

Tomasz HUŚCIO, Franciszek SIEMIENIAKO
POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY

Symulacja komputerowa płaskiej aerostaticznej podpory współrzędnościowej z elektromagnetycznym napędem

Mgr inż. Tomasz HUŚCIO

Reprezentowana dyscyplina – automatyka i robotyka, budowa i eksploatacja maszyn. Prowadzi zajęcia dydaktyczne z programowania systemów sterowania, projektowania układów pomiarów i automatyki, projektowania stron www, techniki multimedialne.



e-mail: tomekh@pb.edu.pl

Prof. dr hab. inż. Franciszek SIEMIENIAKO

Reprezentowana dyscyplina – automatyka i robotyka, budowa i eksploatacja maszyn. Jest autorem lub współautorem 12 podręczników dydaktycznych, 5 rozpraw naukowych, wielu artykułów i referatów ogłoszonych na konferencjach krajowych i zagranicznych. Wypromował sześciu doktorantów. Prowadzi zajęcia dydaktyczne z automatyki, teorii maszyn i mechanizmów oraz automatyzacji procesów.



e-mail: frank@pb.edu.pl

Streszczenie

W artykule omówiono zasadę działania płaskiej aerostaticznej podpory współrzędnościowej z napędem elektromagnetycznym. Opisano etapy badań płaskiej aerostaticznej podpory współrzędnościowej. Przedstawiono algorytm obliczeniowy programu SPAP^{AERO}. Obliczenia przeprowadzane w tym programie są podstawą do określenia zakresu wysokości szczeliny powietrznej, w którym sztywność podpory jest największa i stała. Zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych opracowane w programie SPAP^{AERO}.

Słowa kluczowe: podpora aerostaticzna, elektromagnetyczny moduł napędowy, współrzędnościowy układ pozycjonujący.

Computer simulation of a planar aerostatic two-coordinate relative base with electromagnetic drive

Abstract

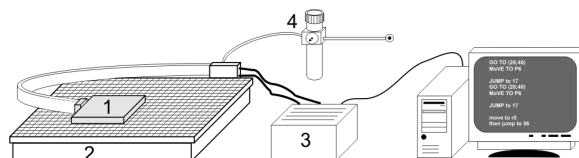
The basic direction of development of the structure of planar, aerostatic, two-coordinate relative bases with electromagnetic drive is to look for solutions characterised by higher stiffness. The stiffness determines an ability of the relative base to counteract the working load (payload). In order to determine the air-gap height range for which the stiffness is the biggest and constant, one has to work out the particular model and computer simulation of the system. Section 1 describes the principle of operation of a planar aerostatic two-coordinate relative base with electromagnetic drive (planar stepping motor). The term of the planar stepping motor was introduced by Bruce Sawyer [1]. In 1968 he patented a device of this name [3]. Recently, Sawyer motors have attracted considerable attention in the robotics because of their many desirable attributes [10, 11, 12, 13]. Figure 1 shows basic elements of the coordinate positioning system. The planar aerostatic two-coordinate relative base (1) (moving forcer) rides over the stationary absolute base (2) (platen) on an air bearing film, typically $10 \div 15 \mu\text{m}$ thick. Table 1 presents common technical data of the planar stepping motor. Figure 3 shows cross sections of the elementary electromagnetic modules that constitute electromagnetic drives when put together in parallel. Figure 5 (Section 2) shows consecutive stages of a computer simulation of the planar aerostatic two-coordinate base with electromagnetic drive. Section 3 presents the algorithm of the computer program SPAP^{AERO} (Figure 7) [14] and the computer simulation results obtained with it. SPAP computer program accelerates the design process of a structure of the planar aerostatic two-coordinate relative base with electromagnetic drive. The computer simulation results enable choosing the required alternative structure of the aerostatic relative bases with electromagnetic drive in particular devices.

Keywords: aerostatic relative base, electromagnetic drive module, coordinate positioning system.

1. Obiekt badań

Płaska aerostaticzna podpora współrzędnościowa z napędem elektromagnetycznym (płaski silnik, ang. planar motor) jest podstawowym elementem współrzędnościowych układów pozycjonujących

wyspecjalizowanych urządzeń (superdokładnych obrabiarek (tokarki diamentarki, szlifierki), maszyn kontrolno-pomiarowych, precyzyjnych stołów montażowych stosowanych w mikroelektronice). Współrzędnościowy układ pozycjonujący, przedstawiony na rysunku 1, składa się z: płaskiej aerostaticznej podpory współrzędnościowej – wzбудnik (ang. forcer) ze smarowaniem aerostaticznym (1); nieruchomej podstawy (ang. platen) (2); karty sterującej (3); zespołu przygotowania sprężonego powietrza (filtr, zawór redukcyjny) (4).



