

# Prototyp przestrzennego, przesuwnego manipulatora równoległego ze zintegrowanymi osiami elektrohydraulicznymi

Prototype of the spatial translational parallel manipulator with integrated electro-hydraulic axes

RYSZARD DINDORF  
PIOTR WOŚ\*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.5-6.87

Omówiono prototyp hydraulicznego przestrzennego przesuwnego manipulatora równoległego o trzech stopniach swobody, składającego się z nieruchomej podstawy i ruchomej platformy, które są połączone przegubami z trzema zintegrowanymi osiami elektrohydraulicznymi. Zaproponowano model kinematyczny i układ sterowania hydraulicznego manipulatora równoległego umożliwiającą kompensację błędów odtwarzania zadanej (wygenerowanej) trajektorii końcowego punktu ruchomej platformy.

**SŁOWA KLUCZOWE:** manipulator równoległy, osie elektrohydrauliczne

*The paper deals with a prototype of 3-DoF (degrees of freedom) hydraulic spatial translational parallel manipulator. The parallel manipulator consists of a fixed base and a moving platform, which are connected by the joints with three integrated electro-hydraulic axes. Kinematics model and control system of the hydraulic parallel manipulator enabling the errors compensation of the set (generates) trajectory of the end-effector on the moving platform has been proposed.*

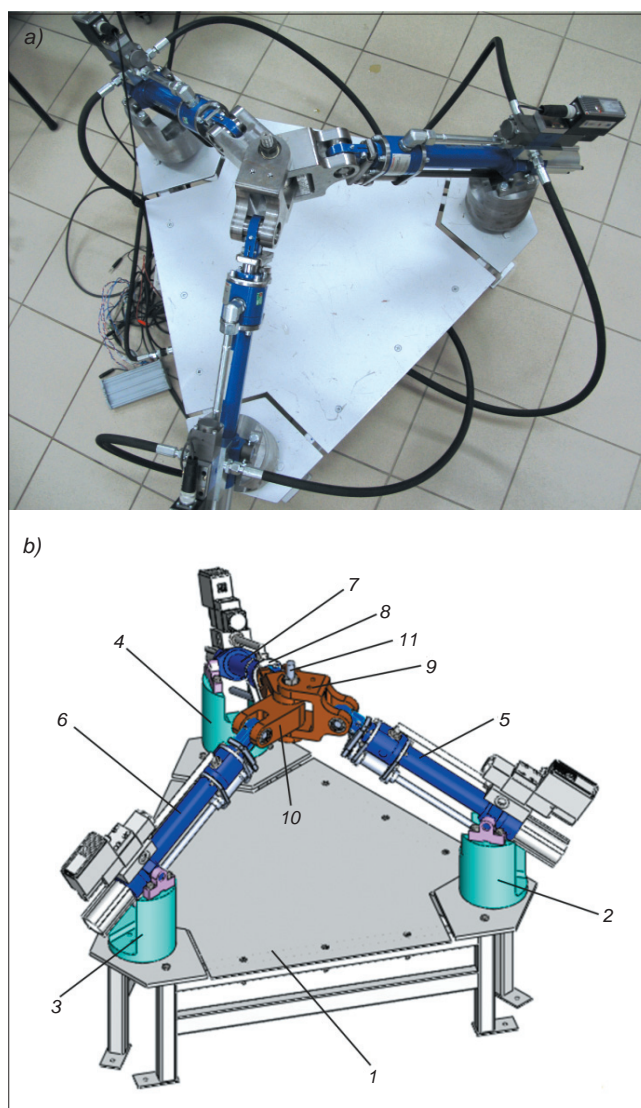
**KEYWORDS:** parallel manipulator, electro-hydraulic axis

Wraz z rozwojem automatyzacji i robotyzacji produkcji rośnie zainteresowanie wieloosiowymi napędami hydraulicznymi w manipulatorach i robotach o równoległej strukturze kinematycznej. Taką strukturę definiuje się jako połączenie platformy roboczej z podstawą za pomocą członów czynnych, które tworzą zamknięte łańcuchy kinematyczne. Platformy oparte na różnych płaskich lub przestrzennych mechanizmach równoległych znajdują zastosowanie m.in. w manipulatorach, robotach, obrabiarkach, teleskopach, maszynach pomiarowych i zawieszaniach pojazdów samochodowych [1, 6, 7].

W Zakładzie Mechatroniki Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach zbudowano prototyp hydraulicznego przestrzennego przesuwnego manipulatora równoległego, składającego się z: nieruchomej podstawy, ruchomej platformy, trzech liniowych, zintegrowanych osi elektrohydraulicznych oraz połączeń przegubowych. Wcześniejsze publikacje poświęcone temu manipulatorowi dotyczyły jego elementów konstrukcyjnych i uproszczonej struktury kinematycznej [2÷4], a także oceny błędów trajektorii końcowego punktu ruchomej platformy manipulatora [5]. W tym artykule opisano ogólny model kinematyczny manipulatora o sześciu stopniach swobody oraz schemat stanowiska badawczego i systemu sterowania umożliwiającą kompensację błędów pozycjonowania i synchronizację ruchu osi elektrohydraulicznych.

Widok z góry i model bryłowy prototypu przestrzennego przesuwnego manipulatora równoległego ze zintegrowanymi osiami elektrohydraulicznymi pokazano na rys. 1.

