

Modelowanie i wdrożenie wysięgników do lokomocji robotów przemysłowych

Modelling and implementation
of movable booms
for industrial robot mobility

Streszczenie

Ustalenie odpowiedniego położenia robota przemysłowego względem miejsca pracy, w pełni wykorzystującego jego potencjał manipulacyjny, ma kluczowe znaczenie dla prawidłowego funkcjonowania stanowiska produkcyjnego. W przypadku robotów pracujących w pozycji odwróconej, oprócz rozwiązań stacjonarnych, można spotkać nieliczne przykłady ruchomych wysięgników o charakterze zewnętrznej osi robota. Tego typu lokomocja, pomimo potencjalnie mniejszego zasięgu w stosunku do torów jezdnych, skutkuje łatwością instalacji oraz zwykle niższymi kosztami. W artykule przedstawiono proces opracowania i wdrożenia do produkcji seryjnej nowych konstrukcji ruchomych wysięgników do lokomocji robotów przemysłowych.

Słowa kluczowe: robot przemysłowy, zewnętrzna oś robota, lokomocja robota, MES

Abstract

The location of industrial robot in relation to work stand is a key issue in proper functioning of the robotic installation including the use of its optimal manipulation ability. In case of robots working in the reversal (upside down) position the use of a special booms are often applied. Beside the stationary setups the movable booms can be used as an outer robot axle. Such solution despite the reduced robot range mobility comparing with robot railways results in not only easy installation but also low cost investment. Unfortunately such solutions that are suitable to the wide range of industrial robots are hardly available on the market. Therefore it is necessary to make a tailored structures for a particular robot application. The method of movable robot booms course of design and implementation into industrial practice are described in this paper.

Keywords: industrial robot, external robot axis, robot mobility, FEM modelling

Dr inż. Paweł Cegielski; dr hab. inż. Dariusz Golański, prof. PW; dr hab. inż. Andrzej Kolasa, prof. PW – Zakład Inżynierii Spajania Politechniki Warszawskiej, dr inż. Tadeusz Sarnowski – ZAP Robotyka, Ostrów Wilkopolski.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: p.cegielski@wip.edu.pl

Wstęp

Podyktowana uwarunkowaniami współczesnego rynku elastyczność robotów przemysłowych musi iść w parze z nie mniej elastyczną konfiguracją i wyposażeniem zrobotyzowanych stanowisk produkcyjnych. Jednym ze sprzyjających czynników jest lokomocja robotów, pozwalająca na realizację zadań wykraczających poza zasięg samego ramienia, a także łączenie różnych operacji na jednym stanowisku, np. technologicznych z transportowymi, czy zmiana produkcji przy wyłączeniu tylko części stanowiska objętego zakresem lokomocji.

W praktyce projektowania i budowy stanowisk zrobotyzowanych konieczna staje się szczegółowa analiza zasięgu ramienia robota, pozycji jego pracy oraz wykorzystania dodatkowych maszyn manipulacyjnych – tzw. zewnętrznych osi.

Pod pojęciem *zewnętrznej osi robota* rozumiane są, w największym uproszczeniu, odrębne w stosunku do robota maszyny manipulacyjne, sterowane przez ten sam układ i program co robot [1]. Są to przede wszystkim pozycjonery manipulujące zamocowanymi przedmiotami poddawanych obróbce oraz układy lokomocyjne robotów, najczęściej w postaci podłogowych i bramowych torów jezdnych [5,6].

Nowoczesne systemy zrobotyzowanego wytwarzania stawiają zewnętrznym osiom bardzo wysokie wymagania. Oczekiwana jest duża dynamika ruchów i dokładność, a wysokie walory użytkowe osiągane są m.in. dzięki określonym właściwościom napędów i sterowania, a także dzięki odpowiedniej konstrukcji mechanicznej. Najbardziej pożądane jest stosowanie wyłącznie napędów sterowanych w sposób ciągły, zdolnych do realizacji zarówno ruchów ustawczych, jak i roboczych, w tym równoczesnych z manipulacją samego robota.

Ustalenie odpowiedniego położenia robota względem miejsca pracy, a więc umiejscowienie jego przestrzeni roboczej względem wykonywanego zadania (przestrzeni operacyjnej), w pełni wykorzystującego potencjał manipulacyjny, ma kluczowe znaczenie dla prawidłowego funkcjonowania stanowiska produkcyjnego. W przeciwieństwie do robotów stojących, ich podwieszenie i praca w pozycji odwróconej gwarantuje znacznie lepsze usytuowanie przestrzeni roboczej w płaszczyźnie poziomej, umożliwiające obróbkę przedmiotów o powierzchni większej nawet o ok. 50%, jednak zwykle za cenę wyższych nakładów na sprzęt i infrastrukturę.

