

# Studium rozwiązań konstrukcyjnych nowej generacji zewnętrznych osi robotów przemysłowych

Study on construction of a new generation of industrial robot external axes

## Streszczenie

Robotyzacja obsługi maszyn i wyrobów średnio-gabarytowych powodować może szereg problemów, m.in. związanych z ograniczonym zasięgiem ramienia robota czy powierzchnią montażową stanowiska. Przykładem może być spawane obiektów przestrzennych czy obsługa pras krawędziowych. Rozwiązaniem może być zastosowanie odpowiednich manipulatorów – zewnętrznych osi robotów, wspomagających dostęp robota do miejsc obróbki, jego zasięg i lokomocję. W artykule przedstawiono efekty rozpoczętych prac badawczo-rozwojowych związanych z budową i wdrożeniem w PPU „ZAP Robotyka” w Ostrowie Wielkopolskim trzech nowych typów maszyn. Przedstawione informacje odnoszą się wprost do wyników projektu nr POIR.01.01.01-00-0271/16, realizowanego w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020 NCBiR.

**Słowa kluczowe:** pozycjoner; manipulator; robot przemysłowy; zewnętrzna oś robota

## Abstract

The robotization of machinery operation and medium-sized products manufacturing can cause a number of problems resulted among others from limited range of the robot arm working space or entire area of the robot station. As examples may be shown a welding of spatial objects or the use of press brakes. The solution may be the application of appropriate manipulators as an external axis of the robots, that assist the robot to access to all the parts of the workpiece, increase its range and improve its locomotion. The article presents the results of the research and development work related to the construction and implementation of three new types of machines in the “ZAP Robotyka” plant in Ostrów Wielkopolski. The information presented here is directly related to the results of Project POIR.01.01.01-00-0271/16 within the framework of the Operational Program Intelligent Development 2014-2020 NCBiR.

**Keywords:** positioner; manipulator; industrial robot; external robot axis

## Wprowadzenie

W przypadku robotyzacji takich procesów, jak np. spawanie łukowe czy obsługa maszyn, zachodzić może potrzeba realizacja takich procesów lub czynności jak spawanie, podawanie czy transportowanie w zakresie przekraczającym zasięg i przestrzeń roboczą robotów przemysłowych dedykowanych do tych zadań. Przyjęty na użytek artykułu (i projektu) termin „obiekty średnio-gabarytowe” ma oczywiście charakter umowny i odnosi się do tych wyrobów produkowanych na stanowiskach zrobotyzowanych, których rozmiar przynajmniej w jednym kierunku przekracza 1 m i nie jest większy niż kilka metrów. Ze wzrostem rozmiaru może pojawić się problem z dostępem do miejsc obróbki, w tym zapewnieniem wymaganej orientacji przestrzennej narzędzia (spawanie, obróbki wykańczające, cięcie termiczne itp.). Przykładem takich obiektów mogą być rozległe arkusze blachy (obsługa pras krawędziowych i tłoczonych), przestrzenne ramy, belki, korpusy, obudowy i zbiorniki (robotyzacja spawania) itp.

Wobec przedstawionych problemów, pomijając nieliczne roboty o nieznacznie zwiększonym zasięgu (jak 7-osiowe roboty QIROX<sup>®</sup> firmy CLOOS z wbudowanymi w podstawę wysięgnikami o długości 550 mm czy ARC Mate 100iC/8L firmy Fanuc o zasięgu wydłużonym z średnio 1400÷1600 do 2028 mm), użycie znacznie większego robota nie jest działaniem racjonalnym. Ze wzrostem rozmiaru (zasięgu) zwiększy się nośność (ponad potrzeby), masa i cena robota. Zwykle inna też będzie dedykacja robota i wspomagające ją oprogramowanie systemowe.

Przy konieczności istotnego zwiększenia zasięgu robota i/lub zdolności do docierania do trudnodostępnych miejsc obróbki, np. spawania na powierzchni konstrukcji o znacznych rozmiarach, konieczne staje się użycie dodatkowych manipulatorów – zewnętrznych osi robota, np. pod postacią torów jezdnych oraz wieloosiowych pozycjonerów o specjalnej konstrukcji [1,4,5,7,8].

**Dr inż. Paweł Cegielski; dr hab. inż. Dariusz Golański, prof. PW; dr inż. Paweł Kołodziejczak; prof. dr hab. inż. Andrzej Kolasa** – Politechnika Warszawska, **dr inż. Tadeusz Sarnowski** – ZAP Robotyka Ostrów Wlkp.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: [pcegiels@wip.pw.edu.pl](mailto:pcegiels@wip.pw.edu.pl)

Od manipulatorów – zewnętrznych osi robotów przemysłowych oczekuje się wysokiej dokładności i obciążalności, zdolności do pracy w pełni zsynchronizowanej z ruchami robota, a pożądane właściwości użytkowe osiągane są m.in. dzięki odpowiedniej strukturze kinematycznej oraz właściwościom układów napędowych i sterowania. Obecnie napędy manipulatorów realizowane są niemal wyłącznie jako elektryczne, wypierając mocne, ale kłopotliwe eksploatacyjnie układy hydrauliczne oraz ograniczone funkcjonalnie napędy pneumatyczne (te ostatnie nadal są stosowane w prostszych manipulatorach lub mniej wymagających zespołach ich ruchu). Serwonapędy elektryczne sterowane w sposób ciągły mogą umożliwić pełną synchronizację manipulatora z ruchami robota.

Znacznym utrudnieniem jest brak jakiegokolwiek unifikacji serwonapędów elektrycznych, w tym kodów sterujących, pomiędzy producentami robotów – każda zewnętrzna oś zdolna do pełnej synchronizacji z robotem wymaga zastosowania napędu (silnik, przekładnia, serwo-wzmacniacz, oprogramowanie) dedykowanego przez producenta danego robota. Z tego względu podaż najwyższej jakości zewnętrznych osi jest istotnie ograniczony – oferowane są przez niektórych producentów robotów i wyłącznie do nich dostosowane oraz przez nieliczne firmy niezależne, każdorazowo adaptujące je do napędu właściwego dla danej aplikacji (użytego robota przemysłowego).

W dalszej części artykułu przedstawiono efekty rozpoczętych prac badawczo-rozwojowych związanych z budową i wdrożeniem w PPU „ZAP Robotyka” w Ostrowie Wielkopolskim nowych typów maszyn. Na podstawie przeprowadzonej, wnikliwej analizy rynku, w tym coraz częściej obserwowanej potrzeby zwiększenia zasięgu operowania robota w odniesieniu do konstrukcji średniej wielkości, w zakres projektu włączono opracowanie dwóch typoszeregów pozycjonerów, o konstrukcji typu „L” i „H”, oraz systemu torów jezdnych, zapewniających robotom niezbędną w takich przypadkach lokomocję (tabl. I).

