

Coboty – zagadnienia bezpieczeństwa przy integracji robotów współpracujących

Mariusz Głowicki

Robotyzacja jako gałąź techniki jest obecna w przemyśle od wielu dziesięcioleci. Korzyści z wykorzystywania robotów przemysłowych do określonych zadań zostały już wielokrotnie wykazane w praktyce. Wraz z coraz to bardziej skomplikowanymi potrzebami produkcyjnymi naturalną potrzebą stała się konieczność współpracy robota z człowiekiem.

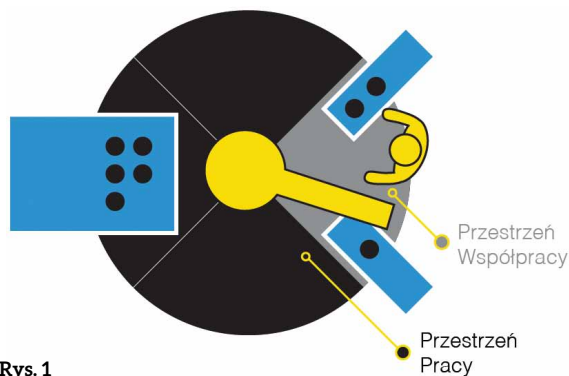
Obecnie wkroczyliśmy już w erę „bezpiecznych – współpracujących robotów”, tzw. „cobotów” (nazwa powstała w wyniku zestawienia słów z języka angielskiego – *collaborative robots*). Niewątpliwie jest to technologia, którą na pewno będzie w dalszym ciągu mocno rozwijania. Ponieważ już teraz większość dostawców „klasycznych robotów” ma w swojej ofercie tego typu rozwiązania, warto na pewno rozważyć ich zastosowanie do rozpatrywanej przez siebie aplikacji. Przykładowo robot YUMI od firmy ABB, czy IIWA od firmy KUKA. Jak przy każdej maszynie, tak samo i przy robotach współpracujących zasadniczym zagadnieniem jest zagwarantowanie możliwości bezpiecznego kooperowania z człowiekiem w środowisku przemysłowym. W dalszej części artykułu przedstawiono kluczowe aspekty, które należy wziąć pod uwagę, tak aby móc bezpiecznie wdrożyć robota współpracującego.

Zagadnienie współpracy człowieka z robotem obecne jest w normach dotyczących bezpieczeństwa od kilkunastu lat. Można powiedzieć, że normy te w chwili wydania, w pewnym stopniu, wyprzedzały stan techniki, co z punktu widzenia normalizacji jest zjawiskiem bardzo rzadkim. Do tej pory daje się to w nich dostrzec, w szczególności w zakresie niektórych rozwiązań proponowanych do redukcji ryzyka dla trybu współpracy człowiek – robot. Mimo to, zakładając dalszy rozwój techniki i wdrażanie zasugerowanych tam rozwiązań, na pewno należy mieć je na uwadze. Podstawowymi z nich są: PN-EN ISO 11161 – Zintegrowane systemy produkcyjne – Wymagania podstawowe; PN-EN ISO 10218-1 – Wymagania bezpieczeństwa dla robotów przemysłowych – Część 1: Roboty; PN-EN ISO 10218-2 – Wymagania bezpieczeństwa dla robotów przemysłowych – Część 2: System robotowy i integracja oraz finalnie najnowszy i najbardziej istotny dokument, zakwalifikowany jako specyfikacja techniczna ISO/TS 15066 – Roboty i urządzenia zrobotyzowane – Roboty współpracujące, będący praktycznym przewodnikiem dla integracji cobotów. Należy podkreślić, że

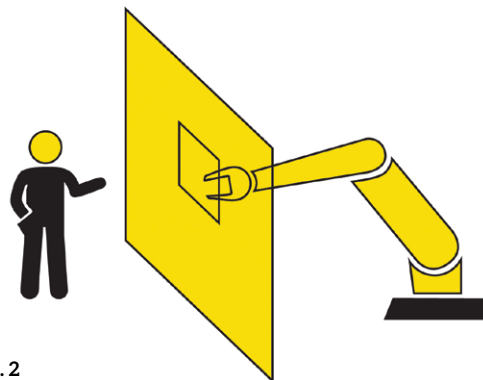
aby móc efektywnie korzystać z ISO/TS 15066, konieczna jest znajomość zagadnień poruszanych w normach z serii PN-EN ISO 10218.