Niezależnie od przyjętego wariantu zamocowania robota, z uwagi na różnorodność zadań i organizacji stanowisk produkcyjnych konieczne staje się indywidualne projektowanie i wykonanie odpowiedniej podstawy lub wysięgnika. Warto pamiętać, że zlekceważenie sztywności tego typu elementów będzie powodować utratę stabilności i błędy pozycjonowania, zwłaszcza podczas zadań wymagających dynamicznych ruchów. Jak widać, montaż robota podwieszanego

w pozycji odwróconej pociąga za sobą liczne problemy, których przełamanie, np. przez wdrożenie określonego typoszeregu gotowych i sprawdzonych wysięgników, przyczyniłoby się do zwiększenia liczby instalacji wysokowydajnych, efektywnych stanowisk zrobotyzowanych.

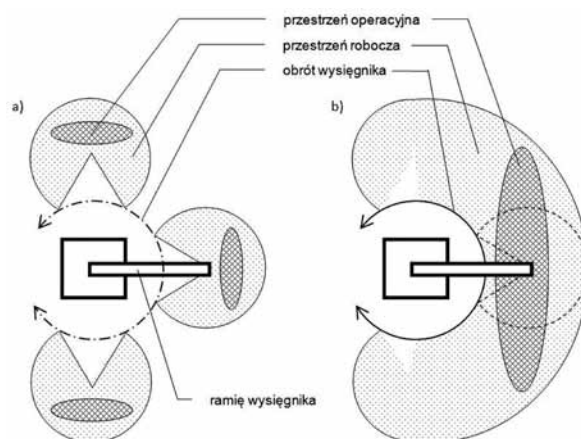
Lokomocja robotów przemysłowych

Maszyny manipulujące robotami przemysłowymi zapewniają im pewną mobilność, ograniczoną m.in. zasięgiem dodatkowo zastosowanych osi czy długością przewodów zasilających, sterujących i technologicznych. Najczęściej spotykane rozwiązania to:

- liniowe tory jezdne o jednym stopniu swobody – podłogowe dla robotów stojących oraz bramowe (rzadziej wysięgnikowe) dla robotów podwieszanych,
- złożone, wieloosiowe (2D/3D) układy lokomocyjne oparte na torach liniowych w układzie bramowym bądź suwnicowym – wyłącznie dla robotów podwieszanych,
- ruchome wysięgniki, przeważnie o jednym stopniu swobody (obrót poziomy ramienia lub jego ruch liniowy w kierunku pionowym), stosowane przede wszystkim do robotów podwieszanych.

Mobilność, uzyskana dzięki zewnętrznym osiom, w tym wysięgnikom z ruchomą belką, pozwala na omińnięcie jednego z podstawowych ograniczeń robotów – często zbyt małej przestrzeni roboczej w stosunku do wymaganej przestrzeni operacyjnej, w obrębie której zdefiniowano zadania produkcyjne. Możliwe są przy tym dwa typowe warianty (rys. 1) [1,3]:

- przestawianie przestrzeni roboczej robota w określone miejsca (ruchy ustawcze układu lokomocyjnego),
- zwiększenie przestrzeni roboczej robota (ruchy robocze układu lokomocyjnego).



Rys. 1. Typowe warianty uzyskiwane z podwieszenia robota na obrotowym ramieniu wysięgnika manipulacyjnego: a) przestawianie, b) powiększanie przestrzeni roboczej robota

Fig. 1. Typical variants derived from robot suspension on a swivel arm manipulator. a) transportation, b) enlarging the robot workspace

Zastosowanie tego typu lokomocji przynosi wiele korzyści. W pierwszej kolejności możliwe staje się planowanie zadań wykraczających poza zasięg ramienia robota, np. przy wytwarzaniu konstrukcji wielkogabarytowych. Dla stanowisk mniej obciążonych możliwa staje się realizacja dodatkowych operacji zgrupowanych wokół obrotowego wysięgnika, jak obsługa dodatkowych urządzeń, łączenie funkcji technologicznych i transportowych itp. Pomimo ograniczonego zasięgu ruchomych wysięgników w stosunku do długich torów jezdnych tego typu lokomocja skutkuje niższymi kosztami zakupu i instalacji, a ilość zajętej powierzchni produkcyjnej jest nieporównanie mniejsza.

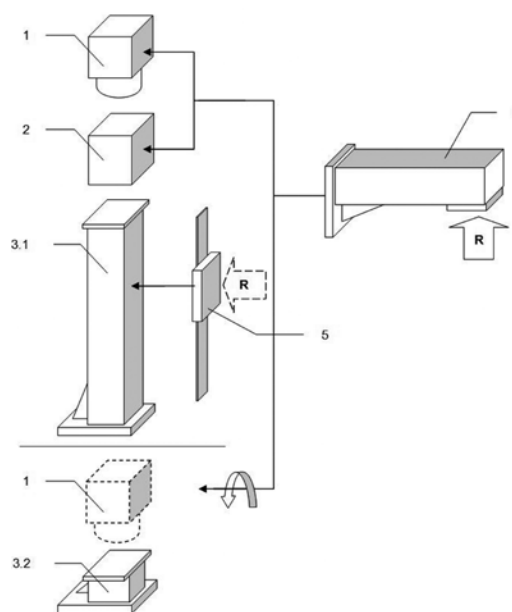
Analiza funkcjonalna projektowanych wysięgników

