

*błąd pozycjonowania robota, montaż, stanowisko montażowe, robotyzacja
robot positioning error, assembly, assembly stand, robotisation*

Rafał KLUZ¹
Jan JAWORSKI²
Tomasz TRZEPIECIŃSKI³

DOKŁADNOŚĆ POZYCJONOWANIA ROBOTÓW W ELASTYCZNYCH SYSTEMACH MONTAŻOWYCH

W artykule przedstawiono zagadnienia związane z kosztem elastycznego systemu montażowego oraz możliwości robotyzacji procesu montażu w kontekście przypadkowych i systematycznych błędów pozycjonowania robota. W celu wyznaczenia prawdopodobieństwa połączenia części cylindrycznych przeprowadzono badania błędów generowanych na zrobotyzowanym stanowisku montażowym. Badania analityczne wykazały, że zarówno błędy statyczne jak i kinematyczne robota montażowego można opisać w postaci dwuwymiarowej funkcji gęstości normalnego rozkładu prawdopodobieństwa. Wyniki badań analitycznych zweryfikowano eksperymentalnie.

POSITIONING ACCURACY OF ROBOTS IN FLEXIBLE ASSEMBLY SYSTEMS

The article presents the issues related to the cost of a flexible assembly system and the possibilities of robotisation of assembly process in the context of random and systematic errors of robot positioning. To determine the probability of the cylindrical parts assembling the researches on the errors generated on the robotic assembly stand were carried out. Analytical investigations have shown that both static and kinematic errors of assembly robot can be described as two-dimensional probability density function of a normal distribution. The analytical results were verified experimentally.

1. WSTĘP

Stopniowa eliminacja barier handlowych oraz niskie ceny oferowane przez eksporterów (zwłaszcza chińskich) sprawiają, że produkcja wielu wyrobów w krajach wysoko rozwiniętych, o wysokim poziomie kosztów pracy, przestaje być opłacalna. Rozwiązaniem może być delokalizacja produkcji do krajów o tańszej sile roboczej, albo przejście do produkcji wyrobów niestandardowych, o najwyższym poziomie jakości, wzornictwa i nowoczesności. Wymaga to skrócenia czasu przygotowania produkcji nowego wyrobu i wprowadzenia go na rynek przy jednoczesnym wzroście konstrukcyjno – technologicznej złożoności wyrobu, wzroście jakości i trudności wykonania. Aby sprostać tym wymaganiom, przedsiębiorstwa muszą bez opóźnień reagować na zmienne wymagania rynku, a przede wszystkim być zdolne do wydajnej produkcji różnych wyrobów w krótkich seriach. Nie sprzyja to jednak uzyskiwaniu wysokiej wydajności procesu w warunkach tzw. „sztywnej automatyzacji”. W celu pogodzenia tych przeciwstawnych wymagań, niezbędne jest zapewnienie możliwości szybkiej zmiany nastawienia posiadanego wyposażenia, przy dostatecznej jego dokładności oraz krótkich terminów projektowania i wykonania wyrobu przy niewysokich kosztach i szybkim zwrocie poniesionych nakładów. W znacznym stopniu wymagania te spełnia robotyzacja procesów montażu, łącząca zalety maszyn specjalnych i uniwersalnych (rys. 1) [1].