Wszystkie opracowywane manipulatory sterowane będą w sposób ciągły, tj. zbliżony do osi własnych robota i będą z nim współdziałać w oparciu o ten sam program użytkowy. Manipulatory będą konstrukcjami uniwersalnymi, przygotowanymi do instalacji jednostek napędowych dostosowanymi do różnych systemów sterowania. Ponadto, nowe maszyny spełnią najwyższe standardy funkcjonalne, wytrzymałościowe i technologiczne, w tym wymagania norm krajowych i europejskich dyrektyw.

Opracowane manipulatory umożliwią tworzenie nowoczesnych aplikacji z zakresu robotyzacji procesów technologicznych. Pozwolą robotom przemysłowym osiągać niezbędną mobilność, zwłaszcza gdy konieczne jest istotne zwiększenie zasięgu ich pracy i/lub zdolności docierania do trudno dostępnych miejsc obróbki.

**Tablica I.** Zestawienie parametrów użytkowych manipulatorów przyjętych dla projektu  
**Table I.** Technical data of manipulators designed in the project

Funkcja lub parametr	Rodzina pozycjonerów typu „L”		Rodzina pozycjonerów typu „H”		System modułowy torów jezdnych
	rozmiar 1	Rozmiar 2	rozmiar 1	Rozmiar 2	
Konstrukcja	monolityczna		przegubowa lub modułowa		modułowa
Liczba stanowisk / platform jezdnych	1 lub 2		2		1 lub 2
Napęd	elektryczny (dostosowany do różnych systemów sterowania)				
Łączna liczba sterowanych osi	2/5 (jedno/dwu – stanowiskowy)		3		1
Obrót stołu roboczego / sterowanie	n x 360°/ciągłe		n x 360°/ciągłe		–
Obrót ramienia „L” / sterowanie	n x 360°/ciągłe		–		–
Obrót zmiany stanowisk/ sterowanie	2 x 180°/dyskretne		2 x 180°/dyskretne		–
Przejazd platformy robota/ sterowanie	–	–	–	–	liniowy/ciągłe
Długość toru jezdneho [m]	–	–	–	–	2,5 i 5,0 (moduły)
Nośność [kg]	250	500	300	1000	250 i 500 (moduły)
Powtarzalność pozycjonowania [mm]	nie gorsza niż ±0,1				
Maks. prąd spaw. [A]	nie mniej niż 500A				
Maksymalna przestrzeń robocza [m]	1,5 x 1,5 x 1,5	2,0 x 2,0 x 2,0	1,5 x 4,0 (średnica/długość)	1,5 x 4,0 (średnica/długość)	–
Uniwersalne mocowanie napędu	uniwersalne gniazdo przyłączeniowe, dorabiany kołnierz silnika i przekładni ruchu				
Pozostały osprzęt	–	–	ewentualne moduły zwiększające długość przestrzeni roboczej (o ile nie zostanie wybrana wersja przegubowa)		słupy, platformy jezdne, moduł transportujący osprzęt

Przedstawione informacje odnoszą się wprost do wyników projektu nr POIR.01.01.01-00-0271/16, realizowanego w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020 NCBiR.

## Pozycjonery typu „L”

Pozycjonery to, najogólniej, maszyny manipulujące (ruchy ustawcze i/lub robocze, nawet równocześnie z ruchami robota) zamocowanymi do nich (za pośrednictwem odrębnego oprzyrządowania montażowego) obiektami poddawanych obróbce przez robot, np. spawanymi, malowanymi, montowanymi itp. Umożliwiają pracę/obróbkę w najdogodniejszych pozycjach i/lub dają dostęp do tych miejsc [1,4,5,7,8].

Pozycjonery dwuosiowe (z jednym stołem roboczym) uchodzą za jedne z najbardziej wszechstronnych, zdolne do nadawania przedmiotowi spawanemu ruchu w płaszczyźnie obrotu stołu roboczego oraz ruchu przez przechylenie tego stołu (tabl. II). Tego typu dwuosiowa manipulacja jest typowa m.in. dla pozycjonerów spawalniczych: obrót stołu istotnie ułatwia dochodzenie robota do miejsc znajdujących się poza jego zasięgiem, a jego pochylenie dodatkowo wspomaga spawanie (lub inny proces) w pozycjach najdogodniejszych technologicznie.

Na tle znanych rozwiązań konstrukcyjnych wyróżniają się pozycjonery typu „L” – manipulujące obiektami za pośrednictwem dwóch osi głównych – obrotowego stołu (oś A, tabl. II) i ramienia w kształcie litery „L” (oś B, tabl. II), na którym stół jest zamocowany. Ruchy robocze obracanego i zarazem pochylanego stołu, równoczesne z ruchami robota, pozwalają na ciągłe spawanie lub inną obróbkę wzdłuż nawet bardzo złożonych trajektorii. Odmienność konstrukcji „L” w stosunku do standardowych pozycjonerów dwuosiowych, a zarazem specjalne predyspozycje do manipulacji obiektami przestrzennymi o znacznych rozmiarach, polegają na:

- lepszym usytuowaniu manipulowanego obiektu w stosunku do zasięgu robota;
- w pełni użytecznym, pełnym zakresie pochylenia manipulowanego obiektu (przez obrót ramienia „L” o  $n \times 360^\circ$ ), pozwalającym na ustawieniu obiektu w pozycji całkowicie obróconej;
- naturalnym, lepszym wyważeniu manipulowanego obiektu, m.in. poprzez zbliżenie środka ciężkości obciążenia do osi obrotu ramienia „L” (oś B, tabl. II) i redukcję

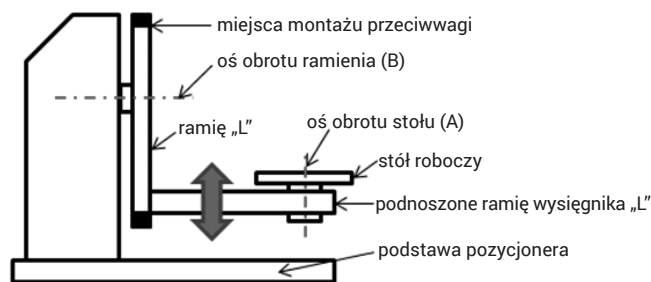
generowanego momentu obrotowego;

- możliwości wyważenia obciążenia poprzez wymienną przeciwwagę (tabl. II);
- możliwości dodania osi Z do podnoszenia i opuszczania ramienia „L” razem z jego osią obrotu; dotyczy głównie maszyn do mechanizacji, a z uwagi na wymóg zapewnienie najwyższej powtarzalności pozycjonowania rozwiązanie to nie jest powszechnie stosowane w pozycjonarach do robotyzacji;
- możliwości budowy wersji dwustanowiskowych.

