

Witold Silek, Henryk Palus
Politechnika Śląska

ZASTOSOWANIE KOMORY WIROWEJ W ROBOTYCE

Streszczenie. W pracy przedstawiono zasadę działania, konstrukcję i metodykę projektowania komory wirowej pracującej równocześnie jako chwytak podciśnieniowy oraz urządzenie sensoryczne. Omówiono dwuetapową metodykę projektowania opartą na teorii zbiorów rozmytych i optymalizacji statystycznej. Zamieszczono porównanie wyników badań teoretycznych i doświadczalnych oraz sformułowano wnioski końcowe.

1. Wstęp

Automatyzacja procesów montażowych, stosowanie w produkcji coraz bardziej nowoczesnych technologii oraz wymagania bezpieczeństwa i wydajności pracy spowodowały znaczny wzrost zainteresowania robotami montażowymi [6].

Duża różnorodność obiektów manipulacji, wielorakość zadań a także szereg innych parametrów procesu montażu, wpłynęły na powstanie wielkiej różnorodności chwytaków robotów.

Aktualnie do manipulowania obiektami o małej masie stosuje się głównie podciśnieniowe chwytaki pneumatyczne [7]. Pomimo prostoty i niskich kosztów wykonania zastosowania ich są ograniczone przez małą trwałość przysawki, duże czasy uchwycenia i zwolnienia obiektu oraz konieczność zapewnienia gładkości powierzchni obiektu manipulacji.

Jednym z ciekawszych i znajdującym coraz szersze zastosowanie, ze względu na swoje własności, jest pneumatyczny chwytak z komorą wirową [13, 8, 9]. Urządzenia chwytakowe tego typu są proste, tanie, trwałe, szybkie i łatwo przezbrawalne oraz pozwalają manipulować bezdotykowo bardzo delikatnymi częściami o różnej masie, kształcie, wymiarze, temperaturze i strukturze powierzchni.

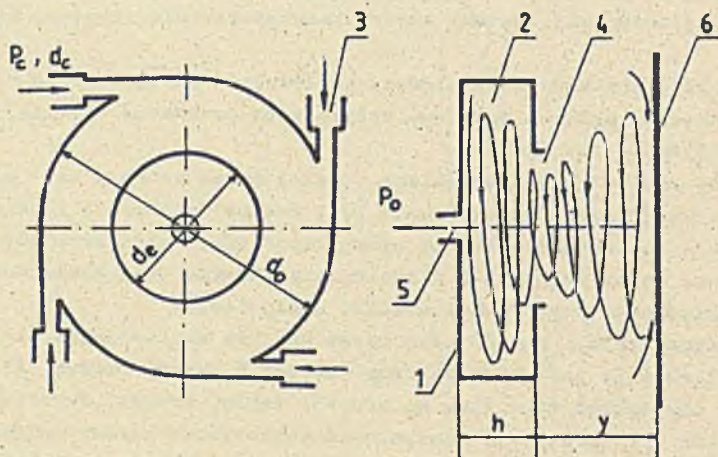
Komora wirowa pracująca jako urządzenie sensoryczne pozwala wykryć obiekt manipulacji, rozpoznać jego kształt i zmierzyć odległość od niego.

W Instytucie Automatyki Politechniki Śląskiej opracowano konstrukcję komory wirowej pracującej równocześnie jako chwytak podciśnieniowy oraz urządzenie sensoryczne [12].

2. Budowa i zasada działania urządzenia

Skonstruowane urządzenie (rys. 1) składa się z korpusu 1, w centralnej części którego znajduje się komora wirowa 2 z kanałami zasilającymi 3, otworem wyjściowym 4 i kanałem odbiorczym (podciśnieniowym) 5. Powietrze zasilające podawane do stycznych dysz 3 jest zawiorane w komorze 2 i wychodzi przez otwór wyjściowy 4 do atmosfery.

Ciśnienia statyczne, w osi komory wirowej a także w strumieniu sprężonego powietrza poruszającego się między dwoma równoległymi powierzchniami detalu (obiektu manipulacji) 6 i korpusu 1, są mniejsze od atmosferycznego (podciśnienia). Działanie komory wirowej jako chwytaka oparte jest na wykorzystaniu podciśnienia, które działając siłowo na detal powodują wytworzenie siły podtrzymującej. Uchwycenie detalu jest bezdotykowe, ponieważ strumień sprężonego powietrza wypływający z otworu wyjściowego 4 wytwarza cienką poduszkę powietrzną między korpusem a podtrzymywanym detalem.



