

SYSTEM POZYCJONOWANIA GŁOWIC PAMIĘCI MASOWEJ Z PRZEGUBAMI PRYZMATYCZNYMI

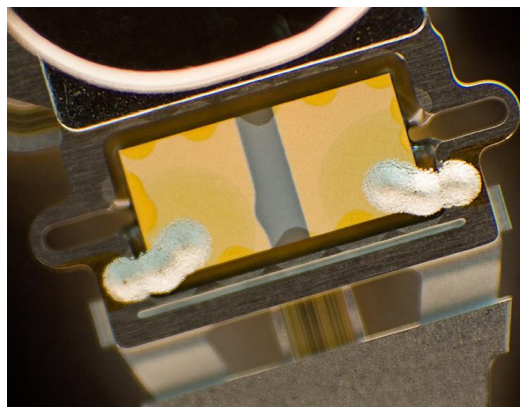
TOMASZ TRAWIŃSKI

*Katedra Mechatroniki, Wydział Elektryczny, Politechnika Śląska
e-mail: tomasz.trawinski@polsl.pl,*

Streszczenie. W pracy przedstawiono dwie przykładowe struktury łańcuchów kinematycznych systemów pozycjonowania głowic pamięci masowych. W łańcuchach kinematycznych występują przeguby obrotowe i pryzmatyczne. Przedstawiono ich macierze przekształceń jednorodnych oraz strukturę macierzy bezwładnościowych dla analizowanych łańcuchów kinematycznych.

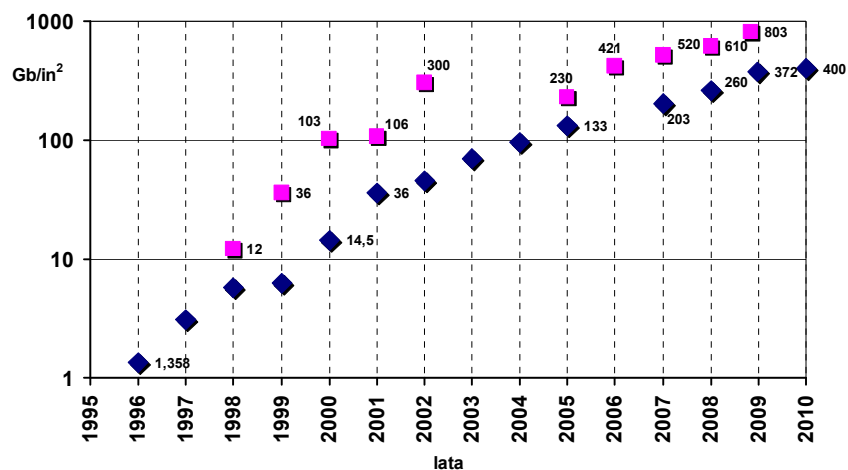
1. WSTĘP

Typowe systemy pozycjonowania głowic dysków twardych wyposażone są w jeden silnik napędowy – tzw. VCM. Przy obserwowanym corocznie intensywnym wzroście pojemności dysków twardych, a co za tym idzie, wzroście powierzchniowych gęstości danych (czyli iloczynu liniowej gęstości bitów i liczby ścieżek) zadanie prawidłowego śledzenia ścieżek przez system pozycjonowania, wyposażony tylko w jeden silnik napędowy, jest bardzo trudne lub wręcz niemożliwe do zrealizowania. Stąd też konieczne jest wprowadzanie do łańcucha kinematycznego systemu pozycjonowania dodatkowych silników pomocniczych – aktuatorów (piezoelektrycznych, elektrostatycznych), umożliwiających zwiększenie zdolności śledzenia ścieżek z danymi. W chwili obecnej największą powierzchniową gęstość danych zastosowano w dyskach twardych firmy Western Digital – jest to wartość $400 \text{ Gb} / \text{in}^2$. Na rys. 1 przedstawiono dodatkowy silnik piezoelektryczny, który jest stosowany w systemach pozycjonowania głowic firmy Western Digital.