W tablicy I zebrano główne parametry i funkcje użytkowe dla opracowywanego typoszeregu pozycjonerów typu „L”. Przyjęto m.in. dwa zakresy nośności: 250 i 500 kg. Wyważenie załadunku nowego pozycjonera realizowane będzie dwutorowo (rys. 1):

- poprzez przesuwanie (ręczne przestawianie) poziomej belki ramienia „L”,
- przez regulowaną (dokładaną) przeciwwagę.

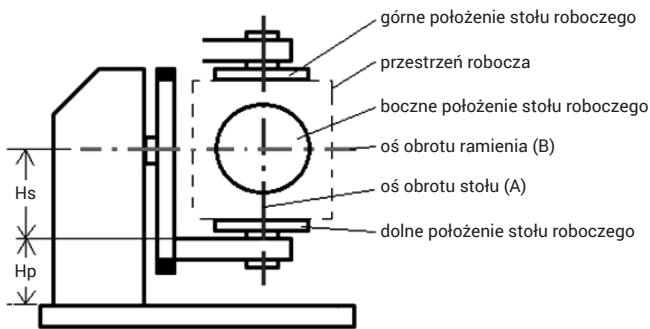
Dla opracowywanej konstrukcji przyjęto innowacyjną, praktycznie nieobserwowaną w rozwiązaniach robotowych innych producentów możliwość przesuwania poziomej belki ramienia „L”. Przyczyni się to do lepszego dopasowywania położenia środka ciężkości obciążenia względem osi obrotu ramienia „L” i minimalizacji niekorzystnego mimośrod (momentów obciążających napędy i przekładnie) oraz dopasowania położenia obracanych przedmiotów do potrzeb i możliwości użytego robota (rys. 1). Zmiana wysokości zamocowania belki w zakresie od maksymalnego odsunięcia (przyjętego dla danego rozmiaru pozycjonera) do zrównania środka belki z osią obrotu ramienia. W skrajnym przypadku pozycjoner „L” zamieni się w klasyczny pozycjoner dwuosiowy z obracanim ramieniem (tabl. I, pozycja skrajna prawa).



Rys. 1. Idea konstrukcyjna pozycjonera jednostanowiskowego typu „L”  
Fig. 1. The construction concept of a single-position type-L positioner

Tablica II. Porównanie głównych cech użytkowych pozycjonerów dwuosiowych  
Table II. Comparison of the main features of two-axis positioners

	Pozycjoner typu „L”	Dwuosiowe pozycjonery konwencjonalne		
Szkic z zaznaczeniem położenia osi obrotu				
Zakres osi A		$n \times 360^\circ$		
Zakres osi B	$n \times 360^\circ$	$0 \div 135^\circ$ (typowo)	$-90 \div 90^\circ$	$n \times 360^\circ$
Możliwość wyważenia załadunku	TAK – przeciwwaga (szkic)	NIE		
Położenie obiektu po obrocie B	komfortowe – zawsze w zasięgu robota	niekorzystne – zbyt blisko (kolizyjnie) podłogi		



Rys. 2. Obszar maksymalnej przestrzeni roboczej pozycjonera „L”  
Fig. 2. The maximum workspace of a type-L positioner

Dla pozycjonerów „L” maksymalna przestrzeń robocza oznacza obszar omiatany zarówno przez stół roboczy, jak i przez obiekt manipulacji. Przyjęto, że przyjmie ona formę sześcianu, nieruchomo usytuowanego przed korpusem pozycjonera i postawionego na powierzchni stołu roboczego znajdującego się w dolnym, najniższym położeniu, wewnątrz którego może znaleźć się manipulowany obiekt (rys. 2). Przyjęto także, że niezależnie od wysokości zamocowania poziomej belki ramienia „L” (rys. 1), możliwy będzie swobodny obrót obydwu osi manipulacji niezaladowanego pozycjonera. W projekcie przyjęto dwa rozmiary przestrzeni roboczej: 1,5 x 1,5 x 1,5 m (dla nośności 250 kg) i 2,0 x 2,0 x 2,0 m (dla 500 kg). Należy jednak zauważyć, że maksymalny rozmiar manipulowanego obiektu dla tego typu pozycjonera będzie silnie uzależniony od chwilowego położenia jego osi manipulacji, i tak:

- niezależnie od położenia ramienia „L”, swobodny obrót stołu roboczego możliwy będzie obiektem w kształcie walca o maksymalnej średnicy 1,5 lub 2,0, odpowiednio do obydwu rozmiarów pozycjonera;
- w zależności od przyjętej, konstrukcyjnej wysokości osi obrotu ramienia „L” ( $H_p + H_s$  na rys. 2) oraz ustawionego dla danego zastosowania odsunięcia  $H_s$  (w celu wyważenia obciążenia i/lub zapewnienia lepszej dostępności dla robota), maksymalna wysokość swobodnie obracanego obiektu walcowego ramieniem „L” będzie równa bądź mniejsza od określonej maksymalną przestrzenią roboczą: 1,5 i 2,0 m, odpowiednio do obydwu rozmiarów pozycjonera (rys. 3).

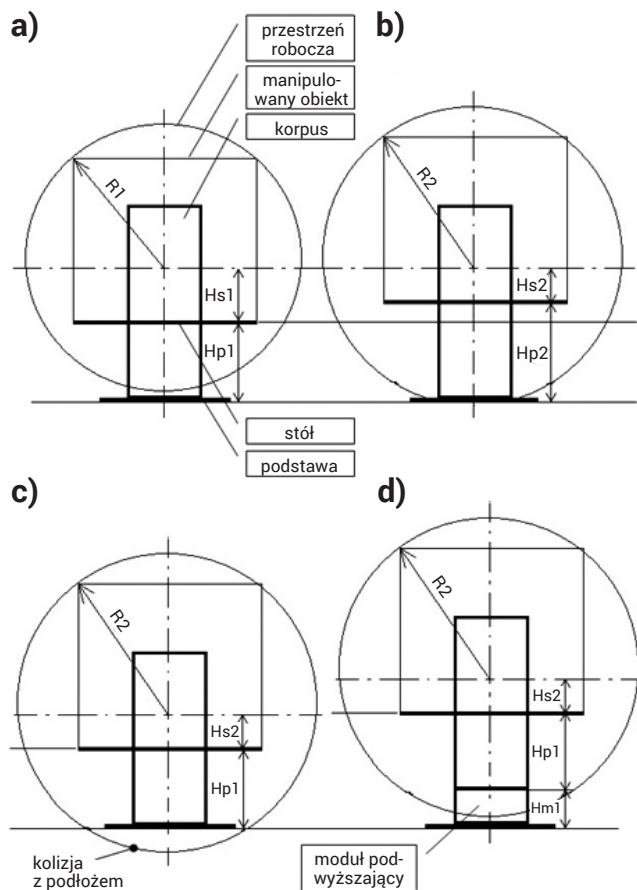
Na rysunku 3 przedstawiono analizę zdolności manipulacji ramieniem „L” obiektu o takich samych wymiarach, w zależności od wysokości osi obrotu ramienia „L” ( $H_p + H_s$ ) oraz ustawionego dla danego zastosowania odsunięcia  $H_s$ , gdzie:  $R$  – promień przestrzeni roboczej ( $R_1 < R_2$ ),  $H_s$  – odległość powierzchni stołu roboczego od osi obrotu ramienia „L” (mimośród ramienia „L”, gdzie  $H_{s1} > H_{s2}$ ),  $H_p$  – odległość powierzchni stołu roboczego od podstawy ( $H_{p1} < H_{p2}$ ),  $H_{m1}$  – wysokość modułu podwyższającego.