Rys. 1. Budowa urządzenia

Fig. 1. Construction of the device

Biorąc pod uwagę to, że w zależności od odległości y , kształtu i struktury detalu zmienia się rozkład prędkości w obszarze przepływu wirowego a tym samym ciśnienie p_o w kanale odbiorczym, można traktować komorę wirową jako urządzenie sensoryczne.

3. Metodyka projektowania urządzenia

Jak na razie nie ma ogólnie przyjętego modelu zjawisk zachodzących w komorze wirowej. Sytuacja taka jest wynikiem złożoności zjawisk zachodzących w przepływie wirowym oraz trudności ich opisu. Analiza komór wirowych jest w większości przypadków częściowo empiryczna, ponieważ przepływ wirowy jest trójwymiarowy, uwarstwiony i ograniczony, a jego własności są ciągle jeszcze mało poznane. Wszystkie znane metody analizy opierają się na równaniach Naviera - Stokesa, za pomocą których można w przybliżeniu aproksymować rzeczywiste zjawiska zachodzące w przepływie wirowym [4]. Wobec małej przydatności stosowanych obecnie metod opracowano dwustopową metodykę, która pozwala konstruować dowolne urządzenie wirowe o z góry zadanej charakterystyce [10, 11].

W etapie pierwszym stosując teorię zbiorów rozmytych do optymalizacji wielokryterialnej można uzyskać i zweryfikować dość szybko przybliżone rozwiązanie optymalne. Rozwiązanie to stanowi punkt wyjścia dla stosowanej w drugim etapie metody optymalizacji statystycznej (planowanie eksperymentu). Etap ten pozwala znaleźć dokładne rozwiązanie optymalne oraz zaplanować eksperyment i zmniejszyć zakres prac doświadczalnych.

Proponowana metodyka projektowania może być skutecznie użyta do projektowania wszędzie tam, gdzie:

- brak jest modelu matematycznego, ale istnieje pewien intuicyjny model rozmyty [2] wynikający z wiedzy projektanta;
- eksperyment fizyczny jest stosunkowo tani i szybki.

3.1. Opis metody

Projektant we wczesnych etapach procesu projektowo - konstrukcyjnego ma do dyspozycji tylko przybliżony model fenomenologiczny, czyli pewien zbiór rozmytej informacji o projektowanym urządzeniu, uzyskany z badań doświadczalnych i analizy porównawczej.

Dla urządzeń wirowych modelem tym jest informacja, że ich własności zależą głównie od dwóch syntetycznych cech konstrukcyjnych:

$$\frac{d_o}{d_e} \approx (1,5 \div 2) \quad ; \quad \frac{d_c}{d_e} \approx (0,1 \div 0,2) \quad , \quad //$$

Jeżeli spełnione są następujące warunki:

$$0,3 \leq \frac{h}{r_o} \leq 0,8 \quad ; \quad \frac{h}{r_e} \geq 0,4 \quad ; \quad 3000 \leq Re \leq 14000 \quad ,$$

gdzie d_c , d_e , d_o - odpowiednio średnice otworów: wasilającego, wyjściowego, odbiorczego,

- h - wysokość komory wirowej,
 Re - liczba Reynoldsa.

Etap I

Celem tego etapu jest wielokryterialny wybór przybliżonego rozwiązania optymalnego (optymalnych wartości syntetycznych cech konstrukcyjnych) ze zbioru rozwiązań A , tzn. takiego rozwiązania, które spełniałoby wszystkie wymagania i było najlepsze ze względu na przyjęte kryteria oceny K .

Zadanie optymalizacji wielokryterialnej z wykorzystaniem zbiorów rozmytych można sformułować zgodnie z [1].

Niech będą dane:

- zbiór rozwiązań konstrukcyjnych $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$,
- zbiór kryteriów oceny $K = \{k_1, k_2, \dots, k_m\}$,
- zbiór wag $W = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}$.

Niech ocena rozmyta rozwiązania a_i względem kryterium k_j będzie określona zbiorem rozmytym o funkcji przynależności $\mu_{R_{1j}}(r_{1j})$, $r_{1j} \in R$, a względna ważność tego kryterium będzie określona wagą rozmytą o funkcji przynależności $\mu_{w_j}(w_j)$, $w_j \in R$.

