

Zbigniew BUDNIAK

POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY
75-620 Koszalin, ul. Raławicka 15-17

Modelowanie i analizy układów montażowych za pomocą systemów CAD/CAE

Dr inż. Zbigniew BUDNIAK

Studiował na Wydziale Technologicznym Moskiewskiego Instytutu Obrabiarkowo-Narzędziowego Stankin w Rosji. Pracę doktorską obronił na tej samej uczelni w 1983r. Zainteresowania naukowe dotyczą automatyzacji montażu, modelowania i analiz przestrzennych mechanizmów maszyn, zautomatyzowanych systemów wspomagania procesu projektowania konstrukcji maszynowych oraz obróbki ubytkowej modelami specjalnych narzędzi ściernych.



e-mail: zbigniew.budniak@tu.koszalin.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono nową koncepcję tworzenia i badania układów montażowych za pomocą nowoczesnych systemów komputerowego wspomagania projektowania CAD i obliczeń inżynierskich CAE. Prezentowana metodyka została zilustrowana na przykładzie układu montażowego do łączenia części o powierzchniach obrotowych pasowanych z luzem dodatnim. Wirtualny układ montażowy zbudowano w oparciu o geometrię konstruktywną systemu CAD zgodnie z opracowanym przestrzennym łańcuchem wymiarowym. Zbudowanie takiego układu pozwala na przeprowadzenie badań symulacyjnych montażu z uwzględnieniem niedokładności wymiarowej i kątowej wykonania jego elementów oraz niedokładności pozycjonowania napędów manipulatora montażowego. W artykule przedstawiono przykładowe wyniki badań symulacyjnych.

Słowa kluczowe: modelowanie, analiza, manipulator montażowy, łańcuch wymiarowy, układ montażowy, CAD/CAE.

Modeling and analysis of assembly systems using CAD/CAE

Abstract

The article presents a new concept of creating and examining assembly systems using modern systems for computer-aided design CAD and CAE engineering calculations. The design and analysis of an assembly system was based on the block diagram shown in Figure 1. The presented methodology is illustrated on the example of an assembly system for connecting parts of the rotating surfaces adjusted with positive play. The developed simulation model, shown in Figures 2-5, allowed to carry out numerical analysis of the assembly system, based on the spatial dimension chain described by formulas (2-16). The results of these analyzes are shown in Figure 6-9. The virtual simulation model of the assembly system using computer technology of CAD/CAE takes into account many of the real assembly parameters (among other things: the accuracy of manufacture of individual parts and components, precision of positioning of motors driving the moving parts of the assembly, etc.). The benefits of the proposed analytical model are enormous, because it allows to create a very careful evaluation of the creation of constructions of technical systems. The presented method can also reduce the financial outlay for the creation of different kinds of prototypes by their total or partial elimination. The presented simulation results illustrate only selected factors affecting the operation of the assembly.

Keywords: modeling, analysis, assembly manipulator, dimension chain, assembly system, CAD/CAE.

1. Wprowadzenie

Postęp w rozwoju zintegrowanych systemów CAD/CAE komputerowego wspomagania projektowania oraz obliczeń i analiz inżynierskich daje konstruktorowi doskonałe narzędzie o niespotykanych dotąd możliwościach do kreowania i analizowania projektowanych maszyn i urządzeń a także całych układów technicznych. Nowoczesne systemy CAD/CAE, posiadające cechy inżynierii wirtualnej [3, 5], pozwalają projektantowi na wykonywanie prac przypominających działania rzeczywiste – operacje wyciągania

i zaginania wyrobów wykonanych z blachy, spawanie konstrukcji stalowych, montaż części maszyn na różnych jego etapach, itp. [6].

Zagadnienia związane ze specyfiką modelowania i analiz kinematycznych układów technicznych przedstawiono w pracach [1, 2]. Opracowanie konstrukcji modelu fizycznego wymaga przeprowadzenia wielu prac projektowo-konstrukcyjnych i wymusza opracowanie nowej metodyki prowadzenia tych prac. Na rys. 1 przedstawiono schemat blokowy komputerowego wspomagania projektowania i analizy układów montażowych. Zapropionowana metodyka pozwala na budowanie tych układów z użyciem m.in. przestrzennych łańcuchów wymiarowych.