Na podstawie rysunku 3 można przeprowadzić krótką analizę problemów konstrukcyjnych pozycjonera typu „L”:

- dogodna wysokość załadunkowa  $H_{p1}$  może powodować zbyt duże odsunięcie stołu od osi obrotu ramienia „L”  $H_{s1}$  (wysoki moment obciążający napęd i przekładnię),
- zmniejszone odsunięcie stołu od osi obrotu do  $H_{s2} < H_{s1}$  (mniejszy moment obciążający napęd i przekładnię) skutkuje znacznie większym promieniem przestrzeni roboczej  $R_2 > R_1$  i wymusza nieergonomiczne podwyższenie korpusu do  $H_{p2} > H_{p1}$ .

W ramach projektu analizowane są następujące rozwiązania:

- obniżenie podstawy korpusu do wysokości ergonomicznej obsługi  $H_{p1}$ , co skutkuje niepełnym zakresem obrotu ramienia „L” i kolizją manipulowanego obiektu z podłożem,



Rys. 3. Analiza zdolności manipulacji ramieniem „L” obiektu o takich samych wymiarach w zależności od wysokości osi obrotu ramienia „L”

Fig. 3. Analysis of the „L” arm manipulation of an object with the same dimensions depending on the axis of rotation height of the „L” arm

- na potrzeby pełnego zakresu obrotu ramienia „L” można zastosować moduł podwyższający korpus, a z uwagi na znaczny wzrost wysokości załadunkowej do poziomu  $H_{p1} + H_{m1}$  można:

- założyć, że zmechanizowany załadunek z użyciem np. suwnicy będzie utrudniony, ale możliwy,
- demontować moduł podwyższający, gdy nie będzie konieczny pełen obrót ramienia „L”,
- zastosować dosuwany podest obsługowy,
- dopuścić wariant z opuszczaniem ramienia „L” razem z osią obrotu,
- dla konstrukcji dwustanowiskowych, po stronie operatora na stałe może być zainstalowany podest (nawet rozległy).

## Pozycjonery typu „H”

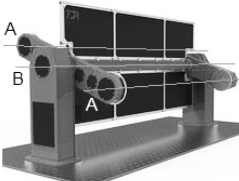
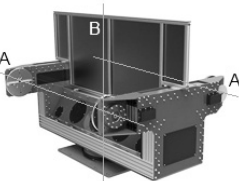
Dwustanowiskowe, symetryczne pozycjonery typu „H” to maszyny o trzech równoległych, poziomych osiach obrotowych – dwóch ustawionych w układzie wrzecionowym i zakończonych stołami roboczymi oraz dodatkowej, do zmiany stanowisk w zakresie połowy obrotu  $2 \times 180^\circ$ . (tabl. III, rys. 4 i 5). Po jednej stronie odbywa się praca robota, a w tym samym czasie druga podlega obsłudze załadunkowej – wyładunkowej [1,4].

Układ wrzecionowy jest typowy do spawania, montażu itp. przedmiotów o znacznych rozmiarach (długich), których środek ciężkości jest znacznie oddalony od powierzchni stołów montażowych. Nie muszą to być obiekty walcowe – pozostałe mogą być mocowane za pośrednictwem pośredniczących ram nośnych. W przypadku manipulowanych



Tablica III. Zestawienie głównych cech użytkowych pozycjonerów typu „H”

Table III. Summary of the main features of type-H positioners

	pozioma oś zmiany stanowisk	pionowa oś zmiany stanowisk
Szkic z zaznaczeniem położenia osi obrotu		
Zakres osi A	$n \times 360^\circ$	
Zakres osi B	$2 \times 180^\circ$	
Zajętość przestrzeni	tylko rozmiarem pozycjonera	rozmiar pozycjonera + obrót
Położenie obiektu po obrocie B	regulowana wysokość	stała wysokość

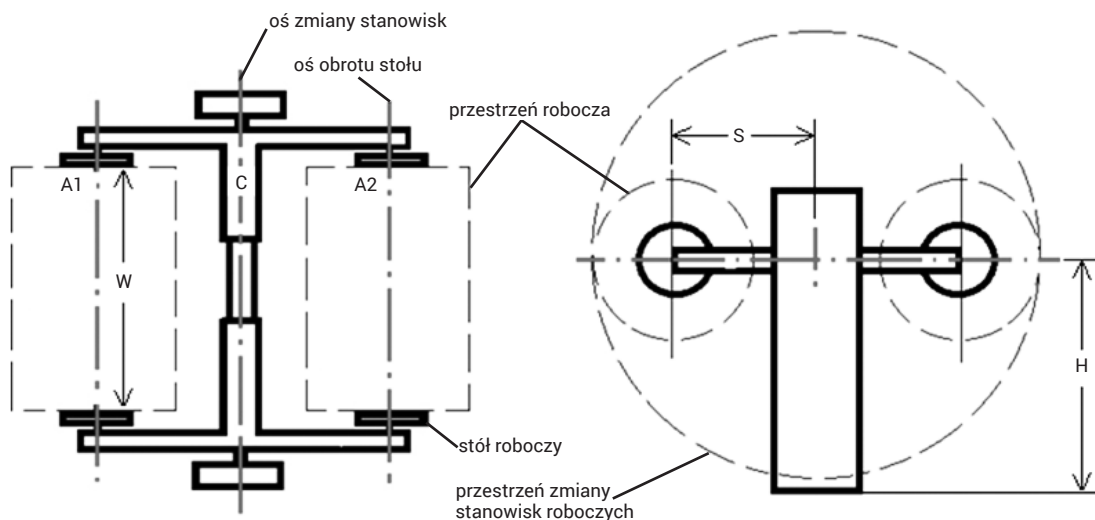
konstrukcji bardzo długich, wykraczających rozmiarem poza zasięg pojedynczego robota, możliwe jest zsynchronizowanie pozycjonera z dwoma robotami pracującymi równocześnie lub z robotem posadowionym na liniowym torze jezdny. Obrót stołów roboczych wspomaga dochodzenie do trudnodostępnych, oddalonych miejsc obróbki, a jego

synchronizacja z ruchami robota pozwala na ciągłą obróbkę, np. spawanie, wzdłuż złożonych trajektorii. Typowo, obydwa stanowiska robocze (wrzeczona) rozdzielone są sztywną przegrodą, konieczna z uwagi na zapewnienie bezpieczeństwa obsługi i osób postronnych.