Rys. 1. Podstawowe elementy współrzędnościowego układu pozycjonującego:

1- płaska aerostaticzna podpora, 2- nieruchoma podstawa, 3- karta sterująca, 4- zespół przygotowania sprężonego powietrza

Fig. 1. Basic elements of the coordinate positioning system: 1- planar aerostatic two-coordinate relative base, 2- immovable absolute base, 3- motion control card, 4- air filter and regulator

W tabeli 1 przedstawiono podstawowe dane techniczne płaskich silników.

Tab. 1. Dane techniczne płaskich silników krokowych [17]
Tab. 1. Common technical data of the planar stepping motor [17]

Maksymalna prędkość, m/s	1,5
Powtarzalność, $\text{mm} \cdot 10^{-3}$	3
Dokładność pozycjonowania, $\text{mm} \cdot 10^{-3}$	$\pm 15^*$
Rozdzielczość, $\text{mm} \cdot 10^{-3}$	1,0
Ciśnienie powietrza zasilającego, MPa	$0,32 \pm 0,01$
Wysokość szczeliny powietrznej, $\text{mm} \cdot 10^{-3}$	8-12

*- zależna od rodzaju wzбудnika

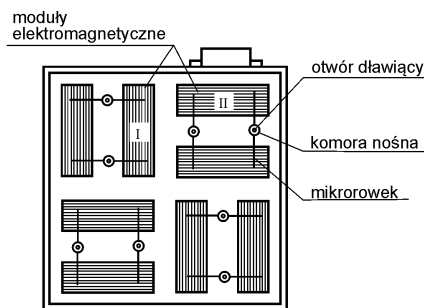
Pojęcie planar motor zostało wymyślone przez Bruce Sawyera [1]. Sawyer prowadził badania nad planarnymi silnikami od lat '60 [2]. W 1968 roku opatentował on urządzenie o takiej nazwie [3]. Obecnie powszechnie używana jest nazwa silnik Sawyera (ang. "Sawyer" motor). Podpora aerostaticzna (wzбудnik) przemieszcza się nad nieruchomą podstawą na powietrznej warstwie smarującej (łożyskowanie aerostaticzne), która zazwyczaj ma od 10 do 15 mikrometrów grubości. Podpora może przenosić obciążenia zewnętrzne wzdłuż określonej, płaskiej trajektorii. Dzięki zastosowaniu łożyskowania aerostaticznego opory tarcia w płaskim silniku (układzie podpora aerostaticzna – podstawa) są znacząco zredukowane (współczynnik tarcia $\mu = 10^{-4} \div 10^{-5}$). Smarowanie aerostaticzne jest smarowaniem gazowym, w którym powierzchnie trące części będących w ruchu względem siebie lub

w stanie spoczynku są całkowicie rozdzielone przez gaz dostarczony z zewnątrz pod ciśnieniem do szczeliny między powierzchniami [4]. W łożysku aerostaticznym działająca siła zewnętrzna jest równoważona przez reakcję cienkiej warstwy czynnika smarującego – powietrza, znajdującej się między dwoma elementami łożyska. Reakcja ta wynika z rozkładu ciśnienia w filmie smarującym na określonej powierzchni.

Sterowanie podpory pneumatycznej realizowane jest przez kartę sterowania (3), która przetwarza, zgodnie z programem sterującym, sygnał cyfrowy z komputera na analogowy sygnał prądowy. Następnie ciąg sterujących impulsów prądowych przekształcany jest bezpośrednio na ciąg przesunięć liniowych (Δx , Δy). Kierunek przesunięć podpory związany jest z sekwencją podawanych impulsów. Prędkość przemieszczania podpory zależy od częstotliwości podawanych impulsów, natomiast wartość, o jaką podpora przesunie się względem podstawy, zależy od ilości podawanych impulsów.

Podpora aerostaticzna (wzbudnik) składa się z: aluminiowej ramy, modułów elektromagnetycznych, instalacji pneumatycznej (zespół przygotowania sprężonego powietrza (reduktor, filtr), przewód zasilający, otwory dławicowe, komory nośne, rowki rozpraszające powietrze).

Na rysunku 2 przedstawiono powierzchnię nośną podpory aerostaticznej.



Rys. 2. Powierzchnia nośna podpory aerostaticznej
Fig. 2. The relative base working surface

Dławiki są umieszczone w otworach doprowadzających powietrze do szczeliny między powierzchniami podpory i podstawy. Charakterystyka przepływu powietrza przez dławik zależy od rodzaju konstrukcji oraz ciśnienia występujących przed i za dławikiem. Rozróżnia się dławiki: kapilarne (o przepływie uwarstwionym), diafragmowe (o przepływie burzliwym) oraz porowate (o przepływie mieszanym) [5].