Rys. 1. Schemat komputerowego wspomagania projektowania i analizy układów montażowych

Fig. 1. Diagram of computer-aided design and analysis of assembly systems

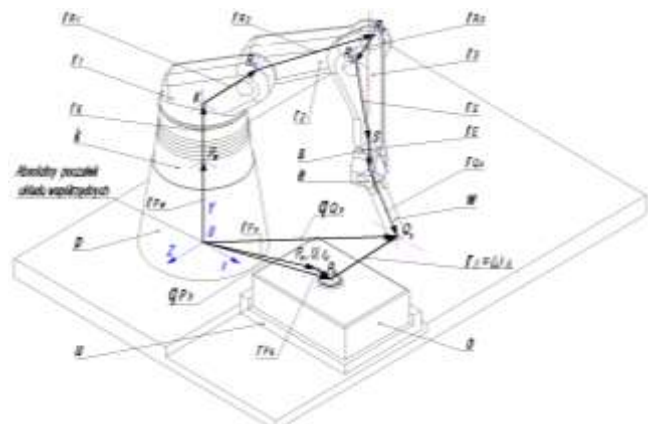
Bardzo istotnym punktem prezentowanej pracy było sprawdzenie poprawności opracowanego modelu przestrzennego układu montażowego, opracowanie modeli parametrycznych części i złożenia, przeprowadzenie analizy kolizji elementów mechanizmu w ruchu, modyfikacji konstrukcji w celu uniknięcia kolizji oraz jej wizualizacji w tym animacji. Do modelowania bryłowego mechanizmu zastosowano oprogramowanie SolidWorks, natomiast obliczenia i analizy kinematyczne przeprowadzono za pomocą programu SolidWorks Motion [4]. Tego typu zintegrowany system CAD/CAE urzeczywistnia ideę modelowania wirtualnego układów fizycznych i zmniejsza liczbę prototypów nowej konstrukcji.

Szczególną uwagę należy przy tym zwrócić na możliwość przeprowadzenia analizy dokładności wzajemnego położenia elementów układu montażowego w oparciu o przestrzenne łańcuchy wymiarowe, mające kluczowe znaczenie w ich projektowaniu. Wykorzystanie przestrzennych łańcuchów wymiarowych, zapisanych jako modele w systemach CAD, pozwala na weryfikację koncepcyjnego projektu przestrzennego układu montażowego oraz analizę: 1) wzajemnego położenia łączonych elementów w procesie technologicznym montażu, 2) dokładności wymiarowo-kształtowej elementów składowych układu montażowego, 3) luzów połączeń ruchomych.

2. Przestrzenny łańcuch wymiarowy układu montażowego

Przeprowadzono analizę przestrzennego układu montażowego (rys. 2) do łączenia części typu wał-tuleja. Układ ten stanowi podstawę zrobotyzowanego gniazda montażowego, składającego

się z manipulatora oraz wyposażenia peryferyjnego. Manipulator montażowy RRRPRR posiada sześć stopni swobody, pięć par obrotowych oraz jedną postępową.



Rys. 2. Położenie elementów układu montażowego
Fig. 2. Location of the assembly system components

W celu zapewnienia względnego położenia osi łączonych elementów, punktów Q_s i P_h z określoną dokładnością, należy przede wszystkim określić wzajemne położenie elementów układu montażowego. Wartość ogniwa zamykającego r_d , określająca błąd wzajemnej lokalizacji punktów węzłowych Q_s i P_h , zależy od dokładności względnego położenia ramion manipulatora montażowego (r_1, r_2 i r_3), siłownika s , chwytaka e , podstawy manipulatora k , łączonych elementów w i o , podstawy manipulatora p . Określenie wartości ogniwa zamykającego, którym jest wektor $r_d = \omega_\Delta$, oparto na rozwiązaniu przestrzennego łańcucha wymiarowego układu przedstawionego na rys. 2.

W ogólnym przypadku wartość ogniwa zamykającego $r_d = \omega_\Delta$, przestrzennego łańcucha wymiarowego układu montażowego, oblicza się z wzoru (1):

$$\omega_\Delta = \vec{r}_\Delta = \vec{q}_{Q_s} - \vec{q}_{P_h} = \vec{r}_{P_w} + \vec{r}_K + \vec{r}_{R_1} + \vec{r}_{R_2} + \vec{r}_{R_3} + \vec{r}_S + \vec{r}_E + \vec{r}_{Q_s} - \vec{r}_{P_o} - \vec{r}_e - \vec{r}_{P_h} \quad (1)$$

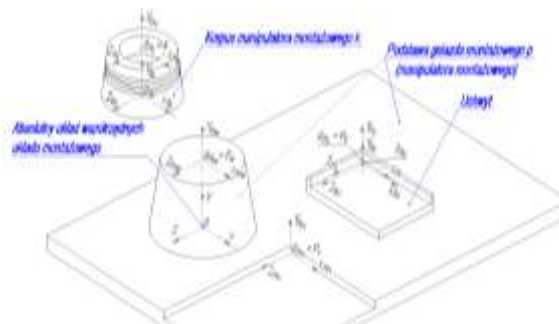
gdzie: q_{Q_s} – wektor określający położenie punktu Q_s , przynależnego do wałka, względem globalnego układu współrzędnych $OXYZ$, q_{P_h} – wektor określający położenie punktu P_h , przynależnego do tulei, względem globalnego układu współrzędnych $OXYZ$, $\vec{r}_{P_w}, \vec{r}_{P_o}$ – wektor określający położenie punktów węzłowych P_w i P_o względem globalnego układu współrzędnych $OXYZ$, $r_K, r_{R_1}, r_{R_2}, r_{R_3}, r_S, r_E, r_{Q_s}, r_{P_h}$ – wektory określające położenie punktów węzłowych $K, R_1, R_2, R_3, S, E, Q_s, P_h$ należących do poszczególnych elementów składowych układu montażowego względem ich lokalnych układów współrzędnych.