Zintegrowane osie elektrohydrauliczne zostały osadzone na wałkach obrotowych umieszczonych w podporach (oznaczonych jako 2÷4), rozstawionych co 120° na podstawie 1. Podstawy siłowników wykonano w postaci tulei z osadzonymi dwoma łożyskami ślizgowymi. Tuleje przykręcono do podstawy na obwodzie o promieniu  $R = 250$  mm. Tłoczyska siłowników (oznaczonych jako

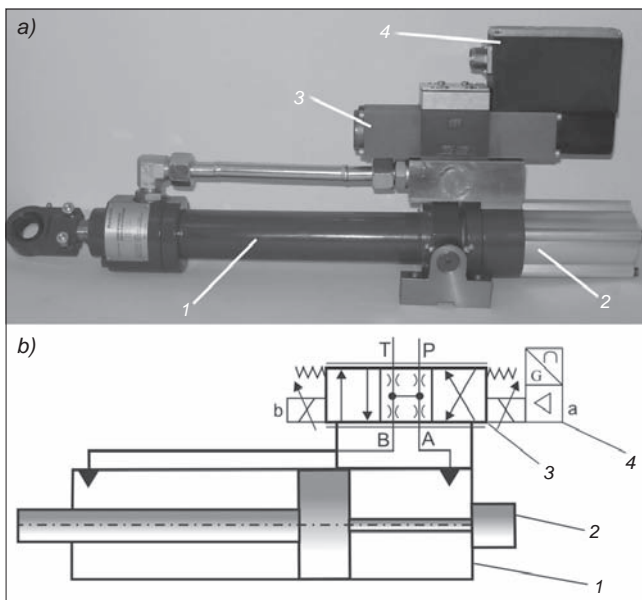


Rys. 1. Hydrauliczny manipulator równoległy (a) i jego model bryłowy (b): 1 – podstawa, 2÷4 – obrotowe podpory siłowników, 5÷7 – siłowniki hydrauliczne, 8÷10 – złącza przegubowe platformy, 11 – szworzeń główny

\* Prof. dr hab. inż. Ryszard Dindorf (dindorf@tu.kielce.pl), dr inż. Piotr Woś (wos@tu.kielce.pl) – Zakład Urządzeń Mechatronicznych, Katedra Technologii Mechanicznej i Metrologii, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej

5÷7) połączone przegubami obrotowymi (8÷10) na obwodzie o promieniu  $r = 130$  mm. Przeguby osadzone na wspólnym sworzniu (11).

W przestrzennym manipulatorze równoległym zastosowano trzy jednakowe zintegrowane osie elektrohydrauliczne (*integrated electro-hydraulic axis*) firmy Bosch Rexroth, które wraz ze schematem hydraulicznym przedstawiono na rys. 2. Pojedyncza zintegrowana os elektrohydrauliczna składa się z siłownika hydraulicznego typu CS (z wewnętrznym magnetostrykcyjnym systemem pomiaru położenia *Novostrictive*) połączonego z rozdzielaczem proporcjonalnym 4/3 i regulatorem typu 4WRSE. Parametry siłowników hydraulicznych typu CS są następujące: średnica tłoka  $D = 40$  mm, średnica tłoczyska  $d = 28$  mm, skok  $h = 220$  mm, nominalne ciśnienie  $p = 160$  bar.



Rys. 2. Zintegrowana os elektrohydrauliczna firmy Bosch Rexroth (a) oraz jej schemat hydrauliczny (b): 1 – siłownik typu CS, 2 – magnetostrykcyjny przetwornik położenia typu TMI, 3 – rozdzielacz proporcjonalny 4/3 typu 4WRSE, 4 – regulator zaworu 4WRSE

Długości osi elektrohydraulicznych (siłowników hydraulicznych z uwzględnieniem ich mocowania w przegubach) jako czynnych członów (elementów napędowych) manipulatora wynoszą:

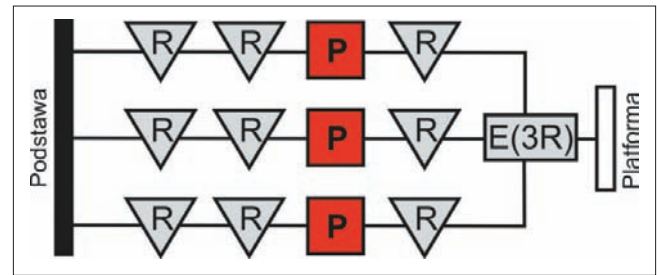
$$L_i = L_{si} + h_i \quad (1)$$

gdzie:  $L_{si}$  – długości siłowników w stanie początkowym przy skrajnym położeniu tłoka, z uwzględnieniem długości mocowania tłoczyska w przegubie obrotowym ( $L_{si} = 425$  mm),  $h_i$  – skok siłowników ( $h_i = 220$  mm).