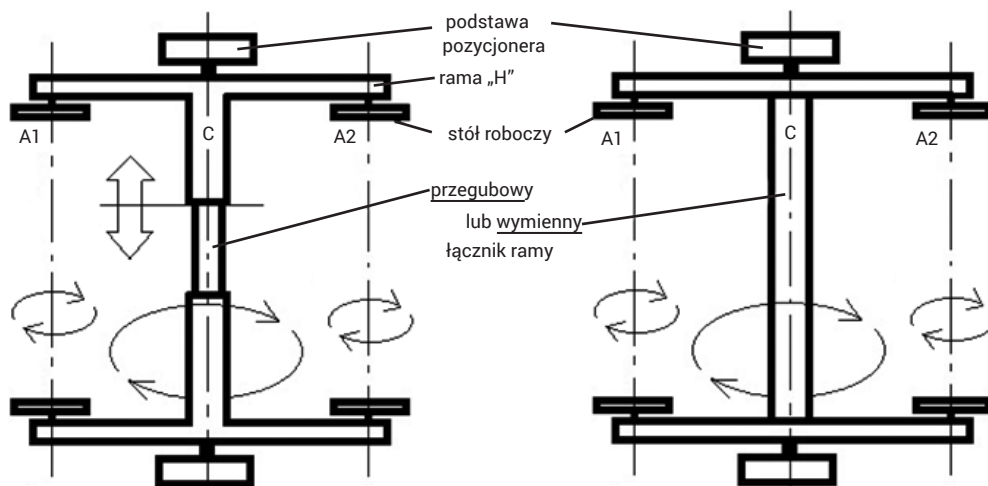
Istnieją dwie odmiany funkcjonalne pozycjonerów typu „H”: – z pionową osią zmiany stanowisk roboczych i będąca przedmiotem opracowania, rzadziej spotykana wersja z poziomą osią zmiany stanowisk roboczych, równoległą do dwóch pozostałych. Drugie rozwiązanie daje szereg korzyści (tabl. III, rys. 4 i 5):

- lepsze usytuowanie obiektu w stosunku do zasięgu ramienia robota, uzyskane dzięki skośnej (a rzadziej regulowanej) pozycji spoczynkowej belki ze stołami roboczymi (tabl. III),
- nie jest wymagana dodatkowa przestrzeń na operację zmiany stanowisk roboczych (rys. 4),
- pozycja montażowa robota i pozostałego osprzętu stanowiska nie jest kolizyjna z operacją zmiany stanowisk roboczych.

W tabelicy I zebrano główne parametry i funkcje użytkowe dla opracowywanego typoszeregu pozycjonerów typu „H”. Przyjęto m.in. dwa zakresy nośności: 300 i 1000 kg, (dwie jednostki podstawowe). Najlepsze usytuowanie obiektu w stosunku do zasięgu ramienia robota uzyskane będzie dzięki innowacyjnej, regulowanej pozycji spoczynkowej obrotowej belki ze stołami roboczymi (skokowo). Maksymalne gabaryty manipulowanych obiektów muszą się zawierać w obrębie przyjętej, maksymalnej przestrzeni roboczej, zdefiniowanej na 1,5 x 4,0 m (średnica/długość), jednakowo dla obydwu maszyn – 300 i 1000 kg (rys. 4).



Rys. 4. Obszar maksymalnej przestrzeni roboczej pozycjonera „H”  
Fig. 4. The maximum work space of a type-H positioner



Rys. 5. Idea zastosowania przegubu lub wymiennego łącznika do zmiany długości przestrzeni roboczej  
Fig. 5. The idea of an application of a joint or replaceable fastener to change the length of the work space

## Tory jezdne

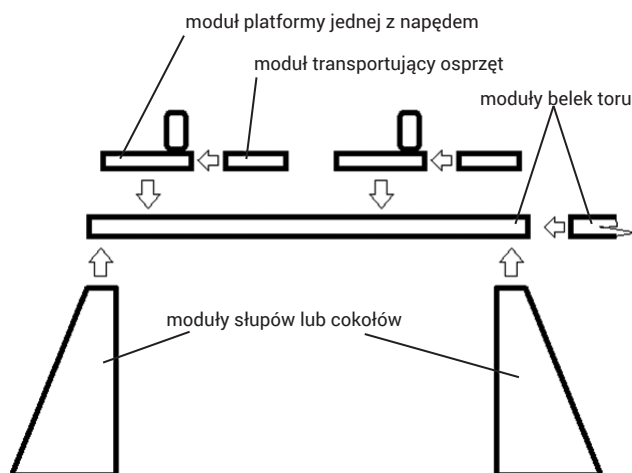
Tory jezdne to liniowe maszyny manipulacyjne zapewniające lokomocję robotów zamocowanych do ruchomej platformy jezdnej (ruchy ustawcze i/lub robocze, nawet równocześnie z ruchami robota), jako zewnętrzne osie robota [1,4]. Lokomocja dotyczy może zarówno nieruchomo stojących robotów, jak i dynamicznie poruszających się w trakcie jazdy na torze. Wśród głównych parametrów i właściwości użytkowych torów wymienić należy:

- konfiguracja montażowa toru – podłogowa lub bramowa (dla krótszych torów także wysięgnikowa);
- pozycja montażowa robota – stojąca dla podłogowych oraz naścienna i podwieszana dla bramowych (wysięgnikowych);
- efektywny zasięg toru;
- powtarzalność pozycjonowania;
- nośność adekwatna do ciężaru i nośności robota oraz realizowanego zadania;
- budowa monolityczna lub modułowa.