Konfigurację układu montażowego można rozpatrywać jako opis względnego położenia lokalnych układów współrzędnych, związanych z poszczególnymi ogniwami łańcucha wymiarowego, przy czym podstawie przypisuje się układ globalny $OXYZ$ (rys. 2). Takie podejście do opisu tego układu montażowego dobrze porządkuje i formalizuje jego modelowanie zarówno w zakresie kinematyki, jak i dynamiki.

W każdej chwili ruchome elementy układu montażowego zajmują określone położenie względem podstawy, jak również względem siebie. Podczas analizy położenia tego układu szczególne znaczenie posiada ustalenie względnego położenia punktów Q_s i P_h , dla zadanego położenia pozostałych elementów układu. Widok rozstrzelony na rys. 3 zawiera: główną jednostkę montażową, która stanowi podstawę gniazda montażowego; korpus manipulatora oraz uchwyt do ustalania i zamocowania korpusu z otworem do którego będzie wstawiony wałek. Podstawie przypisano następujące układy współrzędnych prostokątnych:

- $OXYZ$ - absolutny układ współrzędnych związany z nieruchomą podstawą,

- $O_{Pph}X_{Pph}Y_{Pph}Z_{Pph}$ - lokalny układ współrzędnych stanowiący pomocniczą bazę montażową do ustalenia położenia uchwytu,
- $O_{PQs}X_{PQs}Y_{PQs}Z_{PQs}$ - lokalny układ współrzędnych stanowiący pomocniczą bazę montażową do ustalenia położenia korpusu manipulatora montażowego.



Rys. 3. Widok rozstrzelony podstawy gniazda montażowego, korpusu manipulatora i uchwytu

Fig. 3. View of the base of the assembly socket, the body of the manipulator and the handle

Wektor położenia punktu $O_{PK} = T_K$, będącego jednocześnie początkiem lokalnego układu współrzędnych $O_{PK} X_{PK} Y_{PK} Z_{PK}$ pomocniczej bazy montażowej, w lokalnym układzie współrzędnych $O_{BK} X_{BK} Y_{BK} Z_{BK}$ wynosi:

$$O_{PK} = T_K = \begin{bmatrix} x_{PK} \\ y_{PK} \\ z_{PK} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ l_K \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

gdzie: l_K – wysokość korpusu manipulatora montażowego.

Podczas łączenia korpusu manipulatora montażowego z jego postawą przyjęto, że lokalny układ współrzędnych $O_{PPw}X_{PPw}Y_{PPw}Z_{PPw}$, będący jednocześnie pomocniczą bazą montażową, pokrywa się z lokalnym układem $O_{BK}X_{BK}Y_{BK}Z_{BK}$ stanowiącym główną bazę do ustalenia położenia korpusu. Wektor położenia $O_{PK} = K$, określający położenie początku lokalnego układu współrzędnych $O_{PK} X_{PK} Y_{PK} Z_{PK}$, stanowiącego bazę pomocniczą do ustalenia położenia ramienia r_1 manipulatora, w nieruchomym układzie współrzędnych $OXYZ$, może być otrzymany przez pomnożenie go przez macierze rotacji lokalnego układu współrzędnych $O_{PPw}X_{PPw}Y_{PPw}Z_{PPw}$. Są to kolejno macierze: obrotu wokół osi X_{PPw} o kąt α_{Pw} , obrotu wokół osi Z_{PPw} o kąt γ_{Pw} i obrotu osi Y_{PPw} o kąt β_{Pw} . Transformacje te można zapisać następująco:

$$O_K = K = R_{Pw} T_{PK} + T_{Pw} = \begin{bmatrix} c\alpha_{Pw} & 0 & s\alpha_{Pw} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\alpha_{Pw} & 0 & c\alpha_{Pw} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\gamma_{Pw} & -s\gamma_{Pw} \\ 0 & s\gamma_{Pw} & c\gamma_{Pw} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\beta_{Pw} & -s\beta_{Pw} & 0 \\ s\beta_{Pw} & c\beta_{Pw} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{PK} \\ y_{PK} \\ z_{PK} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{Pw} \\ y_{Pw} \\ z_{Pw} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Analogicznie wektor położenia punktu $O_{PU} = T_U$, będący jednocześnie początkiem lokalnego układu współrzędnych $O_{PU} X_{PU} Y_{PU} Z_{PU}$ pomocniczej bazy montażowej, w lokalnym układzie współrzędnych $O_{BU}X_{BU}Y_{BU}Z_{BU}$ wynosi:

$$O_{PU} = T_U = \begin{bmatrix} x_{PU} \\ y_{PU} \\ z_{PU} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Podczas łączenia uchwytu z postawą układu montażowego przyjęto, że lokalny układ współrzędnych $O_{PPh}X_{PPh}Y_{PPh}Z_{PPh}$,