Rys.1. Aktuatory piezoelektryczne w systemie pozycjonowania głowic dysków serii WB 2TB Black.
Fot. Maciej Miszczuk

Powyższy rysunek przedstawia szczegółowo budowę aktuatora piezoelektrycznego (o wymiarach $\sim 1 \times 2,4 \times 0,15$ mm) zintegrowanego z przegubem typu Φ . Aktuator piezoelektryczny składa się z płytki materiału piezoelektrycznego (widocznej w centralnej części zdjęcia). Widoczne są również miejsca lutownicze (doprowadzenie napięć zasilających). Na rys. 2 przedstawiono wzrost powierzchniowych gęstości danych w okresie 14 ostatnich lat [1, 2].



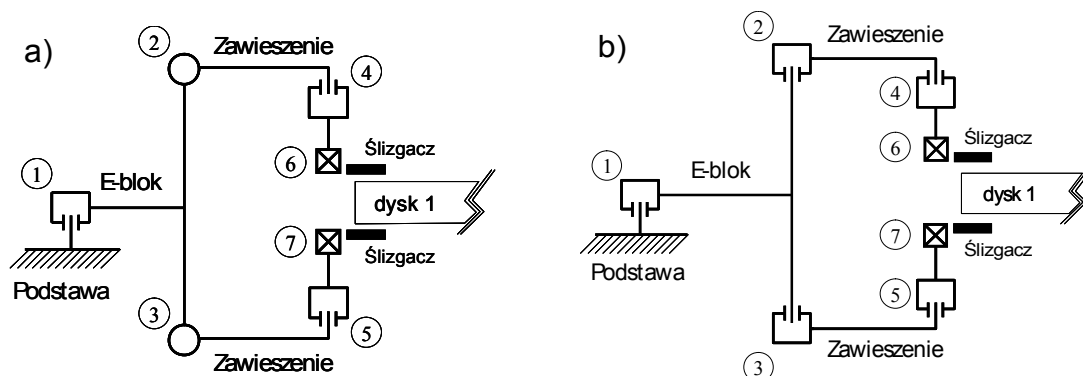
Rys. 2. Powierzchniowe gęstości danych na przełomie ostatnich 14 lat [1, 2]. \diamond – gęstości powierzchniowe stosowane, \square – gęstości powierzchniowe uzyskane w laboratoriach

Dalszy wzrost powierzchniowych gęstości danych jest ciągle możliwy, ale konieczne będzie sterowanie wysokością lotu głowic zapisujących i odczytujących dane [4] nad powierzchnią nośników danych, eliminującą między innymi wpływ falistości powierzchni nośników na wysokość lotu ślizgacza. Stąd wniosek, że system pozycjonowania głowic będzie musiał być wyposażony w co najmniej dwa lub trzy silniki (aktuatory) napędowe. W niniejszej pracy przedstawiono struktury łańcuchów kinematycznych pozwalających na wprowadzenie dodatkowych silników – mikrosilników (aktuatorów) umożliwiających zwiększenie zdolności prawidłowego śledzenia ścieżek z danymi.

2. PRZYJĘTE STRUKTURY ŁAŃCUCHÓW KINEMATYCZNYCH

Analizując proponowane w literaturze struktury łańcuchów kinematycznych, najczęściej spotyka się rozwiązania, w których zastosowano co najwyżej dwa silniki (aktuatory) napędowe. W pracach [5, 8] zaproponowano strukturę łańcucha kinematycznego złożoną z przegubu obrotowego i pryzmatycznego. W pracy [6] przedstawiono strukturę łańcucha kinematycznego złożonego z dwóch przegubów obrotowych. Jedynie w [7] przedstawiono model matematyczny (opisany równaniami transmitancyjnymi) dla struktury, którą można traktować jako złożenie trzech przegubów. Zwiększenie liczby przegubów, w których oddziałują dodatkowe silniki (aktuatory), umożliwi eliminację: wpływu drgań zewnętrznych, drgań wywołanych powtarzalnymi i niepowtarzalnymi biciaми łożysk, itp. Na rys. 3 przedstawiono dwie przykładowe struktury rozgałęzionych łańcuchów kinematycznych. Rozgałęziony łańcuch kinematyczny przedstawiony na rys. 3.a złożony jest z przegubów obrotowych i pryzmatycznych, ale osie obrotu przegubów „(2)” i „(3)” są prostopadłe do pozostałych osi obrotu. Łańcuch ten w dalszej części będzie oznaczany symbolem xGy_rRP (co oznacza – „x” gałęzi, „y” stopni swobody, rRP – konfiguracja przegubów). Osie obrotu przegubów rozgałęzionego łańcucha kinematycznego prezentowanego na rys. 3.b są do siebie równoległe. Tego typu łańcuch oznaczać będziemy w dalszej części symbolem xGy_RRP .