Tory jezdne są niezbędnym wyposażeniem robota, którego zasięg (przeźródź robocza) nie jest wystarczający do realizacji zadania produkcyjnego. Możliwe są przy tym dwa główne warianty funkcjonalne: robot jest przestawiany (ruchem ustawczym toru) do nowej pozycji, lub manipuluje równocześnie z ruchem na torze (ruch ustawczy toru), w wyniku czego jego przestrzeń robocza ulega faktycznemu powiększeniu. Dzięki temu możliwe staje się operowanie wobec obiektów o znacznych rozmiarach i znajduje zastosowanie np. podczas spawania łukowego, cięcia termicznego czy obsługi pras krawędziowych.

W nowoczesnych rozwiązaniach torów jezdnych przekazywanie napędu następuje pomiędzy kołem zębatym silnika umieszczonego na platformie jezdnej robota a zębatką rozłożoną wzdłuż belki toru. W przeciwieństwie do stosowanych wcześniej przekładni śrubowo-toczących, mniej popularnych przekładni pasowych oraz napędów pneumatycznych, rozwiązanie to daje swobodę w wydłużaniu toru (przez dodawanie kolejnych modułów), a także umożliwia niezależną jazdę więcej niż jednego robota na tym samym torze. Dodatkowo, chociaż rzadziej wykorzystywaną korzyścią z zastosowania przekładni zębatkowej jest możliwość przewożenia manipulowanych obiektów czy osprzętu na przedłużonej lub uzupełnionej o specjalny moduł platformie jezdnej robota.

W tabelicy I zebrano główne parametry i funkcje użytkowe dla opracowywanego systemu torów jezdnych o budowie modułowej. Przyjęto m.in. dwa zakresy nośności: 250 i 500 kg, (dwie jednostki podstawowe). Zasięg (długość) toru zależny będzie od liczby złożonych modułów w układzie



Rys. 6. Główne komponenty systemu modułowego torów jezdnych  
Fig. 6. Main components of the modular system of moving tracks

podłogowym (pozycja stojąca robota) i bramowym (pozycja jazdy naścienna lub odwrócona). Możliwa będzie jazda jednego lub dwóch (niezależnie) robotów na jednym torze. Przewidziano innowacyjny, dołączany do platformy jezdnej moduł transportujący osprzęt technologiczny (np. spawalnicze źródła zasilające łuk, zasobniki drutu elektrodowego, urządzenia do czyszczenia i kalibracji efektora – organu roboczego, zasobniki części do montażu itp.), przyczyniający się do zwiększenia zasięgu lokomocji i efektywności stanowiska. Analizowany jest moduł dołączany do platformy jezdnej robota i jeżdzący po torze lub mocowany poprzecznie do kierunku jazdy.

Sposobem na obniżenie ceny torów i podniesienie ich atrakcyjności użytkowej, a zarazem zwiększenie potencjału produkcyjnego integratora, będzie opracowanie innowacyjnej konstrukcji modułowej. System modułowy torów jezdnych oparty będzie na zunifikowanych komponentach (rys. 6), pozwalających na budowę lub przyszyłą przebudowę w obrębie opracowywanych wariantów, w tym w oparciu o:

- moduły belek toru jezdnych 2,5 i 5,0 m,
- moduły słupów nośnych (końcowych, pośrednich),
- moduły platform jezdnych,
- moduły transportujące osprzęt.

## Studium zależności materiałowych i konstrukcyjnych MES

Końcowym etapem studium projektowego manipulatorów było wyodrębnienie i wstępna weryfikacja głównych komponentów konstrukcyjnych poszczególnych maszyn – belek nośnych w oparciu o metodę elementów skończonych (MES) [9,10]. Celem takiego działania było wsparcie fazy projektowej CAD, w tym próba unifikacji zespołów konstrukcyjnych. Słuszność takiego postępowania wykazano w szeregu wcześniejszych prac badawczo-wdrożeniowych [2,3,6].

Do wstępnej analizy przyjęto belki w postaci rur stalowych, kwadratowych oraz prostokątnych (ze stali St3, St5, 18G2A), o następujących wymiarach (mm):

- 1) 200 x 200 x 8;
- 2) 200 x 100 x 5;
- 3) 80 x 80 x 4;
- 4) 100 x 100 x 4;
- 5) 150 x 150 x 6;
- 6) 200 x 200 x 10;
- 7) 300 x 200 x 6;

Przyjęto również, na wstępnym etapie badań, dwa rodzaje zamocowania rur: jednostronne sztywne oraz dwustronne sztywne (rys. 7), odpowiadające warunkom pracy belki nośnej toru jezdnych, poziomej belki ramienia „L” oraz belki dźwigającej stoły w pozycjonerze „H”. Do obliczeń przyjęto pięć wariantów różniących się długością belek oraz masą obciążenia i jej położeniem, zgodnie z przeprowadzoną analizą głównych zespołów mechanicznych opracowywanych manipulatorów. Wszystkie analizowane warianty zamieszczone w tabelicy IV.

Siły wynikające z masy obciążenia wynoszą odpowiednio:

- $F_1 = Q \cdot a = 300 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = -2943 \text{ N}$
- $F_2 = 1000 \cdot 9,8 = -9810,0 \text{ N}$
- $F_3 = 250 \cdot 9,81 = -2452,5 \text{ N}$
- $F_4 = 500 \cdot 9,81 = -4905,0 \text{ N}$

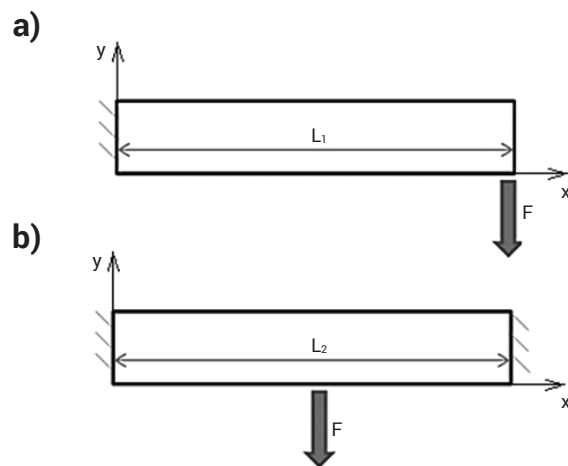
Oprócz sił wynikających z masy obciążenia, w obliczeniach uwzględniono także obciążenie wynikające z masy samych belek. Podstawowe właściwości materiałowe przyjęte do obliczeń są identyczne dla wstępnie zaplanowanych materiałów:

- Moduł Younga  $E = 205000 \text{ MPa}$
- Liczba Poissona  $\nu = 0,3$
- Gęstość  $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$

**Tabela IV.** Warianty długości belek oraz obciążenia  
**Table IV.** Combinations of the beam length and loading used for analysis

Parametr	Zestawienie długości belek i założonych obciążeń				
	Wariant A	Wariant B	Wariant C	Wariant D	Wariant E
$L_1$ [m]	0,8	1,2	1,6		
$L_2$ [m]				2,5	5,0
Q [kg]	-	250			
	300	-			
	-	500			
	1000	-			

Obliczenia zachowania się belek pod obciążeniem zrealizowano przy pomocy oprogramowania opartego na metodzie elementów skończonych (MES), przyjmując dane (wymiary, momenty bezwładności) dla analizowanych przekrojów belek z bazy danych programu [9].