Zgodnie z opisem, przywołanym w PN-EN ISO 10218-2, pkt 3.2, robotem współpracującym nazywamy taki, jaki został zaprojektowany do bezpośredniej interakcji z człowiekiem wewnątrz zdefiniowanej przestrzeni współpracy. Podstawowym kryterium odróżniającym robota współpracującego od klasycznego robota przemysłowego jest rezultat jego konstrukcji. „Bezpieczne” roboty zostały zbudowane w taki sposób, aby możliwe było znaczące ograniczanie mocy i siły jego ruchów. Nie bez znaczenia są tutaj również kształt i materiały wykorzystane do wytworzenia manipulatora. Poprzez tak dobraną konstrukcję, wewnętrznie bezpieczną, osiągalne jest zapewnienie nieurazowych warunków współpracy z człowiekiem w określonych aplikacjach. Roboty takie wydają się być idealnym rozwiązaniem przy wsparciu prac montażowych, transporcie, pakowaniu i paletyzacji relatywnie lekkich elementów czy jako zastępca operatora przy załadunku i rozładunku różnych maszyn produkcyjnych, wykonujących główną część obróbki automatycznie.

Robot współpracujący jest jednym z rodzajów robotów mieszających się w definicji „roboty przemysłowej” przedstawionej w PN-EN ISO 10218-1, pkt 3.10, w ramach której – oprócz klasycznego automatycznie sterowanego, wielozadaniowego manipulatora, programowanego w trzech lub więcej osiach – znajdują się również takie twory, jak ręcznie prowadzone roboty czy części manipulacyjne robotów mobilnych. Przestrzenią współpracy nazywamy część przestrzeni pracy, w której system zrobotyzowany (w tym także przedmiot obrabiany) i człowiek realizują zgodnie zadania produkcyjne. Tak jak pokazano to na rys. 1, przestrzeń współpracy może pokrywać się tylko z fragmentem całkowitej przestrzeni pracy robota, czyli takiej, która jest wykorzystywana podczas wykonywania wszystkich



Rys. 1



Rys. 2

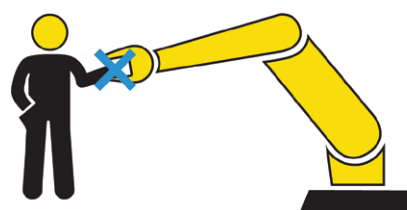
ruchów żądanych przez program zadania. Jest to absolutnie podstawowy fakt, jaki należy wziąć pod uwagę, projektując aplikację z robotem współpracującym. Może się bowiem okazać, że ze względu na zagrożenia i związany z nimi poziom ryzyka konieczne będzie stosowanie odrębnych środków zabezpieczających w przestrzeni współpracy oraz dla pozostałej przestrzeni pracy robota.

Rodzaje współpracy człowiek – robot przedstawione w normach możemy podzielić na cztery podstawowe metody:

- Metoda nr 1 – wykorzystująca funkcję bezpiecznego kontrolowanego zatrzymania, zaimplementowaną w robocie i jego sterowniku.
- Metoda nr 2 – praca z ręcznym prowadzeniem robota.
- Metoda nr 3 – kooperacja przy zachowaniu ograniczonej (kontrolowanej) prędkości i odseparowania.
- Metoda nr 4 – ograniczenie mocy i sił ruchów robota.

Do pierwszych trzech z nich doskonale nadają się również klasyczne roboty przemysłowe. Muszą one być odpowiednio skonstruowane lub wyposażone w zewnętrzną aparaturę. Metoda czwarta to tryb współpracy zakładający wykorzystanie cobotów. Jak widać, pojęcie współpracy człowiek – robot nie ogranicza się jedynie do stosowania robotów współpracujących.