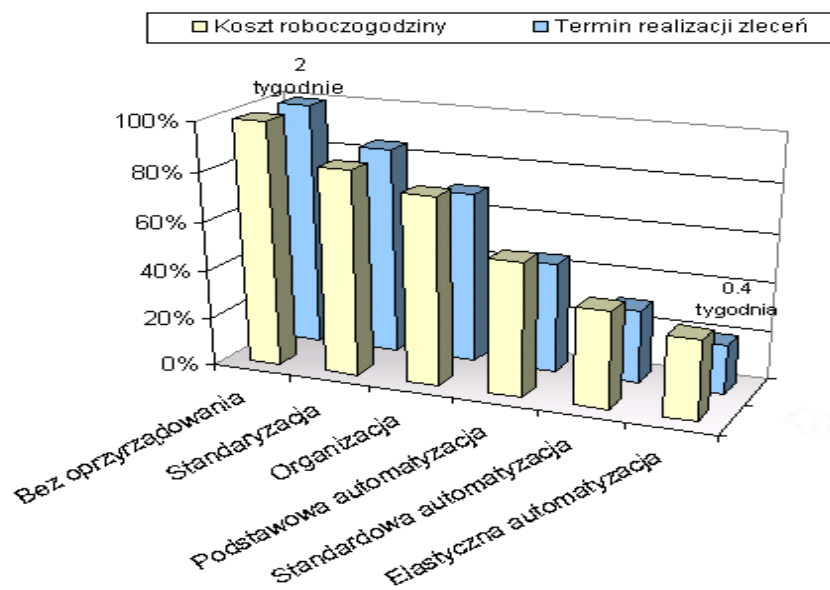
2. KOSZT ELASTYCZNEGO SYSTEMU MONTAŻOWEGO

Ważnym zadaniem z zakresu projektowania zrobotyzowanego systemu montażowego jest zapewnienie niezawodności i poprawności jego przebiegu. Można to uzyskać poprzez wybór odpowiedniego sposobu montażu oraz zapewnienie wymaganej dokładności urządzeń wchodzących w skład łańcucha kinematycznego operacji montażowej. Zastosowanie urządzeń i oprzyrządowania o wysokiej dokładności prowadzi do zwiększenia praw-

¹ Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa; 35-959 Rzeszów; al. Powstańców Warszawy 8, Tel: +48 17 865-17-25, e-mail: rkkmiop@prz.edu.pl

² Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa; 35-959 Rzeszów; al. Powstańców Warszawy 8, Tel: +48 17 865-17-25, e-mail: jjkmiop@prz.edu.pl

³ Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa; 35-959 Rzeszów; al. Powstańców Warszawy 8, Tel: +48 17 865-17-14, e-mail: tomtrz@prz.edu.pl



Rys. 1. Zmniejszenie kosztów roboczogodziny oraz skrócenie terminów realizacji zleceń w wyniku wprowadzenia automatyzacji [1]

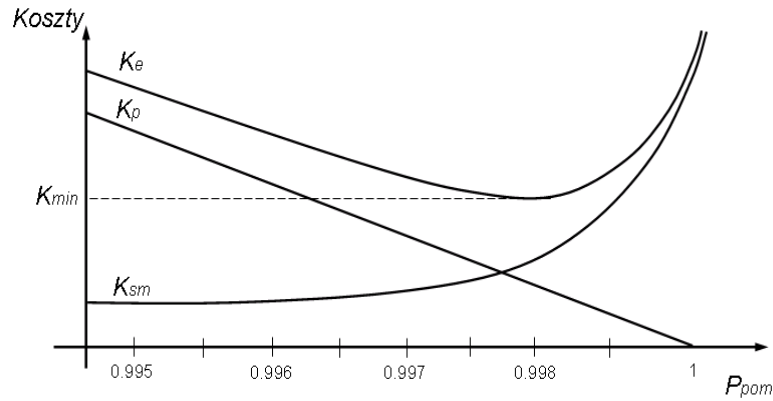
dopodobięstwa poprawnej realizacji procesu łączenia części, lecz zdecydowanie zwiększa ich koszt. Stosowanie więc zbyt precyzyjnych i skomplikowanych środków robotyzacji montażu może być wysoce nieekonomiczne i stawić pod znakiem zapytania opłacalność zrobotyzowania danego procesu montażu.