W obu przypadkach kierunki wysunięcia przegubów pryzmatycznych są prostopadłe do powierzchni nośników danych. W obu przypadkach łańcuchów założono, że przeguby pryzmatyczne napędzają ślizgacze, natomiast nie ma większych przeszkód, aby zamiast ślizgaczy mogły być napędzane bezpośrednio same głowice [1, 2, 4].



Rys. 3. Rozgałęzione łańcuchy kinematyczne milimanipulatorów systemów pozycjonowania głowic z przegubami pryzmatycznymi. Łańcuch typu xGy_rRP – a), łańcuch typu xGy_RRP – b)

We wszystkich produkowanych obecnie rozwiązaniach konstrukcyjnych systemów pozycjonowania głowic podstawowym źródłem napędu w przegubie pierwszym „(1)” jest tzw. silnik VCM (czyli łukowy silnik prądu stałego wzbudzony od magnesów trwałych). Przeguby „(2)” i „(3)” łańcucha typu xGy_rRP nie podlegają napędzaniu. Są one przegubami pasywnymi (działają w nich jedynie momenty wytworzone przez system sprężystego zawieszenia ślizgaczy). Pozostałe przeguby mogą zarówno w jednym jak i drugim przypadku prezentowanym na rys. 3, być napędzane przez mikroaktuatory (aktuatory) piezoelektryczne lub elektrostatyczne [8, 9]. W pracy [9] zaproponowano napęd przegubów „(4)” i „(5)” z wykorzystaniem skokowych silników elektrostatycznych – w celu kompensacji tzw. skosu głowicy (kompensacja kąta pomiędzy osią głowicy a styczną do trajektorii ścieżki), ale nie wspomina się nic na temat napędów innych przegubów. Firma Hitachi zaproponowała i opatentowała bezpośredni napęd głowicy z wykorzystaniem rozszerzalności cieplnej materiałów konstrukcyjnych jarzm samych głowicy [3, 4], który może być interpretowany, jako napęd liniowy przegubów pryzmatycznych. Firma Western Digital stosuje do napędów przegubów „(2)” i „(3)”, w łańcuchu typu xGy_R (pozostałych przegubów całkowicie nie wykorzystuje się), silniki piezoelektryczne – rys. 1.

3. KINEMATYKA MILIMANIPULATORÓW ROZGAŁĘZIONYCH

Człony łańcucha kinematycznego znajdujące się pomiędzy przegubami „(2)”, „(4)” i „(6)” można traktować w ten sposób, że przynależą one do tzw. gałęzi (włączając ślizgacz) – gałęzi *a*, podobnie jak człony znajdujące się pomiędzy przegubami „(3)”, „(5)” oraz „(7)” – to gałąź *b*. Stąd też w łańcuchach kinematycznych przedstawionych na rys. 3 mamy po dwie gałęzie. Przegub podstawowy „(1)”, człon podstawy i E-blok tworzą tzw. konar. Zmienne przegubowe przegubów „(2)” i „(3)” to tzw. zmienne złączeniowe pomiędzy konarem a gałęziami. Stąd też macierze przekształceń jednorodnych opisujących położenie i orientację głowicy w bazowym układzie współrzędnych (w funkcji zmiennych przegubowych) mogą być przedstawione jako złożenie macierzy jednorodnych konara i gałęzi:

$$T_0^g = T_0^{gi} \prod_{i=2}^n A_{gi} \quad (1)$$

gdzie: n – liczba stopni swobody łańcucha kinematycznego jednostkowej gałęzi, $g \in \{a, b, c, \dots\}$ – indeks gałęzi, $T_0^{g_i}$ – macierz (macierze) przekształcenia jednorodnego konara, A_{g_i} – elementarne macierze przekształceń jednorodnych pomiędzy układami współrzędnych gałęzi. W sposób obrazowy sens wzoru (1) – złożenie kinematyki konara i gałęzi – przedstawiono na rys.4.