Wobec braku szerszej krajowej oferty wysięgników do montażu, a przede wszystkim manipulacji robotów przemysłowych w pozycji odwróconej, podjęto prace mające na celu zaprojektowanie i wdrożenie nowej generacji urządzeń, atrakcyjnych zarówno pod względem ceny, poziomu technicznego, jak i wszechstronności zastosowań. Innowacyjność projektu polegała na stworzeniu kompletnego, modułowego systemu wysięgników do instalacji i jednoosiowej lokomocji robotów pracujących przede wszystkim w pozycji odwróconej. Projektowanie i wykonanie nowych urządzeń wymagało innowacyjnego zastosowania wiedzy z zakresu technologii, konstrukcji maszyn i urządzeń, elektroniki, automatyki czy programowania. Wdrożenie przemysłowe będące skomplikowanym i kosztownym procesem wymagało, oprócz prac koncepcyjnych, zbudowania szeregu modeli i prototypów oraz ich wszechstronnych badań, zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i przemysłowych. Zakład Inżynierii Spajania Politechniki Warszawskiej we współpracy z ZAP Robotyka z Ostrowa Wielkopolskiego od wielu lat prowadzi prace badawczo-rozwojowe i wdrożeniowe w obszarze automatyzacji i robotyzacji, a w niniejszym artykule przedstawiono wybrane efekty ostatniego opracowania, zrealizowanego w ramach projektu celowego FSNT-NOT nr ROW-III-234/2012.

Do głównych parametrów i właściwości użytkowych wdrożonego systemu wysięgników zaliczyć należy (tabl. I) [2,3]:

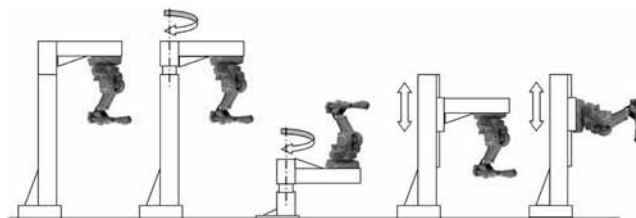
- typoszereg wymiennych modułów konstrukcyjnych: pionowych słupów, poziomych belek wysięgnikowych i niezbędnego osprzętu montażowego (rys. 2),
- uniwersalność systemu – możliwość instalacji napędu elektrycznego dobranego do robota (niemal dowolnego typu) lub uniwersalnego (wewnętrznie programowanego),
- moduł ruchomy obrotowy, instalowany pomiędzy słupem i belką, o zakresie $\pm 180^\circ$,
- moduł ruchomy liniowy, zintegrowany z platformą jezdną do instalacji belki poziomej (a opcjonalnie,

- także bezpośrednio robota), montowany na ścianie pionowego słupa,
- całkowitą nośność kompletnego wysięgnika, niezależnie od konfiguracji, 300 kg,
- powtarzalność pozycjonowania $\pm 0,10$ mm,
- możliwość konfiguracji wysięgnika w wariantach statycznym (bez napędu) i z napędem: liniowym lub obrotowym, w tym ostatnim przypadku zarówno w wersji z odwróconym, jak i stojącym montażem robota (rys. 3),
- możliwość zmiany wcześniejszej konfiguracji, w tym dodanie, zmianę lub rezygnację z modułu napędowego,
- unifikację podzespołów dla wszystkich rozmiarów całego typoszeregu słupów i belek.



Rys. 2. Zestawienie konfiguracyjne opracowanego i zbudowanego systemu wysięgników: 1 – moduł ruchomy obrotowy, 2 – łącznik statyczny, 3 – pionowy słup: 3.1 – nominalny, 3.2 – w wersji obniżonej, 4 – pozioma belka wysięgnikowa, 5 – moduł ruchomy liniowy, R – miejsce montażu robota przemysłowego [3]

Fig. 2. The summary of configuration of designed and built booms system: 1 – rotary motor module, 2 – static switch, 3 – vertical column: 3.1 – nominal 3.2 – reduced version, 4 horizontal beam arm, 5 – linear motor module, R – the place of installation of an industrial robot [3]



Rys. 3. Podstawowe konfiguracje systemu – od lewej: bazowa – statyczna, z modułem ruchowym obrotowym i robotem w pozycji odwróconej, z modułem ruchowym obrotowym i robotem w pozycji stojącej, z modułem ruchowym – liniowym [3]

Fig. 3. Basic configurations of the system – from left: basic – static, rotary mobility module and a robot in an inverted position, the rotational mobility module and a robot in a standing position, the linear mobility module – linear [3]

Tablica I. Uzyskane parametry wdrożonego systemu wysięgników [3]
Table I. The parameters of implemented system booms [3]

Nazwa parametru lub właściwości	Wartość i jednostka
Konfiguracja wysięgników	Modułowa, dowolnie konfigurowana
Zastosowanie	Uniwersalne, otwarte
Możliwy do zastosowania napęd	Elektryczny – ciągły, dobierany do zastosowanego robota (niemal dowolnego typu) lub uniwersalny (wewnętrznie programowany)
Sterowanie	Ciągłe (serwo) lub dyskretne (wewnętrznie programowane)
Wysokość słupa	1; 2,5; 3,5 i 4,5 m
Długość wysięgnika	1,2 i 2,0 m
Zakres obrotu wysięgnika	$\pm 180^\circ$
Zakres podniesienia wysięgnika	2,0 i 3,0 m
Powtarzalność pozycjonowania	$\pm 0,10$ mm
Nośność	300 kg, każda konfiguracja
Pozycja pracy robota	Stojąca lub odwrócona (zależnie od konfiguracji)