Funkcje przynależności przyjmują wartości w przedziale $[0, 1]$

Wprowadzając funkcję $\varepsilon_1 : R^m \rightarrow R$

$$\varepsilon_1 x_1 = \frac{\sum_{j=1}^m w_j r_{1j}}{\sum_{j=1}^m w_j} \quad /2/$$

gdzie $x_1 = (w_1, w_2, \dots, w_m, r_{11}, r_{12}, \dots, r_{1m})$ określa zbiór rozmyty Z_1 o funkcji przynależności

$$\mu_{Z_1}(z_1) = \left(\bigwedge_{j=1}^m \mu_{w_j}(w_j) \right) \wedge \left(\bigwedge_{k=1}^m \mu_{R_{1k}}(r_{1k}) \right) \quad /3/$$

Zbiór rozmyty Z_1 indukuje przez odwzorowanie $\varepsilon_1 : R^m \rightarrow R$ zbiór R_1 o funkcji przynależności

$$\mu_{R_1}(\bar{r}_1) = \bigvee_{x_1 : \varepsilon_1(x_1) = \bar{r}_1} \mu_{z_1}(z_1), \quad \bar{r}_1 \in R \quad /4/$$

Funkcja przynależności $\mu_{R_1}(\bar{r}_1)$ określa całkowitą ocenę rozmytą rozwiąza-

nia konstrukcyjnego a_1 . Mając oceny rozmyte poszczególnych rozwiązań oraz wprowadzając pojęcie zbioru rozmytego uwarunkowanego $I|\bar{R}$ o funkcji przynależności

$$\mu_{I|\bar{R}}(a_1 | \bar{r}_1, \bar{r}_2, \dots, \bar{r}_n) = \begin{cases} 1, & \text{jeżeli } \bar{r}_1 \geq \bar{r}_j \\ 0, & \text{jeżeli } \bar{r}_1 < \bar{r}_j \end{cases} \quad /5/$$

dla każdego $j \in \{1, 2, \dots, n\}$

i pojęcie zbioru rozmytego \bar{R} o funkcji przynależności

$$\mu_{\bar{R}}(\bar{r}_1, \bar{r}_2, \dots, \bar{r}_n) = \bigwedge_{i=1}^n \mu_{R_i}(\bar{r}_i) \quad /6/$$

można określić zbiór rozmyty I o funkcji przynależności

$$\mu_I(a_1) = \bigvee_{\bar{r}_1, \bar{r}_2, \dots, \bar{r}_n : \bar{r}_1 \geq \bar{r}_j} \bigwedge_{j=1}^n \mu_{R_j}(\bar{r}_j), \quad /7/$$

która określa, do jakiego stopnia rozwiązanie konstrukcyjne a_1 jest najlepsze z możliwych. Mając te wartości dla poszczególnych rozwiązań wybieramy jako rozwiązanie optymalne a_0 to, dla którego funkcja przynależności μ_I osiąga wartość maksymalną:

$$\mu_I(a_0) = \bigvee_{i=1}^n \mu_I(a_i) \quad /8/$$

Etap II

W celu uwzględnienia w procesie projektowym złożonych zjawisk aerodynamicznych występujących w komorze wirowej, których modelu matematycznego nie znamy, zaproponowano znalezienie rozwiązania optymalnego metodą planowania eksperymentu [3].

W metodzie tej przyjęto, że projektowane urządzenie można przedstawić jako obiekt opisany funkcją wielu cech konstrukcyjnych:

$$y^* = f(u_1, u_2, \dots, u_n), \quad /9/$$

gdzie: y^* - wybrana ważna właściwość konstrukcyjna,

u_1, u_2, \dots, u_n - cechy konstrukcyjne.

Postać funkcji /9/ jest nieznaną, lecz wartość tej funkcji może być oszacowana za pomocą odpowiedniego eksperymentu w wybranych punktach.

Z a ł o ż e n i a

- nieznaną funkcję można lokalnie aproksymować za pomocą funkcji regresji o postaci wielomianu stopnia drugiego,
- zmienne losowe są niezależne, posiadają jednakową wariancję σ^2 i rozkłady tych zmiennych są normalne.

