

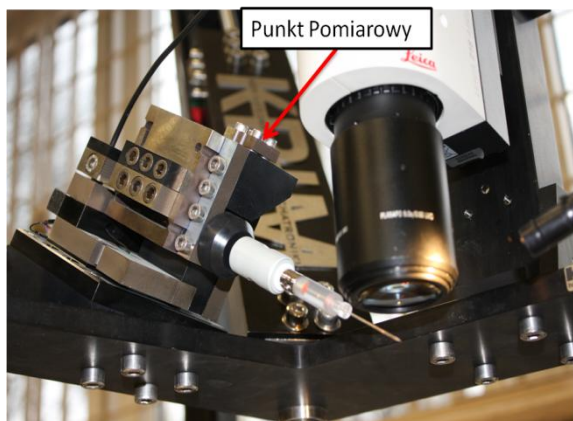
OGRANICZENIE WPŁYWU ODDZIAŁYWAŃ DYNAMICZNYCH PODŁOŻA NA PRECYZJĘ PRACY MIKROROBOTA

Streszczenie

Problemem podjętym w pracy jest ograniczenie wpływu oddziaływań dynamicznych podłoża na dokładność pracy mikrorobota, mającego służyć celom medycznym. Drgania fundamentu na którym posadowiony jest mikrorobot mogą w sposób znaczny wpłynąć na dokładność pozycjonowania elementu wykonawczego. Jedną z metod ograniczenia tego niekorzystnego wpływu jest pasywna wibroizolacja mikrorobota. W pracy przedstawiono model matematyczny układu wibroizolacji, dobór jej parametrów oraz rezultaty wstępnych badań doświadczalnych.

WSTĘP

Problemem precyzyjnego pozycjonowania końcówki wykonawczej manipulatora czy mikrorobota jest podstawowym zagadnieniem mechaniki robotów. Szczególne znaczenie ma to w przypadku wrobotów medycznych lub robotów do manipulacji wewnątrzkomórkowych (rys. 1.) Precyzja pracy mikrorobota zależy zarówno od jakości sterowania jak również innych czynników zaburzających kinematykę czy dynamikę mikrorobota, do których zaliczyć należy drgania przekazywane z otoczenia [1]. Jedną z możliwości ograniczenia drgań przekazywanych na konstrukcję mikrorobota jest zastosowanie wibroizolacji [2,3,4], której idea przedstawiona zostanie w niniejszym artykule.



Rys. 1. Mikrorobot

1. IDEA WIBROIZOLACJI

Rolą każdego obiektu lub urządzenia mechanicznego jest spełnienie określonej funkcji, realizacja założonego procesu technologicznego, której to wynikiem jest oczekiwany cel powstały w wyniku włożonej określonej ilości pracy. W obiektach i urządzeniach mechanicznych realizowany proces wykonawczy ma charakter dynamiczny, który jest ściśle związany z ruchem elementów materialnych (ciał stałych gazów, cieczy). Zazwyczaj procesowi temu towarzyszą najrozmaitsze zakłócenia pociągające za sobą rozpraszanie energii. Spośród tych zakłóceń do najważniejszych należą zakłócenia natury mechanicznej. Przejawiają się one głównie w postaci drgań poszczególnych elementów i podzespołów urządzenia. Proces „idealnego” funkcjonowania urządzenia jest ściśle sprzężony z procesem zakłócających go drgań, praktycznie jest to

jeden proces dynamiczny złożonego układu mechanicznego funkcjonującego jako obiekt mechatroniczny, uwarunkowany jego własnościami wewnętrznymi i oddziaływaniami wewnętrznymi. Wiedząc, że współczesne układy wibroizolacji są też obiektami w pełni mechatronicznymi, wynika konieczność:

1. zabezpieczenia układu wibroizolacji tak, aby jej funkcjonowanie realizowane było w sposób efektywny,
2. minimalizowanie i przewidywanie niepożądanych efektów działania oddziaływań na układ wibroizolacji, tak aby w pierwszym rzędzie ograniczyć zakłócenia i szkodliwe drgania elementów urządzenia oraz wpływ na otaczające środowisko.