Modele obliczeniowe wysięgników

Komputerowe modelowanie wysięgników miało na celu ustalenie najkorzystniejszych, z punktu widzenia stanu odkształceń i naprężeń, wymiarów poszczególnych modułów, zastosowanie usztywnień konstrukcyjnych, np. w postaci żeber, a także ustalenie położenia mechanizmów napędowych oraz zakresów ich ruchów. Przyjęto wstępnie materiał konstrukcji (stal S235), przekroje rur prostokątnych dla pionowego słupa (500x500x12 mm) i poziomej belki (500x300x12 mm), a także rozmieszczenie i grubość żeber usztywniających (10 i 15 mm). Na wstępnym etapie wiele uwagi poświęcono zarówno poszczególnym modułom, jak i kompletnym konfiguracjom roboczym wysięgników. Na rysunku 4 pokazano przykładowo rozważane warianty konstrukcyjne poszczególnych modułów i konfiguracje złożonych wysięgników.

Modelowane konstrukcje maszyn, w tym będących przedmiotem wdrożenia wysięgników, można analizować pod kątem powstających sił, odkształceń i naprężeń za pomocą metody elementów skończonych

(MES) [9]. Wykorzystuje ona ideę dyskretyzacji rozpatrywanego obszaru przez jego podział na skończoną liczbę podobszarów nazywanych elementami, połączonych ze sobą w punktach nazywanych węzłami. Reakcja każdego elementu na przyłożone obciążenie (termiczne, mechaniczne) wyrażona jest w formie skończonej liczby stopni swobody charakteryzowanej przez wartość nieznaną/ych (poszukiwaną) funkcji dla zestawu punktów węzłowych. Odpowiedź modelu matematycznego jest wtedy uważana jako przybliżona przez odpowiedź modelu dyskretnego otrzymanego w wyniku połączenia lub złożenia wszystkich elementów tworzących analizowaną strukturę. W przypadku konstrukcji ramowych, a więc także omawianych wysięgników dla robotów, z powodzeniem stosuje się elementy typu belka, przenoszące obciążenia poprzeczne (np. poziomy wysięgnik) na podparcie (pionowy słup wysięgnika) [3,4,7].



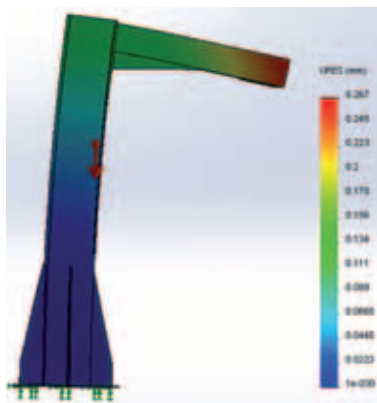
Rys. 4. Studium projektowe zamocowania robota za pośrednictwem modułu ruchowego liniowego i dodatkowego wysięgnika w postaci poziomej belki, podstawy lub łącznika [10]

Fig. 4. The study design of the robot fixture through the linear motor module and additional boom in the form of a horizontal beam, base or connector [10]

Wysięgniki do podwieszania manipulacji robotów powinny zapewniać odpowiednią sztywność, w tym minimalne wygięcie wynikające z obciążenia belki robotem oraz siłami i momentami gnącymi wynikającymi z przyspieszenia robota w czasie pracy. Na potrzeby przeprowadzonych analiz modelowane słupy przytwierdzano na stałe do podłoża, a na końcu poziomej belki mocowano obciążenie symulujące robot o masie 200 lub 300 kg. Obliczenia wstępne prowadzono w module MES wchodzącym w skład edytora CAD Solid Edge [10], a następnie w programie numerycznym LUSAS FEA 13-8. Zadanie analizowano w zakresie sprężystym w układzie przestrzennym (3D) modelu wysięgników. Do obliczeń przyjęto następujące właściwości materiału (stal S235): moduł Younga $E = 210 \cdot 10^6$ Pa, liczba Poissona $\nu = 0,3$, gęstość $= 7800$ kg/m³.