będący jednocześnie pomocniczą bazą montażową, pokrywa się lokalnym z układem $O_{BU}X_{BU}Y_{BU}Z_{BU}$ stanowiącym główną bazę montażową ustalenia położenia korpusu z otworem, do którego będzie wstawiany wałek. Wektor położenia $O_{Pu} = U$, określający położenie lokalnego układu współrzędnych $O_{PU}X_{PU}Y_{PU}Z_{PU}$ stanowiący bazę pomocniczą do ustalenia położenia korpusu z otworem do którego będzie wstawiany wałek, w nieruchomym układzie współrzędnych $OXYZ$, może być otrzymany przez pomnożenie go przez macierze rotacji lokalnego układu współrzędnych $O_{PP_o}X_{PP_o}Y_{PP_o}Z_{PP_o}$. Są to kolejno macierze: obrotu wokół osi X_{PP_o} o kąt α_{p_o} , obrotu wokół osi Z_{PP_o} o kąt γ_{p_o} i obrotu osi Y_{PP_o} o kąt β_{p_o} . Transformacje te można zapisać następująco:

$$O_U = U = R_{P_o} \cdot T_{P_o} + T_{P_o} = \begin{bmatrix} c\alpha_{p_o} & 0 & s\alpha_{p_o} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\alpha_{p_o} & 0 & c\alpha_{p_o} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\gamma_{p_o} & -s\gamma_{p_o} \\ 0 & s\gamma_{p_o} & c\gamma_{p_o} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\beta_{p_o} & -s\beta_{p_o} & 0 \\ s\beta_{p_o} & c\beta_{p_o} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{P_o} \\ y_{P_o} \\ z_{P_o} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{P_o} \\ y_{P_o} \\ z_{P_o} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Postępując zgodnie z przedstawionymi wzorami (2), (3), (4) i (5) obliczono położenie pozostałych punktów węzłowych układu montażowego. W części układu montażowego (podstawa, korpus manipulatora montażowego, ramiona manipulatora montażowego r_1, r_2, r_3 , siłownika, efektora oraz wałka) obrano punkt Q_s , którego położenie w lokalnym układzie współrzędnych $O_{BQ_s}X_{BQ_s}Y_{BQ_s}Z_{BQ_s}$ określono jako wektor Q_{SE} . W szczególnym przypadku położenie środka wałka o długości równej l_o , na jego powierzchni czołowej, oblicza się:

$$Q_{SE} = \begin{bmatrix} 0 \\ -l_o \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Ten sam punkt jest opisany wektorem Q_s , określającym jego położenie w układzie absolutnym $OXYZ$:

$$Q_s = R_{P_w} \cdot Q_{SP_w} + T_{P_w} \quad (7)$$

gdzie:

$$Q_{SP_w} = R_K \cdot Q_{SK} + T_K \quad (8)$$

$$Q_{SK} = R_{R_1} \cdot Q_{SR_1} + T_{R_1} \quad (9)$$

$$Q_{SR_1} = R_{R_2} \cdot Q_{SR_2} + T_{R_2} \quad (10)$$

$$Q_{SR_2} = R_{R_3} \cdot Q_{SR_3} + T_{R_3} \quad (11)$$

$$Q_{SR_3} = R_S \cdot Q_{SS} + T_S \quad (12)$$

$$Q_{SS} = R_E \cdot Q_{SE} + T_E \quad (13)$$

$R_K, R_{R_1}, R_{R_2}, R_{R_3}, R_S, R_E$ - macierze rotacji określające obrót lokalnych układów współrzędnych, których początki znajdują się w punktach $K, R_1, R_2, R_3, S i E$, wokół ich osi;

$T_K, T_{R_1}, T_{R_2}, T_{R_3}, T_S, T_E$ - wektory opisujące przemieszczenia lokalnych układów współrzędnych, których początki znajdują się odpowiednio w punktach $K, R_1, R_2, R_3, S i E$.

Macierz rotacji R_{P_w} oraz wektor T_{P_w} stanowią składowe wzoru (3).

W części układu montażowego (podstawa, uchwyt oraz korpusu z otworem do którego jest wstawiany wałek) obrano punkt P_h , którego położenie w lokalnym układzie współrzędnych $O_{BU}X_{BU}Y_{BU}Z_{BU}$, określono jako wektor P_{hU} :

$$P_{hU} = \begin{bmatrix} X_{B_U} \\ Y_{B_U} \\ Z_{B_U} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Ten sam punkt jest opisany wektorem p_h określającym jego położenie w układzie absolutnym $OXYZ$:

$$P_h = R_{P_o} \cdot P_{hP_o} + T_{P_o} \quad (15)$$

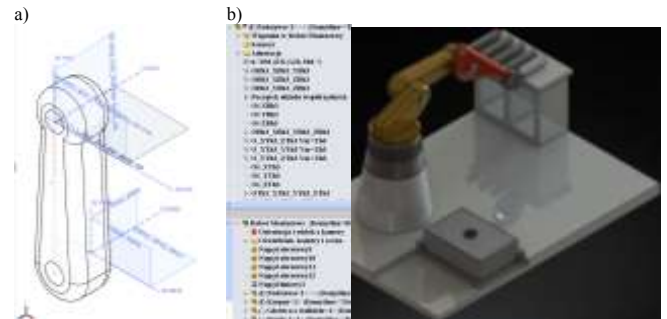
gdzie:

$$P_{hP_o} = R_U \cdot P_{hU} + T_U \quad (16)$$

R_{P_o} - macierz rotacji określająca obrót lokalnego układu współrzędnych, którego początek znajduje się w punkcie P_o , wokół jego osi, T_{P_o} - wektor (translacja) opisujący przemieszczenia lokalnego układu współrzędnych, którego początek znajduje się w punkcie P_o . Macierz rotacji R_{P_o} oraz wektor T_{P_o} stanowią składowe z wzoru (5).

3. Modelowanie wirtualnego modelu układu montażowego

Pierwszym etapem budowania wirtualnego modelu układu montażowego było utworzenie modeli zawierających konstruktywną geometrię poszczególnych jego części. Geometrię tą tworzą płaszczyzny, osie oraz punkty konstrukcyjne, a także początki lokalnych układów współrzędnych. Parametry geometrii konstruktywnej, określającej położenia lokalnych układów współrzędnych, ich osi oraz punktów zapisano w postaci zmiennych modelowania. Wartości tych zmiennych odpowiadają elementom macierzy rotacji oraz wektorów opisanych w równaniach (2-16). Na rys. 4a zamieszczono widok ramienia r_1 wraz z elementami geometrii konstruktywnej widocznymi w oknie *FeatureManager* programu *SolidWorks*.



Rys. 4. Widok wirtualnego modelu, a) ramienia manipulatora r_1 , b) gniazda montażowego
Fig. 4. View of the virtual model: a) manipulator arm r_1 , b) assembly socket

Bazując na modelu podstawy układu montażowego zdefiniowano relacje występujące pomiędzy pozostałymi elementami złożenia.

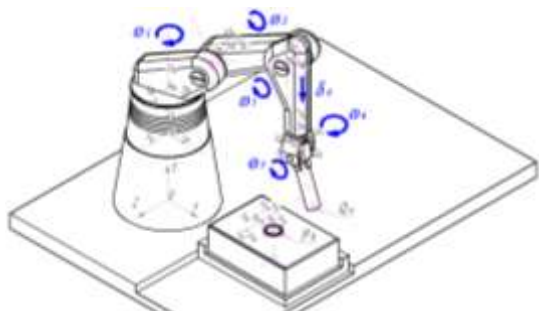
Do jednoznaczного określenia położenia poszczególnych elementów mechanizmu wykorzystano przylegające do siebie bazy montażowe łączonych komponentów. Widok końcowy wirtualnego gniazda montażowego wraz z układem montażowym i jego geometrią konstruktywną, stanowiącą element przestrzennego łańcucha wymiarowego, zawiera rys. 4b.

4. Analiza numeryczna

Analizę numeryczną układu montażowego przeprowadzono w trzech głównych etapach: 1) utworzenie modelu symulacyjnego, 2) przeprowadzenie badań symulacyjnych ruchu, 3) wizualizacja wyników.

Struktura kinematyczna układu montażowego przedstawiona na rys. 5 uwzględnia możliwości ruchowe manipulatora montażowego RRRPRR. Ruchy poszczególnych osi uzyskiwane są za pomocą napędów przekazujących energię kinetyczną mobilnym członom.

Układ kinematyczny manipulatora montażowego umożliwia nadanie efektorowi e , a ściślej mówiąc lokalnemu układowi współrzędnych $O_{BE}X_{BE}Y_{BE}Z_{BE}$ związanemu z chwytakiem, określonego położenia względem globalnego układu współrzędnych odniesienia $OXYZ$, związanego z podstawą układu montażowego.



Rys. 5. Struktura kinematyczna układu montażowego
Fig. 5. Kinematic structure of the assembly system

Położenie układów współrzędnych określono przez opisanie przemieszczeń ich początków i obrotów wokół osi. Na rys. 5 pokazano jeden absolutny układ współrzędnych $OXYZ$ związany z podstawą układu montażowego, sześć lokalnych układów współrzędnych manipulatora montażowego (układy $O_{BK}X_{BK}Y_{BK}Z_{BK}$, $O_{BR_1}X_{BR_1}Y_{BR_1}Z_{BR_1}$, $O_{BR_2}X_{BR_2}Y_{BR_2}Z_{BR_2}$, $O_{BR_3}X_{BR_3}Y_{BR_3}Z_{BR_3}$, $O_{BS}X_{BS}Y_{BS}Z_{BS}$, $O_{BE}X_{BE}Y_{BE}Z_{BE}$ pokrywają się z głównymi bazami montażowymi służącymi do ustalenia położenia korpusu manipulatora k , jego ramion r_1 , r_2 , r_3 , siłownika s oraz chwytaka e) oraz dwa kolejne lokalne układy współrzędnych związane z obiektem manipulacji (układy współrzędnych $O_{BU}X_{BU}Y_{BU}Z_{BU}$, $O_{BO}X_{BO}Y_{BO}Z_{BO}$ pokrywające się z głównymi bazami montażowymi ustalającymi położenie uchwytu montażowego u oraz korpusu o z otworu do którego jest wstawiany wałek w). Układ prostokątny $O_{BK}X_{BK}Y_{BK}Z_{BK}$ jest związany z korpusem manipulatora k i jest podstawowym układem odniesienia manipulatora montażowego.

