

Nowe konstrukcje i metody projektowania zewnętrznych osi do lokomocji robotów przemysłowych

Paweł Cegielski*, Dariusz Golański*, Andrzej Kolasa*, Tadeusz Sarnowski**

*Zakład Inżynierii Spajania, Politechnika Warszawska

**ZAP-Robotyka Sp. z o.o., Ostrów Wielkopolski

Streszczenie: Robotyzacja wielu zadań produkcyjnych może wymagać zwiększenia zasięgu ramienia robota ponad jego standardowe rozmiary. W tym celu mogą być zastosowane dodatkowe maszyny lokomocyjne, tzw. zewnętrzne osie robota, w tym wszelkiego rodzaju tory jezdne. Wysokie parametry użytkowe tego typu maszyn zagwarantować mogą nowoczesne metody projektowania i analizy konstrukcji już na etapie wstępnego modelowania. ZAP-Robotyka, wspólnie z Zakładem Inżynierii Spajania Politechniki Warszawskiej od szeregu lat prowadzi prace badawczo-rozwojowe i wdrożeniowe w dziedzinie urządzeń do automatyzacji i robotyzacji. W artykule przedstawiono efekty ostatnich prac związanych z modelowaniem i budową zewnętrznych osi robotów przemysłowych.

Słowa kluczowe: robot przemysłowy, tor jezdny, MES

1. Wprowadzenie

Uwarunkowania współczesnego rynku wymuszają częstą modernizację i zmiany wyrobów produkowanych przy szerokim wykorzystaniu elastycznych środków wytwórczych, w tym robotów przemysłowych. Wysoka elastyczność robotów musi iść w parze z odpowiednią konfiguracją i wyposażeniem stanowisk produkcyjnych. W stosunku do tzw. zewnętrznych osi robotów, definiowanych jako odrębne maszyny manipulacyjne współdziałające z robotem, w tym sterowane z poziomu tego samego programu użytkowego, a nawet kontrolera (takich jak pozycjonery czy tory jezdne) konieczna może okazać się ich każdorazowa wymiana lub stosowanie droższych, ale bardziej wszechstronnych urządzeń, np. o większej nośności i większej liczbie stopni swobody. Aby sprostać nowym wyzwaniom, projektowanie i eksploatacja nowych urządzeń wymaga innowacyjnego zastosowania tradycyjnej wiedzy z zakresu technologii, konstrukcji maszyn i urządzeń, elektroniki, automatyki czy programowania.

Tory jezdne pozwalają na przemieszczanie się zamocowanych na nich robotów przemysłowych, umożliwiając realizację zadań obejmujących obszary nawet znacznie wykraczające poza przestrzeń roboczą samego robota [2, 3].

Główne parametry torów to: rodzaj i liczba osi (przeważają konstrukcje jednoosiowe – liniowe), zasięg, nośność i powtarzalność pozycjonowania, a także rodzaj zastosowanego napędu i sterowania. Przy powtarzalności pozycjonowania nie gorszej niż robotów przemysłowych i znacznej nośności (powyżej 200 kg) osiągają wysokie prędkości i zakresy ruchu. W grupie prostych, jednoosiowych torów jezdnych, szczególną rolę odgrywają jednostki podwieszane, przeznaczone do przemieszczania robotów pracujących w pozycji bocznej lub odwróconej. Przyjmuje się, że w takiej pozycji uzyskuje się około 50 % wzrost wykorzystania przestrzeni roboczej. Możliwe staje się stosowanie lżejszych i tańszych robotów o mniejszym zasięgu oraz realizacja zadań o znacznie utrudnionym dostępie do miejsca obróbki.

Podjęcie opracowania i wdrożenia nowych generacji torów podwieszanych miało na celu rozszerzenie oferty produkowanych w kraju, a więc łatwiej dostępnych i tańszych urządzeń, przy zachowaniu najwyższych parametrów i funkcjonalności. Dotychczas produkowane tory podłogowe nie są w stanie sprostać wszystkim zadaniom produkcyjnym. Zastosowanie urządzeń z importu, z uwagi na wysoką cenę, a niekiedy także ściśle dopasowanie do określonego typu robotów (pochodzących od tego samego producenta), często nie jest uzasadnione ekonomicznie, a wręcz nie jest możliwe.