Zadania te realizuje się drogą wyboru właściwej kontroli urządzenia i jego parametrów, w szczególności bezwładnościowych, kinematycznych, geometrycznych, sztywności i rozproszenia energii przy zadanych oddziaływań zewnętrznych. Jednym z ważniejszych narzędzi na etapie projektowania jak i kontroli stanu zachowywania się układu wibroizolacji jest rozproszenie energii tzn. tłumienie. Jest ono związane z rozpraszaniem energii mechanicznej, zamienianej głównie w energię cieplną, co znacznie pogarsza skuteczność układu wibroizolacji. Idealne funkcjonowanie obiektów mechanicznych winno przebiegać z minimalnym tłumieniem. Jeżeli jednak procesowi dynamicznego funkcjonowania urządzeń towarzyszą niepożądane drgania o dużych amplitudach, których nie można wyeliminować na drodze modyfikacji konstrukcji (strukturalnej lub parametrycznej), należy wprowadzić tłumienie działające jedynie w pasmach częstotliwości charakteryzujących się nadmiernym poziomem amplitud drgań. Przedstawione metody modyfikacji obniżenia poziomu drgań należą do grupy metod „pasywnych” i nie zawsze za ich pomocą można osiągnąć zamierzony rezultat. Należy wówczas sięgnąć do metod „aktywnych”, które sprowadzają się do modyfikacji strukturalnych lub parametrycznych obiektu mechanicznego z przewidzeniem zastosowania dodatkowego źródła energii.

Reasumując, kolejne etapy minimalizacji drgań z uwzględnieniem hierarchii ich stosowania można ująć następująco:

1. likwidacja dopływu energii dodatkowej, eliminowanie lub zmniejszanie sił wymuszających, wyrównoważenie sił, izolowanie od zaburzeń zewnętrznych,
2. przegrupowanie zachowawczych odbiorników energii w układzie, odprowadzenie energii z miejsc gdzie drgania nie powinny przewyższać określonego poziomu do miejsc, w których drgania są dopuszczalne, odstrojenie od rezonansów, wprowadzenie dodatkowych więzów lub zerwanie istniejących,
3. przegrupowanie niezachowawczych odbiorników energii bezpośrednio rozpraszających energię kinetyczną oraz obniżenie poziomu tłumienia w trakcie efektywnego cyklu roboczego i pod-

wyższenie tłumienia w elementach i zespołach drgających niepotrzebnie,

4. modyfikacja strukturalna polegająca na sprzężeniu z dodatkowymi odbiornikami energii drgającymi w przeciwfazie, ograniczając drgania sprzężonych z nimi elementów,
5. uzupełnienie dodatkowych zachowawczych odbiorników energii elementami rozpraszającymi przekazywaną do nich energię,
6. dobranie pętli sprzężenia zwrotnego z zewnętrznym zasilaniem, w której realizuje się automatyczna modyfikacja strukturalna lub parametryczna,
7. globalne sterowanie procesem drganiowym układu mechanicznego.

Ze względu na ścisłe sprzężenie procesu „idealnego funkcjonowania urządzenia” z zaburzającymi jego ruch drganiami niezbędne jest dokładne poznanie całego procesu dynamicznego realizowanego przez dany obiekt mechaniczny, tak aby istniała możliwość skutecznego ograniczenia zaburzeń nie naruszając właściwego, roboczego funkcjonowania.

Niektóre przyczyny drgań można wyeliminować stosunkowo łatwo. Do nich zaliczyć izolację urządzeń od wymuszeń kinematycznych, przekazywanych przez otoczenie oraz izolację źródeł drgań w samym urządzeniu, tak aby drgania w pewnym zakresie częstotliwości $0 \div 50$ [Hz], rozchodziły się tylko w ograniczonej przestrzeni i nie były przekazywane do otaczającego środowiska. I to jest podstawowym zagadnieniem wibroizolacji.

W badaniach teoretycznych dotyczących minimalizacji drgań należy rozróżnić izolację otoczenia od oddziaływań dynamicznych przy niskich częstotliwościach $f_r < 50$ [Hz] oraz izolację elementów konstrukcyjnych ze względu na wysokie częstotliwości drgań materiałowych tzw. dźwiękoizolację. Wibroizolację dzielimy na siłową i przemieszczeniową. Pierwsza z nich dotyczy ograniczenia oddziaływań dynamicznych na podłożu, druga ma na celu ograniczenie drgań przenoszonych od podłoża do obiektu, co stanowi temat naszego zadania. Warunkiem poprawnego działania układu wibroizolacji jest jak wiadomo spełnienie warunku:

$$\frac{\omega}{\omega_0} \geq \sqrt{2} \quad (1)$$

gdzie:

ω – częstość wymuszenia,

ω_0 – częstość drgań własnych,

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

k - sztywność,

m - masa

Spełnienie warunku (1) nie zawsze jest możliwe do zrealizowania, gdyż układ mechaniczny, wibroizolowany z użyciem elementów o masowej strukturze, byłby narażony na wielokrotny rezonans.