Metoda planowania eksperymentu służy do wyznaczenia takich wartości cech konstrukcyjnych, przy których funkcja regresji osiąga maksimum. Tok postępowania w tym etapie można przedstawić za pomocą następujących czynności:

- o k r e ś l e n i e z m i e n n y c h k o n s t r u k c y j n y c h

Ponieważ znaczna ilość zmiennych konstrukcyjnych komplikuje postać równania regresji i zwiększa liczbę badań, w pracy wybrano następujące zmienne: $d_o, d_e (u_1, u_2)$. Zmienną konstrukcyjną d_c przyjęto jako stałą o wartości wynikającej z poprzedniego etapu.

- s f o r m u ł o w a n i e k r y t e r i u m o p t y m a l i z a c j i

Szukając optymalnej konstrukcji przyjęto kryterium optymalizacji jako funkcję jednej zmiennej konstrukcyjnej, która jest możliwa do oceny na tym etapie (np. czułość charakterystyki, zakres pomiarowy)

- d o b ó r p o s t a c i f u n k c j i r e g r e s j i

W pracy założono, że maksymalizowaną funkcję y^+ można lokalnie aproksymować w otoczeniu punktu początkowego u_1^0, u_2^0 za pomocą funkcji regresji o postaci:

$$\hat{y} = a_0 + a_1 u_1 + a_2 u_2 + a_{11} u_1^2 + a_{12} u_1 u_2 + a_{22} u_2^2 \quad /10/$$

Przyjęto wielomian stopnia drugiego, ponieważ chodzi o zbadanie charakteru osiągniętego punktu stacjonarnego (rozwiązanie przybliżone z etapu pierwszego).

- w y b ó r t y p u p l a n u

Dla identyfikacji modelu liniowo - kwadratowego przyjęto [5] planowanie kompozycyjne umożliwiające uzyskanie pewnej oszczędności eksperymentów.

- o p t y m a l i z a c j a

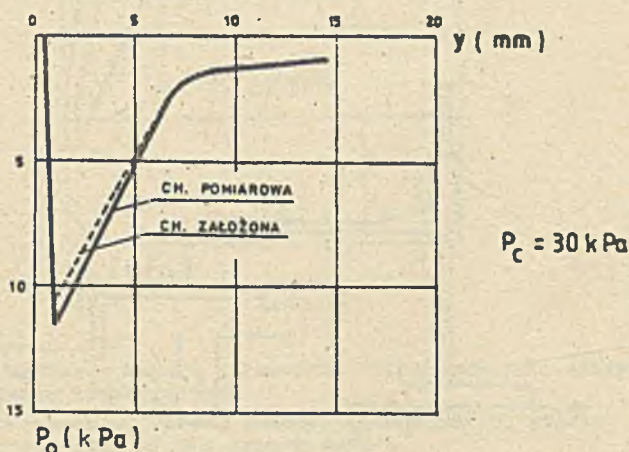
Celem optymalizacji jest znalezienie maksimum funkcji /10/ w przyjętym obszarze ograniczeń na u_1 i u_2 . Szukanie maksimum należy zacząć od intuicyjnie wybranego punktu początkowego u_1^0, u_2^0 z krokiem wariantowania $\Delta u_1, \Delta u_2$. W pracy proponuje się wybrać punkt początkowy (u_1^0, u_2^0) zbliżony do uzyskanego w etapie pierwszym rozwiązania przybliżonego.

3.2. Ocena otrzymanych wyników

Przedstawioną metodę zastosowano do zaprojektowania urządzenia sensorycznego z komorą wirową. W rezultacie otrzymano następujące cechy geometryczne komory wirowej:

$d_o = 13,5$ mm, $d_c = 1$ mm, $d_e = 6,75$ mm, $h = 5$ mm.

Na rys. 2 porównano charakterystyki statyczne urządzenia wynikające z pomiaru i zastosowania zaproponowanej metodyki projektowania.



Rys. 2. Charakterystyki statyczne urządzenia sensorycznego

Fig. 2. Static characteristics of the sensor device

Przeprowadzone pomiary wykazały, że własności konstrukcyjne zaprojektowanego urządzenia różnią się od założonych następująco:

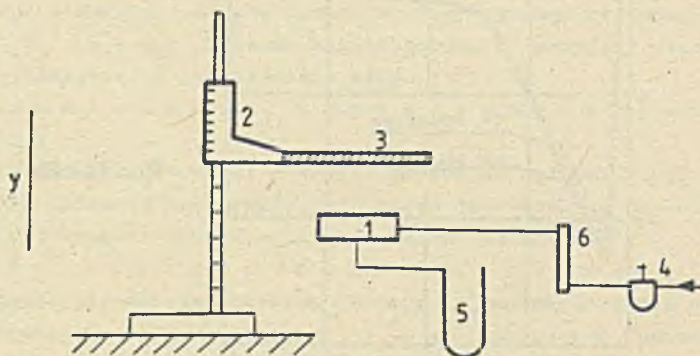
- 11,5 % - wartości zakresu pomiarowego,
- 9,5 % - wartości ciśnienia wyjściowego,
- 3,5 % - wartości mocy zasilania,
- 25 % - wartości czułości charakterystyki.