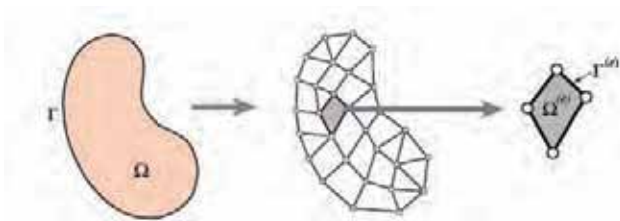
W artykule przedstawiono efekty ostatnich prac, związanych z opracowaniem i budową nowych konstrukcji torów jezdnych, wdrażanych do produkcji seryjnej w ramach projektu celowego FSNT-NOT [8].

2. Analiza numeryczna MES

W przypadku współczesnych, coraz bardziej precyzyjnych robotów przemysłowych, o powtarzalności pozycjonowania rzędu $\pm 0,01-0,10$ mm, pojawia się potrzeba zapewnienia najwyższej sztywności ich zamocowania i manipulacji. W przypadku torów podłogowych, pewne niedostatki mogą być zrekomensowane odpowiednim fundamentem i mocowaniem toru do podłoża. Dla torów podwieszanych konieczny jest staranny dobór wszystkich elementów nośnych (belki, słupów podporowych) i prowadzących (prowadnice, przekładnie), poparty obliczeniami i próbami ruchowymi modeli

i prototypów. Faza badań ruchowych pociąga za sobą znaczne koszty, stanowi jednak miarodajne potwierdzenie jakości przyjętych rozwiązań. Nowością, w stosunku do wcześniejszych opracowań, było zastosowanie zaawansowanych technik obliczeniowych i modelowania komputerowego, które chociaż częściowo ograniczyły potrzebę budowania kosztownych modeli, przyspieszając opracowanie i kompletację nowych konstrukcji [2, 5].

Analiza metodą elementów skończonych (MES) polega na wykorzystaniu idei dyskretyzacji rozpatrywanego obszaru przez jego podział na skończoną liczbę podobszarów nazywanych elementami (rys. 1). Elementy te połączone są ze sobą w punktach nazywanych węzłami. Reakcja każdego elementu wyrażona jest w formie skończonej liczby stopni swobody charakteryzowanej przez wartość nieznanej (poszukiwanej) funkcji dla zestawu punktów węzłowych.



Rys. 1. Dyskretyzacja i podział obiektu na elementy skończone
Fig. 1. Discretization of a body and its division into finite elements

W przypadku konstrukcji ramowych, często stosuje się elementy typu belka, których głównym zadaniem jest przenoszenie obciążeń poprzecznych na ich podparcia (słupy). Belka przenosi tylko poprzeczne obciążenia głównie przez zginanie w taki sposób, że po jednej stronie powstają podłużne naprężenia ściskające, a po drugiej stronie naprężenia rozciągające. Obie strefy naprężeń oddzielone są od siebie neutralną powierzchnią o naprężeniu równym zeru. Kombinacja naprężeń rozciągających oraz ściskających wytwarza wewnętrzny moment gnący, który stanowi główny mechanizm transportu obciążenia do słupów. Modele matematyczne jednowymiarowej belki strukturalnej konstruowane są na podstawie teorii belek. Ponieważ belki są w rzeczywistości ciałami trójwymiarowymi, to wszystkie modele zakładać muszą pewną formę aproksymacji. Najprostsze modele dla prostych, pryzmatycznych belek oparte są na teorii Bernoulli-Eulera [1] nazywanej też klasyczną teorią belki lub teorią belki Timoszenko [7]. Modele te mogą być stosowane dla sformułowania skończonych elementów w postaci belek.

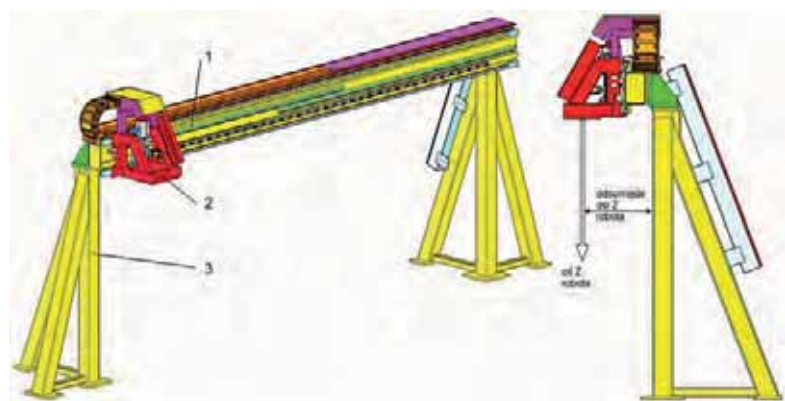
3. Modele obliczeniowe toru jezdnego

Z uwagi na odmienne warunki pracy i montażu, w tym obciążenia dynamiczne, nie jest możliwe proste zastosowanie toru podłogowego w wariantcie podwieszanym. Konieczne staje się zaprojektowanie odrębnych jednostek, o odpowiednio wzmocnionych układach jezdnych i napędowych. Sam mon-

