

WPLYW BŁĘDÓW ORIENTACJI ROBOTA MONTAŻOWEGO NA MONTOWALNOŚĆ CZĘŚCI O POWIERZCHNIACH PŁASKICH

The impact of assembly robot orientation errors on the assembly of parts with flat surfaces

Rafał KLUZ, Magdalena BUCIOR, Andrzej KUBIT, Dawid WYDRZYŃSKI

S t r e s z c z e n i e: W pracy przeprowadzono analizę zjawisk zachodzących podczas kojarzenia części maszyn o powierzchniach płaskich. Sformułowano wymagania, jakie muszą zostać spełnione, aby połączenie mogło zostać zrealizowane poprawnie. Następnie w odniesieniu do tych wymagań, określono wpływ błędów robota, na prawdopodobieństwo poprawnej realizacji procesu łączenia rozpatrywanych części maszyn. Wykazano, że w przypadku, gdy wymiary łączonych części są niewielkie, (≤ 20 mm) to w warunkach montowalności można pominąć wpływ błędów orientacji robota. Zmniejsza to wprawdzie nieznacznie dokładność obliczeń prawdopodobieństwa połączenia części (0.5%), jednak znacznie je upraszcza. Wykazano również, że w przypadku większych wymiarów części konieczne staje się uwzględnienie błędów kątowych, ale jedynie tych, które powodują przemieszczenie powierzchni o największych długościach.

S ł o w a k l u c z o w e: błędy robota, montowalność części, dokładność montażu

A b s t r a c t: This paper presents the phenomena occurring during the mating of machine parts with flat surfaces. The requirements have to be fulfilled in order for the connection to be carried out correctly were formulated. Then, in relation to these requirements, the impact of robot errors on the probability of correct implementation of the connection process of the considered machine parts was determined. It was shown that if the dimensions of the parts to be joined are small, (≤ 20 mm), the effect of robot orientation errors can be neglected under mounting conditions. Although this slightly reduces the accuracy of the probability of combining parts (0.5%), it considerably simplifies them. It has also been shown that in the case of larger parts dimensions, it is necessary to take into account angular errors but only those that cause displacement of the surfaces of the largest lengths.