Optymalizację urządzenia przeprowadzono wykonując 8 komór wirowych i 23 pomiary. Należy zwrócić uwagę na dość dużą zbieżność wyników pierwszego ($d_o = 13$ mm; $d_e = 6,5$ mm; $d_c = 1$ mm) i drugiego ($d_o = 13,5$ mm;

$d_e = 6,75 \text{ mm}$; $d_c = 1 \text{ mm}$) etapu. Zbieżność ta wynika z poprawnego oczekiwania arbitralnego przyjęcia funkcji przynależności.

4. Wyniki badań eksperymentalnych

Badania eksperymentalne przeprowadzono korzystając ze stanowiska pomiarowego (rys. 3) składającego się z urządzenia z komorą wirową 1, wysokościomierza 2 (dokładność $0,02 \text{ mm}$), do którego przymocowana była przysłona 3. Urządzenie z komorą wirową zasilane było z instalacji sprężonego powietrza przez reduktor 4. Ciśnienie wyjściowe mierzone było za pomocą U-rurki wodnej 5, a wydatek objętościowy za pomocą rotametu 6.



Rys. 3. Schemat stanowiska pomiarowego

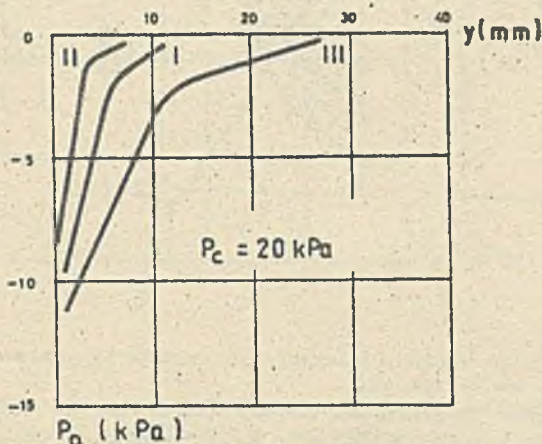
Fig. 3. The scheme of measuring standing

4.1. Praca komory wirowej jako urządzenia sensorycznego

Na rys. 2 przedstawiono typową charakterystykę statyczną komory wirowej pracującej jako urządzenie sensoryczne. Ciśnienie wyjściowe urządzenia zależy od następujących zmiennych: wartości ciśnienia zasilającego, odległości y od przysłony, wymiarów geometrycznych komory wirowej, rodzaju i struktury przysłony. Wpływ zmian wymiarów komory wirowej na charakterystyki statyczne urządzenia przedstawiono na rys. 4.

Badania przeprowadzono z trzema komorami wirowymi o następujących cechach geometrycznych:

- komora wirowa pierwsza (I) : $r_{\text{in}} = 3 \text{ mm}$, $r_{\text{out}} = 6 \text{ mm}$, $h = 2,5 \text{ mm}$, $r_0 = 0,55 \text{ mm}$,
- komora wirowa druga (II) i trzecia (III) były - odpowiednio pomniejszone i powiększone w stosunku do pierwszej.



Rys. 4. Wpływ wymiarów komory wirowej na charakterystykę statyczną urządzenia sensorycznego

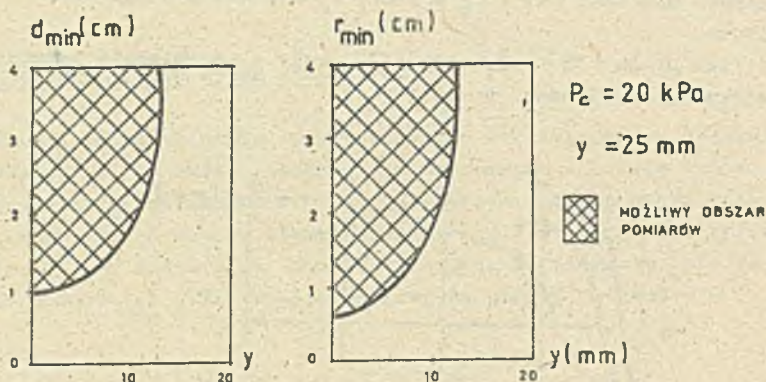
Fig. 4. The influence of vortex chamber dimensions on static characteristics of the sensor device