taż toru wymaga użycia słupów podporowych, a ich liczba i rozmieszczenie uwarunkowane są m.in. długością toru, całkowitym obciążeniem czy charakterem realizowanych zadań. Najkrótsze mogą być podparte jednostronnie (układ wysięgnikowy), ale przeważają konstrukcje bramowe – dwupodporowe, najdłuższe zaś wymagają szeregu podpór pośrednich.

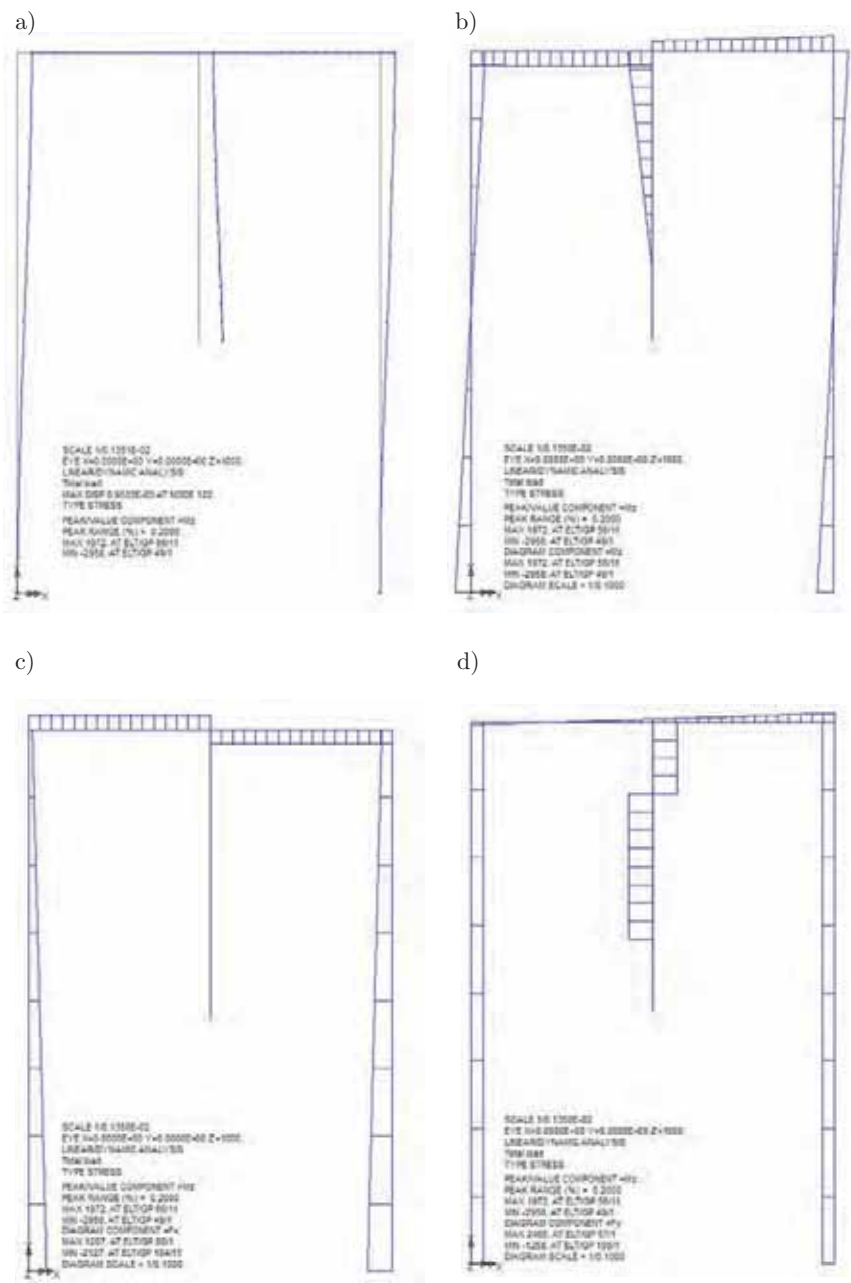
Przedmiotem projektu [8] był typoszereg podwieszanych torów jezdnych do współpracy z niemal dowolnymi robotami przemysłowymi, o całkowitej masie nieprzekraczającej 300 kg. Przyjęta, całkowita długość toru w zakresie od 2 m do 6 m, jest kompromisem między funkcjonalnością a ceną i jest efektem zarówno własnych doświadczeń produkcyjnych, jak i dostępnych danych literaturowych. Powtarzalność pozycjonowania ustalono na $\pm 0,15$ mm. W skład zunifikowanej jednostki weszła m.in.: belka toru, bieżnie z prowadnicami o dużej odporności na złożone rozkłady sił i momentów obciążających, platforma jezdna robota i układ przeniesienia napędu, oparty na przekładni zębatkowej, z przyłączem silnika elektrycznego zlokalizowanym na platformie jezdnej robota (rys. 2). Takie rozwiązanie ułatwi budowę toru o nietypowych długościach, gdzie przekładnia napędowa nie stanowi ograniczenia zasięgu ruchu. Konstrukcja ma charakter otwarty, dający możliwość łączenia z układami sterowania większości robotów, po zainstalowaniu dedykowanej jednostki napędowej lub napędu uniwersalnego.