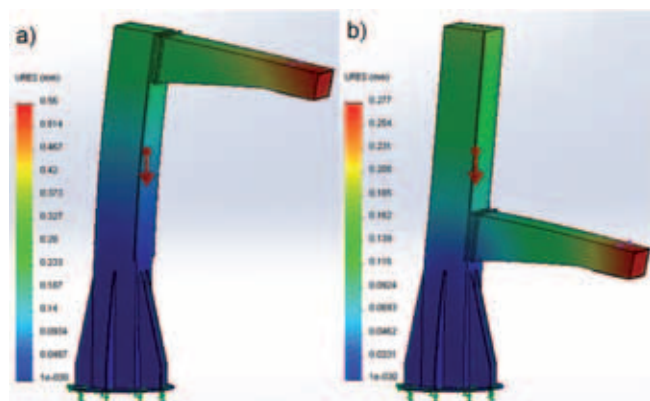
Zbudowano model 3D składający się z pionowego słupa oraz poziomego wysięgnika w postaci ruchomej belki, na końcu której umieszczony jest robot o masie 300 kg. W pierwszej kolejności wykonano wstępne obliczenia numeryczne dla przypadku obciążenia słupa z wysięgnikiem poziomym ciężarem własnym

bez zamocowanego robota. W wyniku obliczeń uzyskano wartość maksymalną ugięcia końca poziomego wysięgnika wynoszącą 0,267 mm (rys. 5).



Rys. 5. Rozkład przemieszczenia w analizowanej konstrukcji słupa z poziomym wysięgnikiem pod wpływem ciężaru własnego [10]
Fig. 5. Distribution of the displacement field of the truss column with a horizontal boom under the self-weight loading condition [10]

W kolejnym modelu dodatkowo na końcu poziomego wysięgnika przyłożono obciążenie symulujące podwieszony robot przemysłowy o masie 300 kg. Wykonano obliczenia dla dwóch przypadków położenia poziomego wysięgnika z robotem: w skrajnie górnym oraz w skrajnie dolnym położeniu ruchomej belki. Jak należało oczekiwać, w przypadku konfiguracji wysięgnika z belką w położeniu górnym stwierdzono zwiększone (o ok. 50%) pionowe ugięcie końca belki w stosunku do wariantu z belką zabloкованą w położeniu dolnym (rys. 6). W stosunku do konstrukcji bez zamocowanego robota ugięcie maksymalne belki wzrosło o ponad 100%, co wskazuje na konieczność zapewnienia odpowiedniej sztywności belki pionowej. Podobne obliczenia przeprowadzono również dla słupa prostokątnego o grubości 10 mm, a ich wyniki zebrano w tabelicy II. Zmniejszenie grubości ścianki pozwala obniżyć masę konstrukcji o ok. 300 kg w stosunku do grubości 12 mm, ale prowadzi to do wzrostu ugięcia wysięgnika o ok. 15%.



Rys. 6. Deformacja całości konstrukcji dla słupa z nieruchomą (ręcznie przestawianą) belką: a) w górnym i b) w dolnym położeniu, z obciążeniem 300 kg [10]
Fig. 6. The deformation of the whole structure of the fixed (manually adjustable) beam column: a) in the upper and b) in the lower position with the robot load of 300 kg [10]

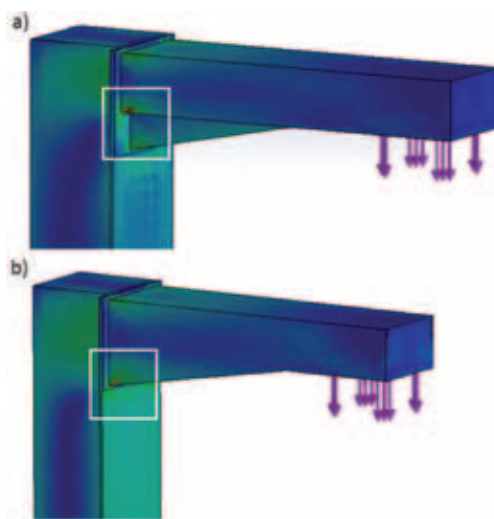
Tabela II. Obliczone ugięcia wysięgnika dla różnych grubości ścianek rur prostokątnych

Table II. The calculated boom deflections for different wall thicknesses of rectangular tubes

Grubość ścianki słupa pionowego	10 mm		12 mm	
	Pod własnym ciężarem	Z zamocowanym robotem 300 kg	Pod własnym ciężarem	Z zamocowanym robotem 300 kg
Maksymalne ugięcie pionowe wysięgnika mm	0,272	0,782	0,262	0,679

Istotny z punktu widzenia ugięcia konstrukcji, ale także powstających w konstrukcji sił i momentów gnących jest obszar w miejscu zamocowania poziomej belki do pionowego słupa oraz obszar podstawy robota ze wzmocnieniem w postaci żeber.

Odpowiednie wzmocnienie tych obszarów będzie miało wpływ na zmniejszenie wygięcia całej konstrukcji, a w szczególności końca wysięgnika z podwieszonym robotem. Przykład modyfikacji obszaru konstrukcji w miejscu zamocowania poziomej belki pokazano w miejscu zaznaczonym na rysunku 7.