$$T_0^g = T_0^{g_i} \prod_{i=2}^n A_{g_i}$$

Rys. 4. Złożenie kinematyki konara i gałęzi

Macierze przekształceń jednorodnych (1) występuje tyle, ile jest gałęzi – stron nośników danych, z którymi współpracują głowice. W przypadku łańcuchów kinematycznych prezentowanych na rys.3 mamy następujące, końcowe postaci macierzy przekształceń jednorodnych:

- przypadek pierwszy – łańcuch typu xGy_rRP:

$$T_0^{g_1} = \left[\begin{array}{ccc|c} c_1 & 0 & s_1 & a_1 c_1 \\ s_1 & 0 & -c_1 & a_1 s_1 \\ 0 & 1 & 0 & \pm d_{g_1} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (2)$$

gdzie: a_1, d_{g_1} – długość członu konara, odsunięcia przegubów dla gałęzi g ; s_{g_i}, c_{g_i} – skróty nazw funkcji sinus i kosinus dla kąta Θ_1 .

- przypadek drugi – łańcuch typu xGy_RRP:

$$T_0^{g_1} = \left[\begin{array}{ccc|c} c_1 & -s_1 & 0 & a_1 c_1 \\ s_1 & c_1 & 0 & a_1 s_1 \\ 0 & 0 & 1 & \pm d_{g_1} \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (3)$$

gdzie: znak „ \pm ” przechodzi w znak „+” dla gałęzi leżących powyżej środka bazowego układu współrzędnych.

- dla gałęzi łańcucha kinematycznego z rys.3.a:

$$T_{g_1}^{g_4} = \prod_{i=2}^4 A_{g_i} = \left[\begin{array}{ccc|c} c_{g_2 g_3} & -s_{g_2 g_3} & 0 & a_{g_3} c_{g_2 g_3} + a_{g_2} c_{g_2} \\ s_{g_2 g_3} & c_{g_2 g_3} & 0 & a_{g_3} s_{g_2 g_3} + a_{g_2} s_{g_2} \\ 0 & 0 & 1 & \pm (-d_{g_2} - d_{g_4}) \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right], \quad (4)$$

gdzie: znak „ \pm ” przechodzi w znak „+” dla gałęzi górnej; $s_{g_2 g_3}, c_{g_2 g_3}$ – skróty nazw funkcji sinus i kosinus dla sumy kątów Θ_{g_2} i Θ_{g_3} ; d_{g_i} – odsunięcia przegubów dla gałęzi g .

- dla gałęzi łańcucha kinematycznego z rys. 3.b:

$$T_{g1}^{g4} = \prod_{i=2}^4 A_{gi} = \begin{bmatrix} c_{g2}c_{g3} & -s_{g3}c_{g2} & -s_{g2} & \pm s_{g2}(d_{g3} - d_{g4}) + c_{g2}(a_{g2} + a_{g4}c_{g3}) \\ s_{g2}c_{g3} & s_{g2}s_{g3} & c_{g2} & \pm(-c_{g2}(d_{g3} - d_{g4})) + s_{g2}(a_{g2} + a_{g4}c_{g3}) \\ -s_{g3} & -c_{g3} & 0 & -a_{g4}s_{g3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

gdzie: znaki „ \pm ” przechodzą w znaki „ $+$ ” dla gałęzi górnej, a_{gi} – długości członów gałęzi g .

4. MACIERZE BEZWŁADNOŚCIOWE MILIMANIPULATORÓW ROZGAŁĘZIONYCH

Równania dynamiki rozgałęzionych milimanipulatorów mogą być przedstawione w postaci macierzowej, jako:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{D}_r^{-1}(\mathbf{Q} - \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{G}), \quad (6)$$

gdzie: \mathbf{D}_r – macierz bezwładnościowa, \mathbf{C} – macierz sił odśrodkowych i Coriolis’a, \mathbf{G} – wektor sił/momentów odgrawitacyjnych, \mathbf{Q} – wektor uogólnionych wymuszeń, $\ddot{\mathbf{q}}$, $\dot{\mathbf{q}}$ – wektory uogólnione odpowiednio: przyspieszenia i prędkości.