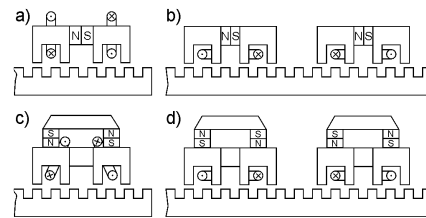
Komora nośna (komora wyrównawcza, rozprężania) jest elementem, w którym powietrze po przepłynięciu przez dławik rozpręża się. Objętość komory za dławikiem powinna być możliwie mała ze względu na drgania samowzbudne typu „młotek pneumatyczny” [5]. Stosunek objętości komory nośnej do objętości szczeliny nie powinien przekraczać 0,25...0,3. Większa objętościowo komora nośna jest jedną z zasadniczych przyczyn niestabilności podpór aerostaticznych [6, 7, 8]. Wysokość komory nośnej jest około 10-krotnie większa od wysokości szczeliny powietrznej, stąd przyjmuje się, że ciśnienie w niej jest stałe [9].

Rowki rozpraszające powietrze (mikrorowki, kanały) przeznaczone są do rozpraszania sprężonego powietrza na całej powierzchni nośnej podpory pneumatycznej.

Powierzchnia nośna podpory zawiera także dwie grupy ortogonalnych elektromagnetycznych modułów. Moduł elektromagnetyczny I odpowiada za przesunięcie podpory wzdłuż osi X, II natomiast za przesunięcie podpory wzdłuż osi Y.

Na rysunku 3 przedstawiono podstawowe rozwiązania elementarnych modułów elektromagnetycznych, które zestawione równolegle tworzą moduły napędowe (I, II). Moduł elektromagnetyczny składa się z rdzeni magnetycznych, pomiędzy którymi znajdują się magnesy trwałe. Na każdym rdzeniu znajduje się uzwojenie.

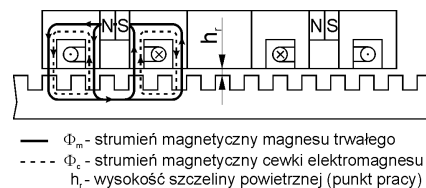
Rdzenie mają nacięte zęby, które znajdują się od siebie w odległości równej podziałce zębowej nieruchomej podstawy.



Rys. 3. Podstawowe rozwiązania konstrukcyjne elementarnych modułów elektromagnetycznych: a) moduł dwufazowy, b) dwa moduły jednofazowe, c) moduł dwufazowy z jarzmem, d) dwa moduły jednofazowe z jarzmi

Fig. 3. Cross sections of the elementary electromagnetic modules

Elektromagnetyczny moduł napędowy składa się z ułożonych równoległe elementarnych modułów elektromagnetycznych (rysunek 4).



Rys. 4. Elementarny moduł elektromagnetyczny
Fig. 4. Elementary electromagnetic module

W elementarnym elektromagnetycznym module wyróżniamy dwa obwody magnetyczne. Pierwszy obwód, w którym występuje strumień magnetyczny Φ_m generowany przez magnes trwały oraz drugi obwód, w którym strumień Φ_c generowany jest przez cewkę o n zwojach. Strumień Φ_c generowany przez cewkę wytwarza siłę F_c powodującą ruch modułu napędowego (a więc przemieszczanie podpory aerostaticznej względem nieruchomej podstawy). Strumień Φ_m generowany przez magnes trwały generuje siłę przyciągania magnetycznego F_e elementarnego modułu elektromagnetycznego.

Wartość siły F_p przyciągania podpory (twornika) do podstawy (stojana) generowanej przez magnesy trwałe elektromagnetycznych modułów napędowych wynosi:

$$F_p = n_e \cdot F_e, \quad (1)$$

gdzie:

- n_e - liczba elementarnych elektromagnetycznych modułów wchodzących w skład modułów napędowych,
- F_e - siła przyciągania generowana przez elementarny elektromagnetyczny moduł.

Do zalet płaskich silników można zaliczyć:

- możliwość uzyskania dwóch stopni swobody (w ograniczonym zakresie także trzeci stopień swobody – obrót) z użyciem pojedynczej części ruchomej – podpory aerostaticznej,
- możliwość budowy mechanizmów (manipulatorów) o szeregowej a nie równoległej strukturze kinematycznej,
- niewielkie tarcie współpracujących powierzchni silnika (współczynnik tarcia $\mu = 10^{-4} \div 10^{-5}$),
- wysoka precyzja,
- możliwość osiągania dużych przestrzeni roboczych,
- możliwość budowania układów z wieloma podporami na jednej podstawie.