Konstrukcja bramowa z belką jezdną (rys. 2), na której podwieszony jest uniwersalny robot przemysłowy, powinna spełniać wymagania związane z odpowiednią sztywnością, zapewniającą minimalne wygięcie wynikające z obciążenia belki robotem oraz siłami i momentami gnącymi wynikającymi z przyspieszenia robota w czasie ruchów ustawczych i roboczych. Możliwość określenia powstających ugięć, sił wzdłużnych, poprzecznych i momentów zginających już na etapie ich projektowania umożliwi modelowanie za pomocą metody elementów skończonych (MES) [4]. Analiza taka umożliwi dobór odpowiedniego rodzaju bramy pod kątem wymiarów oraz kształtu przekroju poprzecznego dla zadanego obciążenia.



Rys. 2. Schemat modelowej konstrukcji: 1) belka jezdna z prowadnicami i zębatką napędową, 2) platforma jezdna robota z zamontowaną jednostką napędową, 3) słupy podporowe

Fig. 2. Scheme of model design: a) the beam with slideway and gear rack, 2) robot transporting platform with drive unit, 3) support columns



Rys. 3. Model o rozstawie podpór 2 m: łączna deformacja konstrukcji (a) oraz diagramy rozkładu: sumarycznego momentu gnącego (b), siły F_x (c) oraz siły F_y (d), spowodowane masą własną i siłą poprzeczną powstającą w wyniku ruchu robota

Fig. 3. Frame model with 2 m distance between supports: total deformation of the frame (a) and distribution of total bending moments (b), F_x force (c) and F_y force (d), resulting from its weight and transverse force accompanying the robot movements

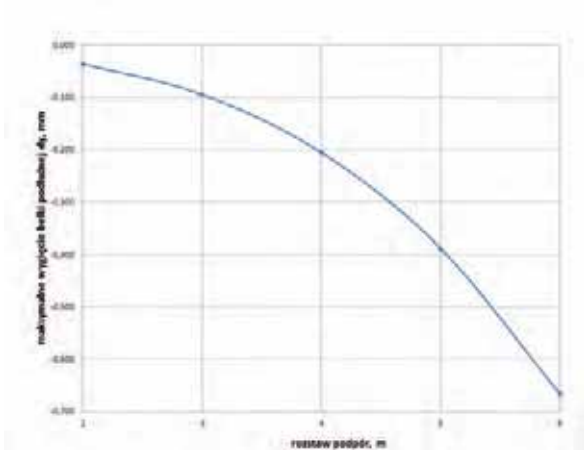
Zbudowano model bazowy, odpowiadający konstrukcji bramowej z dwoma słupami podporowymi (bez podpory środkowej) o wysokości 3 m z poprzeczną belką jezdnią o długości z zakresu od 2 m do 6 m i przekroju w postaci rury prostokątnej o narzuconym przekroju 200 mm × 300 mm × 8 mm. Słupy podporowe mają przekrój 180 mm × 180 mm × 8 mm, a cała konstrukcja wykonana jest ze stali