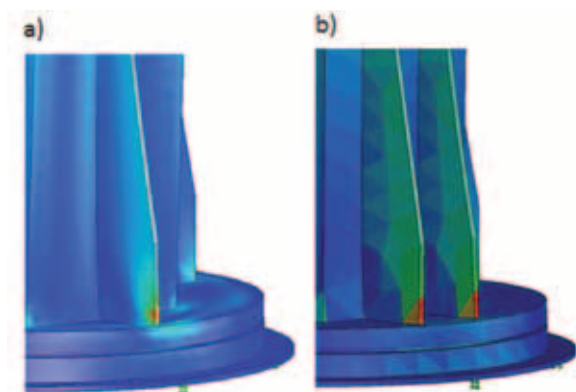


Rys. 7. Modyfikacja węzła konstrukcji w miejscu zamocowania poziomej belki do pionowego słupa: a) wersja pierwotna z dwoma żebrami, b) wersja z rozsuniętymi żebrami oraz wspawanym między nie poprzecznie wzmocnieniem [10]

Fig. 7. Modification of the structure in the place where the horizontal beam is attached to the vertical column: a) the original version of the two ribs, b) the version of the expanded ribs reinforced with transversely welded plate [10]

W przedstawionym rozwiązaniu dwa żebra wspierające poziomą belkę rozsunięto maksymalnie na boki rury prostokątnej, a na ich spodnią część przyspawano stalową płytę wzmacniającą. Po wykonaniu analizy numerycznej dla tak przebudowanego węzła konstrukcji wysięgnika maksymalne ugięcie pionowe zmniejszyło się o ok. 12% do wartości 0,599 mm.

Drugim obszarem modyfikacji konstrukcji słupa z wysięgnikiem jest obszar podstawy słupa, w którym występują żebra wzmacniające. Możliwych jest wiele wariantów rozwiązań konstrukcyjnych zastosowanych żeber, dzięki którym podstawa słupa ulegnie wzmocnieniu. Dotyczy to głównie zastosowania różnej liczby żeber przy podstawie oraz ich umiejscowienia. Przykładowo, na rysunku 8 pokazano rozkład naprężeń zredukowanych (Hubera-Misesa) w podstawie słupa dla wariantu z pojedynczym i podwójnym żebrze. Koncentracja naprężeń występująca w żebrze przy podstawie może zostać częściowo zniwelowana przez rozłożenie naprężenia na większą liczbę żeber.



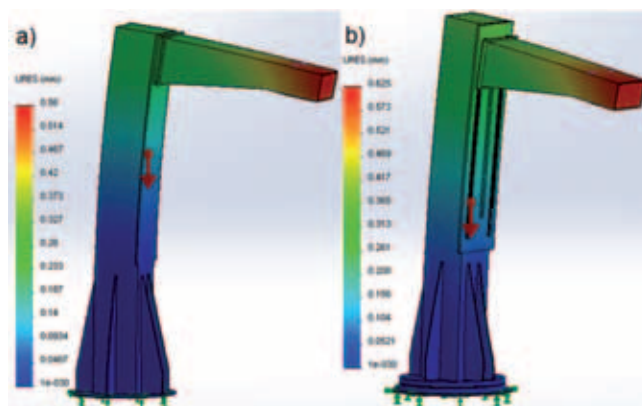
Rys. 8. Porównanie rozkładu naprężeń (zredukowanych) w dwóch wariantach żeber wzmacniających podstawę słupa pionowego: a) pojedyncze żebro, b) podwójne żebro [3,10]

Fig. 8. The comparison of stress distribution (reduced) in two rib variants strengthening the vertical column: a) single rib, b) double rib [3,10]

Zamocowanie belki wspornika poziomego w słupie pionowym może być zrealizowane jako stacjonarne, gdy belka pozioma jest przestawiana ręcznie w określone położenie względem słupa oraz jako niestacjonarne, gdy konstrukcja słupa oraz belka zapewniają płynny ruch oraz zamocowanie na określonej wysokości w wyznaczonym zakresie przemieszczenia (rys. 9). Jak widać, rozwiązanie stacjonarne powoduje niższe ugięcie całej konstrukcji, ale nie jest tak uniwersalne jak w przypadku rozwiązania niestacjonarnego umożliwiającego szybką i płynną regulację wysokości belki poziomej.

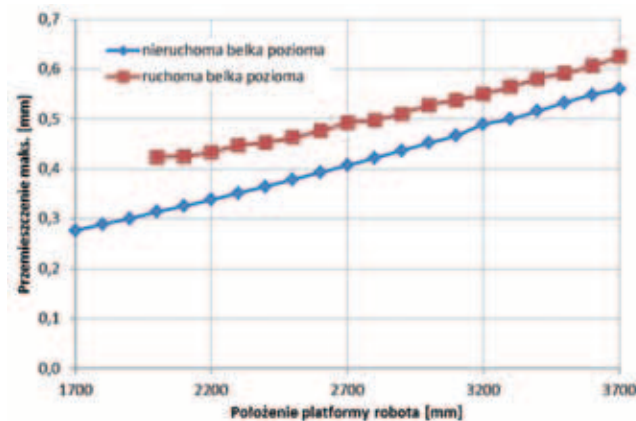
Na rysunku 10 przedstawiono wykresy obrazujące rozkład maksymalnego przemieszczenia (ugięcia) pionowego końca poziomej belki o długości 2 m, zarejestrowane w miejscu zamocowania robota o masie 300 kg. Przemieszczenia wyznaczono w modelach z nieruchomą (przestawianą ręcznie) i ruchomą (napędzaną przez liniowy moduł napędowy, jak na rys. 4) belką poziomą, wyliczając je w funkcji jej położenia względem pionowego słupa o wysokości 4,1 m. Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że przemieszczenie zmienia się niemal liniowo ze wzrostem położenia platformy mocującej robot. Wartości te są wyższe dla wysięgnika z napędzanym