Z powodu wielu zalet w ostatnich latach silniki Sawyera znajdują szerokie zastosowanie w robotyce [10, 11, 12, 13].

Ważnym parametrem konstrukcyjnym płaskich podpór aerostacyjnych jest ich sztywność. Sztywność jest miarą zdolności podpory aerostacyjnej do przeciwstawiania się obciążeniom zewnętrznym. Przejawem działania obciążeń zewnętrznych jest zmiana grubości warstwy nośnej h (szczeliny powietrznej) w układzie podpora – szczelina powietrzna – podstawa.

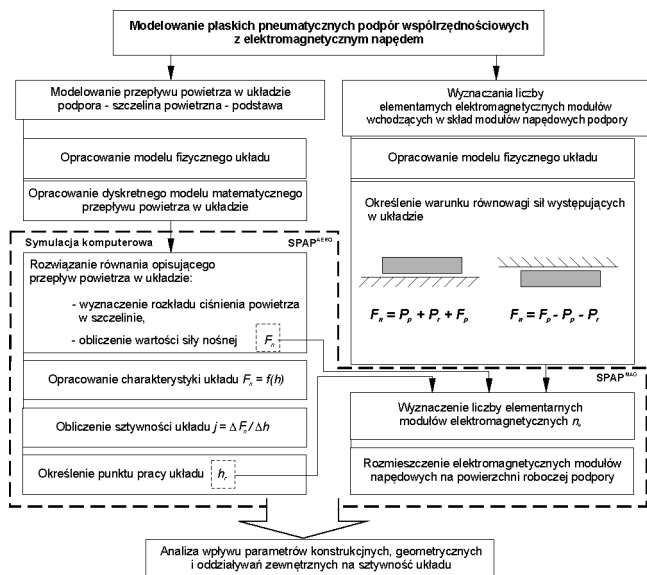
Sztywność statyczna podpory, bez zwiększania wymiarów powierzchni nośnej podpory i przy stosowanym określonym ciśnieniu powietrza zasilającego szczelinę powietrzną, może być zwiększana do żądanej wartości sposobami konstrukcyjno-eksploatacyjnymi. Jednym ze sposobów realizacji tego celu jest opracowanie modelu płaskiej aerostacyjnej podpory i przeprowadzenie badań poprzez symulację komputerową.

Analiza uzyskanych wyników pozwoli na określenie wpływu parametrów konstrukcyjnych, geometrycznych i oddziaływań zewnętrznych na zachowanie się podpory (jej sztywności).

2. Modelowanie podpór aerostacyjnych z napędem elektromagnetycznym

Na rysunku 5 przedstawiono poszczególne etapy modelowania i symulacji komputerowej płaskiej aerostacyjnej podpory współrzędnościowej z napędem elektromagnetycznym. W modelowaniu aerostacyjnej podpory współrzędnościowej z napędem elektromagnetycznym można wyróżnić dwa podstawowe etapy.

1. Modelowanie przepływu powietrza w układzie podpora – szczelina powietrzna – podstawa.
2. Wyznaczenie, w oparciu o warunek równowagi sił występujących w układzie, liczby n_e elementarnych elektromagnetycznych modułów wchodzących w skład modułów napędowych zainstalowanych w podporze oraz ich rozmieszczenie na powierzchni nośnej podpory aerostacyjnej.

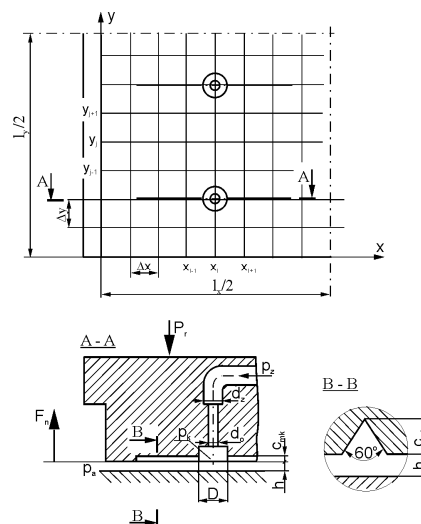


Rys. 5. Modelowanie i symulacja komputerowa płaskiej aerostacyjnej podpory współrzędnościowej z napędem elektromagnetycznym
Fig. 5. Modelling and computer simulation of the planar aerostatic two-coordinate relative base with electromagnetic drive

Przy obliczeniach podpory, związanych z przepływem powietrza w układzie podpora – szczelina powietrzna – podstawa, obciążenie robocze P_r nie jest brane pod uwagę. Na tym etapie symulacji komputerowej szukamy takiego zakresu wysokości szczeliny Δh (zakresu pracy) pomiędzy podporą a podstawą, dla którego sztywność podpory j jest największa i stała. Obciążenie robocze P_r uwzględniane jest w drugim etapie symulacji komputerowej podpór (podczas obliczeń liczby n_e modułów elektromagnetycznych). Podstawę tych obliczeń stanowi warunek równowagi sił występujących w układzie podpora – szczelina powietrzna – podstawa.