Prognozy wykazują, że montaż zrobotyzowany staje się szczególnie opłacalny w produkcji mało- i średnioseryjnej, między 100 000 a 600 000 wyrobów rocznie na zmianę produkcyjną. Badania przeprowadzone w Wielkiej Brytanii [2] wykazały, że wielkość produkcji dla zrobotyzowanych gniazd montażowych mieści się pomiędzy 200 a 620 wyrobów na godzinę, a dla zrobotyzowanych linii montażowych między 220 a 750. Przeprowadzone jednak ostatnio badania w Katedrze Technologii Maszyn i Organizacji Produkcji Politechniki Rzeszowskiej odnośnie dokładności zrobotyzowanych systemów montażowych wykazały, że przedstawione zakresy opłacalności wielkości produkcji dla systemów elastycznych, mogą być znacznie zawyżone. Wykazano bowiem, że istnieje możliwość zapewnienia już na etapie projektowania procesu technologicznego montażu wymaganego poziomu montowalności połączeń części maszyn (prawdopodobieństwa połączenia części p_{pom}), bez zbędnego zawyżania dokładności stosowanego wyposażenia stanowiska montażowego, a w związku z tym, również niepotrzebnego zawyżania kosztów operacji.

Wzrost prawdopodobieństwa p_{pom} powoduje zmniejszenie kosztów przestojów K_p (rys. 2), co naturalnie prowadzi do zmniejszenia kosztów eksploatacji K_e . Wpływ p_{pom} na całkowity koszt eksploatacji nie następuje jednak wyłącznie poprzez koszty przestojów. Przy wzroście p_{pom} do wartości bliskiej jedności gwałtownie wzrastają wymagania co do urządzeń i wyposażenia stanowiska montażowego K_{sm} , a przez to zwiększają się koszty eksploatacji [3]. Można więc przewidzieć, że koszty operacji montażowej nie zależą w sposób liniowy od prawdopodobieństwa poprawnego montażu, ale mają pewne minimum lokalne, które wyznacza optymalną konstrukcję i wyposażenie stanowiska montażowego. Należy zatem minimalizować liczbę urządzeń w łańcuchu kinematycznym operacji montażowej, a przez to dążyć do ograniczenia kosztów montażu warunkującego opłacalność robotyzacji.

ROBOTYZACJA PROCESU MONTAŻU

Najważniejszym i zarazem najtrudniejszym etapem procesu montażu jest wzajemna orientacja części przed montażem, zwłaszcza wówczas, gdy części lub zespoły 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. Podstawowym warunkiem osiągnięcia wysokiej niezawodności pracy systemu montażowego jest spełnienie warunku montowalności dla wszystkich kojarzonych części. Przez montowalność wyrobu w zrobotyzowanym montażu należy zatem rozumieć prawdopodobieństwo zmontowania jego części, przy zachowaniu wymagań jakościowych.



Rys. 2. Przykładowe charakterystyki kosztów operacji montażowej w funkcji prawdopodobieństwa [3]

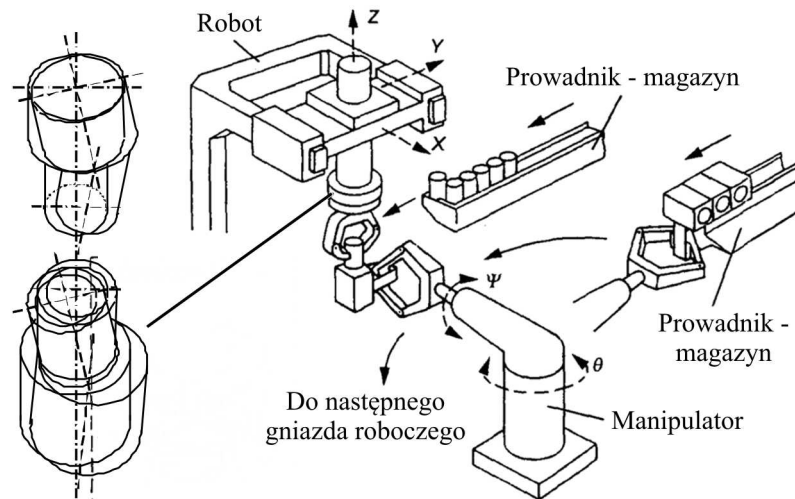
Montowalność, zwłaszcza w zrobotyzowanym montażu, ma istotne znaczenie i determinuje dalsze etapy projektowe, jak: wybór schematu bazowania, wybór budowy i stopni swobody robota montażowego, metody uzyskiwania dokładności oraz warunków wykonywania operacji montażowej. Charakteryzowana jest bowiem wartościami tolerancji elementów montowanych, a także wielkością dopuszczalnych przemieszczeń liniowych i kątowych elementów łączonych w przestrzeni, w granicach których możliwy jest jeszcze ich montaż [4]. Wartości te są różne w zależności od przyjętych metod montażu, sposobu bazowania i unieruchomienia części. W trakcie realizacji procesu części powinny być zatem dostarczone na pozycje montażowe w takim położeniu, aby przy dowolnych wymiarach, znajdujących się w przedziale dopuszczalnych tolerancji, możliwe było zmontowanie kojarzonych części [5, 6].