Stąd też koniecznym jest wprowadzenia pojęcia warunku wibroizolacji, który najogólniej polega na tym, że system wibroizolacji przy zmianie częstotliwości wymuszeń od podłoża, zapewnia dopuszczalne w pewnym ograniczonym zakresie zmiany amplitudy drgań, spełniając jednocześnie warunek wibroizolacji, który jest opisany na pewnym ograniczonym zbiorze częstotliwości drgań własnych wykluczającym możliwość powstania rezonansów wewnętrznych (związanych z efektami falowymi), spełniając jednocześnie warunek wibroizolacji (1). Stąd możemy postawić zmodyfikowany warunek wibroizolacji w postaci:

$$f_{oi} < f_w < f_{oi+1}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

Oznacza to, że należy tak dobrać parametry fizyczne układu wielu stopniach swobody aby częstotliwość wymuszenia była zawarta w przedziale ograniczonym przez dwie kolejne częstotliwości drgań własnych. W przypadku gdy masa elementu wibroizolującego jest znaczna, gdy wymiary geometryczne elementów układu wibroizolacji, upodobią się do pasa lub arkusza, modelowanie układu wibroizolacji jako układu dyskretnego niesie za sobą pewne zagrożenia. Najważniejszym z nich to zjawisko falowe elementów sprężystych, ponieważ nie można w tym przypadku założyć, że elementy te są bezmasowe. W takim elemencie elastycznym mogą pojawić się tzw. rezonanse wewnętrzne (efekty falowe), co może spowodować, że efekt wibroizolacji będzie przeciwny do zamierzonego tzn. ograniczenia oddziaływań dynamicznych od otoczenia. Aby zapobiec takiej możliwości, koniecznym jest wyznaczenie częstotliwości drgań własnych układu wibroizolującego w oparciu o rozpatrzenie tego układu wibroizolacji jako modelu ciągłego lub dyskretno - ciągłego.

2. MODEL DYSKRETNO-CIĄGŁY SYSTEMU WIBROIZOLACJI ROBOTA

W oparciu o te założenia opracowano model dyskretno-ciągły układu wibroizolacji [5] przemieszczeniowej mikroroboty, którego schemat przedstawiono na rysunku 2. Równanie różniczkowe opisujące ten model, przy założeniu że elementy sprężyste wibroizolatora mają charakterystykę liniową, przyjmuje następującą postać:

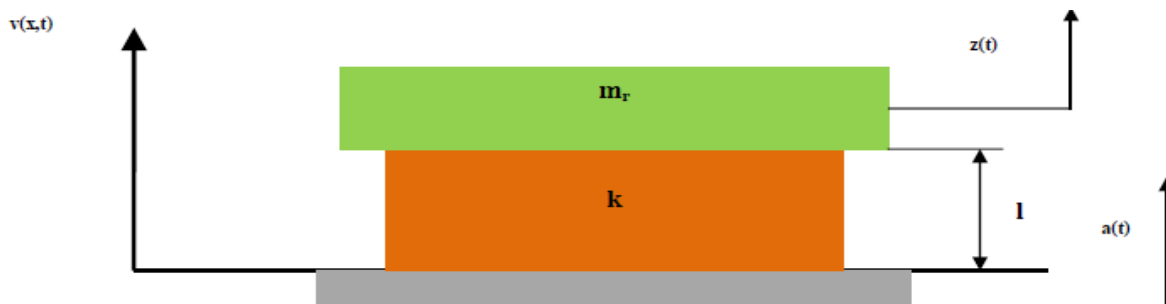
$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad (3)$$

gdzie:

$$a = \sqrt{\frac{E^*}{\rho}}$$

E^* - dynamiczny moduł Younga,

ρ - gęstość materiału wibroizolatora.



Rys. 2. Model dyskretno-ciągły układu wibroizolacji mikroroboty [2]

Dla zależności (3) przyjęto następujące warunki brzegowe:

$$m_r \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + E^* F \frac{\partial [v(l,t) - \frac{1}{l} v(0,t)]}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$v(0,t) = a(t)$$

gdzie:

m_r - masa mikroroboty,
 $a(t)$ - przemieszczenie podłoża robota,
 l - grubość materiału wibroizolatora.