stopniem swobody (zamontowanym modułem ruchu liniowego), a wynikać to może m.in. z większego stopnia złożoności takiego rozwiązania konstrukcyjnego w porównaniu z wariantem nieruchomej belki poziomej. Duży wpływ na wielkość ugięcia konstrukcji słupa z belką poziomą, na której zamocowany jest robot przemysłowy, ma masa samego robota. W analizie przyjęto, że wynosi ona 300 kg, ale w zależności od konstrukcji i rodzaju robota może być ona większa lub mniejsza, co wpłynie na wielkość powstających przemieszczeń (ugięć), zwłaszcza pionowych. Przykładowo, obniżenie masy robota o 100 kg spowoduje zmniejszenie maksymalnego wygięcia belki poziomej z robotem o ok. 24% w całym zakresie położenia belki poziomej zarówno w układzie stacjonarnym, jak i w układzie niestacjonarnym (rys. 11).



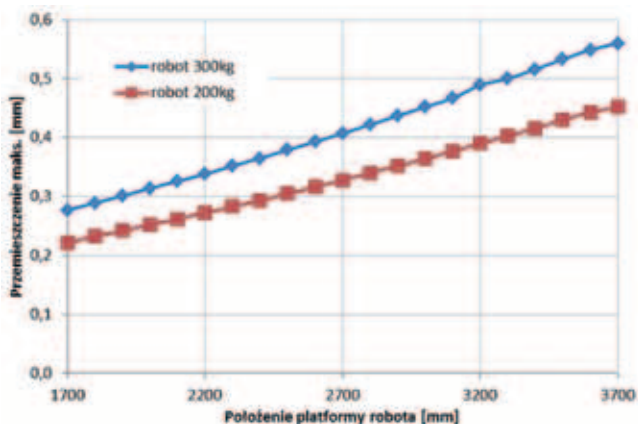
Rys. 9. Porównanie deformacji słupa z poziomym wysięgnikiem w przypadku zamocowania poziomej belki: a) w sposób stacjonarny, b) w sposób niestacjonarny [10]

Fig. 9. The comparison of deformation of the column and horizontal boom in the case the boom is attached: a) in a stationary b) in a non-stationary manner [10]



Rys. 10. Rozkład maksymalnego przemieszczenia końca poziomej belki wyznaczone w modelach z nieruchomą (ręcznie przestawianą) i ruchomą (napędzaną) belką poziomą w funkcji wysokości, na jakiej się znajduje względem pionowego słupa (obciążenie 300 kg) [3]

Fig. 10. The distribution of the maximum displacement of the end of the horizontal beam set on models with fixed (manually adjustable) and mobile (driven) horizontal beam as a function of the height at which it is located relative to the vertical column (loaded with 300 kg robot) [3]



Rys. 11. Rozkład maksymalnego przemieszczenia końca poziomej belki wyznaczone w modelu stacjonarnym z nieruchomą (ręcznie przestawianą) belką poziomą w funkcji wysokości położenia belki dla robota o masie 300 i 200 kg

Fig. 11. The distribution of the maximum displacement of the end of the horizontal beams set in a stationary model with a fixed (manually adjustable) horizontal beam as a function of the height of the beam for a robot with a mass of 300 kg and 200 kg

Budowa modeli, prototypów i wdrożenie

Opracowane modele obliczeniowe MES, a następnie fizyczne modele konstrukcyjne wybranych modułów, stały się punktem wyjścia do wstępnych badań. Dopiero po uzyskaniu pozytywnych rezultatów, możliwe było stworzenie projektu najkorzystniejszego, zarówno pod względem konstrukcyjnym, jak i użytkowym, a następnie przejście do fazy prototypów o docelowych parametrach przyjętych dla wdrożenia.

Pierwszym krokiem była budowa i badania fizycznych



Rys. 12. Konfiguracja statyczna prototypów podczas badań i weryfikacji
Fig. 12. The static configuration of prototypes during testing and verification

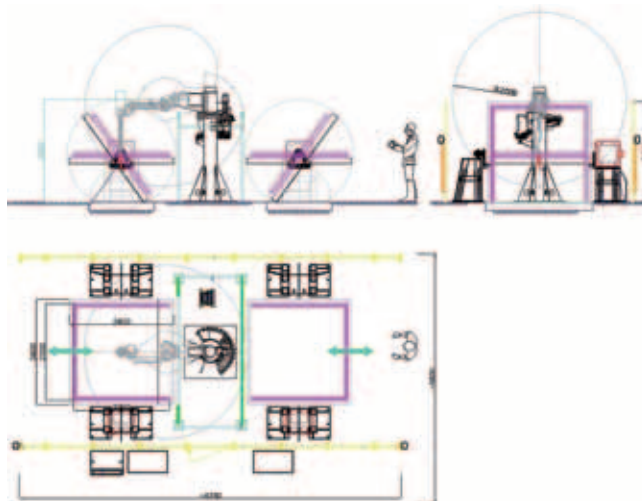
modeli doświadczalnych, obejmujących większość modułów projektowanego systemu, jednak o obniżonych parametrach technicznych (nośność nieprzekraczająca 150 kg) i funkcjonalnych (mniejsza powtarzalność pozycjonowania, tylko moduł ruchomy obrotowy). Pozytywna weryfikacja przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych i funkcjonalnych pozwoliła na opracowanie i budowę prototypów wszystkich modułów systemu, o docelowych parametrach przyjętych dla wdrożenia.