Zagadnienia związane z robotyzacją montażu można znacznie ułatwić dokonując dekompozycji połączeń według kształtów powierzchni, którymi są złączane montowane części. Z tego punktu widzenia montaż typowych, najbardziej rozpowszechnionych połączeń można rozpatrywać jako typowy szereg czynności łączenia części m.in. z powierzchniami płaskimi, walcowymi, stożkowymi, kulistymi, gwintowymi. Najbardziej jednak rozpowszechnionymi rodzajami połączeń są jednak połączenia z powierzchniami walcowymi i stożkowymi stanowiącymi około 40% ogólnej liczby połączeń (umieszczanie łożysk w korpusie, paletyzacja wirników itp.). Chcąc zatem zachować wysoką wydajność i niezawodność procesu montażu należy przede wszystkim poznać warunki montowalności tych połączeń, zwłaszcza w przypadku gdy montaż odbywa przy zastosowaniu robota montażowego [7, 8].

W celu wyznaczenia montowalności części cylindrycznych należy wyznaczyć dopuszczalne przesunięcie i skrócenie osi montowanych elementów w każdym etapie montażu dla najbardziej niesprzyjających warunków. Połączenie części może być osiągnięte, jeżeli największe przemieszczenie osi nie przewyższa tolerancji względnego przesunięcia liniowego i kątowego łączonych części:

$$\begin{aligned} \Delta_{\Sigma \text{ liniowy}} &= \Delta_{\Sigma \text{ liniowy}}^{\text{systematyczny}} + \Delta_{\Sigma \text{ liniowy}}^{\text{przypadkowy}} \leq [\Delta l] \\ \Delta_{\Sigma \text{ kątowy}} &= \Delta_{\Sigma \text{ kątowy}}^{\text{systematyczny}} + \Delta_{\Sigma \text{ kątowy}}^{\text{przypadkowy}} \leq [\Delta \gamma] \end{aligned} \quad (1)$$

W rzeczywistych warunkach produkcyjnych trudno jest uzyskać zgodność osi łączonych części. Proces montażu polega bowiem na kolejnym łączeniu elementów i uzyskiwaniu określonej dokładności ogniów zamykających. Jeśli parametry ogniwa zamykającego będą wychodzić poza zadane granice tolerancji, świadczyć to będzie o nadmiernych błędach, uniemożliwiających poprawną realizację procesu [9]. Podstawowymi źródłami tych błędów są odchyłki parametrów orientowanych części, niedokładności w wykonaniu urządzenia orientującego, zjawiska zużyciowe, niestabilność parametrów energetycznych, mała dokładność wykonania oprzyrządowania i robota montażowego oraz błędy projektowania procesu technologicznego [10-12]. Zatem dokładność automatycznego orientowania części (rys. 3) jest wyznaczana wielkością błędów prowadzących do odchyłek położenia rzeczywistego od nominalnego. Zapewnienie wymaganej dokładności orientacji części stanowi więc jeden z podstawowych problemów zrobotyzowanego montażu.