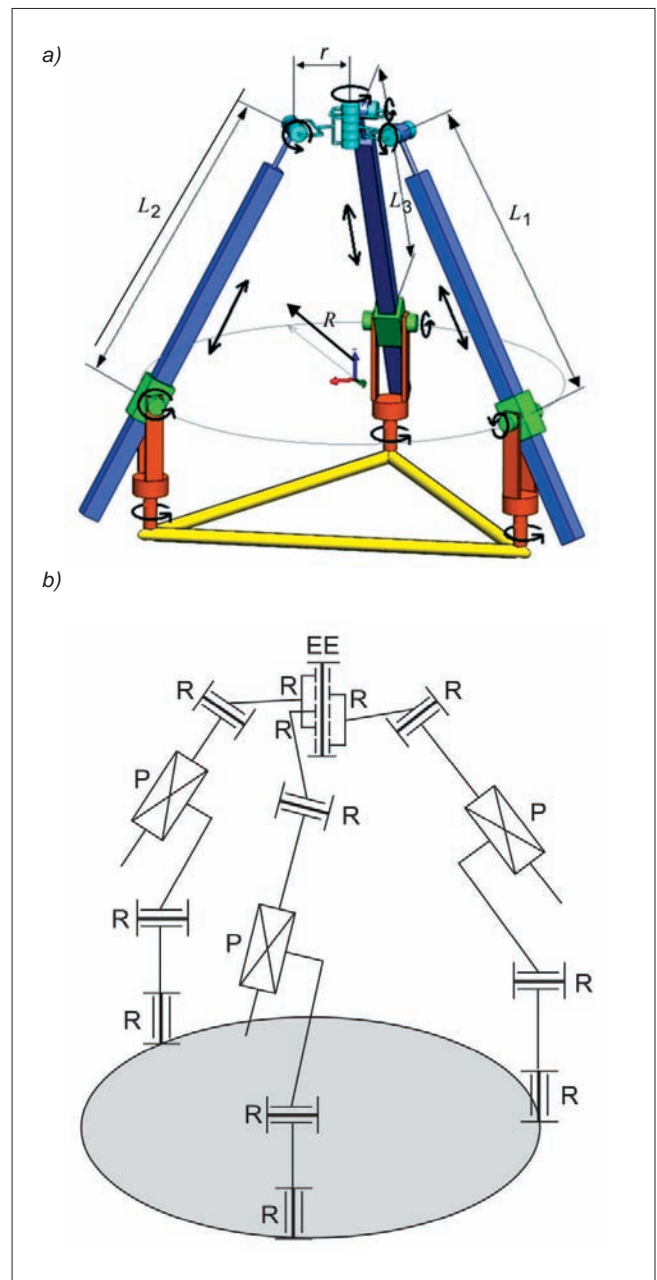
### Struktura i model kinematyczny manipulatora

Trzy zamknięte łańcuchy kinematyczne hydraulicznego przestrzennego przesuwne manipulatora równoległego tworzą strukturę 3-RRPRR przedstawioną na rys. 3. Występują w niej przeguby obrotowe R, przeguby pryzmatyczne P i przegub płaski E(3R). Przeguby obrotowe R służą do połączenia przegubów pryzmatycznych (osi elektrohydraulicznych) z nieruchomą podstawą i ruchomą platformą. Przegub płaski E platformy ruchomej tworzą trzy przeguby obrotowe R połączone na wspólnym sworzniu. Ten trzpień jest jednocześnie punktem końcowym

EE (*end effector*) ruchomej platformy położonej na przegubie E. Model i schemat kinematyczny hydraulicznego manipulatora równoległego o strukturze 3-RRPRR pokazano na rys. 4.



Rys. 3. Schemat struktury kinematycznej hydraulicznego manipulatora równoległego o strukturze 3-RRPRR: R – przeguby obrotowe (członów bierne), P – przeguby pryzmatyczne (członów czynne), E(3R) – przegub płaski (człon bierny)



Rys. 4. Model i schemat kinematyczny hydraulicznego manipulatora równoległego: R – przeguby obrotowe, P – przeguby pryzmatyczne, EE – punkt końcowy

Na podstawie obliczeniowego modelu przestrzennego manipulatora równoległego z trzema osiami elektrohydraulicznymi (rys. 5) określono ogólny model kinematyczny manipulatora równoległego o sześciu stopniach swobody, którego punkt końcowy EE może się przemieszczać wzdłuż i obracać wokół osi kartezjańskiego układu współrzędnych XYZ. Model ten może posłużyć do badania błędów trajektorii (konturu trajektorii) punktu końcowego, wynikających np. z luzów konstrukcyjnych i niedokładności pozycjonowania siłowników hydraulicznych. Ogólny model kinematyczny manipulatora o sześciu stopniach swobody daje się uprościć do modelu kinematycznego manipulatora o trzech stopniach swobody, czyli do analizowanego hydraulicznego manipulatora równoległego przestrzennego przesuwnego, w którym punkt końcowy przemieszcza się tylko wzdłuż osi układu współrzędnych XYZ.

Kąty położenia punktów  $A_i$  na nieruchomej podstawie oraz punktów  $B_i$  na ruchomej platformie opisuje zależność:

$$\theta_i = \frac{2\pi}{3}(i-1), \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

Kąty położenia poszczególnych przegubów w podstawie i platformie wynoszą:  $\theta_1 = 0^\circ$ ,  $\theta_2 = 120^\circ$ ,  $\theta_3 = 240^\circ$ .

Uwaga: w dalszych równaniach macierzowych przyjęto skrócone oznaczenia funkcji trygonometrycznych: c – cosinus, s – sinus.

Współrzędne punktu  $A_i^A$  na podstawie manipulatora:

$$A_i^A = \begin{bmatrix} A_{ix}^A \\ A_{iy}^A \\ A_{iz}^A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \cdot c\theta_i \\ R \cdot s\theta_i \\ 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} A_{ix}^A = R \cdot c\theta_i \\ A_{iy}^A = R \cdot s\theta_i \\ A_{iz}^A = 0 \end{cases} \quad (3)$$

gdzie:  $R$  – promień okręgu opisujący punkty  $A$  podstawy,  $A_i^A$  – współrzędne stałych punktów na podstawie, określone wektorem  $R_i$ :

$$R_i = [R \cdot c\theta_i, R \cdot s\theta_i, 0]^T \quad (4)$$

Po uwzględnieniu wartości kątów  $\theta_i$  współrzędne wektora  $R_i$  są następujące:  $R_1[R, 0]$ ,  $R_2[-0,5R; 0,86R]$ ,  $R_3[-0,5R; -0,86R]$ .