Ogólne struktury macierzy bezwładnościowych, sformułowane na podstawie [1, 2, 10], dla analizowanych struktur łańcuchów kinematycznych są następujące:

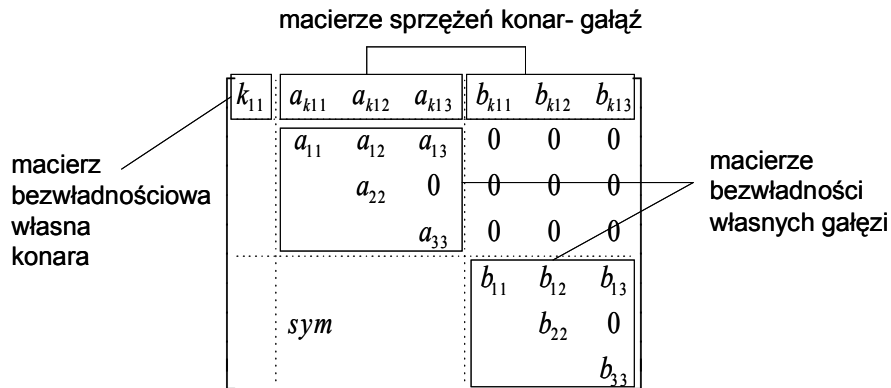
- dla łańcucha typu xGy_rRP (rys. 3.a):

$$\mathbf{D}_r = \begin{bmatrix} k_{11} & a_{k11} & a_{k12} & a_{k13} & b_{k11} & b_{k12} & b_{k13} \\ & a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & & a_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & a_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & sym & & & b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ & & & & & b_{22} & 0 \\ & & & & & & b_{33} \end{bmatrix} \quad (7)$$

- dla łańcucha typu xGy_RRP (rys. 3.b):

$$\mathbf{D}_r = \begin{bmatrix} k_{11} & a_{k11} & a_{k12} & 0 & b_{k11} & b_{k12} & 0 \\ & a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & a_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & a_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & sym & & & b_{11} & b_{12} & 0 \\ & & & & & b_{22} & 0 \\ & & & & & & b_{33} \end{bmatrix} \quad (8)$$

W macierzach (7) i (8) wyraźnie można zauważyć strukturę blokową – odpowiadającą przyjętemu wcześniej podziałowi milimanipulatora rozgałęzionego na konar i gałęzie. Czyli można w nich wyróżnić następujące podmacierze: bezwładności własnych konara (jest to macierz jednoelementowa), bezwładności własnych gałęzi (w analizowanych przypadkach są to macierze dziewięcioelementowe leżące na przekątnej głównej) oraz macierze sprzężeń konar – gałąź (są to macierze wierszowe – trójelementowe). Na rys. 5. przedstawiono w sposób obrazowy położenie poszczególnych macierzy.



Rys. 5. Blokowa struktura macierzy bezwładnościowych

Macierze leżące na przekątnej głównej są macierzami symetrycznymi kwadratowymi. Wyrażenia opisujące poszczególne elementy macierzy bezwładnościowych są znacznie rozbudowane [1, 2, 10]. Najbardziej rozbudowaną formę mają elementy (element) macierzy bezwładności własnej konara:

- dla łańcucha typu xGy_RRP:

$$k_{11} = m_{c1}a_{c1}^2 + I_{zc1} + \sum_{i=2,3} \left\{ \sum_{g \in \{a,b,\dots\}} (m_{cgi}(a_1^2 + 2a_1 a_{cgi}c_{gi} + a_{cgi}^2) + I_{zgi}) \right\} +$$

$$+ \sum_{g \in \{a,b,\dots\}} \{m_{cg4}(a_1^2 + 2a_1 a_{g2}c_{g2} + 2a_{cg4}(a_1 s_{g2g4} + a_{g2}s_{g3}) + a_{cg4}^2) + I_{zg4}\} \quad (9)$$

przy czym może zachodzić $a_{cg3} = a_{g2}$,

- dla łańcucha typu xGy_rRP:

$$k_{11} = m_{c1}a_{c1}^2 + I_{zc1} + \sum_{g \in \{a,b,\dots\}} m_{cg2}(a_1 + a_{cg2}c_{g2})^2 +$$