Cztery stopnie swobody dla zespołu ruchu regionalnego są wystarczające do tego, aby efektor e został przemieszczony do dowolnego punktu strefy obsługowej, którą jest strefa bezpośredniego połączenia wałka w z otworem w korpusie o . Do zespołu ruchu regionalnego dodano jeszcze dwa nadmiarowe stopnie ruchu (dwa ruchy obrotowe chwytaka e – obrót efektora względem osi Y_{BE} i osi Z_{BK}).

Aby określić położenie i orientację manipulatora montażowego w tym chwytaku e wraz z wałkiem w , względem osi otworu w korpusie, do którego jest on wstawiany, należy przyporządkować prostokątne układy współrzędnych ogniom układu montażowego zgodnie z wcześniej przedstawionymi wzorami (2-16). Z punktu widzenia procesu montażowego, najważniejsze jest określenie wzajemnego położenia osi łączonych elementów, czyli wałka w i osi otworu w korpusie o . Stąd w dalszych rozważaniach będzie analizowane położenie i orientacja wałka. Wałek w jest na stałe związany z pomocniczymi bazami montażowymi efektora e , a na jego osi symetrii znajduje się punkt Q_s , którego wektor położenia opisano wzorem (7).

W celu wyznaczenia zależności między współrzędnymi konfiguracyjnymi ($\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \delta_6$) i współrzędnymi bazowymi położenia i orientacji wałka w (Ω_4, Ω_5), wprowadzono tymczasowe wiązania 3D określające pozycję układu montażowego oraz jego elementów w gnieździe montażowym w pozycjach startowej (rys. 4b) oraz końcowej (rys. 5).

Należy zwrócić uwagę, że lokalny układ współrzędnych $O_{BE}X_{BE}Y_{BE}Z_{BE}$ wraz ze wstawianym wałkiem w , jest podstawowym układem zastosowanym do wyznaczenia wzajemnego położenia łączonych elementów. Układ $O_{BR_1}X_{BR_1}Y_{BR_1}Z_{BR_1}$ związany jest z ogniwem r_1 i może tylko się obracać o kąt Ω_1 względem osi Y_{BR_1} . Lokalne układy współrzędnych $O_{BR_2}X_{BR_2}Y_{BR_2}Z_{BR_2}$ i $O_{BR_3}X_{BR_3}Y_{BR_3}Z_{BR_3}$ związane są z ogniwami r_1 i r_2 . Dla tych układów możliwe są względne obroty o kąt Ω_2 względem osi Z_{BR_2} i Ω_3 wokół osi Z_{BR_3} . Układ współrzędnych $O_{BS}X_{BS}Y_{BS}Z_{BS}$ siłownika liniowego s przemieszcza się w kierunku efektora e o wartość δ_4 . Układ współrzędnych $O_{BE}X_{BE}Y_{BE}Z_{BE}$ efektora e

umiejscowiony w centralnej części chwytaka jest wyznaczony przez obroty o kąt Ω_5 względem osi Z_{BE} i Ω_6 wokół osi Y_{BE} .

Wymuszenie względnego ruchu wałka, w celu wykonania symulacji ruchu, uzyskano przez zastosowanie wirtualnych silników wykonujących ruch obrotowy z prędkościami $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ i ω_5 . W położeniu pozycjonowania wałka, uruchomiono silnik liniowy u_4 wymuszający ruch postępowy efektora e .

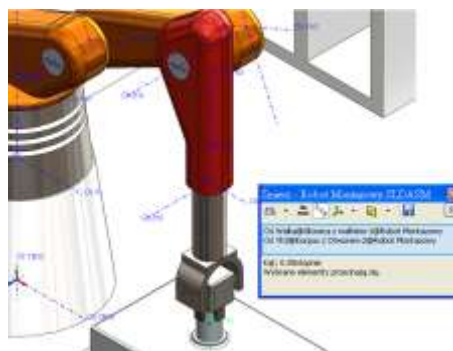
Przyjęte parametry ruchu manipulatora montażowego zawiera tabela 1.