Rys. 3. Graficzna interpretacja błędów automatycznego orientowania części [13]

4. PRZYPADKOWY BŁĄD POZYCJONOWANIA ROBOTA MONTAŻOWEGO

Dokładność robota przemysłowego uzależniona jest od znacznej liczby czynników, w związku z czym obarczona jest przypadkowymi błędami pozycjonowania, należącymi do jego podstawowych charakterystyk, mającymi główny wpływ na poprawną realizację procesu montażu cylindrycznych części maszyn [14]. W ogólnym przypadku błędy te można podzielić na:

- przypadkowe błędy liniowe robota,
- przypadkowe błędy kątowe robota (tzw. błędy orientacji).

Z przeprowadzonej analizy i badań wynika, że kinematyczny błąd orientacji robota w niewielkim stopniu wpływa na montowalność cylindrycznych połączeń części maszyn [15]. Ograniczony wpływ wynika z faktu, iż dla luzu dowolnej cylindrycznej jednostki montażowej uwarunkowanego koniecznością uwzględnienia kinematycznych liniowych błędów robota maksymalny błąd orientacji $\Delta\omega (\pm\sigma_\omega)$ jest znacznie mniejszy ($\Delta\omega \ll \alpha_{gr}$) od maksymalnego dopuszczalnego kąta skreślenia osi montowanych części α_{gr} (wynikającego z warunków geometrycznych i siłowych procesu montażu występujących w obrębie rozważanej jednostki montażowej). Uwzględniając ponadto fakt, że największy wpływ na proces montażu połączeń cylindrycznych mają błędy pozycjonowania na dwóch współrzędnych prostopadłych do osi kojarzonych elementów, pomijając zmienną losową błąd robota związaną z osią orientowanego elementu, liniowy przypadkowy błąd pozycjonowania robota można przedstawić w postaci dwuwymiarowej funkcji gęstości normalnego rozkładu prawdopodobieństwa [15]:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_y\sigma_x\sqrt{1-\rho_{xy}^2}} \exp\left[-\frac{1}{2(1-\rho_{xy}^2)}\left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} - 2\rho_{xy}\frac{x}{\sigma_x}\frac{y}{\sigma_y} + \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)\right] \quad (2)$$

gdzie:

ρ_{xy} – współczynnik korelacji między składowymi x i y wektora błędu,

σ_x^2 – wariancja składowej x wektora błędu,

σ_y^2 – wariancja składowej y wektora błędu.

5. SYSTEMATYCZNY BŁĄD POZYCJONOWANIA ROBOTA

Sztywność robota montażowego jest jedną z podstawowych charakterystyk wpływających zarówno na dynamiczne charakterystyki robota, jak i na dokładność pozycjonowania końcówki roboczej. Ze względu na skończoną sztywność modułów wchodzących w skład konstrukcji robota, obciążona przenoszona częścią końcówka robota doznaje przesunięcia w stosunku do zadanego położenia o pewien systematyczny błąd (statyczny

błąd pozycjonowania) [16]. Sztywność robota przemysłowego zapewniona jest poprzez sztywność poszczególnych jego mechanizmów wykonawczych. W ogólnym przypadku odkształcenia modułu można opisać za pomocą macierzy:

$$[\Delta_k] = [x, y, z, \alpha, \beta, \gamma] \quad (3)$$

gdzie: x, y, z – składowe wektora przesunięcia, α, β, γ – kąty obrotu.

Sztywność modułu można scharakteryzować macierzą sztywności ustanawiającą związek między siłami i momentami działającymi na moduł, a jego odkształceniami. Wszystkie siły i momenty działające na k -ty moduł, można sprowadzić do jednego głównego wektora sił R_k i jednego momentu M_k , przyłożonych do początku układu współrzędnych związanego z końcowym (węzłowym) punktem k -tego modułu. Wówczas można założyć, że w węzłowym punkcie k -tego modułu przyłożony jest wektor sił:

$$[F_k] = [R_{kx}, R_{ky}, R_{kz}, M_{kx}, M_{ky}, M_{kz}] \quad (4)$$

Macierz sztywności całej konstrukcji robota montażowego określająca związek między przemieszczeniem węzłów modułu i obciążeniem zewnętrznym można zbudować na podstawie uprzednio ustalonych macierzy sztywności poszczególnych modułów przy jednoczesnym zapewnieniu warunków zgodności przemieszczeń w węzłach oraz warunków równowagi. W związku z czym agregację poszczególnych modułów robota (macierzy sztywności) w jednolitą konstrukcję (globalną macierz sztywności) przedstawia równanie:

$$[K] = \sum_{i=1}^{ITA} a^T \cdot [c_g]^T \cdot [k] \cdot [c_g] \cdot a \quad (5)$$

gdzie a – macierz Boolowska. Jej zadaniem jest umieszczenie macierzy sztywności modułu w odpowiednim miejscu macierzy całej konstrukcji modułowego robota przemysłowego.

Przy małych odkształceniach konstrukcji robota przemysłowego związek między wektorem przyłożonych do konstrukcji sił $[F]$ i składowymi wektora odkształceń $[\Delta]$ wyrażony jest liniowo poprzez elementy macierzy podatności będącej macierzą odwrotną do macierzy sztywności konstrukcji. Wielkość systematycznych błędów robota można więc wyznaczyć na podstawie następującej zależności:

$$[\Delta] = [K]^{-1} \cdot [F] \quad (6)$$

6. BADANIA MONTOWALNOŚCI CZĘŚCI CYLINDRYCZNYCH

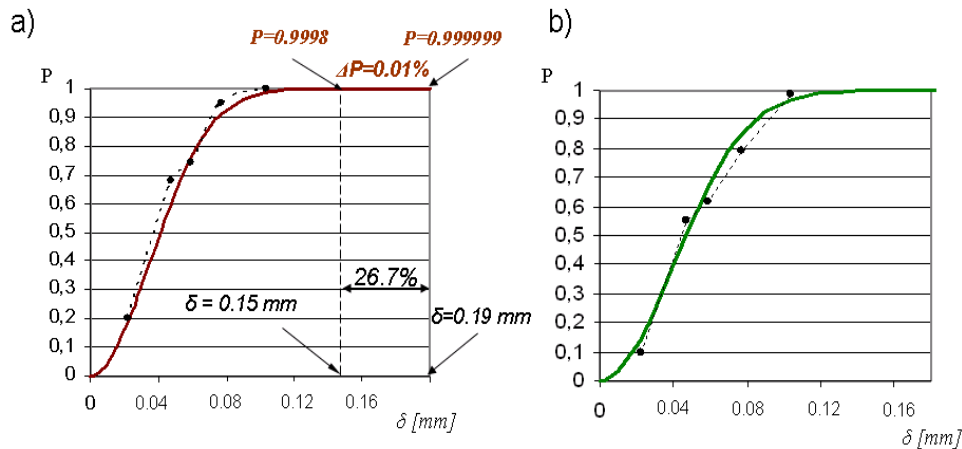
W celu wyznaczenia prawdopodobieństwa połączenia części cylindrycznych przeprowadzono badania błędów generowanych na zrobotyzowanym stanowisku montażowych [7, 14, 15], które wykazały, że zarówno błędy statyczne jak i kinematyczne robota montażowego można opisać w postaci dwuwymiarowej funkcji gęstości normalnego rozkładu prawdopodobieństwa. Prawdopodobieństwo poprawnej realizacji procesu montażu części cylindrycznych o luzie δ w takim przypadku, jest prawdopodobieństwem zdarzenia, że zmienna losowa błędów robota znajdzie się wewnątrz pewnego cylindra, o środku znajdującym się w punkcie nominalnym i promieniu odpowiadającym odległości między osiami montowanego połączenia $r = 0.5\delta$. Wartość tego prawdopodobieństwa jest całką z funkcji gęstości w obszarze: $O: \{ u^2 + v^2 \leq (0.5\delta)^2 \}$:

$$P = \iint_{x^2 + y^2 \leq (0.5\delta)^2} \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho_{xy}^2}} \exp \left[-\frac{1}{2(1-\rho_{xy}^2)} \left(\frac{(x-\Delta x)^2}{\sigma_x^2} - 2\rho_{xy} \frac{(x-\Delta x)}{\sigma_x} + \frac{(x-\Delta x)}{\sigma_y} + \frac{(x-\Delta x)^2}{\sigma_y^2} \right) \right] dx dy \quad (7)$$

gdzie: $\Delta x, \Delta y$ - odpowiednio wartość oczekiwana zmiennej losowej x i y błędów kinematycznego (statyczny błąd robota wywołany odkształceniem jego konstrukcji nośnej ciężarem przenoszonej części).