Na rysunku 12 pokazano przykładową konfigurację prototypów podczas badań i weryfikacji. Wdrożony system zaprezentowano potencjalnym użytkownikom, m.in. podczas Międzynarodowych Targów Poznańskich, gdzie spotkał się z dużym zainteresowaniem (rys. 13 i 14).



Rys. 13. Prezentacja wdrożonych wysięgników na Międzynarodowych Targach Poznańskich

Fig. 13. The presentation of deployed booms at Poznan International Fair



Rys. 14. Konfiguracja stanowiska zrobotyzowanego z wysięgnikiem z modułem obrotowym

Fig. 14. The configuration of the robotized installation with a rotary module boom

Podsumowanie

Przedstawiony modułowy system wysięgników powstał na podstawie oryginalnego projektu, zwerifikowany podczas badań modeli i prototypów, opartego na nowoczesnych rozwiązaniach mechanicznych i układach napędowych. Dostosowany został do potrzeb i możliwości potencjalnych, przede wszystkim krajowych użytkowników, zarówno pod względem uniwersalności, jak i konkurencyjnej ceny.

Zastosowane narzędzie obliczeniowe (metoda elementów skończonych) jest bardzo przydatne zwłaszcza do szybkiej i skutecznej analizy porównawczej rozkładu deformacji, sił i naprężeń występujących

w konstrukcjach nowych maszyn i procesów technologicznych [3,4,7,8]. Przeprowadzone obliczenia MES pozwoliły na sprawdzenie wielu istotnych wariantów konstrukcji słupa i belki poziomej, na podstawie których można dokonać modyfikacji konstrukcji już na wstępnym etapie modelowania.

Opracowany system wysięgników umożliwił elastyczne zestawianie zrobotyzowanych stanowisk produkcyjnych i ich efektywne wykorzystywanie. Sprzyja temu otwarta, modułowa architektura, pozwalająca na modyfikacje wysięgnika w dowolnym momencie jego eksploatacji.

Literatura

- [1] Cegielski P.: Robotyzacja. W: Technika spawalnicza w praktyce. Poradnik inżyniera konstruktora i technologa. Red. K. Ferenc. Warszawa, Verlag 2012.
- [2] Cegielski P., Kolasa A., Golański D., Sarnowski T., Oneksiak A.: Innowacyjne rozwiązania konstrukcyjne w przemysłowych urządzeniach do automatyzacji procesów spawalniczych. Przegląd Spawalnictwa 1/2013, s. 30-35.
- [3] Cegielski P., Golański D., Kolasa A., Sarnowski T.: Alternatywne systemy lokomocji robotów przemysłowych. Postępy Robotyki pod red. K. Tchonia i C. Zielińskiego, t. 2, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Elektronika, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2014, s. 569-578.
- [4] Cegielski P., Golański D., Kolasa A., Sarnowski T.: Nowe konstrukcje i metody projektowania zewnętrznych osi do lokomocji robotów przemysłowych. PAR 7-8/2013, s. 90-95.
- [5] Cegielski P., Kolasa A., Sarnowski T.: Pozycjonery i tory jezdne – nowe rozwiązania zewnętrznych osi robotów przemysłowych. Prace Naukowe. Elektronika, z. 166. OW Politechniki Warszawskiej, 2008, s. 357-366.
- [6] Cegielski P., Kolasa A., Sarnowski T., Oneksiak A.: Wdrożenia przemysłowe projektów badawczo-rozwojowych w zakresie mechanizacji i automatyzacji procesów spawalniczych. Przegląd Spawalnictwa 6/2011, s. 53–59.
- [7] Golański D., Cegielski P., Giżyński P., Kolasa A.: Modelowanie numeryczne podstaw robotów przemysłowych. Przegląd Spawalnictwa 6/2014, s. 34-41.
- [8] Kolasa A., Golański D., Cegielski P., Oneksiak A.: Modelowanie numeryczne odkształceń w spawanych blachownicach. Przegląd Spawalnictwa 10/2009, s. 3-8.
- [9] Cook R.D.: Finite element modelling for stress analysis. John Wiley, 1995.
- [10] Stasiuk M.: Wysięgniki do mocowania i manipulacji robotów przemysłowych. Praca dyplomowa magisterska. Kierujący P. Cegielski. PW 2012.

Miesięczne i roczne spisy treści oraz streszczenia artykułów opublikowanych w Przeglądzie Spawalnictwa są dostępne na stronie internetowej:

www.pspaw.pl