niestopowej typu S235. Podstawy słupów przytwierdzono są na stałe do podłoża. W środkowej części bramy podwieszony jest robot o masie 250 kg, w którego środku ciężkości przyłożona została siła poprzeczna 2452,5 N, odwzorowująca przyspieszenie robota podczas ruchu ustawczego (przyjęto wstępnie $a = 9,81 \text{ m/s}^2$). Założono także, że całkowita długość robota w kierunku y wynosi 1,6 m. Obliczenia

przeprowadzono w programie numerycznym LUSAS FEA 13-8 opartym na metodzie elementów skończonych [6]. Zadanie analizowano jako płaskie w zakresie sprężystym. Przyjęte do obliczeń właściwości materiału (stal S235): moduł Younga $E = 210 \cdot 10^6 \text{ Pa}$, liczba Poissona $\nu = 0,3$, gęstość $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$. Dla tak zbudowanego modelu przeprowadzono obliczenia numeryczne dla przypadku obciążenia bramy ciężarem własnym oraz siłą poprzeczną wynikającą z przyspieszenia robota w czasie wykonywania ruchów ustawczych. Obliczenia pozwoliły zobrazować deformacje (wygięcia) konstrukcji bramowej (rys. 3a). Przykładowo, największe ugięcie zarejestrowano dla belki jezdnej o długości 6 m i wyniosło ono $\delta_y = -0,665 \text{ mm}$ (dla konstrukcji, na którą dodatkowo oddziałuje siła poprzeczna wynikająca z przyspieszenia ruchu robota). Następnie, zbadano rozkłady sił (F_x , F_y) oraz momentu gnącego M_z (rys. 3b).

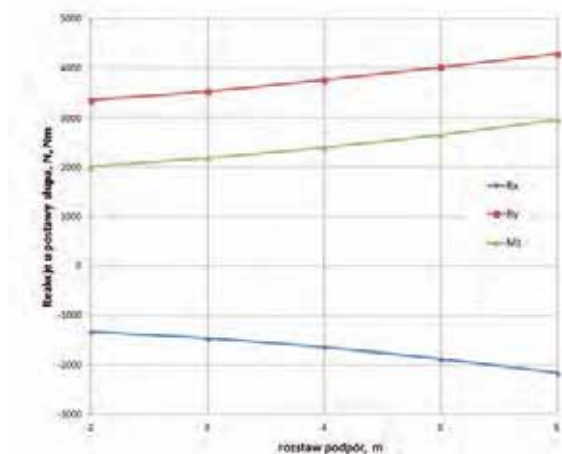
Na rys. 4 przedstawiono wpływ rozstawu podpór na wielkość ugięcia dla wszystkich analizowanych przypadków. Jak widać, dwukrotny wzrost rozstawu podpór (z 2 m na 4 m) spowodował niemal pięciokrotny wzrost ugięcia belki, natomiast trzykrotny wzrost rozstawu podpór (z 2 m na 6 m) wywołał aż 17-krotny wzrost ugięcia belki poprzecznej. Wzrost wygięcia belki poprzecznej wynika ze wzrostu momentu gnącego, wywołanego większym ramieniem działania sił w belkach. Wraz ze wzrostem odległości między słupami, podstawa jest coraz bardziej obciążona, zarówno momentem gnącym, jak i reakcjami sił wzdłużnych i poprzecznych (rys. 5).

Dla przypadku o rozstawie 6 m między skrajnymi słupami podporowymi zbudowano model przestrzenny 3D. W celu wzmocnienia konstrukcji wprowadzono trzeci słup podporowy umieszczony w połowie długości poprzecznej belki jezdnej (rys. 6). Analizę odkształceń oraz sił i momentów zginających w konstrukcji przeprowadzono dla masy podwieszono centralnie robota wynoszącej 250 kg, na którą oddziałuje siła poprzeczna z przyspieszeniem $9,81 \text{ m/s}^2$. Słupy boczne mają po dwa wzmocnienia, natomiast słup środkowy jedno. Przyjęto takie jak poprzednio przekroje



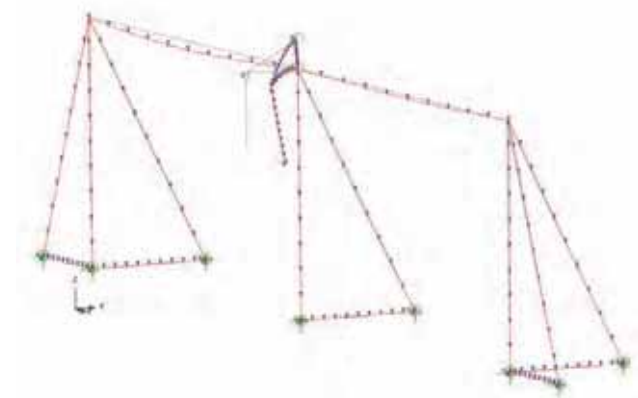
Rys. 4. Zmiana maksymalnego ugięcia pionowego belki poprzecznej ze wzrostem rozstawu podpór