Z otrzymanych charakterystyk widać, że powiększanie komory wirowej powoduje wzrost zakresu pomiarowego, mocy zasilającej i ciśnienia wyjściowego oraz zmniejszenie ozułości charakterystyki. Punkt załamania charakterystyki odpowiada w przybliżeniu średnicy otworu wyjściowego d_0 i połowie wartości zakresu pomiarowego y .

Badanie wpływu wielkości i rodzaju obiektu manipulacji na wartość zakresu pomiarowego przeprowadzono z urządzeniem sensorycznym o następujących cechach geometrycznych: $r_0 = 11,5 \text{ mm}$, $r_{\text{in}} = 6,5 \text{ mm}$, $h = 6 \text{ mm}$.

Stosowano w czasie doświadczeń obiekty manipulacji płaskie i zaokrąglone - odpowiednio o różnej średnicy d i o różnym promieniu zaokrąglenia r . Otrzymane wyniki przedstawiono na rys. 5.

Przedstawione charakterystyki pokazują, że istotny wpływ d_{min} i r_{min} występuje do połowy wartości zakresu pomiarowego urządzenia. Zależność ciśnienia wyjściowego od kształtu, wielkości i położenia detali na linii montażowej może być wykorzystana do ich identyfikacji i sortowania.



Rys. 5. Wpływ wymiarów obiektu manipulacji na zakres pomiarowy urządzenia sensorycznego

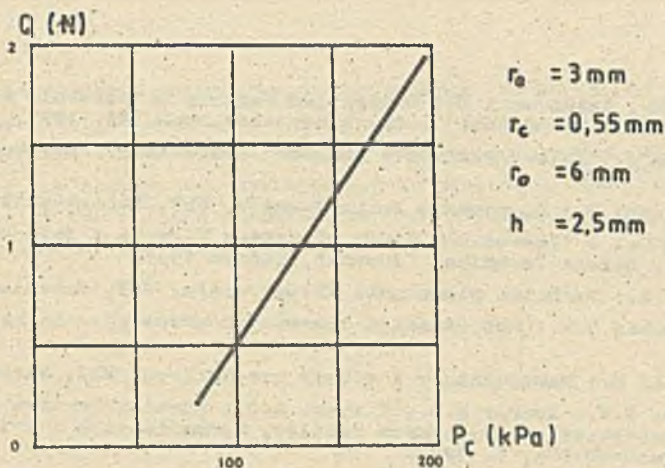
Fig. 5. The influence of a gripper object dimensions on measuring distance of the sensor device

4.2. Praca komory wirowej jako chwytaka

Badania eksperymentalne przeprowadzone na stanowisku pomiarowym (rys. 3) składającym się z chwytaka i ciężarków (obiektów manipulacji). Podczas pomiarów określano minimalną wartość ciśnienia zasilania, przy której ciężarek jest utrzymywany przez chwytak. Udźwig chwytaka zależy od następujących zmiennych: wartości ciśnienia zasilania, odległości y , wymiarów geometrycznych komory wirowej, kształtu i struktury obiektu manipulacji. Zależność udźwigu Q chwytaka od wartości ciśnienia zasilania przedstawia rys. 6.

Podczas badań doświadczalnych stwierdzono, że udźwig chwytaka maleje wraz ze zmniejszaniem się ciśnienia zasilania, średnicy i promienia zaokrąglenia obiektu manipulacji. Stwierdzono również, że chwytak może przenosić detale o różnym kształcie (płyta, kula, bryły obrotowe), nierównej lub perforowanej powierzchni. Detale mogą mieć wagę od kilku do kilkuset gramów.

Ponieważ badane urządzenie było optymalizowane pod kątem własności sensorycznych, tak więc udźwig jest mały przy stosunkowo dużym ciśnieniu zasilania.