K e y w o r d s: robot errors, assembly of parts, assembly accuracy

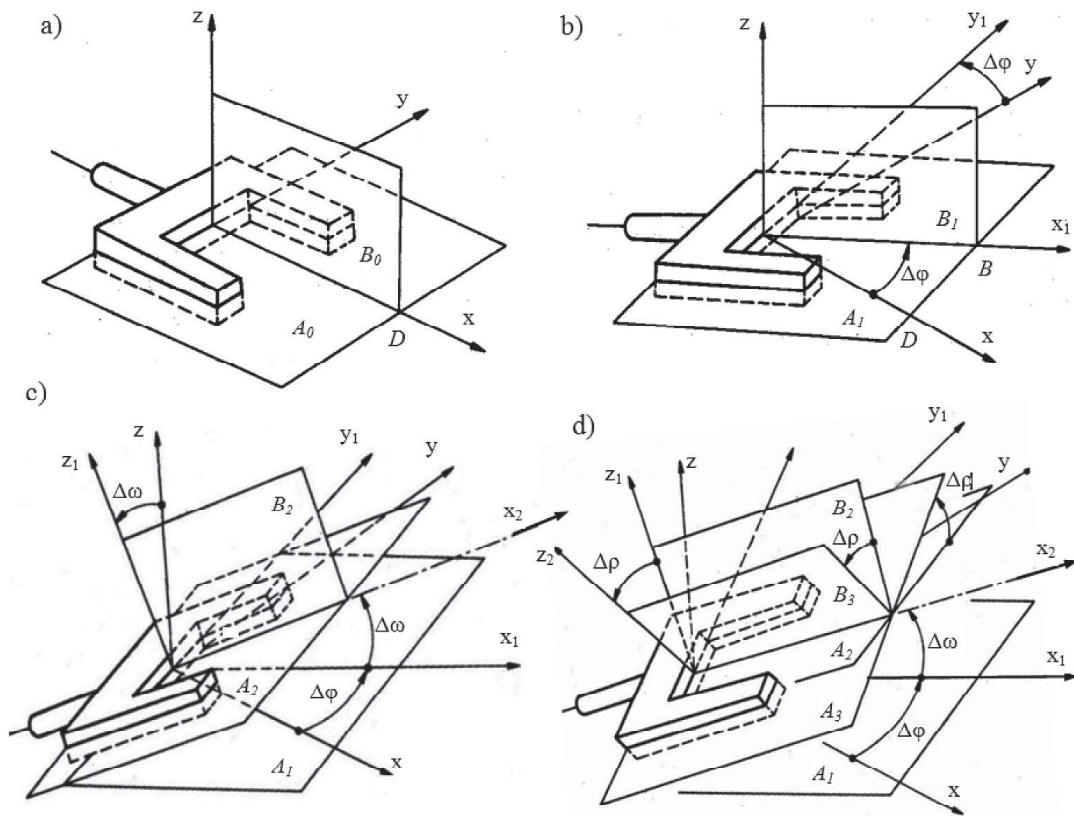
Wprowadzenie

Najważniejszym i jednocześnie najtrudniejszym etapem procesu montażu jest wzajemna orientacja części, zwłaszcza wtedy, gdy powinny być zorientowane z dużą dokładnością względem siebie. Niezapewnienie wymaganej dokładności uniemożliwia realizację procesu montażowego, narusza jego stabilność i powoduje pogorszenie efektywności ekonomicznej całego procesu [4]. Podstawowym warunkiem osiągnięcia wysokiej niezawodności pracy systemu montażowego jest spełnienie warunku montowalności dla wszystkich kojarzonych części. W rzeczywistości warunki te mogą być spełnione jedynie z pewnym prawdopodobieństwem. W związku z tym przez montowalność wyrobu w zrobotyzowanym montażu należy rozumieć prawdopodobieństwo zmontowania jego części, przy zachowaniu wymagań jakościowych [4, 7].

Montowalność, zwłaszcza w zrobotyzowanym montażu, ma istotne znaczenie i determinuje dalsze etapy projektowe jak: wybór schematu bazowania, wybór budowy i stopni swobody robota montażowego oraz warunki wykonywania operacji montażowej. Charakteryzowana jest wartościami tolerancji łączonych części, wielkością dopuszczalnych przemieszczeń liniowych i kątowych elementów łączonych w przestrzeni, w granicach, których możliwy jest jeszcze ich montaż. Wartości te są różne

w zależności od przyjętych metod montażu oraz sposobu ustalenia części. W trakcie realizacji procesu części powinny być dostarczone na pozycje montażowe w takim położeniu, aby przy dowolnych wymiarach, znajdujących się w przedziale dopuszczalnych tolerancji, możliwe było ich połączenie [7].

Celowość zastosowania zrobotyzowanego stanowiska montażowego, w dużym stopniu zależy od jego wydajności, uzależnionej od częstotliwości awarii oraz czasu jej usunięcia. Przyczyny awarii są różnorodne. Podstawowe z nich wynikają z tego, że parametry mechanizmów wykonawczych stanowiska montażowego nie odpowiadają wymaganiom technicznym podczas łączenia konkretnych jednostek montażowych. W celu zapewnienia wymaganej niezawodności zrobotyzowanego systemu montażowego, konieczne jest sformułowanie warunków montażu kojarzonych części, określonych na podstawie analizy parametrów geometrycznych i siłowych, wynikających z kinematyki przebiegu procesu łączenia jednostki montażowej. Dlatego w niniejszej pracy przeprowadzono analizę zjawisk, zachodzących podczas kojarzenia części maszyn o powierzchniach płaskich oraz sformułowano wymagania, jakie muszą zostać spełnione, aby połączenie mogło zostać zrealizowane poprawnie. Następnie w odniesieniu do tych wymagań, określono wpływ błędów robota na prawdopodobieństwo poprawnej realizacji procesu łączenia rozpatrywanych części maszyn.