Przy wyznaczaniu liczby n_e modułów elektromagnetycznych dla uniwersalnego zastosowania układu podpora – szczelina powietrzna – podstawa przyjmujemy, że obciążenie robocze podpory P_r jest równe zero ($P_r = 0$). Natomiast w przypadku wyznaczania liczby n_e modułów elektromagnetycznych dla dedykowanego układu podpora – szczelina powietrzna – podstawa przyjmujemy, że wartość P_r jest równa ciężarowi urządzenia montowanego na podporze. Przykładem może być manipulator przemieszczający się na podporze.

Model fizyczny badanego układu, który stanowi podstawę do opracowania modelu matematycznego przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Model fizyczny układu podpora – szczelina powietrzna – podstawa
Fig. 6. Physical model of the relative base – air-gap – absolute base system

Złożoność zjawisk przepływu powietrza oraz wymiany ciepła w układzie podpora – szczelina powietrzna – podstawa wymaga przyjęcia szeregu założeń upraszczających. Typowymi założeniami upraszczającymi w aerostacyjnej teorii smarowania są:

- nie ma zmiany ciśnienia p w kierunku prostopadłym do powierzchni roboczych podpory i podstawy,
- przepływ powietrza przez szczelinę jest laminarny i ciągły,
- lepkość powietrza jest stała w całym obszarze warstwy smarującej,
- współpracujące powierzchnie robocze są nieodkształcalne,
- pomijalny jest wpływ sił bezwładności powietrza na parametry pracy układu,
- oddziaływanie otoczenia jest niezmiennie (stała temperatura i ciśnienie).

3. Symulacja komputerowa

Do badań symulacyjnych płaskiej aerostacyjnej podpory współrzędnościowej z napędem elektromagnetycznym wykorzystano program komputerowy SPAP. Program SPAP składa się z dwóch modułów: SPAP^{AERO} - do obliczeń związanych z przepływem powietrza w układzie podpora – szczelina powietrzna – podstawa [14], SPAP^{MAG} - do wyznaczenia liczby elementarnych elektromagnetycznych modułów oraz ich rozmieszczenie na powierzchni nośnej podpory pneumatycznej [15].

Na rysunku 7 przedstawiono algorytm obliczeniowy programu komputerowego SPAP^{AERO}, który obrazuje kolejne obliczenia mające na celu wyznaczenie rozkładu ciśnienia powietrza p w szczelinie i wynikającej z tego rozkładu siły nośnej F_n . Uzyskane wyniki umożliwiają opracowanie wykresu siły nośnej F_n w funkcji wysokości szczeliny h . Na podstawie wykresu $F_n = f(h)$ można określić zakres zmian wysokości szczeliny powietrznej, w którym sztywność podpory jest największa i stała.

W celu wyznaczenia $(m+1) \times (n+1)$ dyskretnych ciśnień $\bar{p}_{i,j}$ na powierzchni roboczej podpory: $0 \leq x \leq L_x$, $0 \leq y \leq L_y$ należy

rozwiązać $(m-1) \times (n-1)$ nieliniowych równań różnicowych w postaci:

$$a_{i,j} P_{i,j}^2 - b_{i,j} P_{i+1,j}^2 - c_{i,j} P_{i-1,j}^2 - d_{i,j} P_{i,j+1}^2 - e_{i,j} P_{i,j-1}^2 = \psi_{i,j}, \quad (2)$$

gdzie:

$\psi_{i,j}$ - wyrażenie zależne od występowania otworu zasilającego w węzle,

$a_{i,j}, b_{i,j}, c_{i,j}, d_{i,j}, e_{i,j}$ - współczynniki stałe dla każdego węzła siatki, zależne od rozmieszczenia mikrorowków na powierzchni roboczej podpory,