Fig. 4. Change of the maximal vertical deflection of transverse beam versus increase of the distance between supports



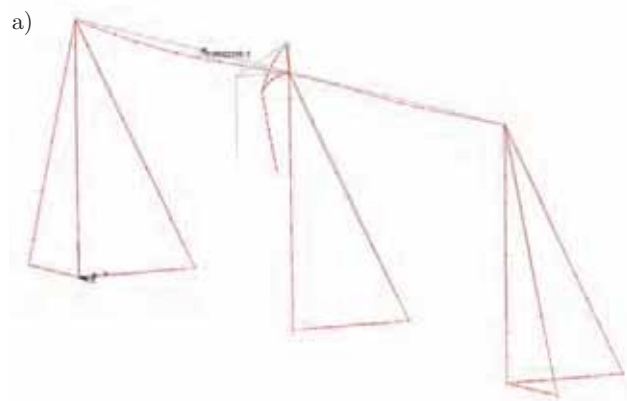
Rys. 5. Reakcje (M_z – moment gnący, R_x – siła poprzeczna, R_y – siła wzdłużna) w prawej podporze konstrukcji ramowej w funkcji wielkości rozstawu podpór

Fig. 5. Reactions (M_z – bending moment, R_x – transverse force, R_y – longitudinal force) in the right support column of the frame as a function of the distance between supports



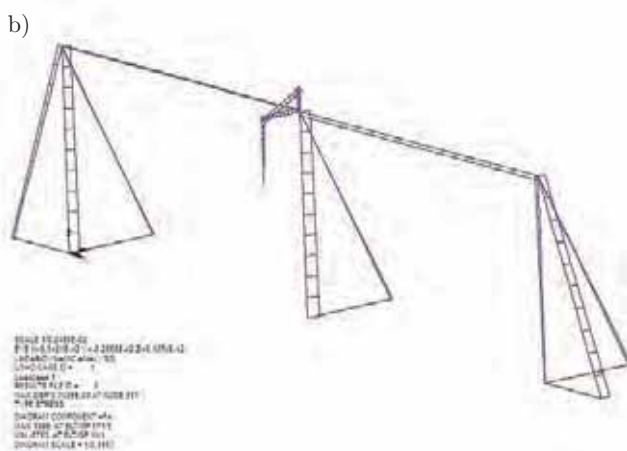
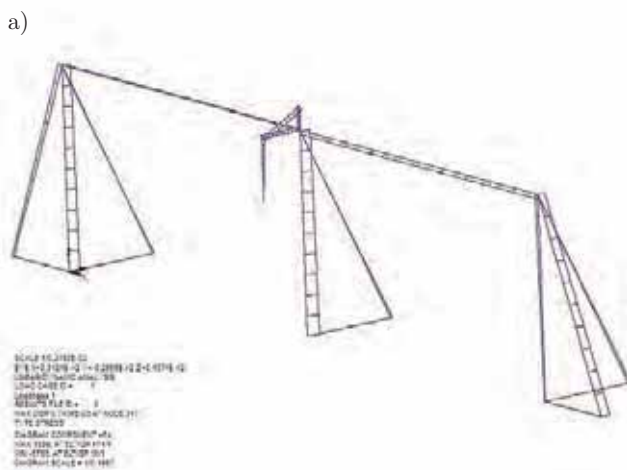
Rys. 6. Model przestrzenny MES konstrukcji bramowej o rozpiętości 6 m, opartej na trzech słupach podporowych

Fig. 6. Three-dimensional FEM model of the frame construction with 6 m distance between supports and with three support columns



Rys. 7. Deformacja konstrukcji ramowej: a) w płaszczyźnie z-x, b) w płaszczyźnie x-y

Fig. 7. Deformation of the analyzed frame: a) in z-x plane, b) in x-y plane



Rys. 8. Wykresy: a) siły poprzecznej F_x w słupach oraz b) momentu gnącego M_y , wyznaczonego w belce poprzecznej

Fig. 8. Diagram components of a) F_x transverse force in the support columns and b) M_y bending moment in the transverse beam



Rys. 9. Tor jezdny o długości 10 m (powstały podczas realizacji projektu)

Fig. 9. The 10 m driving track built based on the project results

poprzeczne rur prostokątnych belki jezdnej i słupów podporowych.