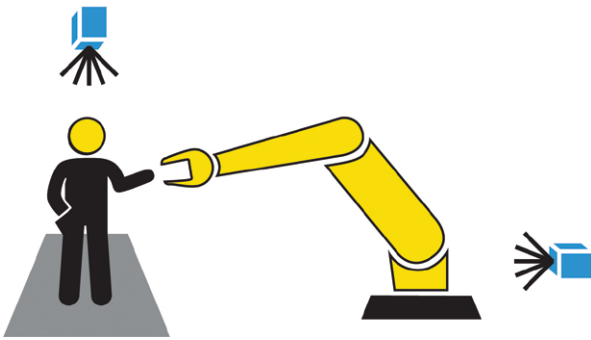
Metoda nr 1 (rys. 2) jest powszechnie stosowana w różnego rodzaju stacjach montażowych, celach spawalniczych lub zgrzewalniczych itp. W takiej aplikacji przestrzeń wokół robota jest wyznaczona i nadzorowana poprzez obwodzące środki ochronne, takie jak różnego rodzaju osłony (np. popularne rolety szybkobieżne) czy aparatura optoelektroniczna. Rola operatora ogranicza się do odbioru poprzedniego i załadunku kolejnego przedmiotu obrabianego do chwytaka robota. W trakcie tego zadania operator przebywa w przestrzeni pracy robota. Jest on najczęściej wykrywany przez środki detekcji. Ich reakcja wymusza wyzwolenie w sterowaniu robota tzw. bezpiecznego kontrolowanego zatrzymania. Jest ono zazwyczaj realizowane w kategorii 2 zatrzymywania wg PN-EN 60204-1 (Bezpieczeństwo maszyn – Wyposażenie elektryczne maszyn – Część 1: Wymagania ogólne) – czyli z kontrolą bezruchu i pozostawieniem zasilania na napędach osi robota (np. w celu zachowania określonych parametrów technologicznych, momentu trzymającego czy pozycji robota). Bezruch jest kontrolowany przez



Rys. 3

dodatkowe elementy w układzie sterowania (np. enkodery, czujniki położenia i ruchu). W przypadku nieoczekiwanego ruchu robota dochodzi do jego detekcji i bezzwłocznego odłączenia zasilania napędów, czyli tzw. kategorii 0 zatrzymywania wg PN-EN 60204-1. Tuż po załadunku operator opuszcza przestrzeń nadzorowaną i wyzwala cykl produkcyjny. Wówczas pomiędzy operatorem a robotem funkcjonuje określony system odgradzający. W przypadku jego naruszenia ruch robota i inne operacje w procesie technologicznym ulegają bezpiecznemu zatrzymaniu, podobnie jak w przypadku wykrycia nieoczekiwanego ruchu robota w trakcie przestoju. Po zakończeniu cyklu produkcyjnego i ustawieniu robota w pozycji do przekazania materiału do odbioru możliwy jest dostęp operatora do przestrzeni współpracy w celu ponownego przeładunku przedmiotów obrabianych, w trakcie którego ponownie monitorowany jest bezruch robota w kategorii 2 zatrzymywania wg PN-EN 60204-1.

Metoda nr 2 (rys. 3) zakłada wykorzystanie robota jako urządzenia wspomagającego, automatyzującego procesy montażowe czy poprawiającego ergonomię pracy. Klasyczny przykład to wsparcie przy instalacji foteli w autach na liniach produkcyjnych, gdzie robot znakomicie odciąża montażystę. W tym trybie pracy ruch robota odbywa się na wyraźne żądanie obsługującego. Sterowanie robotem jest realizowane za pomocą obydwu rąk z wykorzystaniem urządzeń zezwalających, z funkcją podtrzymywania, zabudowanych w oprzyrządowaniu technologicznym. W zależności od pozostałych zagrożeń i w konsekwencji od wyboru urządzenia zezwalającego praca z robotem będzie możliwa tylko przy aktywacji przycisków dwustanowych lub tylko przy aktywacji przycisków trójstanowych – w pozycji