Rys. 1. Interpretacja kątów orientacji a) położenie nominalne chwytaka, b) obrót chwytaka wokół osi z o kąt $\Delta\phi$, c) obrót chwytaka wokół osi y_1 o kąt $\Delta\omega$, d) obrót chwytaka wokół osi x_2 o kąt $\Delta\rho$
 Fig. 1. Interpretation of the orientation angles a) nominal position of the gripper, b) rotation of the gripper around the z axis by the angle $\Delta\phi$, c) gripper rotation about the axis around y_1 by the angle $\Delta\omega$, d) grip rotation about the x_2 axis by the angle $\Delta\rho$

Warunki montowalności

Przydatność elementów do łączenia w jednostki montażowe jest pewną cechą, zależną od konstrukcji elementu, sposobu łączenia i budowy stanowiska montażowego. W ogólnym przypadku warunek montowalności części o powierzchniach płaskich można przedstawić w postaci zależności (1) z której wynika, że połączenie jednostki montażowej nastąpi wówczas, gdy błędy względnego przemieszczenia osi łączonych części powiększone o ich względne przemieszczenie spowodowane błędami orientacji chwytaka robota będą mniejsze od dopuszczalnych.

$$\begin{aligned} 0.5L_x &\geq |\Delta x + \Delta\Psi_x| \\ 0.5L_y &\geq |\Delta y + \Delta\Psi_y| \\ 0.5L_z &\geq |\Delta z + \Delta\Psi_z| \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:

L_x, L_y, L_z – luz połączenia względem poszczególnych osi,
 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – błędy względnego przemieszczenia osi łączonych części na kierunku osi x, y, z ,
 $\Delta\Psi_x, \Delta\Psi_y, \Delta\Psi_z$ – przemieszczenia liniowe części wywołane błędami orientacji robota.

Orientację końcówki roboczej manipulatora robota montażowego w przestrzeni można określić za pomocą trzech kątów ϕ, ω, ρ (rys. 1). Jeżeli przy powtarzających się kolejno ruchach manipulatora każda ze współrzędnych konfiguracyjnych q_j zostaje ustawiona z pewnym niewielkim odchyleniem (błędem) Δq_j odżądanego ustawienia nominalnego, to orientacja chwytaka dozna również odchylenia odżądanego orientacji nominalnej. Kąty orientacji będą przy każdym cyklu nieco inne, doznając odchylenia $\Delta\phi, \Delta\omega, \Delta\rho$.

Uwzględniając fakt, że podczas procesu montażu mogą pojawić się błędy orientacji względem wszystkich osi przyjętego układu współrzędnych, warunki montowalności części o powierzchniach płaskich można zapisać w postaci:

$$\begin{aligned} 0.5L_x &\geq |\Delta x + H_L - H_L \cos \Delta\omega \cos \Delta\phi| \\ 0.5L_y &\geq |\Delta y + L_L \cos \Delta\rho \cos \Delta\phi + H_L \cos \Delta\rho \sin \Delta\phi + \\ &\quad + W_L \cos \Delta\rho \sin \Delta\phi - L_L| \\ 0.5L_z &\geq |\Delta z + L_L \cos \Delta\rho \sin \Delta\phi + H_L \cos \Delta\rho \sin \Delta\phi + \\ &\quad + W_L \cos \Delta\rho \sin \Delta\phi - W_L| \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie: L_L, W_L, H_L oznacza odpowiednio długość, szerokość i wysokość przyłączanej części