Współrzędne punktu  $B_i^B$  na ruchomej platformie manipulatora:

$$B_i^B = \begin{bmatrix} B_{ix}^B \\ B_{iy}^B \\ B_{iz}^B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cdot c\theta_i \\ r \cdot s\theta_i \\ 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} B_{ix}^B = r \cdot c\theta_i \\ B_{iy}^B = r \cdot s\theta_i \\ B_{iz}^B = 0 \end{cases} \quad (5)$$

gdzie:  $r$  – promień okręgu opisujący punkty  $B$  platformy ruchomej,  $B_i^B$  – współrzędne punktów na ruchomej platformie, określone wektorem  $r_i$ :

$$r_i = [r \cdot c\theta_i, r \cdot s\theta_i, 0]^T \quad (6)$$

Po uwzględnieniu wartości kątów  $\theta_i$  współrzędne wektora  $r_i$  są następujące:  $r_1[r, 0]$ ,  $r_2[-0,5r; 0,86r]$ ,  $r_3[-0,5r; -0,86r]$ .

Położenie punktów  $B_i$  na platformie ruchomej względem nieruchomej podstawy, która wykonuje ruchy prostoliniowe i obrotowe, wyraża się równaniem:

$$\begin{bmatrix} B_i^A \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_B^A & p \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B_i^B \\ 1 \end{bmatrix} = T_B^A \cdot \begin{bmatrix} r_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

W równaniu (7)  $T_B^A$  jest macierzą transformacji, a  $p = \overline{AB}$  – wektorem położenia punktu końcowego (środkowego)  $B$  platformy względem punktu  $A$  na podstawie:

$$T_B^A = \begin{bmatrix} R_B^A & p \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$p = [x_p, y_p, z_p]^T \quad (9)$$

gdzie:  $x_p, y_p, z_p$  – współrzędne punktu końcowego w układzie kartezjańskim XYZ.

Obrót lokalnego układu odniesienia XYZ w układzie globalnym  $X_0 Y_0 Z_0$  można opisać za pomocą macierzy rotacji  $R_B^A$ , z trzema kątami zwanymi RPY (roll-pitch-yaw), pokazanymi na rys. 5, które oznaczają:

- R – kołysanie boczne, kąt obrotu  $\alpha$  wokół osi X,
- P – kołysanie wzdłużne, kąt obrotu  $\beta$  wokół osi Y,
- Y – zbaczanie, kąt obrotu  $\gamma$  wokół osi Z.

Macierz rotacji  $R_B^A$  zapisano następująco:

$$\begin{aligned} R_B^A &= R_{BZ}(\gamma) \cdot R_{BY}(\beta) \cdot R_{BX}(\alpha) = \\ &= \begin{bmatrix} c\gamma & -s\gamma & 0 \\ s\gamma & c\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c\beta & 0 & s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha & -s\alpha \\ 0 & s\alpha & c\alpha \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} c\gamma \cdot c\beta & c\gamma \cdot s\beta \cdot s\alpha - s\gamma \cdot c\alpha & c\gamma \cdot s\beta \cdot c\alpha + s\gamma \cdot s\alpha \\ s\gamma \cdot c\beta & s\gamma \cdot s\beta \cdot s\alpha + c\gamma \cdot c\alpha & s\gamma \cdot s\beta \cdot c\alpha - c\gamma \cdot s\alpha \\ -s\beta & c\beta \cdot s\alpha & c\beta \cdot c\alpha \end{bmatrix} \quad (10) \end{aligned}$$

Równanie (7) w zapisie wektorowym ma postać:

$$B_i^A = p + R_B^A \cdot r_i \quad (11)$$

Zadanie odwrotne kinematyki polega na wyznaczeniu ruchu (przemieszczenia, prędkości i przyspieszenia) osi elektrohydraulicznych (siłowników hydraulicznych) na podstawie danych ruchu (położenia, prędkości i przyspieszenia) punktu końcowego EE na ruchomej platformie.

Wektor członu czynnego (osi elektrohydraulicznej) od przegubu  $A_i^A$  do przegubu  $B_i^A$  wynosi:

$$L_i = B_i^A - A_i^A \quad (12)$$

Po uwzględnieniu zależności (11) i (3):

$$L_i = p + R_B^A \cdot r_i - R_i \quad (13)$$

Graficzną interpretację równania wektorowego (13) przedstawiono na rys. 5.