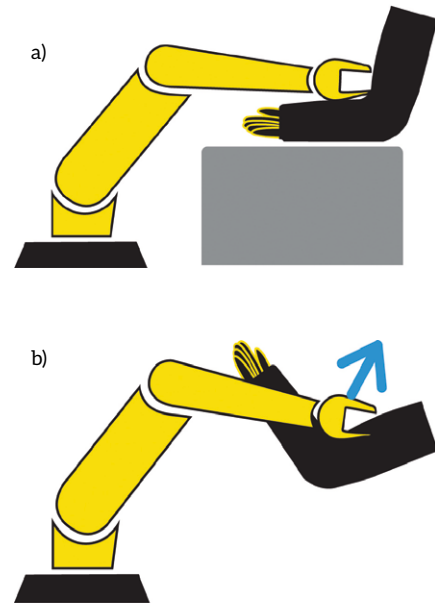


Rys. 4

środkowej aktywowanej z odpowiednią siłą. W trakcie ruchu robota jego prędkość jest ograniczona do wartości bezpiecznej, wynikającej z oceny ryzyka. W przypadku przekroczenia wartości granicznej ruchu robota ulegają zatrzymaniu. Konieczne jest więc stosowanie tutaj funkcji bezpieczeństwa dla napędów opisanych szerzej w normie PN-EN 61800-5-2 (Elektryczne układy napędowe mocy o regulowanej prędkości – Część 5-2: Wymagania dotyczące bezpieczeństwa – Funkcjonalne).

Metoda nr 3 (rys. 4) zakłada doposażenie robota lub aplikacji w aparaturę wykrywającą człowieka w pełnej przestrzeni, wykraczającej poza maksymalną przestrzeń nakreśloną z możliwości ruchu robota. W przypadku detekcji zbliżania się człowieka do obszaru pracy robota robot spowalnia swoje ruchy do prędkości bezpiecznych, wynikających z oceny ryzyka. Wartości prędkości są ograniczone i monitorowane w trakcie całego czasu, gdy ustalony obszar jest naruszony. Dodatkowo robot utrzymuje odległość separacji pomiędzy swoimi elementami a wykrytym w strefie człowiekiem. Odległość separacji jest uzależniona od aktualnej prędkości robota i zdolności człowieka do pokonania tej odległości w czasie. Gdy jest to konieczne dla kontynuacji procesu, robot odpowiednio modyfikuje trajektorię ruchu, zachowując przy tym odległość separacji. Kiedy odległość separacji nie może być dłużej zachowana, wówczas robot przechodzi w bezpieczne kontrolowane zatrzymanie (podobnie jak opisano to w metodzie 1). Jest to metoda pracy stosowana najrzadziej ze względu na nadal istniejące ograniczenia w zakresie rozwiązań bezpieczeństwa. Oczywiście częściowo taka współpraca może być zapewniona z wykorzystaniem już istniejących rozwiązań optycznych w dziedzinie bezpieczeństwa maszyn. Natomiast docelowo niezbędne jest tu rozwiązanie, które będzie dynamicznie reagować na ruchy człowieka w przestrzeni pracy robota i jej sąsiedztwie.

Metoda 4 w praktycznym ujęciu narzuca konieczność wykorzystania cobotów. Dzięki specjalnie zaprojektowanym robotom w wyniku ich kontaktu z ciałem człowieka (lub inną przeszkodą) dochodzi do zatrzymania ruchu bądź wycofania ramienia. To samo wymaganie dotyczy również wyposażenia technologicznego i przedmiotu obrabianego. Z punktu widzenia bezpieczeństwa kluczowe jest tutaj ograniczenie parametrów ruchu do wartości progowych przyjętych na etapie oceny ryzyka.



Rys. 5

Specyfikacja techniczna ISO/TS 15066 wprowadza dwa istotne pojęcia: kontakt „krępujący” (termin angielski: *quasi-static contact*) oraz „przejściowy – uderzenie” (termin angielski: *transient contact*). Oba odnoszą się do interakcji pomiędzy operatorem a częścią systemu zrobotyzowanego. Pierwszy z nich (rys. 5 a) to taki, w wyniku którego część ciała operatora może zostać zaciśnięta pomiędzy częścią ruchomą a innym elementem stałym lub ruchomym celi. W drugim przypadku (rys. 5 b) część ciała operatora nie ulega zaciśnięciu, a ulega odrzuceniu lub operator może ją wycofać spod elementu ruchomego systemu zrobotyzowanego.