Błędy robota względem poszczególnych osi przyjętego układu współrzędnych (Δx , Δy , Δz) powiększone o względne przemieszczenie części spowodowane wystąpieniem błędów orientacji części $\Delta \Psi_x$, $\Delta \Psi_y$, $\Delta \Psi_z$ stanowią nowe zmienne losowe: ξ_x , ξ_y , ξ_z . W przypadku gdy zmienne te są niezależne statystycznie prawdopodobieństwo połączenia części o określonych wartościach luzu L_x , L_y , L_z jest równe:

$$P = P(-0.5L_x \leq \xi_x < 0.5L_x) \cdot P(-0.5L_y \leq \xi_y < 0.5L_y) \cdot P(-0.5L_z \leq \xi_z < 0.5L_z) \quad (3)$$

Jeżeli natomiast między zmiennymi losowymi występuje zależność statystyczna wówczas całkowity błąd należy traktować jako 3-wymiarowy wektor losowy (lub 3-wymiarową zmienną losową) o łącznej gęstości prawdopodobieństwa $f(\xi_x, \xi_y, \xi_z)$. Prawdopodobieństwo połączenia części można wówczas wyznaczyć na podstawie zależności:

$$P = \int_{-0.5L_x}^{0.5L_x} \int_{-0.5L_y}^{0.5L_y} \int_{-0.5L_z}^{0.5L_z} f(\xi_x, \xi_y, \xi_z) d\xi_x d\xi_y d\xi_z \quad (4)$$

Identyfikacja błędów robota montażowego

Błąd położenia osi łączonych części jest zmienną losową, uzależnioną od błędów powtarzalności robota montażowego i błędów urządzeń wykonawczych. Do typowych urządzeń wchodzących w skład oprzyrządowania technologicznego robotów montażowych należą chwytaki przemysłowe, urządzenia do automatycznej wymiany narzędzi oraz urządzenia antykolizyjne. Przeprowadzone badania [1, 2, 3] wykazały, że błąd względnego przemieszczenia osi części $f(\xi_x, \xi_y, \xi_z)$ można scharakteryzować za pomocą zmiennej losowej, podlegającej prawu

normalnego rozkładu prawdopodobieństwa, o gęstości prawdopodobieństwa f tej zmiennej określonej funkcją (5), o macierzy wartości oczekiwanych $\mu^T = [\mu_1, \mu_2, \mu_3]$, odpowiadającej statycznemu błędowi robota i macierzy kowariancji A [6, 8]:

$$f(\xi_x, \xi_y, \xi_z) = \frac{1}{2\pi\sqrt{|\Lambda|}} \exp\left[-\frac{1}{2}(x - \mu)^T \Lambda^{-1}(x - \mu)\right] \quad (5)$$

gdzie:

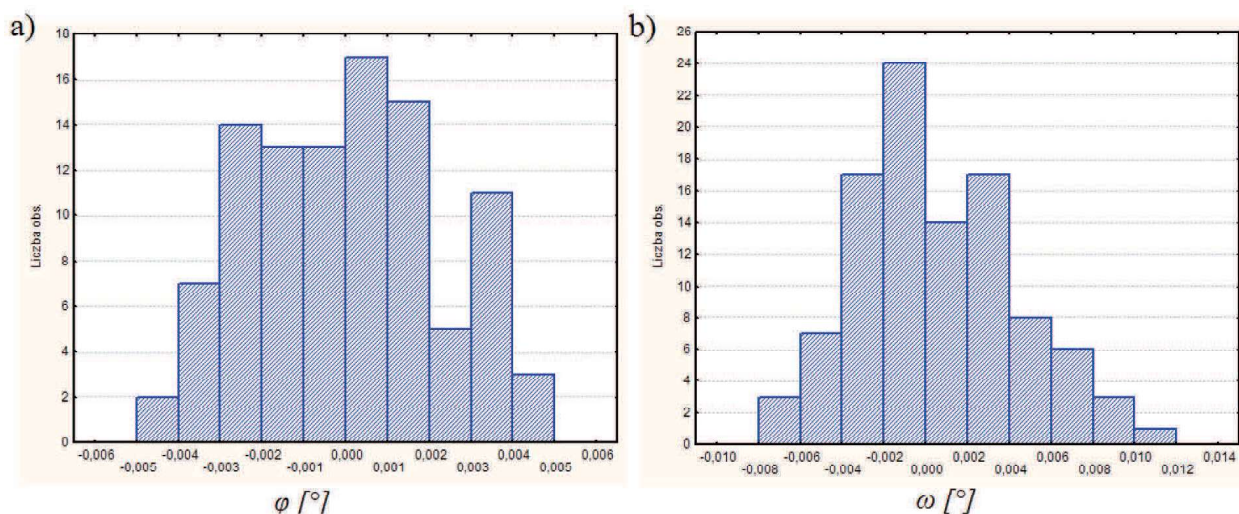
A – macierz kowariancji

μ^T – macierz wartości oczekiwanych

Błędy orientacji robota przemysłowego są funkcją błędów ustawienia współrzędnych konfiguracyjnych Δ_{qi} . Badania przeprowadzone na przykładzie robota przemysłowego Mitsubishi RV-M2 wykazały, że błędy te podlegają normalnemu rozkładowi prawdopodobieństwa. W przypadku rozpatrywanego robota, mającego 5 stopni swobody wartości odchyłeń standardowych zmiennych losowych $\Delta\varphi$, $\Delta\omega$, $\Delta\rho$ są jednakowe dla wszystkich pozycji manipulatora i wynoszą odpowiednio: $\sigma_{\Delta\varphi} = 0,0023^\circ$, $\sigma_{\Delta\omega} = 0,0038^\circ$, $\sigma_{\Delta\rho} = 0,008^\circ$. Na rys. 2 przedstawiono rysunki histogramów zmiennych losowych błędów orientacji końcówki robota w przykładowym punkcie przestrzeni roboczej.

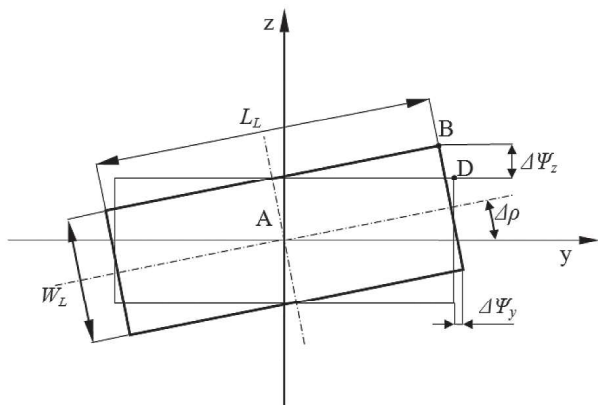
Wpływ błędów orientacji na prawdopodobieństwo połączenia części

Wyznaczenie parametrów zmiennych losowych ξ_x , ξ_y , ξ_z może w wielu przypadkach sprawiać wiele trudności. Wiąże się bowiem z koniecznością wyznaczania spłotów funkcji gęstości zmiennych losowych [5]. W związku z tym przeprowadzono badania, mające na celu określenie w jaki sposób błędy orientacji robota wpływają na prawdopodobieństwo połączenia części. W tym celu



Rys. 2. Histogramy przedstawiające błędy kątowe: a) kąta orientacji $\Delta\varphi$, b) kąta orientacji $\Delta\omega$; robota Mitsubishi RV – M2
Fig. 2. Histograms showing angular errors: a) orientation angle $\Delta\varphi$, b) orientation angle $\Delta\omega$; Mitsubishi RV – M2 robot

założono, że montaż będzie odbywał się z udziałem siły grawitacji. W takim przypadku warunki montowalności (2) ulegają znacznemu uproszczeniu, albowiem w takiej konfiguracji manipulatora robota Mitsubishi RV-M2 wpływ na montowalność mają jedynie błędy w płaszczyźnie prostopadłej do osi orientowanej części (Δz , Δy) oraz błędy orientacji $\Delta\omega$ i $\Delta\rho$. W celu wyznaczenia prawdopodobieństwa połączenia części założono, że montaż może odbywać się w punkcie przestrzeni robota charakteryzującym się błędem powtarzalności pozycjonowania: $\sigma_{\Delta z} = 0,016$ mm, $\sigma_{\Delta y} = 0,023$ mm oraz błędem orientacji $\sigma_{\Delta\rho} = 0,008^\circ$ (rys. 3).