Pod wpływem działania siły poprzecznej oraz masy własnej robota następuje deformacja sprężysta całej konstrukcji w płaszczyźnie $z-x$ oraz $x-y$ (rys. 7). Powstające wygięcia w lewej części belki poprzecznej osiągają maksymalnie $-0,0754$ mm w kierunku pionowym (płaszczyzna $z-x$) oraz $-0,09$ mm w płaszczyźnie $x-y$. Największe siły w słupach pionowych to siły poprzeczne osiągające wartości do $-5,7$ kN, natomiast w belce poprzecznej największe wartości przyjmuje moment gnący $M_y = 1,3$ kNm (rys. 8).



Rys. 10. Szczegóły zamocowania i oprzyrządowania belki jezdnej: 1) osłona gaśnicowego przewodnika przewodów sterująco-zasilających, 2) belka jezdna, 3) łącznik słupa, 4) zębatka układu przeniesienia napędu, 5) bieżnia (dolna), 6) słup podporowy

Fig. 10. Fixing details and equipment of the travel track: 1) shielding of caterpillar guide for control and power cables, 2) driving track, 3) column fastener, 4) gear rack for drive transmission, 5) lower track, 6) support column

4. Realizacja praktyczna i wdrożenie

Podczas projektowania i budowy serii docelowej wykorzystano wyniki modelowania konstrukcyjnego, obliczeniowego MES oraz badań laboratoryjnych fizycznych modeli doświadczalnych, w tym wytypowane podzespoły oraz rozwiązania konstrukcyjne, m.in. przekroje rur prostokątnych. Ostatecznie powstał typoszereg o długości belki jezdnej w zakresie od 2 m do 10 m (rys. 9), z napędem opartym na nieruchomej zębatce przytwierdzonej do toru i jednostką napędową poruszającą się wraz z platformą robota (rys. 10). Przy takim rozwiązaniu przekładnia napędowa nie stanowi ograniczenia zasięgu ruchu, co ułatwia budowę torów o dowolnych długościach. Dodatkową korzyścią jest możliwość

zainstalowania na jednym torze więcej niż jednego robota na niezależnych platformach jezdnych. Dzięki wymiennej platformie jezdnej, roboty mogą być zamocowane zarówno w wariancie odwróconym, gdzie oś Z robota skierowana pionowo w dół (rys. 9), jak i naściennym, z osią Z skierowaną poziomo (rys. 11).



Rys. 11. Platforma jezdna w wariancie z poziomym mocowaniem robota

Fig. 11. Moving platform with horizontal-type robot fixing

5. Podsumowanie

Przedstawione urządzenia powstały w oparciu o oryginalne projekty, zakładające wykorzystanie najnowszych układów mechanicznych i napędowych. Z drugiej strony, uwzględniają potrzeby i możliwości potencjalnych, głównie krajowych użytkowników, zarówno pod względem ceny jak i oferowanej uniwersalności. Nowe typy torów jezdnych pozwolą na elastyczne zestawianie zrobotyzowanych stanowisk i ich efektywne wykorzystywanie w odniesieniu do wielu różnych procesów technologicznych.

Zbudowany bazowy model obliczeniowy 2D, dla konstrukcji bramowej z belką wzdłużą opartą na dwóch słupach

podporowych wraz z podwieszonym robotem umożliwił określenie wygięcia belki wzdłużnej pod wpływem masy własnej konstrukcji oraz obliczenia rozkładu sił wzdłużnych, poprzecznych i momentów gnących w całej konstrukcji. Przedstawione wyniki porównawcze dla szeregu konstrukcji różniących się długością belki wzdłużnej wskazują na poprawność charakteru wyników w przedstawionych modelach. Tak przygotowany model bazowy posłużył do dalszej analizy konstrukcji bramowych, celem określenia wymaganej geometrii całej konstrukcji oraz kształtów i przekrojów belek i wsporników, pod kątem zapewnienia odpowiedniej sztywności w czasie ruchów poprzecznych robota, przy założonych wartościach jego masy oraz przyspieszeń, jakie będzie uzyskiwał przy ruchu ustawczym. Dalsze prace, ukierunkowane na szczegółowe modele 2D i 3D, w tym przeprowadzone analizy rozkładu sił i przemieszczeń, pozwoliły na dobór optymalnego kształtu i wielkości przekroju belki wzdłużnej dla założonego zakresu jego długości, rozstawu słupów wspornikowych oraz przyspieszenia robota w czasie pracy. Wyniki obliczeń uzyskane z analizy przyjętych modeli MES konstrukcji bramowych ostatecznie potwierdzono podczas badań rzeczywistych modeli i prototypów.