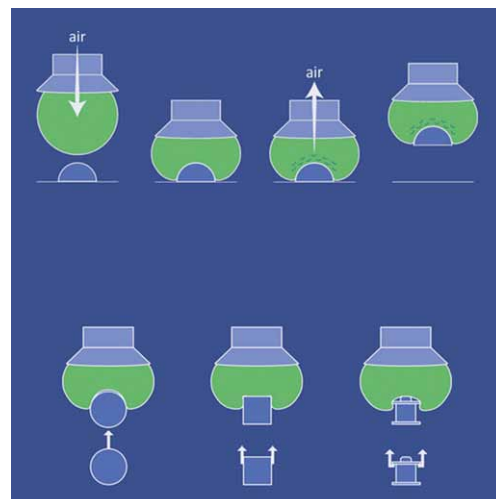
Na potrzeby opracowania przewodnika przeprowadzono badania wrażliwości części ciała człowieka na ból w przypadku obydwu rodzajów kontaktu. Testom poddano dwadzieścia dziewięć ściśle określonych punktów na ciele człowieka (m.in. skroń, mostek, opuszkę palca wskazującego). Za wartości progowe ustalono te odnotowane dla siedemdziesiątego piątego procentu badanej populacji, do której należało łącznie sto dorosłych osób. Wartości progowe nacisków powierzchniowych i sił dla kontaktu „przejściowego – uderzenia” przyjmują dwukrotnie większe wartości niż te ustalone dla kontaktu „krępującego”. Wynika to głównie z założenia, że kontakt przejściowy jest ograniczony w czasie maksymalnie do 0,5 s, po którym ustaje. W takim okresie człowiek jest w stanie wytrzymać działanie większych sił. W załączniku A do ISO/TS 15066 zaprezentowano wyznaczone wartości. Warto dodać, że powinny mieć one charakter orientacyjny. Obarczono je komentarzem o zastąpieniu ich w przyszłości wartościami wynikającymi z bardziej specyficznych badań nad robotami współpracującymi.

Parametry, na które ma wpływ integrator robota współpracującego, to najczęściej prędkość i moment obrotowy. Dzięki wzorom przedstawionym w A do ISO/TS 15066 możliwe jest określenie, jakimi wartościami tych parametrów ruchu powinien cechować się robot w różnych częściach przestrzeni tak,

aby nie przekraczać wartości progowych nacisków powierzchniowych i sił dla obydwu typów kontaktu. Należy podkreślić, że przed nastawami konieczne jest świadome określenie na etapie projektu i oceny ryzyka, w jakich obszarach możliwe są interakcje części ciała z poruszającym się ramieniem robota (w tym z oprzyrządowaniem technologicznym i przedmiotem obrabianym). Drugim kluczowym aspektem będzie rozróżnienie typu potencjalnego kontaktu. Tak jak opisano powyżej, istnieją różne wartości progowe dla każdego z nich. W celu weryfikacji, czy w danym miejscu może dojść do „skrępowania” danej części ciała, należy wspierać się dwoma normami PN-EN ISO 13857 (Odległości bezpieczeństwa uniemożliwiające sięganie kończynami górnymi i dolnymi do stref niebezpiecznych) – na potrzeby określenia możliwości sięgnięcia daną częścią ciała w określony obszar w maszynie/aplikacji oraz PN-EN 349 (Minimalne odstępstwa zapobiegające zgniecieniu części ciała człowieka) – faktyczne stwierdzenie występowania w danym miejscu pomiędzy elementem ruchomym a innym elementem ruchomym lub stałym strefy zgniotu. Kolejnym istotnym czynnikiem będą kształty i powierzchnie poddane potencjalnemu kontaktowi, a w konsekwencji decyzja, czy należy utrzymać progową wartość nacisku powierzchniowego czy siły. Prosty przykład obrazujący ten problem jest sytuacja, w której w pierwszym przypadku z określoną siłą na dłoń oddziałuje szpikuliec, a w drugim płaska powierzchnia elementu chwytaka robota. W obu przypadkach graniczne wartości sił będą zupełnie różne.