$p_{i,j}$ - wartości ciśnień w poszczególnych węzłach siatki dyskretyzacji,

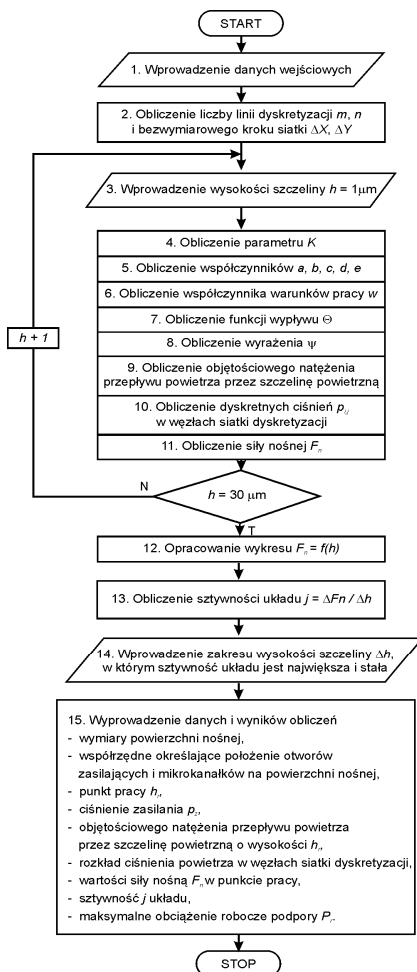
P - bezwymiarowe ciśnienie w węzłach siatki dyskretyzacji odniesione do ciśnienia atmosferycznego ($P_{i,j} = \frac{p_{i,j}}{p_a}$).

Warunki brzegowe to $2 \cdot (m+n)$ zależności wynikających z równości ciśnień w węzłach położonych na obwodzie powierzchni roboczej podpory z ciśnieniem atmosferycznym:

$$P_{i,0} = 1; \quad 0 \leq i \leq m$$

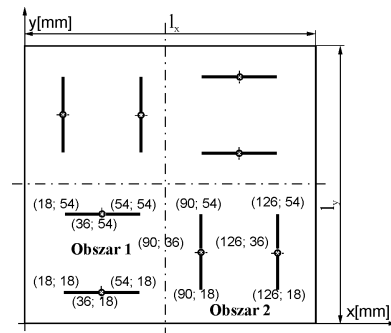
$$P_{0,j} = 1; \quad 0 \leq j \leq n$$

Model matematyczny przepływu powietrza przez układ podpora – szczelina powietrzna – podstawa przedstawiono w artykule [16].



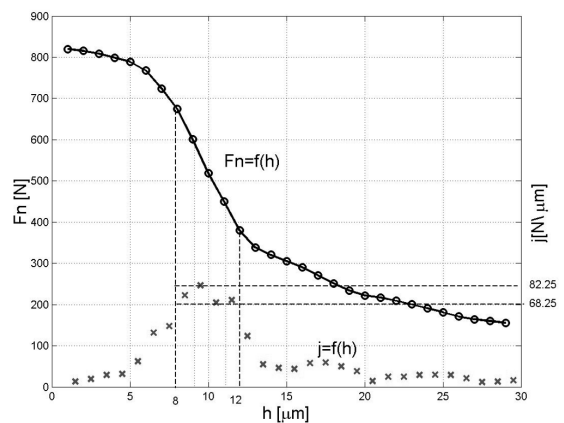
Rys. 7. Algorytm obliczeniowy programu SPAP^{AERO}
Fig. 7. Algorithm of the computer program SPAP^{AERO}

- Do symulacji komputerowej przyjęto następujące dane wejściowe:
- wielkości geometryczne: $l_x = 144$ mm, $l_y = 144$ mm, $\Delta x = 4,5$ mm - krok siatki dyskretyzacji na osi x, $\Delta y = 4,5$ mm - krok siatki dyskretyzacji na osi y, $d_o = 0,285 \cdot 10^{-3}$ [m], $D = 2,85 \cdot 10^{-3}$ [m], $c_{mk} = 0,15 \cdot 10^{-3}$ [m];
 - ciśnienia: $p_z = 0,32$ MPa, $p_a = 0,1$ MPa;
 - własności gazu zasilającego (powietrza): lepkość dynamiczna $\mu = 1,8 \cdot 10^{-5} \left[\frac{Ns}{m^2} \right]$, gęstość powietrza atmosferycznego $\rho_a = 1,25 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$, $R = 287 \left[\frac{N \cdot m}{kg \cdot K} \right]$, $T = 293$ [K];
 - rozmieszczenie otworów zasilających szczelinę powietrzną oraz rowków rozprzodających powietrze na powierzchni nośnej podpory przyjęto zgodnie z rysunkiem 8. Ponieważ geometria powierzchni roboczej podpory jest centralnie symetryczna, wystarczy więc podać współrzędne na obszarze 1 i obszarze 2.