Rys. 3. Przemieszczenia liniowe części $\Delta\Psi_y$, $\Delta\Psi_z$ wywołane błędem orientacji robota $\Delta\rho$

Fig. 3. Linear displacements of parts $\Delta\Psi_y$, $\Delta\Psi_z$ caused by the robot orientation error $\Delta\rho$

Podczas montażu w każdym cyklu oś manipulowanej części powinna pokrywać się z osią części bazowej (punkt A). Punkt D zaznaczony na rys. 3 przedstawia położenie docelowe (nominalne) wierzchołka części przyłączanej. To położenie wyznaczone przez zerową wartość błędu kąta orientacji ($\Delta\rho = 0$). W realizacji praktycznej takiego procesu błąd ten jest pewną niezerową wielkością ($\Delta\rho \neq 0$). Dlatego też końcowe położenie wierzchołka części jest przesunięte w stosunku do wyznaczonego położenia nominalnego o pewien odcinek:

$$\Delta\Psi_z = L_l \sin \Delta\rho \quad (6)$$

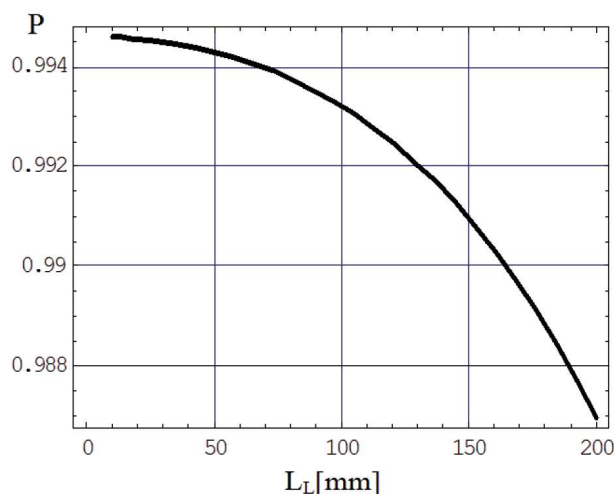
Probabilistyczna natura błędu kąta pozycjonowania ρ ma wpływ na dokładność pozycjonowania części. Jeżeli odchylenie standardowe błędu ustawienia kąta ρ w położeniu zerowym $\rho = 0$ jest równe $\sigma_{\Delta\rho}$ to odchylenie standardowe zmiennej losowej $\Delta\Psi_z$ będzie równe:

$$\sigma_{\Delta\Psi_z} = L_l \sigma_{\Delta\rho} \quad (7)$$

Ponieważ zmienna losowa ξ_z jest sumą zmiennej losowej błędów Δz i $\Delta\Psi_z$ to jej odchylenie standardowe wynosi:

$$\sigma_{\xi_z} = \sqrt{\sigma_{\Delta z}^2 + \sigma_{\Delta\Psi_z}^2} \quad (8)$$

Dla połączenia o wymiarach części przyłączanej wynoszących $L_L = 20$ mm, $W_L = 10$ mm, luzie $L_z = 0,096$ mm i $L_y = 0,14$ mm wyznaczono na podstawie zależności (3) prawdopodobieństwo połączenia części. W pierwszym etapie obliczeń założono, że w trakcie procesu występuje jedynie błąd względnego przemieszczenia osi łączonych części (Δz , Δy). Wartość prawdopodobieństwa połączenia części wyniosła $P = 0,9946$ co odpowiada zdolności jakościowej procesu równej $C_p = 0,93$. Następnie założono, że na proces łączenia części ma wpływ również błąd orientacji $\Delta\rho$. W wyniku tego prawdopodobieństwo uległo zmniejszeniu do wartości $P = 0,9945$, a więc o 0,01%, co odpowiada zdolności jakościowej procesu $C_p = 0,92$ (-0,5%).