Następnie zamieniono zmienne w równaniach (3) i (4) zgodnie z poniższą zależnością:

$$v(x,t) = u(x,t) + a(t) \quad (5)$$

Wskutek operacji otrzymano:

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} - \ddot{a}(t)$$

$$\frac{\partial^2 u(l,t)}{\partial t^2} + k_z \frac{\partial u(l,t)}{\partial x} = -\ddot{a}(t) \quad (6)$$

$$u(0,t) = 0$$

gdzie:

$$k_z = \frac{E^* F}{m_r}$$

Dla zależności (6) wprowadzamy następujące warunki początkowe:

$$u(x,0) = f_1(t)$$

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = f_2(t) \quad (7)$$

Następnie wykorzystując metodę Fouriera rozdzielania zmiennych, otrzymujemy równanie na częstotliwości własne problemu początkowo-brzegowego w postaci:

$$\operatorname{tg} \frac{\omega}{a} l - \frac{E^* F}{m_r a \omega} = 0 \quad (8)$$

Rozwiązując powyższe równanie, np. korzystając z metody graficznej, wyznaczamy szereg częstotliwości własnych z których do dalszych rozważań uwzględniamy pierwsze trzy.

Zakładając, że wymuszenie stanowi przemieszczenie podłoża pochodzące od drgań wywołanych drganiami otoczenia, równanie ruchu, z uwzględnieniem tłumienia, przyjmuje postać:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^3 u}{\partial t \partial x^2} \right] = \frac{\ddot{a}(t)}{\rho F} \quad (9)$$

gdzie:

E^* - dynamiczny moduł Younga,
 ρ - gęstość masowa materiału wibroizolatora,

F - pole przekroju poprzecznego wibroizolatora,

μ - współczynnik tłumienia,

$\ddot{a}(t)$ - amplituda przyspieszeń podłoża działające prostopadle do powierzchni podstawy robota.

Rozwiązania poszukujemy będziemy w postaci szeregu według funkcji własnych:

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} X(x)T(t) \quad (10)$$

Po podstawieniu (10) do (9) i rozdzieleniu zmiennych otrzymujemy układ równań określających funkcje $T(t)$:

$$\ddot{T}(t) + \omega_n^2 \dot{T}(t) + \omega_n^2 T(t) = \frac{1}{\rho F} Q_n(t) \quad (11)$$

Rozwiązania zamkniętego poszukujemy w postaci całki szczególnej spełniającej zerowe warunki początkowe dla przypadku tłumienia podkrytycznego. Ma ono postać:

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(\omega \cdot t - \psi_n) X_n(l) \quad (12)$$

Podstawiając zależność (12) do (9) otrzymujemy wyrażenie na amplitudę drgań wymuszonych w postaci:

$$A_n = \frac{Q_n(t) \gamma_n^2}{\rho F} \frac{1}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + \mu^4 \omega_n^4}} \quad (13)$$

gdzie:

$$\operatorname{tg} \psi_n = \frac{\omega_n \mu \omega}{\omega_n^2 - \omega^2}$$

$$\gamma_n^2 = \int_0^l X_n^2(l) + \frac{m_z}{\rho F} X_n^2(l)$$

$$Q_n = \frac{1}{\gamma_n^2} \int_0^l q(x) \sin \omega t X_n(x) dx$$

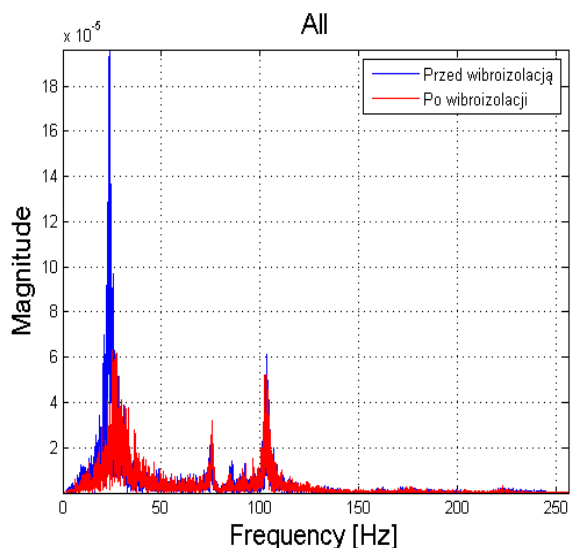
A_n - amplituda drgań wymuszonych,

ω_n - częstość wymuszenia,

ψ_n - kąt przesunięcia fazowego,

$Q_n(t)$ - wymuszenie kinematyczne.