Tab. 1. Parametry ruchu manipulatora montażowego
Tab. 1. Parameters motion of the assembly manipulator

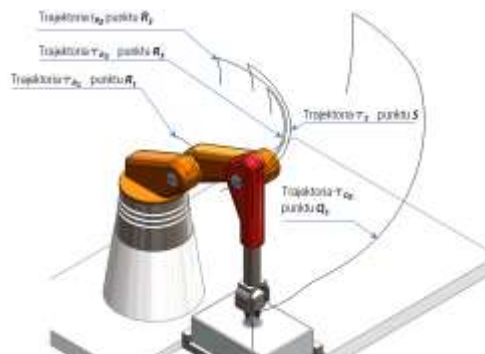
Wirtualny silnik	Prędkość		Przemieszczenie		Czas	
	obrotowa ω [°/s]	liniowa v [m/s]	kątowe Ω [°]	liniowe δ [mm]	rozpoczęcia ruchu [s]	zakończenia ruchu [s]
ω_1	150	-	90,00	-	0	0,600
ω_2	120	-	23,42	-	0	0,195
ω_3	130	-	68,49	-	0,2	0,726
v_4	-	2	-	200	0,7	1,70
ω_5	180	-	44,93	-	0,2	0,449
ω_6	-	-	-	-	-	-

Analizę numeryczną względnego położenia elementów układu montażowego przeprowadzono dla środka wstawianego wałka Q_s względem nieruchomego środka otworu P_h , mierzono przy tym kąt skrzyżowania osi łączonych elementów. Wynik tego badania pokazano na rys. 6.

Przedstawiony wynik badania symulacyjnego (rys. 6) wykazał, że osie łączonych elementów pokrywają się, a więc są współosiowe. Z kolei współrzędne punktów P_h i Q_s , w rzucie na płaszczyznę OZX absolutnego układu współrzędnych, są jednakowe. Rezultaty tych badań wskazują na poprawność opracowanego modelu symulacyjnego zawierającego ponad 300 elementów geometrii konstruktywnej przestrzennego łańcucha wymiarowego opisanego równaniami (2-16).



Rys. 6. Względne położenie łączonych elementów w pozycji końcowej
Fig. 6. The relative position of the connected elements in the end position



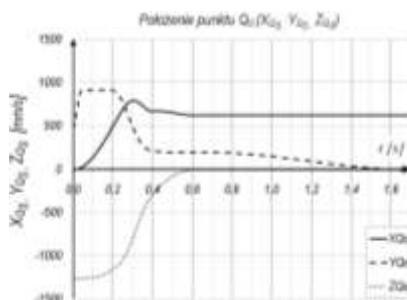
Rys. 7. Trajektorie wybranych punktów charakterystycznych manipulatora montażowego
Fig. 7. Trajectories of selected characteristic points of the assembly manipulator

Zastosowanie opracowanego modelu symulacyjnego pozwoliło na znalezienie położenia charakterystycznych punktów członów układu montażowego. Położeń tych punktów poszukuje się na ich

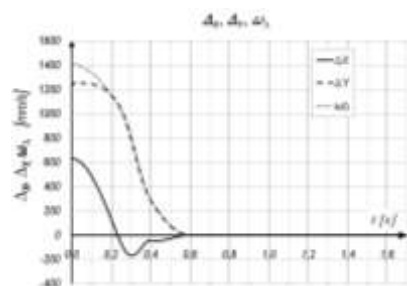
trajektoriach wynikających z więzów narzuconych przez poszczególne człony i pary kinematyczne. Na rys. 7 przedstawiono układ montażowy z trajektoriami τ_{R_1} , τ_{R_2} , τ_{R_3} , τ_S i τ_{Q_S} zakreślonymi przez punkty R_1, R_2, R_3, S oraz punkt Q_S .

Dla przyjętych parametrów ruchu (tabela 1), konfiguracja układu jest następująca:

- punkt R_1 elementu r_1 , porusza się po łuku okręgu τ_{R_1} o kącie rozwarcia $\Omega_5 = 90^\circ$,
- trajektorie τ_{R_2} , τ_{R_3} i τ_{Q_S} są złożonymi krzywymi w przestrzeni trójwymiarowej, jest to wynikiem jednoczesnego działania wirtualnych silników $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ i ω_5 w przedziale czasowym $t = 0-0,6$ s,
- trajektorie τ_{R_1} , τ_{R_2} , τ_{R_3} i częściowo trajektoria τ_{Q_S} są zakreślane w przestrzeni do momentu pozycjonowania manipulatora montażowego, po którym zaczyna się bezpośrednie wstawienie wałka do otworu w korpusie,
- w końcowym etapie montażu, od miejsca pozycjonowania do jego zakończenia, przemieszcza się tylko siłownik s wraz z efektem e oraz wstawianym wałkiem w ; pozostałe napędy wirtualne są wyłączone; punkt środkowy Q_S , na tym etapie połączenia, zakreśla linię prostą; zmianę wartości współrzędnych punktu Q_S , w funkcji czasu t , w absolutnym układzie współrzędnych, przedstawiono na rys. 8,
- z przedstawionego wykresu wynika, że wstawianie wałka do otworu w korpusie przebiega w dwóch etapach; w pierwszym dla $t = 0-0,6$ s następuje przemieszczenie efektora wraz ze wstawianym wałkiem do położenia pozycjonowania, w tej fazie montażu następuje zbliżenie osi łączonych części; współrzędne punktu Q_S ($X_{Q_S}, Y_{Q_S}, Z_{Q_S}$) zmieniają się w szerokim przedziale,
- w końcowej fazie, bezpośredniego łączenia wałka z otworem w korpusie, wartości współrzędnych są stałe i wynoszą: $X_{Q_S} = f(t) = \text{const} = 622 \text{ mm}$, $Z_{Q_S} = f(t) = \text{const} = -9 \text{ mm}$; wyniki analizy numerycznej określające położenie środka wstawianego wałka Q_s względem nieruchomego środka otworu P_h pokazano na rys. 9; odległość pomiędzy tymi środkami Δ obliczono z wzoru: $\Delta = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_z^2}$, gdzie: $\Delta_x = X_{Q_S} - X_{P_h}$, $\Delta_z = Z_{Q_S} - Z_{P_h}$.