$$+ \sum_{g=a,\dots} \{m_{cg3}(a_1 + a_{g2}c_{g2} + d_{cg3}s_{g2})^2 + I_{zg3}c_{g2}^2\} +$$

$$+ \sum_{g=a,\dots} \{m_{cg4}((a_1 + (d_{g3} - d_{g4})s_{g2} + (a_{g2} + a_{cg4}c_{g3})c_{g2})^2 + (a_{cg4}s_{g3})^2) + I_{zg4}c_{g2}^2\} + \quad (10)$$

$$+ \sum_{g=b,\dots} \{m_{cg3}(a_1 + a_{g2}c_{g2} - d_{cg3}s_{g2})^2 + I_{zg3}c_{g2}^2\} +$$

$$+ \sum_{g=b,\dots} \{m_{cg4}((a_1 - (d_{g3} + d_{g4})s_{g2} + (a_{g2} + a_{cg4}c_{g3})c_{g2})^2 + (a_{cg4}s_{g3})^2) + I_{zg4}c_{g2}^2\}$$

gdzie: a_{gi} , a_{cgi} , d_{gi} , d_{cgi} – odpowiednio: długości członów, położenia środków ciężkości, odsunięcia przegubów oraz odsunięcia środków ciężkości dla gałęzi g ; s_{gi} , c_{gi} – skróty nazw funkcji sinus i kosinus dla kątów Θ_{gi} ; s_{1g2} , c_{1g2} – skróty nazw funkcji sinus i kosinus dla sumy kątów Θ_1 i Θ_{g2} ; m_{c1} – masa członu konara; m_{cgi} – masy członów gałęzi g ; I_{zc1} – masowy moment bezwładności członu konara; I_{zgi} – masowe momenty bezwładności gałęzi g .

Wyrażenia na pozostałe elementy macierzy (7) i (8) są również rozbudowane, przy czym prostszą postać mają elementy macierzy bezwładnościowej łańcucha typu xGy_RRP.

5. PODSUMOWANIE

Zaproponowane struktury rozgałęzionych łańcuchów kinematycznych układów przeniesienia napędu systemów pozycjonowania głowic, na skutek możliwości wprowadzenia dodatkowych aktuatorów, dają bardzo szerokie możliwości w kierunku poprawiania zdolności śledzenia ścieżek z danymi. W analizowanych łańcuchach możliwe jest wprowadzanie dodatkowych aktuatorów piezoelektrycznych współpracujących z przegubami „(2)” i „(3)”, tego typu rozwiązanie jest obecnie stosowane w produktach komercyjnych (rys. 1). Zarówno jeden jaki i drugi przedstawiony łańcuch kinematyczny może być wyposażony w dodatkowe aktulatory elektrostatyczne, zapewniające kompensację skosu głowicy – w obu przypadkach aktulatory powinny napędzać przeguby „(4)” i „(5)”. Kontrola wysokości lotu ślizgaczy, względnie samych głowic, jest również możliwa w tych rozwiązaniach – sprowadzać się będzie ona do wprowadzenia napędu przegubów pryzmatycznych „(6)” i „(7)”, zrealizowanych poprzez aktulatory elektrostatyczne lub termiczne [3, 4]. Przedstawione łańcuchy mogą być porównane ze sobą w świetle kilku kryteriów, wynikających ze specyfiki pracy systemu pozycjonowania głowic oraz faktu śledzenia ścieżek o niewielkich wymiarach geometrycznych (rzędu 50–100 nm) i wynikającej z tego konieczności eliminacji wpływu zakłóceń (np. drgań zewnętrznych i wewnętrznych, drgań strukturalnych konstrukcji poszczególnych członów). W świetle powyższych uwag najbardziej korzystnie prezentuje się łańcuch typu xGy_rRP, który najlepiej spełnia wszystkie wymagania (umożliwia kompensację wpływu drgań odbywających się w kierunku prostopadłym i poprzecznym do nośników danych, możliwa jest kompensacja skosu głowicy i regulacja wysokości lotu głowic/ślizgacza). Nieco gorzej wypada tutaj łańcuch typu xGy_RRP, który przenosi ciężar kompensacji drgań oddziaływających w kierunku prostopadłym do nośnika danych na napęd przegubu pryzmatycznego. Łańcuch ten jednak umożliwia rozbitcie funkcji kompensacji skosu głowicy i kompensacji wpływu drgań oddziaływających w kierunku poprzecznym do osi obrotu nośnika danych na dwa oddzielne napędy przegubów. Porównując wyrażenia opisujące elementy macierzy bezwładnościowych, bardziej korzystnie prezentuje się rozgałęziony łańcuch kinematyczny typu xGy_RRP, co czyni go bardzo interesującą propozycją od konstrukcji układów przeniesienia napędów systemów pozycjonowania głowic.