Wykorzystując zależności (13) dobrano elementy wibroizolujące wykonane z mikro gumy, które po zastosowaniu pozwoliły ograniczyć znacznie wartość bezwzględna amplitudy drgań mikroroboty dla częstotliwości podstawowej wymuszenia. Wpływ zastosowania elementu wibroizolującego na drgania mikroroboty pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Skuteczność zastosowanej wibroizolacji

PODSUMOWANIE

W przypadku posadowienia maszyn i urządzeń a w szczególności robotów medycznych wykonujących procesy punkcji komórek z dokładnością do kilku μm , istotnym zagadnieniem jest ograniczenie wpływu drgań na głowicę wykonawczą od otoczenia jak i od drgań wywołanych dynamiką napędów robota. Jedną z metod pozwalających na ograniczenie wpływu drgań, taką przyjęto w tym zadaniu, jest zastosowanie wibroizolacji, traktowanej jako system składający się z bryły sztywnej posadowionej na fundamencie za pośrednictwem elementu elastycznego traktowanym układ o ciągłym rozłożeniu masy. Praca robotów medycznych o tak wysokich wymaganiach technologicznych, związanych w szczególności z dużymi dokładnościami pozycjonowania głowicy wykonawczej, musi zapewniać dokładne i pewne posadowienie i izolację od niepożądanych drgań fundamentu wywołanych zewnętrznymi czynnikami dynamicznymi. Zastosowanie elastycznych elementów wibroizolacji zezwala na zastąpienie podparcia punktowego (śruby mocujące) podparciem rozłożonym, a w przypadku dynamiki która jest jedną z istotnych cech robotów, koniecznym jest dobór elementów elastycznych w oparciu o teorię wibroizolacji i dźwiękoizolacji.

Na podstawie przedstawionych w pracy metod analitycznych i wyników analiz można stwierdzić, że zastosowanie wibroizolacji skutecznie ogranicza wartość amplitudy drgań w obszarze rezonansu podstawowego. Dobór jej ze względu na ciągłą strukturę wibroizolatora wymaga traktowania tego układu mechanicznego jako układu dyskretno-ciągłego w którym elementem ciągłym jest wibroizolator. Takie podejście pozwala na znaczne dokładniejsze wyznaczenie parametrów wibroizolacji a w szczególności wymiarów geometrycznych i sztywności stosowanych wibroizolatorów.

BIBLIOGRAFIA

1. Bednarz J., Kobus K., Lisowski W., *Analiza własności dynamicznych manipulatora równoległego przeznaczonego do manipulacji wewnątrzkomórkowych.*, Logistyka nr 6, s. 1789–1798, 2014.
2. Adamczyk J., Stojek Z., Targosz J., *Wibroizolacja podtorzy szynowych.* Mechanika 15, PAN – Oddział Kraków, Prace Komisji Mechaniki Stosowanej, 1991.
3. Goliński J., *Wibroizolacja Maszyn i Urządzeń.*, WNT Warszawa, 1979.
4. Targosz J., *Theoretical basis of vibroisolation of the track structure.* Zeszyty Naukowe AGH, Mechanika. t. 19, z. 2, 2000.

5. Bednarz J., Targosz J., *Dobór parametrów płyty dociskowej układu wibroizolacji podtorza na podstawie jego modelu dyskretno-ciągłego.*, TTS. Technika Transportu Szynowego, R. 19 nr 9, s. 4039–4046, 2012.

LIMITATION OF DYNAMIC INFLUENCE OF SUBSTRATUM ON PRECISION OF MICROMANIPULATOR WORK

Abstract

The problem taken in the work is the limitation of the influence the substratum dynamic on the accuracy of the micromanipulator used for medical purposes. The vibrations of the foundation on which the micromanipulator is built on can have a significant effect on the positioning accuracy of the micromanipulator actuator. One of the solutions to reduce this negative impact is application of passive vibration isolation system of Micromanipulator. The paper presents a mathematical model of vibration isolation system, selection of its parameters and preliminary results of experimental studies.

Autor:

dr hab. inż. **Jan Targosz** – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Katedra Robotyki i Mechatroniki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Tel: +48 12 617 36 75, Fax: +48 12 634 35 05, E-mail: jantargosz@interia.pl