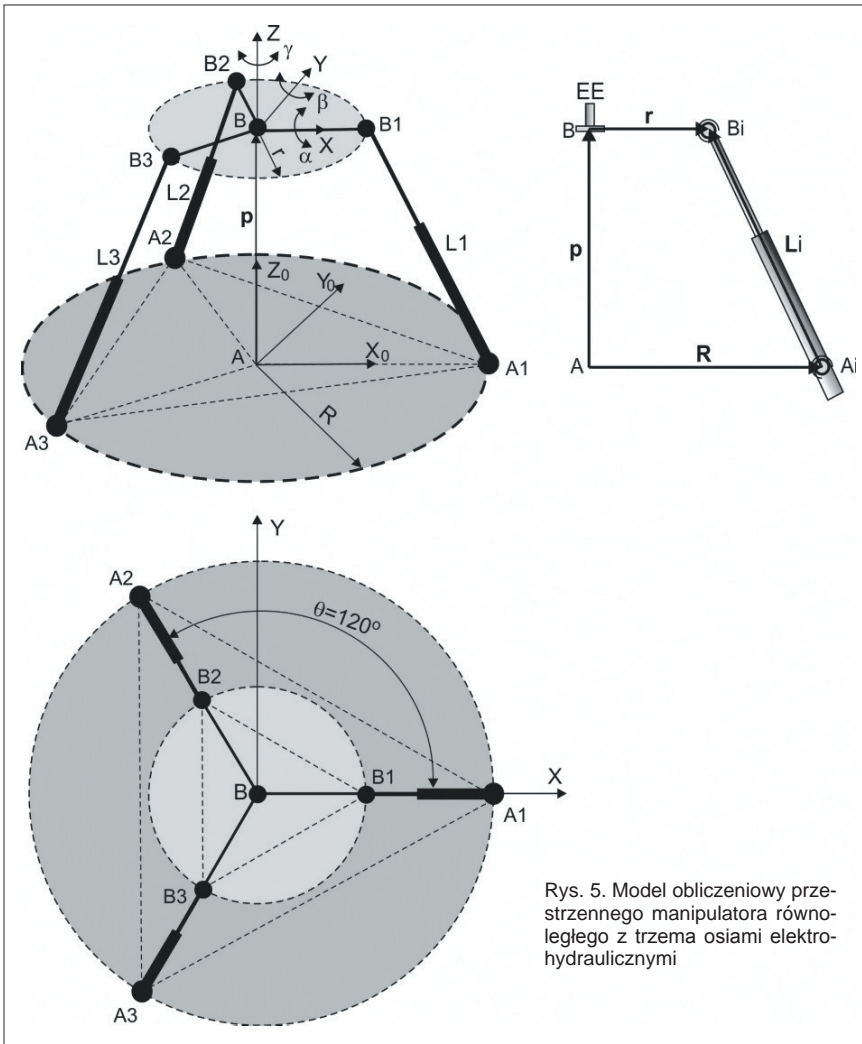
Długości  $L_i$  członów czynnych (osi elektrohydraulicznych) oblicza się ze wzoru:

$$L_i = \sqrt{L_i^T \cdot L_i} \quad (14)$$

Zrózniczkowanie równania (13) po czasie oraz wykorzystanie własności pochodnej rotacji prowadzi do otrzymania zależności:

$$\dot{L}_i = \dot{p} + \dot{R}_B^A \cdot r_i = v + \omega \times R_B^A \cdot r_i \quad (15)$$





Rys. 5. Model obliczeniowy przestrzennego manipulatora równoległego z trzema osiami elektrohydraulicznymi

gdzie  $\dot{\mathbf{p}}$  i  $\boldsymbol{\omega}$  są odpowiednio wektorami prędkości liniowej i kątowej:

$$\dot{\mathbf{p}} = [v_x, v_y, v_z]^T \quad (16)$$

$$\boldsymbol{\omega} = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T \quad (17)$$

Na podstawie zależności (15) określono prędkość członów czynnych (osi elektrohydraulicznych):

$$\dot{L}_i = \mathbf{u}_i^T \cdot \dot{\mathbf{L}}_i = \mathbf{u}_i^T \cdot \mathbf{v} + \mathbf{u}_i^T \cdot \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R}_B^A \cdot \mathbf{r}_i \quad (18)$$

Mechanizm o strukturze równoległej jest mechanizmem zamkniętym, a ograniczenia jego ruchu określa zależność:  $f(\mathbf{L}, \mathbf{q}) = 0$ . Zadanie kinematyki odwrotnej jest następujące:

$$\mathbf{dL} = \mathbf{J} \cdot \mathbf{dq} \quad (19)$$

gdzie:  $\mathbf{L} = [L_1, L_2, L_3]^T$  – wektor przesunięcia osi elektrohydraulicznych,  $\mathbf{q} = [x_p, y_p, z_p, \alpha, \beta, \gamma]^T$  – wektor pozycji i rotacji punktu końcowego,  $\mathbf{J} = \mathbf{J}_L^{-1} \cdot \mathbf{J}_q$  – macierz Jacobiego.

Błąd pozycji i orientacji w układzie kinematyki prostej można zapisać jako:

$$\delta \mathbf{q} = \mathbf{J}^{-1} \cdot \delta \mathbf{L} \quad (20)$$

gdzie wektory  $\delta \mathbf{q} = [\Delta x_p, \Delta y_p, \Delta z_p, \Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \gamma]$  i  $\delta \mathbf{L} = [\Delta L_1, \Delta L_2, \Delta L_3]$  uwzględniają zmiany parametrów kinematycznych manipulatora.

### Sterowanie manipulatorem

W hydraulicznym przestrzennym przesuwym manipulatorze równoległym o strukturze kinematycznej 3-RRPR punkt końcowy EE, leżący na ruchomej platformie, ma trzy stopnie swobody, a więc może się przemieszczać tylko wzdłuż osi współrzędnych kartezjańskich XYZ. Z uwagi na brak możliwości obrotu punktu EE wokół osi XYZ kąty RPY wynoszą:  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\beta = 0^\circ$  i  $\delta = 0^\circ$ , a macierz rotacji (10) przyjmuje postać:

$$\mathbf{R}_B^A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Po uwzględnieniu macierzy rotacji (21) w równaniu (13) otrzymuje się wektor długości członów czynnych:

$$\mathbf{L}_i = \mathbf{p} + \mathbf{r}_i - \mathbf{R}_i \quad (22)$$

Biorąc pod uwagę kinematykę odwrotną hydraulicznego manipulatora równoległego, określoną równaniem (22), ze wzoru (14) wyznaczono zmiany długości  $L_i$