Rys. 6. Zależność udźwigu chwytaka od ciśnienia zasilania

Fig. 6. Dependence of gripper load - carrying capacity on the supply pressure

5. Uwagi i wnioski końcowe

Przedstawiona metodyka projektowania pozwala projektować urządzenia z komorą wirową o z góry zadanych cechach i właściwościach konstrukcyjnych z dokładnością nie gorszą niż 25 %.

Opisana w pracy metoda wielokryterialnego wyboru oparta na teorii zbiorów rozmytych okazała się bardzo przydatna, gdyż umożliwiła stosunkowo szybko znalezienie racjonalnego kompromisu między wieloma wzajemnie sprzecznymi wymaganiami i ograniczeniami, zmniejszając tym samym koszty wstępnych prac i prób.

Metody planowania eksperymentu pozwoliły właściwie planować eksperyment i zmniejszać zakres prac doświadczalnych.

Przeprowadzone badania doświadczalne, prostota, niska cena oraz inne własności opisanych urządzeń potwierdzają tezę o ich przydatności w robotyce.

Kierunki dalszych prac i badań:

- zbadanie dokładności pozycjonowania elementów,
- przebadanie własności dynamicznych,
- opracowanie konstrukcji chwytaka o udźwigu zależnym od położenia i kształtu obiektu manipulacji.

LITERATURA

- [1] Daas S.M., Kwakernaak H.: Rating and ranking of multiple - aspect alternatives using fuzzy sets, Automatica, vol. 13, 1977.
- [2] Kacprzyk J.: Zbiory rozmyte w analizie systemowej, PWN, Warszawa 1986.
- [3] Kacprzyński B.: Planowanie eksperymentów, WNT, Warszawa 1974.
- [4] Kwock C.K.: A theoretical study of vortex flow in a thin cylindrical chamber, Bendix Technical Journal, Winter 1969.
- [5] Mańczak K.: Technika planowania eksperymentu, WNT, Warszawa 1976.
- [6] Ochocimaki D.E.: Robotizacija sboročnych processov, Nauka, Moskva 1985.
- [7] Olaszewski M.: Manipulatory i roboty przemysłowe, WNT, Warszawa 1985.
- [8] Safronov V.V., Ivanov A.A., Mirkeev A.O.: Kombinirovannnye pnevmaticheskie zachvaty promyšlennych robotov, Mechanizacija i avtomatizacija proizvodstva, 7, 1985.
- [9] Sentjakov B.A., Isupov T.P., Nordanov A.A.: Strujnoe zachvatnoe ustrojstvo so snekovym zavichritelem potoka, Mechanizacija i avtomatizacija proizvodstva, 1, 1986.
- [10] Sileikis V.: Metodyka projektowania komory wirowej pracującej jako czujnik odległości, Praca doktorska, Gliwice 1978.
- [11] Sileikis V., Czogala E., Mrozek A.: Optymalizacja komory wirowej pracującej jako czujnik przesunięcia, ZN Pol. Śl. z. 40, Gliwice 1978.
- [12] Sileikis V., Palus H.: Primenenie vichrevoj kamery dlja upravlenija promyšlennym robotom, Proceedings of 7th International Conference on Control Systems and Computer Science, Bucharest 1987.
- [13] Śniady S., Szejnach W.: Zastosowanie efektu wirowego w układach manipulujących drobnymi częściami, III Krajowa Konferencja "Pneumatyczne i Hydrauliczne Elementy Automatyki Przemysłowej", Warszawa 1984.

Recenzent: Prof.dr h.inż.M.Werszko

Wpłynęło do Redkcji do 1988-04-30.

ПРИМЕНЕНИЕ ВИХРЕВОЙ КАМЕРЫ В РОБОТОТЕХНИКЕ

Резюме

В работе представлены принципы действия, конструкция и методика проектирования вихревой камеры, работающей одновременно как вакуумное захватное устройство и как сенсорное устройство. Рассмотрена двухэтапная методика проектирования вихревой камеры основана на результатах теории расплывчатых множеств и статистической оптимизации. Представлены и сравнены результаты теоретических и экспериментальных исследований, сформулированы выводы.

APPLICATIONS OF VORTEX CHAMBER IN ROBOTICS

S u m m a r y

The paper presents principles of performance, construction and design methodology of a vortex chamber working simultaneously as a vacuum gripper and a sensor device. A two-stage design methodology based on the fuzzy sets theory and statistical optimization is discussed. The comparison of the results of the authors' theoretical and experimental researches and concluding remarks are presented.