Rys. 8. Powierzchnia nośna podpory aerostaticznej
Fig. 8. The relative base working surface

W pierwszym etapie symulacji komputerowej (program SPAP^{AERO}) otrzymano wykres siły nośnej F_n w funkcji wysokości szczeliny h . Charakterystykę $F_n = f(h)$ układu podpora – szczelina powietrzna – podstawa przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Wykres siły nośnej w funkcji wysokości szczeliny $F_n = f(h)$ i sztywności w funkcji wysokości szczeliny $j = f(h)$
Fig. 9. Aerodynamic lift F_n and stiffness j vs. air-gap height h

W celu wyznaczenia zakresu wysokości szczeliny powietrznej, w którym sztywność układu podpora – szczelina powietrzna – podstawa jest największa i stała, obliczono sztywność j podpory dla kolejnych zakresów wysokości szczeliny powietrznej:

$$j_{1,2} = \frac{\Delta F_n}{|\Delta h|} = \frac{F_{n_{h1}} - F_{n_{h2}}}{1}, j_{2,3} = \frac{\Delta F_n}{|\Delta h|} = \frac{F_{n_{h2}} - F_{n_{h3}}}{1}, \dots, j_{29,30} = \frac{\Delta F_n}{|\Delta h|} = \frac{F_{n_{h29}} - F_{n_{h30}}}{1} \quad (4)$$

gdzie:

$F_{n_{h_1}}, \dots, F_{n_{h_{30}}}$ - wartość siły nośnej dla kolejnych wysokości szczeliny $h = 1, 2, \dots, 30 \mu\text{m}$,

$$\Delta h = 1 \div 2, 2 \div 3, \dots, 29 \div 30 \mu\text{m} \Rightarrow \Delta h = 1.$$

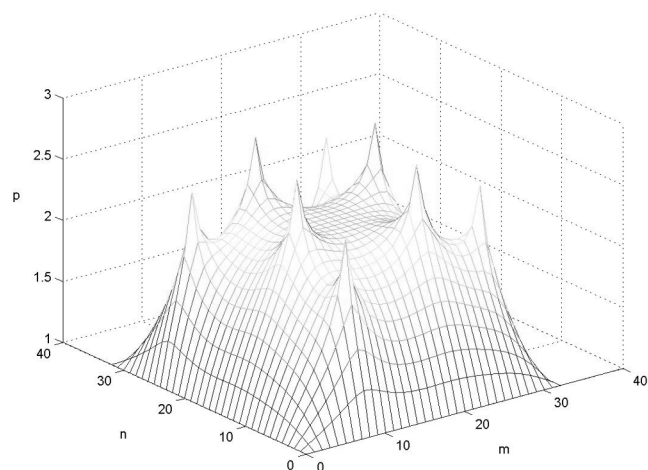
Otrzymane wartości sztywności j dla poszczególnych zakresów wysokości szczeliny zestawiono na charakterystyce $j = f(h)$ (rysunek 9).

Z charakterystyki $j = f(h)$ można odczytać, że sztywność układu podpora – szczelina powietrzna – podstawa jest największa i praktycznie stała w zakresie zmian wysokości szczeliny $\Delta h = 8 \div 12 \mu\text{m}$. Stąd:

$$j = \frac{\Delta F_n}{|\Delta h|} = \frac{F_{n_{h_8}} - F_{n_{h_{12}}}}{|h_8 - h_{12}|} = \frac{675 - 380}{|8 - 12|} = 73,75 \frac{\text{N}}{\mu\text{m}}. \quad (5)$$

Po wprowadzeniu do programu SPAP^{AERO} oszacowanego zakresu wysokości szczeliny na ekran monitora zostają wyprowadzone następujące dane:

- wymiary powierzchni nośnej,
 - współrzędne określające rozmieszczenie otworów zasilających i mikrokanalików na powierzchni nośnej podpory aerostaticznej (rysunek 8),
 - ciśnienie zasilania układu podpora – szczelina powietrzna – podstawa $p_z = 0,32 \text{ MPa}$,
- oraz wyniki obliczeń:
- punkt pracy $h_r = 12 \mu\text{m}$,
 - objętościowe natężenie przepływu powietrza przez szczelinę powietrzną o wysokości h_r ,
 - wartości ciśnienia na powierzchni podpory w węzłach siatki dyskretyzacji (rysunek 10),
 - wartość siły nośnej $F_n = 380 \text{ N}$ w punkcie pracy h_r ,
 - sztywność układu j ,
 - maksymalne obciążenie robocze podpory $P_{rmax} = 295 \text{ N}$.



m, n – liczby całkowite określające krok siatki,
 P - bezwymiarowe ciśnienie w węzłach siatki dyskretyzacji

odniesione do ciśnienia atmosferycznego ($P_{i,j} = \frac{P_{i,j}}{P_a}$)

Rys. 10. Rozkład ciśnienia powietrza p na powierzchni nośnej podpory aerostaticznej
 Fig. 10. Distribution of the air pressure p on the working surface of the relative base

Dla obciążenia roboczego większego od P_{rmax} szczelina przyjmuje wysokość mniejszą od $8 \mu\text{m}$. Przy bardzo małych szczelinach, w praktyce występuje zjawisko niestabilności (tzw. młot pneumatyczny) powodujące drganie podpory [9].