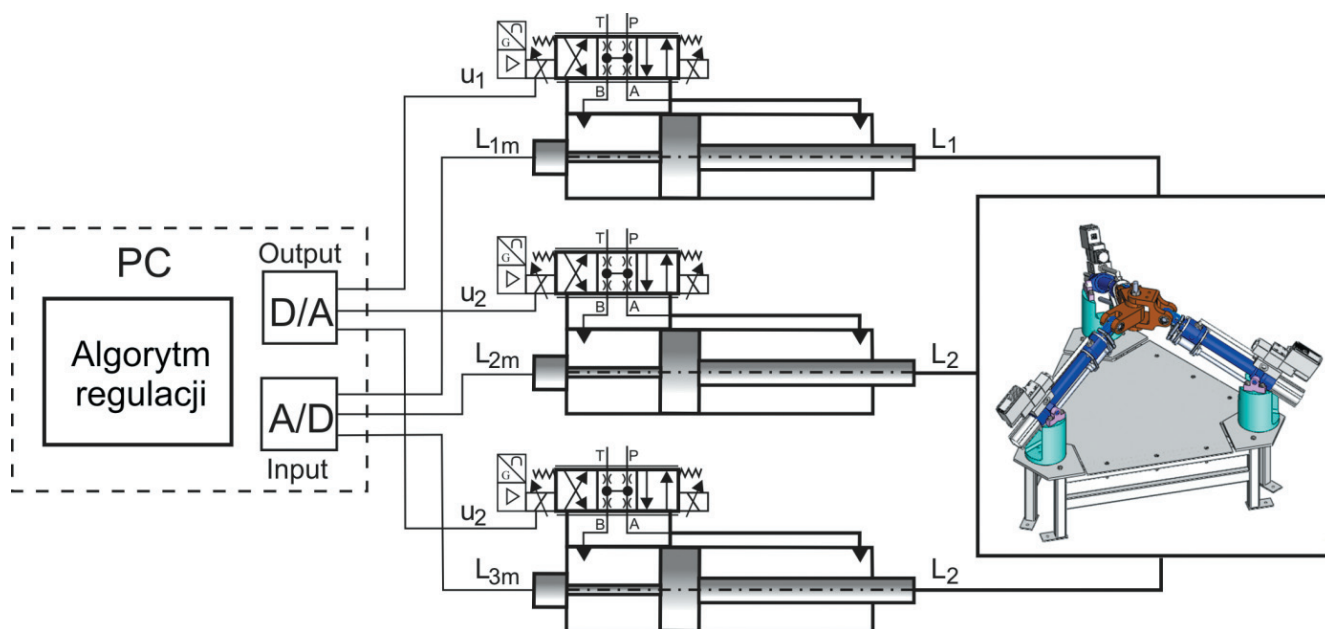
osi elektrohydraulicznych dla zadanej trajektorii punktu końcowego EE. Wektor  $\mathbf{p} (x_p, y_p, z_p)$  w położeniu początkowym punktu końcowego EE ma współrzędne:  $x_p = 0$ ,  $y_p = 0$ ,  $z_p = z_{p0}$ . Dla tego położenia początkowego długości osi elektrohydraulicznych wynoszą:

$$L_i = L_{0i} \pm \Delta L_i \quad (23)$$

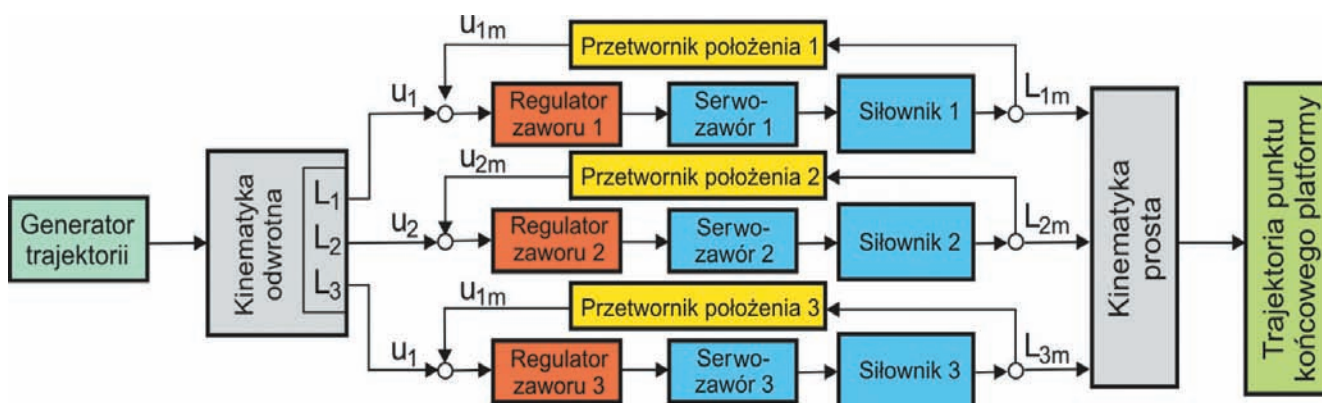
gdzie:  $L_{0i}$  – długości osi elektrohydraulicznych w stanie początkowym, przy początkowym wysunięciu tłoczyska siłownika;  $\Delta L_i$  – zmiana długości osi elektrohydraulicznych, skoki siłowników.