W celu weryfikacji przedstawionych zależności przeprowadzono eksperymentalne badania polegające na wyznaczeniu tegoż prawdopodobieństwa. W tym celu przeprowadzono proces montażu części cylindrycznych o luzie równym: 22 μm , 46 μm , 62 μm , 78 μm , 104 μm , dla dwóch wielkości obciążeń końcówki robota Mitsubishi RV-M2: 1100 g i 2300 g. Przedstawione na rysunku 4 zależności z dużą dokładnością odzwierciedlają wyniki uzyskane z przeprowadzonych badań eksperymentalnych (tabela 1), wskazując na fakt, iż domi-

nujący wpływ na montowalność cylindrycznych połączeń części maszyn wykazują liniowe statyczne i kinematyczne błędy robota montażowego. Pozostałe zaś błędy wydają się mieć marginalny wpływ, nie wywierając znaczącego wpływu na prawidłowy przebieg procesu łączenia części.



Rys. 4. Krzywe obrazujące prawdopodobieństwo połączenia części cylindrycznych w funkcji luzu δ , wyznaczone teoretycznie (linia ciągła) i eksperymentalnie (linia przerywana); a) dla obciążenia 1100 g, b) dla obciążenia 2300 g

Tab. 1. Porównanie wyników wartości błędów dla dwóch różnych obciążeń końcówki robota Mitsubishi RV – M2

Obciążenie końcówki robota	Maksymalny błąd bezwzględny $\Delta P_{max} = \max \left(\left P_e^{(i)} - P_t^{(i)} \right \right)$	Błąd średniokwadratowy $M = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(P_e^{(i)} - P_t^{(i)} \right)^2}{n}}$	Błąd średni $m = \frac{\sum_{i=1}^n \left P_e^{(i)} - P_t^{(i)} \right }{n}$
1100 g	0,08	0,041	0,032
2300 g	0,06	0,045	0,043

7. PODSUMOWANIE

Jednym z podstawowych zagadnień dotyczących projektowania zrobotyzowanych systemów montażowych jest problem zapewnienia wymaganej niezawodności stanowisk. Aby osiągnąć pożądaną poziom niezawodności systemu przedsiębiorstwa zmuszone są do stosowania narzędzi i oprzyrządowania o wysokiej dokładności, które z reguły są bardzo drogie, powodując nadmierny wzrost kosztów eksploatacji stanowisk. Wzrost kosztów z kolei stawia pod znakiem zapytania opłacalność robotyzacji danego procesu montażu.

Rozwiązaniem przedstawionego problemu może być praca systemu z akceptowanym przez przedsiębiorstwo poziomem montowalności części maszyn, bez zbędnego zawyżania dokładności stosowanego wyposażenia. Zapewnienie zbyt wysokiego prawdopodobieństwa połączenia części w warunkach produkcyjnych, może okazać się w wielu wypadkach mało uzasadnione z ekonomicznego punktu widzenia. Przebieg funkcji prawdopodobieństwa wskazuje, iż w miarę zbliżania się do prawdopodobieństwa równego 1, małe przyrosty wartości prawdopodobieństwa odpowiadają dużym przyrostom wartości luzu. Dla krzywej odpowiadającej obciążeniu końcówki robota masą 1100 g, wzrost wartości prawdopodobieństwa z wartości 0,999872 do wartości 0,999999 czyli o 0,0127% pociąga konieczność zwiększenia tolerancji pasowania łączonych elementów o 26,667% tzn. z wartości 0,15 mm do 0,19 mm. Zapewnienie takiej wartości prawdopodobieństwa wymaga zwiększenia luzu w połączeniu, lub zwiększenia dokładności wyposażenia zrobotyzowanego stanowiska montażowego, co wiąże się z poniesieniem dodatkowych kosztów, a co z kolei stawia pod znakiem zapytania opłacalność zrobotyzowania operacji montażu. W wielu wypadkach korzystniejszą decyzją może okazać się zdecydowanie na mniejszą niezawodność stanowiska montażowego i poniesienie nieznacznych kosztów związanych z przestojami, niż na znacznie kosztowniejszą zwykle zmianę wyposażenia technologicznego. Zmniejszanie kosztów skutkuje nie tylko poprawą konkurencyjności, ale i rozszerzeniem rynku. Na tanie wyposażenie technologiczne