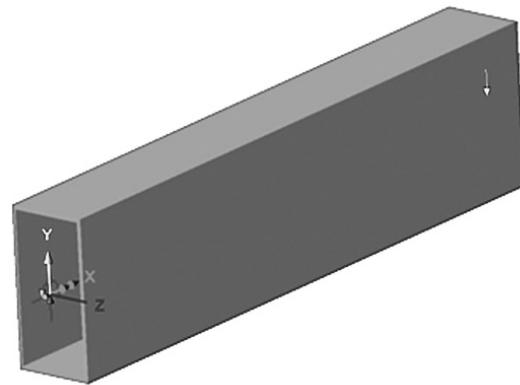


**Rys. 7.** Schemat obciążenia oraz zamocowania belki: a) jednostronne, b) dwustronne  
**Fig. 7.** The loading scheme of a one-sided (a) and two-sided (b) fixed beams

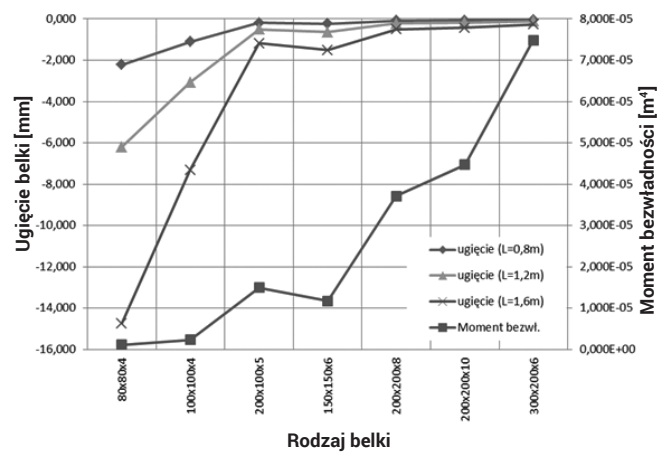
Na rysunku 8 przedstawiono przykładową wizualizację jednej z analizowanych belek o przekroju prostokątnym. W celu zapewnienia największej sztywności, modele z belkami prostokątnymi obciążano zgodnie z kierunkiem dłuższej osi (osi Y na rys. 8). Potwierdzono to w toku badań wstępnych.

Na rysunkach 9÷12 przedstawiono końcowe wyniki analiz szczegółowych, którym poddano wszystkie warianty zestawione w tabelicy IV. Na wykresach zestawiono wyodrębnione rodzaje belek w odniesieniu do ich wyznaczonych przekrojów, momentów bezwładności, ugięć i ciężarów (różne zestawienia). Widać, że dla belek kwadratowych wzrostowi ich przekroju poprzecznego towarzyszy wzrost momentu bezwładności. Odpowiednio zorientowane względem obciążenia belki z rur o przekroju prostokątnym mogą wykazywać korzystniejsze zachowanie w stosunku do podobnych rur o przekroju kwadratowym,

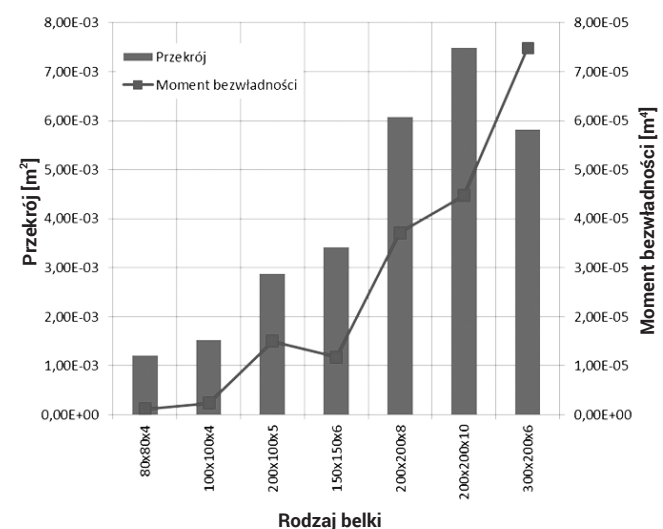
uzyskując niższe ugięcia pod podobnym obciążeniem. Mniejszy przekrój rury prostokątnej, dla którego ugięcie belki jest zmniejszone, prowadzi także do obniżenia ciężaru całej belki.



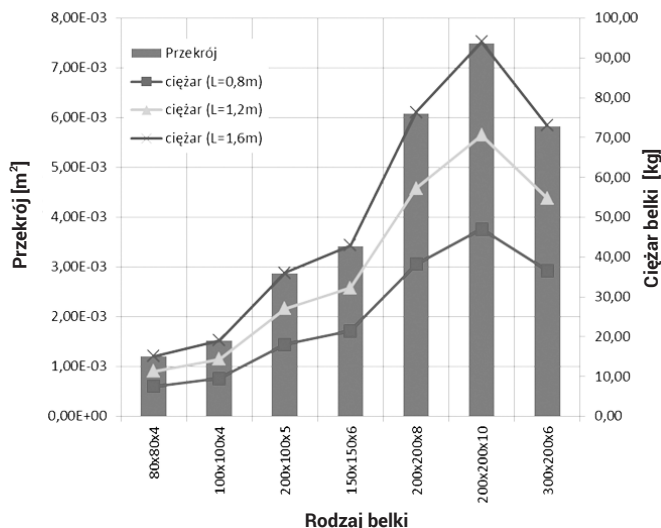
**Rys. 8.** Przykładowy model belki prostokątnej z podparciem jednostronnym  
**Fig. 8.** An example of the rectangle beam model fixed at one side