Rys. 8. Położenie punktu Q_s w absolutnym układzie współrzędnych XYZ
Fig. 8. Location of the point Q_s in the absolute coordinate system XYZ



Rys. 9. Niewspółosiowość łączonych części maszyn
Fig. 9. Misalignment of combined machine parts

Wyniki badań symulacyjnych (rys. 8 - 11) opracowano dla układu montażowego, w którym poszczególne elementy są wyko-

nane z *absolutną* dokładnością. Oznacza to, że wartość ogniwa zamykającego w momencie pozycjonowania wynosi $r_{\Delta} = 0$. Wykonany model numeryczny pozwala ponadto na przeprowadzenie badań uwzględniających błędy wymiarowe i kątowe elementów układu montażowego oraz niedokładności pozycjonowania silników wykonujących ruchy obrotowe $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_5$ i postępowy v_4 . Błędy te są zapisane jako wybrane elementy macierzy rotacji i translacji we wzorach (2-16) a następnie, w postaci geometrii konstruktywnej, zamodelowane w wirtualnym modelu układu montażowego.

5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono możliwości współczesnych systemów CAD/CAE do modelowania i analizy kinematycznej wirtualnego układu montażowego. Opracowany model symulacyjny, na podstawie opracowanej metodyki, umożliwia przeprowadzenie analiz numerycznych układu montażowego, w oparciu o przestrzenny łańcuch wymiarowy. Pozwala to między innymi:

- zakreślać tory montażowe wybranych punktów charakterystycznych układu montażowego, w tym obszary robocze manipulatorów montażowych,
- badać dokładności pozycjonowania i warunki montażowości w montażu automatycznym z uwzględnieniem dokładności wykonania łączonych części i podzespołów,
- przeprowadzać symulacje kinematyczne i dynamiczne układu montażowego,
- analizować kolizje (w ruchu) oraz wykrywać strefę kontaktu łączonych części,
- określać wpływ dokładności ruchu silników napędzających ruchome elementy układu montażowego na dokładność pozycjonowania.

Zbudowany wirtualny model symulacyjny układu montażowego z zastosowaniem technik komputerowych CAD/CAE uwzględnia wiele parametrów realnego montażu. Korzyści wynikające ze stosowania przedłożonego modelu analitycznego mogą być duże, gdyż pozwalają na dokonanie bardzo wnikliwej oceny tworzonej konstrukcji układów technicznych. Zaproponowana metodyka może również zmniejszyć nakłady finansowe na tworzenie różnego rodzaju prototypów przez całkowite lub częściowe ich wyeliminowanie.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC - 2012/05/B/ST8/02802.

6. Literatura

- [1] Budniak Z., Bil T.: Simulation of the movement of four-bar spatial linkage. International Journal of Applied Mechanics and Engineering, 2012, vol.17, No.4, pp.723-732.
- [2] Budniak Z.: Modelowanie przestrzennych łańcuchów wymiarowych układów montażowych z zastosowaniem technik CAD/CAE. Pomiary Automatyka Kontrola, 2013, vol. 59, s. 652-655.
- [3] Kostić Z., Cvetković D., Jevremović A.: How to use CAD tools for modelling virtual engineering environments. 17th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology" TMT 2013, Istanbul, Turkey, 10-11 September 2013, p.373-376.
- [4] Kuang-Hua Chang: Motion Simulation and Mechanism Design with SolidWorks Motion 2011. Schroff Development Corporation, p. 1-19.
- [5] Lo S. H. R.: Virtual Mechanical Engineering Education - A Case Study. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Social, Human Science and Engineering Vol:1 No:9, 2007, p. 16-21.
- [6] Pawłowski W.: Możliwości zastosowania komputerowego wspomaganie na kolejnych etapach procesu projektowania. Technologia i Automatyzacja montażu, nr 1(35)/2002, s.26-29.

otrzymano / received: 21.05.2014

przyjęto do druku / accepted: 02.09.2014

artykuł recenzowany / revised paper