mogą sobie pozwolić średnie i małe firmy, których w przemyśle jest najwięcej. Zmniejszenie kosztów eksploatacji systemu montażowego daje ponadto możliwość przesunięcia zakresów opłacalności wielkości produkcji dla systemów elastycznych w kierunku mniejszych wartości, odpowiadających produkcji mało- i średnioseryjnej.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Honczarenko J.: *Elastyczna automatyzacja wytwarzania*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2000.
- [2] Koch T.: *Systemy zrobotyzowanego montażu*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2006.
- [3] Chrapek K., Bielski S., Kocełuch A., Koch T., Kozera M., Kuciel A., Malicki J., Mydlikowski J., Smalec Z., Żaba K.: Opracowanie podstaw budowy elastycznych systemów montażowych. Raport Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej 1997, Ser. SPR Nr 19.
- [4] Lemu H.G.: *Assesment of geometric tolerance information as a carrier of design intent to mnaufacturing and inspection*, Proceedings of Third International Workshop of Advanced Manufacturing and Automation, IWAMA 2013 & Akademia Publishing, Trondheim, 2013, s. 59-70.
- [5] Jezierski J., Kowalik M., Siemiątkowski Z., Warowny R.: *Analiza tolerancji w konstrukcji i technologii maszyn. Zbiór zadań*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2010.
- [6] Jezierski J., Kowalik M., Sieczka P.: *Nowa metoda obliczeń tolerancji i odchyłek w analizie wektorowej wymiarów tolerowanych*, Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji, nr 2, tom 17, 1997, s. 97-106.
- [7] Kluz R., *Montowalność czopowo-tulejowych połączeń realizowanych przez roboty montażowe*. Technologia i Automatyzacja Montażu, nr 2,3, 2007, s. 69-72.
- [8] Kluz R., Trzepieciński T.: *The repeatability positioning analysis of the industrial robot arm*, Assembly Automation, no. 3, vol. 34, 2014, s.285-295.
- [9] Lemu H.G.: *Current status and challenges of using geometric tolerance information in intelligent manufacturing systems*, Advances in Manufacturing, no. 1, vol. 2, 2014, s. 13-21.
- [10] Koren Y.: *Robotics for engineers*, McGraw-Hill Book Company, New-York, 1985.
- [11] Craig J.J.: *Introduction to robotics: Mechanics and control*, Pearson Education, Upper Saddle River, 2005.
- [12] Hunt V.D.: *Industrial robotics handbook*, Industrial Press, New York, 1983.
- [13] Barczyk J., Igielski J., Łunarski J.: *Układy podawania w systemach automatycznego montażu*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1996.
- [14] Riemmer R., Edan Y.: *Evaluation of the influence of target location on robot repeatability*, Robotica, no. 4, vol. 18, 2000, s. 443-449.
- [15] Kluz R.: *Badania teoretyczne i eksperymentalne montowalności części cylindrycznych*. Technologia i Automatyzacja Montażu, nr 1, 2008, s. 6-9.
- [16] Kluz R.: *Badanie i ocena dokładności robota montażowego [w:] Perłowski R., Zielecki W., Skoczylas L., Szabajkiewicz W., Kluz R.: Technologie Urządzenia Metody – Wybrane zagadnienia technologii montażowych i obróbkowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2007, s. 90-112.