Z punktu widzenia wymagań formalnych przy budowaniu stanowiska wyposażonego w robota współpracującego warto zweryfikować, jak zakwalifikowany przed producenta jest robot współpracujący. W większości przypadków producenci wprowadzają na rynek roboty współpracujące jako „maszyny nieukończone” w myśl Dyrektywy Maszynowej 2006/42/WE. Maszynę nieukończoną od maszyny kompletnej odróżnia kryterium konkretnego zastosowania, którego w myśl definicji ta pierwsza po prostu nie ma. Zgodnie z zapisami dyrektywy, jedynym przeznaczeniem maszyny nieukończonej jest jej wbudowanie do innej maszyny kompletnej lub połączenie z inną maszyną nieukończoną, tak aby stworzyły one łącznie maszynę kompletną. Atrybutem maszyny nieukończonej jest Deklaracja włączenia dla maszyny nieukończonej, natomiast dla maszyny kompletnej mówimy o Deklaracji zgodności WE. Co więcej, maszyny nieukończone nie powinny być oznakowane znakiem CE przez wgląd na dyrektywę 2006/42/WE (uwaga: w niektórych przypadkach mogą one posiadać takie oznakowanie, ale wynika ono tylko i wyłącznie ze względu na zgodność z innymi dyrektywami). Takie oznakowanie może być umieszczone tylko na maszynie kompletnej. Podsumowując, przy integracji robota współpracującego konieczne będzie zachowanie procedury wprowadzenia maszyny do obrotu lub oddania do użytku. Kluczowym krokiem tego procesu jest fachowo przeprowadzona ocena ryzyka. Dopiero bezpieczna maszyna lub aplikacja może być oznakowana znakiem CE i dla takiej poprawne jest wystawienie Deklaracji zgodności WE.

W ISO/TS 15066 podkreślono istotną rolę przyszłego użytkownika aplikacji wyposażonej w robota współpracującego. Zgodnie z pkt. 4.3.1 powinien on uczestniczyć w ocenie ryzyka



Rys. 6

i projektowaniu stacji. Natomiast to integrator jest odpowiedzialny za koordynację udziału użytkownika i za wybór odpowiedniego systemu zrobotyzowanego, bazując na wymaganiach tejże aplikacji. W samym przeprowadzeniu procesu oceny ryzyka warto wspierać się wytycznymi normy PN-EN ISO 12100 (Ogólne zasady projektowania – Ocena ryzyka i zmniejszenie ryzyka). W przypadku ograniczeń czasowych lub braku dostatecznego doświadczenia warto rozważyć uwzględnienie zewnętrznych konsultantów w procesie projektowania i oceny.

Jeżeli w trakcie procesu oceny ryzyka zidentyfikowano jego nieakceptowalne wartości, konieczne jest podjęcie działań związanych z redukcją ryzyka. Oprócz środków i rozwiązań bezpieczeństwa związanych z samym robotem współpracującym, wymienionych przy opisie metod współpracy człowiek – robot (w szczególności, ale nie jedynie Metody nr 4), dodatkowo dalszą redukcję można osiągnąć przez: stosowanie tzw. bezpiecznych narzędzi (rys. 6), rozwiązania związane z absorpcją energii – np. odpowiednie obicie elementów robota, amortyzowanie, stosowanie podatnych połączeń, rozwiązania związane ze zwiększeniem powierzchni kontaktu – np. zaokrąglone naroża i krawędzie, gładkie powierzchnie czy inne, jak ograniczenie przenoszonych mas. Jeżeli wyczerpane zostały wszelkie powyższe rozwiązania, niezbędne będzie zastosowanie klasycznych środków redukcji ryzyka znanych z innych rodzajów maszyn i aplikacji, takich jak osłony czy inne urządzenia ochronne.

Podsumowując: aby bezpiecznie wdrożyć robota współpracującego, należy przede wszystkim zadbać o dobrą współpracę na linii integrator – użytkownik. Najistotniejszym etapem tej współpracy jest faza projektowania i oceny ryzyka, do której aktywnie powinien być włączony użytkownik. Przy doborze rozwiązań redukujących ryzyko warto wspierać się normami zharmonizowanymi z Dyrektywą Maszynową 2006/42/WE oraz dedykowaną dla tego typu robotów specyfikacją techniczną ISO/TS 15066. ■