LITERATURA

1. Trawiński T.: Model matematyczny systemu pozycjonowania głowic pamięci masowych z dodatkowymi przegubami pryzmatycznymi. W: XIII Seminar Fundamental Problem of Ergoelectronics, Electromechanics and Mechatronics PPEEm'2009, CD-ROM, Wisła, November 2009, p.1–5,
2. Trawiński T.: Expressions described elements of inverse inertial matrices of positioning head systems of mass storage devices. W: Seminar Fundamental Problem of Ergoelectronics, Electromechanics and Mechatronics PPEEm'2007, Tom II, Wisła, November 2007, p.221–224,
3. United States Patent 7495856 – Disk drive Slider Design for Thermal Fly–height Control and Burnishing–on–demand, February 2009,
4. Shiramatsu T., Atsumi T., Kurita M., Shimizu Y., Tanaka H.: Dynamically controlled thermal flying–height control slider. IEEE Transactions on Magnetics 2008, Vol. 44, No. 11, p.3695–3697.
5. Huang X., Horowitz R., Li Y.: Design and analysis of robust track–following controllers for dual–stage servo system with an instrumented suspension. American Control Conference, Portland, USA, June 2005, p.1126–1131.

6. Sang–Min Suh, Chung Choo Chung, Seung–Hi Lee: Discrete–time LQG/LTR dual–stage controller design in magnetic disk drives. *IEEE Transaction on Magnetics* 2001, Vol. 37, No.4, p.1891–1895.
7. Huang X., Horowitz R., Li Y.: Track–following control with active vibration damping and compensation of a dual–stage servo system. “*Microsystem Technology*” 2005, 11, p. 1276–1286.
8. Horsley D.A., Cohn M.B., Singh A., Horowitz R., Pisano A.P.: Design and fabrication of an angular microactuator for magnetic disk drives. “*Journal of Microelectromechanical Systems*” 1998, Vol. 7, No.2, p.141–148.
9. Sarajlic E., Yamahata C., Cordero M., Fujita H.: Electrostatic rotary stepper micromotor for skew angle compensation in hard disk drive. *MEMS 2009 – 22nd IEEE Int. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems*, p.1079–1082.
10. Trawiński T.: Odwracanie macierzy o wybranych strukturach przy pomocy macierzy blokowych. „*Przegląd Elektrotechniczny*” 2009, nr 6, s.98–101,

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009 – 2011 jako projekt badawczy N N510 355137.

HEAD POSITIONING SYSTEM OF MASS STORAGE DEVICES WITH PRISMATIC JOINTS

Summary. In the paper the issue of mathematical model of head positioning system of mass storage devices, so–called hard disk drive (HDD) has been presented. Typical head positioning systems in hard disk drives are equipped with only one driving motor – so–called VCM (Voice Coile Motor). According to annually observed grow of hard disk drive capacity, and what follows increase of data areal density (product of linear bit density and data track density), the aim of proper track following by head positioning system, equipped only with one motor, is very difficult or almost impossible to realize. It follows that it is necessary to add another auxiliary motors – actuators (piezoelectric or electrostatic) into kinematics chain of head positioning system that increase data track following ability. Nowadays the data areal density reached the value of 400 Gb/in² in commercial products of Western Digital company.

Hence in the article the mathematical model (dynamic matrices) of head positioning system, expressed by two different kinematic chains, which allows for introducing into kinematics chain additional motors has been formulated. This mathematical model allows us for analysis of mutual interaction between auxiliary motors (actuators) and main motor.