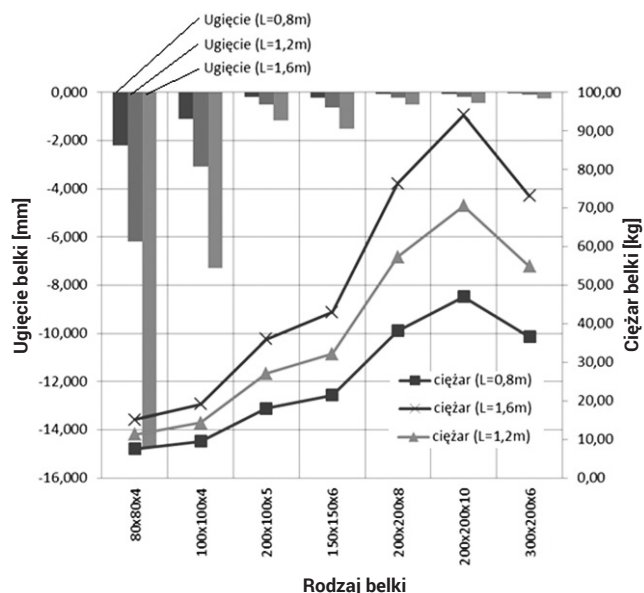
**Rys. 9.** Wpływ rodzaju belki na wielkość jej przekroju oraz momentu bezwładności  
**Fig. 9.** Effect of beam type on its cross-sectional dimension and moment of inertia



**Rys. 10.** Wpływ rodzaju i wielkości przekroju belki (momentu bezwładności) na wielkość ugięcia belki dla różnej długości belki (obciążenie 250 kg dla  $L = 0,8$  m i 300 kg dla pozostałych długości)  
**Fig. 10.** Effect of the type and cross-section size (moment of inertia) on the beam deflection for different beam lengths (load 250 kg for  $L = 0,8$  m and 300 kg for the remaining length)



Rys. 11. Wpływ rodzaju i przekroju rury na ciężar belki  
Fig. 11. Effect of pipe type and cross-section on the beam weight



Rys. 12. Wpływ rodzaju i długości rury na ciężar i ugięcie maksymalne belki  
Fig. 12. Effect of pipe type and length on the weight and maximum beam deflection

## Podsumowanie i wnioski

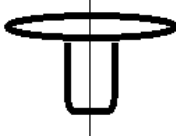
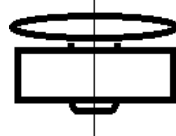
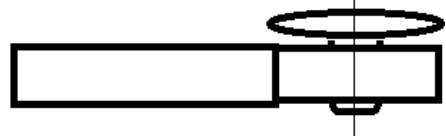
Przyjęte, referencyjne parametry manipulatorów pozwolą na opracowanie i wdrożenie maszyn o najwyższej funkcjonalności. Przy ich projektowaniu warto dodatkowo przeanalizować możliwość wyodrębnienia wspólnych podzespołów, mogących być bazą dla różnych maszyn. Takimi zespołami mogłyby być np. różne konfiguracje stołu z piastą napędową (tabl. V). Należy oczywiście uwzględnić parametry użytkowe właściwe dla danego typu manipulatora.

Przeprowadzone studium zależności materiałowych i konstrukcyjnych metodą elementów skończonych (MES) dało konstruktorom szereg informacji przyczyniających się do znacznego przyspieszenia procesu projektowania, a w przyszłości skróci i uprości proces szczegółowej analizy wytrzymałościowej MES. W badaniach wykazano, w niektórych przypadkach, przewagę rur o profilu prostokątnym nad kwadratowym. Należy jednak zauważyć, że w przypadku ruchomych zespołów manipulatorów zmieniać się będzie kierunek działania sił w stosunku do chwilowej orientacji obciążanego przekroju belki. Dotyczy to np. poziomego ramienia „L”. W takim przypadku wskazane wydaje się zastosowanie belek o przekrojach symetrycznych – kwadratowych.

Przeprowadzone studium doboru podzespołów i mechanizmów specjalnych i prefabrykowanych (pominięte w artykule) potwierdziło dostęp do szerokiej gamy wysokiej jakości gotowych komponentów, przydatnych do budowy manipulatorów. Ich prawidłowy dobór wymaga jednak poznania jak najszerszej oferty oraz przeprowadzenie szczegółowej analizy wymiarowej i wytrzymałościowej, a także ekonomicznej.

Tablica V. . Różne konfiguracje podzespołu: stół – piasta napędowa, w odniesieniu do możliwości zastosowania w poszczególnych manipulatorach typu „L” oraz „H”

Table V. Various configurations of the manipulator subassembly: table – drive hub, for use in individual type-L and type-H manipulators

Zestaw komponentów podzespołu	Stół roboczy	+	+	+
	Piasta stołu	+	+	+
	Korpus piasty	-	+	+
	Ramię	-	-	+
Szkic podzespołu				
Wykorzystanie w pozycjonerze „L”	Napęd stołu roboczego		Napęd stołu roboczego z poziomą belką ramienia „L”	
Wykorzystanie w pozycjonerze „H”	Napęd stołu roboczego		Napęd stołu roboczego z poziomą belką ramienia „H”	
	Napęd osi zmiany stanowisk		Napęd osi zmiany stanowisk z pionowym słupem korpusu	



## Literatura

- [1] Cegielski P. Rozdziały: 7.2.1 Pozycjonery spawalnicze, 7.4.3 Zewnętrzne osie, w: Technika spawalnicza w praktyce. Poradnik inżyniera konstruktora i technologa, Red. K. Ferenc, Warszawa, Verlag Dashofer 2015.
  - [2] Cegielski P., Golański D. i inni: Modelowanie i wdrożenie wysięgników do lokomocji robotów przemysłowych, Przegląd Spawalnictwa, Vol. 87, Nr 1, 2015, s. 6-13.
  - [3] Cegielski P., Golański D. i inni: Nowe konstrukcje i metody projektowania zewnętrznych osi do lokomocji robotów przemysłowych, PAR 7-8/2013, s. 90-95.
  - [4] Cegielski P., Kolasa A., Sarnowski T.: Nowe konstrukcje pozycjonerów jako zewnętrznych osi robotów przemysłowych, Przegląd Spawalnictwa, Vol 88, Nr 1, 2016.
  - [5] Cegielski P., Kolasa A., Sarnowski T.: Pozycjonery i tory jezdne – nowe rozwiązania zewnętrznych osi robotów przemysłowych. Problemy Robotyki T. 1. Prace Naukowe. Elektronika. Z.166. OW Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008, s. 357-366.
  - [6] Golański D., Cegielski P., Giżyński P., Kolasa A.: Modelowanie numeryczne ugięcia podstawy robotów przemysłowych, Przegląd Spawalnictwa, Vol. 86, Nr 6, 2014, s. 34-41.
  - [7] Honczarenko J.: Roboty przemysłowe. Budowa i zastosowanie, WNT Warszawa 2011.
  - [8] Kruczyński M.: Zrobotyzowane stanowiska spawalnicze – przykłady konfiguracji, Biuletyn Automatyki 3/2008, ASTOR, s. 20-22.
  - [9] LUSAS Modeller User Manual v.14.0. FEA Ltd. UK.
  - [10] R.D. Cook. Finite element modelling for stress analysis. John Wiley, 1995
-