Bibliografia

1. Beer F.P., Johnston E.R. Jr., *Mechanics of Materials*, McGraw-Hill, New York, 1981.
2. Cegielski P., Golański D., Kolasa A., Sarnowski T., Nowe konstrukcje i metody projektowania zewnętrznych osi robotów przemysłowych [w:] *Problemy Robotyki*, pod redakcją Krzysztofa Tchonia i Cezarego Zielińskiego. Prace Naukowe. Elektronika. T. 1, z. 175, OW Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2010, 263–274.
3. Cegielski P., Kolasa A., Sarnowski T., Oneksiak A., *Wdrożenia przemysłowe projektów badawczo-rozwojowych w zakresie mechanizacji i automatyzacji procesów spawalniczych*, „Przegląd Spawalnictwa” 6/2011, 53–59.
4. Cook R.D., *Finite element modelling for stress analysis*, John Wiley and Sons, 1995.
5. Golański D., Cegielski P., Kolasa A., *Analiza numeryczna odkształceń w elementach konstrukcyjnych podwieszonego toru jezdny, Zeszyty Naukowe PW. Seria Mechanika*, z. 230 „Spajanie materiałów we współczesnej technice”, Warszawa 2010, 61–69.
6. LUSAS Modeller User Manual v.13.8. FEA Ltd. UK.
7. Timoshenko, S.P., Goodier, J.N., *Theory of Elasticity*, Second Edition, McGraw-Hill, New York, 1951.
8. Projekt Celowy FSNT-NOT Nr ROW-III-032-2009 pn. „Uruchomienie produkcji typoszeregu podwieszanych torów jezdnych do robotów”, 2009–2010. ■

New designs and design methods for external travel axes of industrial robots

Abstract: Robotization of production tasks may require an increase of robot arm range beyond its nominal size. Additional transportation machines may be used for this purpose, called external robot axes, including all kind of driving tracks. To ensure

high usable parameters of these machines, application of new methods of design and construction analysis is required at the initial stage of model design. ZAP Robotics together with Department of Welding Engineering at Warsaw University of Technology has been engaged in research, development and implementation work in the area of equipment for automation and robotization. This paper presents the results of last work related to modelling and design of the external robot axes.

Keywords: industrial robot, linear axis for robot, FEM

dr hab. inż. Andrzej Kolasa

Profesor w Zakładzie Inżynierii Spajania na Wydziale Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej. Zajmuje się badaniami równowagi statycznej i zjawisk dynamicznych w układach źródło zasilania–łuk spawalniczy, właściwościami zasilaczy spawalniczych oraz automatyzacją procesów spawalniczych.

e-mail: akolasa@wip.pw.edu.pl



dr inż. Paweł Cegielski

Adiunkt w Zakładzie Inżynierii Spajania na Wydziale Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej. Zajmuje się problematyką budowy i eksploatacji źródeł energii elektrycznej do spawania łukowego oraz automatyzacją i robotyzacją spawania.

e-mail: pcegiels@wip.pw.edu.pl



dr hab. inż. Dariusz Golański, prof. PW

Pracownik naukowo-dydaktyczny Zakładu Inżynierii Spajania na Wydziale Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej. Zajmuje się zagadnieniami komputerowej analizy naprężeń własnych w spajanych złączach ceramiczno-metalowych, kompozytach oraz warstwach powierzchniowych. Wykorzystuje głównie analizę numeryczną opartą na metodzie elementów skończonych do modelowania rozkładów pól temperatury i naprężeń w połączeniach spajanych.

e-mail: dgol@wip.pw.edu.pl



dr inż. Tadeusz Sarnowski

Dziekan Wydziału Zamiejscowego w Ostrowie Wielkopolskim Społecznej Akademii Nauk w Łodzi. Prezes Zarządu Spółki ZAP-Robotyka zajmującej się automatyzacją i robotyzacją procesów wytwarzania. Zainteresowania badawcze dotyczą nowych rozwiązań urządzeń do aplikacji stanowisk zrobotyzowanych.

e-mail: sarnowski@zap.com.pl;
www.zap-robotyka.com.pl