Rys. 4. Wpływ szerokości części L_L na prawdopodobieństwo połączenia części

Fig. 4. Influence of L_L part width on the probability of joining parts

W dalszym etapie analizy założono, że długość części L_L wynosi 200 mm (rys. 4). W tym jednak przypadku okazało się, że pojawienie się błędu $\Delta\rho$ prowadzi do zmniejszenia prawdopodobieństwa połączenia części o 0,86% do wartości $P = 0,9860$, co odpowiada obniżeniu zdolności jakościowej procesu aż o 12%.

Podsumowanie

Wyznaczanie poziomu montowalności cylindrycznych połączeń części maszyn na zrobotyzowanym stanowisku montażowym stanowi złożone zagadnienie. Największe trudności można napotkać wówczas, gdy w obliczeniach uwzględnia się błędy orientacji części względem wszystkich osi przyjętego układu współrzędnych. Prowadzi to bowiem do złożonych obliczeń, polegających na wyznaczeniu splotu funkcji gęstości wszystkich zmiennych losowych mających wpływ na przebieg procesu montażu. Z przeprowadzonych w pracy obliczeń wynika jednak, że w przypadku, gdy wymiary łączonych części są niewielkie, ($L_L, W_L, H_L \leq 20$ mm) to w warunkach montowalności można pominąć wpływ błędów orientacji. Zmniejsza

to wprawdzie dokładność obliczeń (o ok. 0,5%), jednak znacznie upraszcza obliczenia prawdopodobieństwa. W przypadku, gdy wymiary części są większe konieczne staje się ich uwzględnienie, ale jedynie tych, które powodują przemieszczenie powierzchni o największych długościach.

Należy przy tym zauważyć, że badania poziomu montowalności prowadzone były dla robota należącego do starszej klasy manipulatorów, charakteryzujących się większymi wartościami błędów w porównaniu do robotów nowszej generacji. Dla robotów tych, odznaczających się znacznie większą dokładnością, wpływ błędów orientacji na prawdopodobieństwo połączenia części może okazać się znacznie mniejszy.

LITERATURA

- [1] Choi D.H., H.H. Yoo. 2006. "Reliability analysis of a robot manipulator operation employing single Monte-Carlo simulation". *Key Engineering Materials*, Vol. 321/323 No. 1662-9795: 1568–1571.
- [2] Kluz R., T. Trzepieciński. 2015. "Analysis of optimal orientation of robot gripper for an improved capability assembly process". *Robotics and Autonomous Systems* t. 74, Part A, s. 253–266.
- [3] Kluz R., T. Trzepieciński. 2014. "The repeatability positioning analysis of the industrial robot arm". *Assembly Automation*, t. 34, s. 285–295.
- [4] Kluz R. 2014. „Walidacja wyposażenia zrobotyzowanego stanowiska montażowego”. *Technologia i Automatykacja Montażu*: 23–27.
- [5] Kotulski Z., W. Szczepiński. 2004. „Rachunek błędów dla inżynierów”. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
- [6] Kumar R., P. Kalra, N.R. Prakash. 2011. "A virtual RV-M1 robot system". *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 27 No. 6: 994–1000.
- [7] Łunarski J., W. Szabajkiewicz. 1993. „Automatyzacja procesów technologicznych montażu maszyn”. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
- [8] Zhang J.Y., C. Zhao, D.W. Zhang. 2011. "Pose accuracy analysis of a robot manipulator based on kinematics". *Advanced Materials Research*, Vol. 201/203: 1867–1872.

dr inż. Rafał Kluz – Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji, Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, e-mail: rkluz@prz.edu.pl

dr inż. Magdalena Bucior – Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji, Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, e-mail: magdabucior@prz.edu.pl

dr inż. Andrzej Kubit – Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji, Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, e-mail: akubit@prz.edu.pl

dr inż. Dawid Wydrzyński – Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji, Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, e-mail: dwydrzynski@prz.edu.pl