Hydrauliczny przestrzenny przesuwny manipulator równoległy ze zintegrowanymi osiami elektrohydraulicznymi był obiektem badań doświadczalnych wykonanych na stanowisku, którego schemat zamieszczono na rys. 6. Na rys. 7 przedstawiono natomiast schemat blokowy układu sterowania. Nieznajomość błędów pozycjonowania poszczególnych osi elektrohydraulicznych skutkuje np. błędami konturu trajektorii punktu końcowego (ruchomej platformy) manipulatora. Celem badań było stworzenie takiego systemu regulacji manipulatora, który będzie przeciwdziałał tym błędom. Opracowano algorytmy: sterowania konwencjonalnego z regulatorem PID [5], sterowania adaptacyjnego AC (*adaptive control*) [8, 9] oraz sterowania ze sprzężeniem krzyżowym CCC (*cross-coupled control*) [10]. W konwencjonalnych układach sterowania błędy pozycjonowania korygowane są oddzielnie dla każdej osi elektrohydraulicznej.





Rys. 6. Schemat stanowiska badawczego hydraulicznego manipulatora równoległego



Rys. 7. Schemat blokowy układu sterowania hydraulicznego manipulatora równoległego

Przeprowadzono badania dotyczące kompensacji błędów odtwarzania zadanej trajektorii punktu końcowego (ruchomej platformy) hydraulicznego manipulatora równoległego. Zastosowany układ regulacji umożliwiał kompensację błędów pozycjonowania i synchronizacji ruchu osi elektrohydraulicznych. Podczas eksperymentu generowano różne trajektorie punktu końcowego platformy manipulatora. Przykładową trajektorią spiralną o współrzędnych:

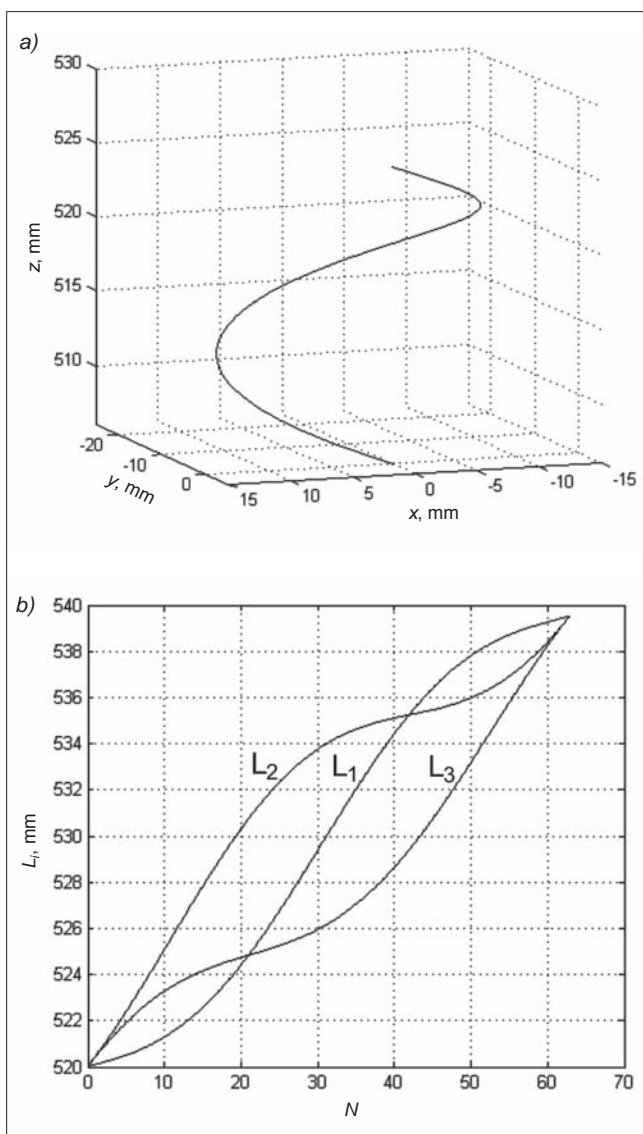
$$\begin{cases} x_p = r \cdot \sin(N/r) \\ y_p = r \cdot \cos(N/r) - r \\ z_p = L_{i0} + [h/(2k\pi r)]N \end{cases} \quad (24)$$

wygenerowano dla parametrów:  $N = 0:0.1:2k\pi r$  (zmienność długości spirali),  $k = 1$  (liczba zwojów),  $r = 10$  mm (promień spirali),  $h = 20$  mm (wysokość spirali),  $L_{i0} = 520$  mm (początkowa długość członu czynnego).

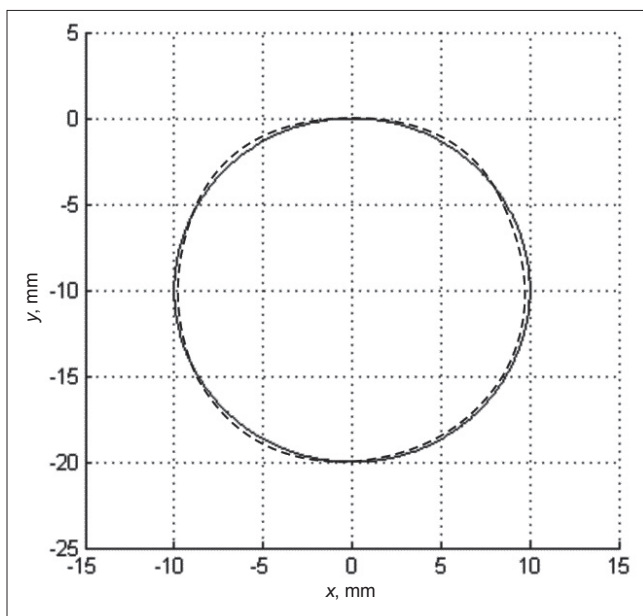
Spiralną trajektorię punktu końcowego ruchomej platformy hydraulicznego przestrzennego przesuwającego manipulatora równoległego oraz zmiany długości osi elektrohydraulicznych pokazano na rys. 8.