Kolejnym krokiem symulacji komputerowej jest wyznaczenie liczby elementarnych elektromagnetycznych modułów napędo-

wych oraz ich rozmieszczenie na powierzchni nośnej podpory pneumatycznej. Algorytm działania programu komputerowego SPAP^{MAG} umożliwiający przeprowadzenie tego rodzaju obliczeń przedstawiono w [15].

4. Podsumowanie

Badania dotyczące przepływu powietrza przez układ podpora – szczelina powietrzna – podstawa oraz wyznaczenia liczby elementarnych elektromagnetycznych modułów napędowych oraz ich rozmieszczenie na powierzchni nośnej podpory są na etapie symulacji komputerowych. Program komputerowy SPAP z modułami SPAP^{AERO} i SPAP^{MAG} przyspieszy procesu projektowania konstrukcji płaskich aerostaticznych podpór współrzędnościowych z napędem elektromagnetycznym. Wyniki obliczeń uzyskane podczas symulacji komputerowej umożliwią wybór pożądanego, w określonym urządzeniu, wariantu konstrukcji podpory aerostaticznej z elektromagnetycznym napędem.

Kolejnym krokiem badań będzie weryfikacja doświadczalna wyników uzyskanych z symulacji komputerowych.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008-2009 jako projekt badawczy Nr N N504 478834.

5. Literatura

- [1] W. E. Hinds and B. Nocito: Theory and Application of Step Motors. West Publishing Co., St. Paul 1974.
- [2] E. R. Pelta: Two-axis Sawyer motor for morion system. IEEE Control Systems magazine pp. 20-24, October 1987.
- [3] Sawyer B.A.: US Patent nr. 3 376 578 (1968).
- [4] PN-90/M-87051. Łożyska ślizgowe. Smarowanie. Terminologia.
- [5] Wiercioch W.: Parametry konstrukcyjno-technologiczne aerostaticznych połączeń przewodnicowych. Trybologia 3-1988.
- [6] Grassam M. S., Powell J. W.: Podsiłpni s gazowej smazkoj. Izd. MIR, Maskwa 1966. (Oryginał wydany w Londynie w 1966).
- [7] Senberg S. A., Żed W. P., Siseev M. D.: Opyr skolzhenja s gazowoj smazkoj. Maszynostrojenie, Moskwa 1969.
- [8] Wiercioch W.: Badania statyczne i dynamiczne prostoliniowych przewodnic aerostaticznych obrabiarek. Praca doktorska, Instytut Budowy Maszyn, Politechnika Śląska – Gliwice 1978.
- [9] Kazimierski Z., Krysiński J.: Łożyskowanie gazowe i napędy mikro-turbinowe. WNT, Warszawa 1981.
- [10] Hashida S., Kaiho F., Koizumi Y., Tamura T.: Planeserwy Planar Serwomotor. Yokogawa Technical Report English Edition No. 32 (2001).
- [11] Hollis R. L., Rizzi A. A., Brown H. B., Quaid A. E., Butler Z. J.: Toward second-generation minifactory for precision assembly. In Proc. IARP Workshop on Microrobots, Micromachines and Microsystem, Moscow, Russia, April 24-25 2003. Int'l Advanced Robotics Program.
- [12] Lauwers T. B., Edmonds Z. K., Hollis R. L.: Progress in Agile Assembly: Minifactory Couriers Based on Free-roaming Planar Motors. 4th Int'l Workshop on Micro-Factories, Shanghai, P. R. China, October 15-17, 2004.
- [13] Hollis R. L., Gowdy J., Rizzi A. A.: Design and Development of a Tabletop Precision Assembly System. Mechatronics and Robotics, (MechRob '04) Aachen, Germany, September 13-15, 2004.
- [14] T. Huścio: Komputerowo wspomaganą symulacją płaskich aerostaticznych podpór współrzędnościowych Program SPAPAERO. International Scientific-Technical Conference. Hydraulic and Pneumatics '2005. Problems and development tendencies in the beginning decade of the 21st Century, p. Wrocław 2005.
- [15] T. Huścio, F. Siemieniako: Algorytm doboru elektromagnetycznych modułów napędowych płaskiej aerostaticznej podpory współrzędnościowej. Acta mechanica et automatica vol. 2, no. 1 (3), Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok 2008.
- [16] T. Huścio, S. Karpovich: Mathematical model of the gas flow through the relative base – air gap – absolute base system, Sovremennye metody proektirovanija mašin: respublikanskij meżvedomstvennyj sbornik naučnych trudov. Vyp.2, T.6. Technoprint, Mińsk 2005 r.
- [17] Information on <http://www.ruchserwomotor.com>