Długości osi elektrohydraulicznych (członów czynnych) od stanu początkowego  $L_{oi} = 520$  mm zmieniają w kolejnych krokach przedziału  $N$  wygenerowanej trajektorii spiralnej. Regulacja ze sprzężeniem krzyżowym CCC jest skuteczna w przypadku synchronizacji ruchu osi elektrohydraulicznych, co widać na rys. 8. Rzeczywistą trajektorię punktu końcowego platformy manipulatora równoległego określono pośrednio, na podstawie pomiaru zmiany długości osi elektrohydraulicznych (skoku siłowników). Dzięki temu można było porównać trajektorię zadaną z trajektorią rzeczywistą w układzie współrzędnych XY (rys. 9). Różnica między tymi trajektoriami jest błędem konturu trajektorii spiralnej. Dalsze badania będą dotyczyły dokładności pozycjonowania z uwzględnieniem tarcia w przegubach kinematycznych.





Rys. 8. Spiralna trajektoria punktu końcowego ruchomej platformy manipulatora równoległego (a) i zmiany długości osi hydraulicznych (b)



Rys. 9. Porównanie (w układzie XY) trajektorii spiralnych: zadanej (linia ciągła) z rzeczywistą (linia przerywana)

## Podsumowanie

W Zakładzie Mechatroniki Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach zbudowano prototyp przestrzennego przesuwne manipulatora równoległego o trzech stopniach swobody. Hydrauliczny manipulator równoległy składa się ze stałej podstawy i ruchomej platformy, które są połączone przegubami z trzema liniowymi osiami elektrohydraulicznymi. Trzy zamknięte łańcuchy kinematyczne manipulatora tworzą strukturę 3-RRPRR – z przegubami obrotowymi R i przegubami pryzmatycznymi P. Przegubami pryzmatycznymi są trzy jednakowe, zintegrowane osie elektrohydrauliczne, złożone z siłowników hydraulicznych zintegrowanych z proporcjonalnymi zaworami rozdzielającymi 4/3 i regulatorami typu 4WRSE. Przedstawiono ogólny model kinematyczny manipulatora równoległego o sześciu stopniach swobody, który można uprościć do badanego hydraulicznego manipulatora przestrzennego przesuwne o trzech stopniach swobody. Zaproponowano model kinematyczny i układ sterowania manipulatora umożliwiający kompensację błędów odtwarzania zadanej trajektorii punktu końcowego. Zastosowane układy regulacji kompensują błędy pozycjonowania i synchronizacji ruchu osi elektrohydraulicznych wynikające z luzów konstrukcyjnych i niedokładności pozycjonowania siłowników hydraulicznych. Przedstawiono przykład dla wygenerowanej spiralnej trajektorii ruchu punktu końcowego.

Podczas kieleckich targów PNEUMATICON 2014 omówiony prototyp hydraulicznego przestrzennego przesuwne manipulatora równoległego o trzech stopniach swobody został wyróżniony za innowacyjne rozwiązanie.

## LITERATURA

- diGregorio R., Parenti-Castelli V. "A translational 3-DoF parallel manipulator". In: Lenarčič J., Husty M.L. (eds.): "Advances in Robot Kinematics: Analysis and Control". Springer Verlag, 1998: pp. 49÷58.
- Dindorf R., Woś P. „Konstrukcja i kinematyka hydraulicznego translacyjnego manipulatora równoległego o trzech stopniach swobody”. *Hydraulika i Pneumatyka*. Nr 5 (2013): s. 5÷9.
- Dindorf R., Woś P. „Struktura kinematyczna hydraulicznego manipulatora równoległego o trzech stopniach swobody”. „*Monografia: Biblioteka CYLINDER*”. Gliwice: KOMAG 2013, s. 327÷341.
- Dindorf R., Woś P. „Kinematyka translacyjnego manipulatora równoległego o trzech stopniach swobody”. *Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej. Budowa i Eksploatacja Maszyn*. Nr 18 (2014): s. 36÷43.
- Dindorf R., Woś P. "Contour error of the 3-DoF hydraulic translational parallel manipulator". *Advanced Materials Research*. Vol. 874, No. 57 (2014): pp. 57÷62. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.874.57.
- Merlet J.P. "Les robots paralleles". 2e edition. Paris: Hermes, 1997.
- Tsai L.-W. "Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators". New York: John Wiley & Sons, 1999.
- Woś P., Dindorf R. "Adaptive control of a parallel manipulator driven by electro-hydraulic cylinders". *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*. Vol. 17, No. 3, 2012.
- Woś P., Dindorf R. "Adaptive control of the electro-hydraulic servo-system with external disturbances". *Asian Journal of Control*. No. 15 (2013): pp. 1065÷1080. DOI: 10.1002/asjc.602.
- Woś P., Dindorf R. "Synchronized Trajectory Tracking Control of 3-DoF Hydraulic Translational Parallel Manipulator". In: Awrejcewicz J. et al. (eds.), "MECHATRONICS: Ideas for Industrial Applications, Advances in Intelligent Systems and Computing 413". Springer Verlag, 2015: pp. 269÷277. DOI: 10.1007/978-3-319-10990-9\_24. ■