

## Urządzenie do zmiany sztywności i eliminacji drgań układu OUPN

Przedmiotem wynalazku jest urządzenie do zmiany sztywności i eliminacji drgań układu OUPN. Urządzenie może być stosowane do obrabiarek skrawających, zwłaszcza do tokarek wyposażonych w podtrzymki z uchwytem. Urządzenie montuje się do podtrzymki po przeciwnej stronie niż uchwyt. Umożliwia on obrabianie długich, mało sztywnych elementów, rozszerzając granicę obróbki wibrostabilnej. Układ OUPN rozumiany jest jako układ Obrabiarka Uchwyt Przedmiot obrabiany Narzędzie, w którym zachodzą interakcje między poszczególnymi jego elementami.

Z polskiego opisu zgłoszeniowego wynalazku P.400973 znany jest tłumik drgań do korpusu narzędzia skrawającego mającego postać co najmniej jednego wgłębienia, utworzonego w korpusie narzędzia skrawającego, które jest wypełnione materiałem tłumiącym. Cechą charakterystyczną rozwiązania jest to, że wgłębienie w korpusie posiada co najmniej jedno przewężenie, którego geometria jest opisywana parametrami, takimi jak kąt, który stanowi kąt zawarty pomiędzy osią symetrii otworu, a ścianą przewężenia, oraz promień wierzchołka przewężenia, przy czym kąt jest zawarty w zakresie od 25 do 40°, promień R wynosi od 0,5 do 6 mm, a materiałem tłumiącym jest metal nieżelazny lub stop metali nieżelaznych. Ponadto istotnym jest fakt, że tłumik drgań stanowi integralną część narzędzia skrawającego, a więc nie może być zastosowany do zwykłych narzędzi skrawających. Z opisu wynalazku EP2933526 znane jest rozwiązanie w postaci sterowalnego węzła do tłumienia drgań. Przedmiotem wynalazku jest półaktywny węzeł, obejmujący dwie warstwy nośne elementu konstrukcji oraz sterowalne sprzęgło, który w szczególności może znaleźć zastosowanie w tłumieniu drgań wywołanych obciążeniem udarowym. Cechą charakterystyczną rozwiązania patentowego jest to, że półaktywny węzeł, do tłumienia drgań, w postaci sprzęgła, aktywatora i elementów sprężystych, umieszczony jest na specjalnej belce, składającej się z dwóch przylegających do siebie ślizgowo warstw, przy czym sprzęgło usytuowane jest korzystnie w miejscu największego względnego przesunięcia warstw tej belki. Układ wymaga instalacji go na specjalnie spreparowanej części konstrukcji w postaci specjalnej dwuwarstwowej belki, a więc ingeruje w konstrukcję urządzenia, w którym ma być zainstalowany. Z polskiego opisu wynalazku P.407606 znane jest urządzenie dynamiczne do tłumienia drgań, wyposażone w korpus, do którego jest

przymocowany jeden koniec elementu sprężystego, którego drugi koniec jest obciążony elementem bezwładnościowym. Cechą charakterystyczną rozwiązania patentowego jest to, że elementem bezwładnościowy jest połączony z listwą zębatą zamocowaną w tulejach prowadzących osadzonych w tym korpusie. Listwa z kolei zazębia się z kołem zębatym osadzonym na wale łożyskowanym w korpusie. Urządzenie jest nadto wyposażone w przekładnię bezstopniową oraz układ sterującym zmianę przełożenia wału oraz w koło zamachowe osadzone na tym wale. Układ sterujący tłumi drgania poprzez zamianę energii ruchu posuwistego drgającego elementu, na którym zamontowano korpus opisywanego urządzenia na energię kinetyczną ruchu obrotowego koła zamachowego. Ten rodzaj urządzenia, w grupie urządzeń bezwładnościowych, stosowany może być do eliminacji drgań o dużej amplitudzie i małej częstotliwości. Z opisu wynalazku EP2458243 znane jest urządzenie w postaci generatora drgań mocowanego do elementu drgającego. Cechą charakterystyczną tego rozwiązania jest dodatkowe mocowanie generatora za pomocą uchwyty widełkowego, mocowanego przegubowo, do innego miejsca konstrukcji drgającego elementu. Generator drgań jest w postaci siłownika elektrodynamicznego, który zawiera dwie cewki przeciwsoodne zamontowane w jednym korpusie oraz część ruchomą w postaci magnesu trwałego. Utrzymanie części ruchomej realizowane jest za pomocą sprężyn podporowych. Generator drgań przystosowany jest w głównej mierze do wykorzystania w pojazdach, powinien być mocowany do karoserii w miejscu występowania niekorzystnych drgań własnych tłumionego układu i kontrolowany w zamkniętej pętli, w zależności od wykonanych pomiarów na przykład przez czujnik drgań lub czujnik akustyczny. Z opisu ochronnego wzoru użytkowego PL67878 znany jest wzbudnik drgań mechanicznych, w którym wykorzystany jest głośnik elektrodynamiczny. Cechą charakterystyczną tego rozwiązania jest przymocowanie masy drgającej w postaci krążka do membrany głośnika. Istotnym jest, że masa drgająca wystaje ponad obudowę wzbudnika. Moc takiego wzbudnika jest skorelowana z mocami głośników elektrodynamicznych. Układ w takiej postaci nie posiada sprzężenia zwrotnego. Z polskiego opisu wynalazku P410145 znany jest półaktywny system tłumienia drgań zastosowany w ramieniu robota szklarskiego. Charakteryzuje się tym, że na ramieniu robota szklarskiego, na którym osadzony jest tłumik, składający się z trzech specjalnie połączonych pierścieni, wewnątrz których zamontowano siłomierz tensometryczny oraz

aktuator piezoelektryczny. W celu pomiaru drgań do nieruchomego korpusu robota zamocowano czujnik prędkości, układ sterownia nadzoruje zachowania układu aktywnie sterując aktuatorem piezoelektrycznym jako generatorem siły o zmiennej amplitudzie i częstotliwości, tłumiąc aktywnie drgania. Z polskiego opisu wynalazku P406306 znany jest wibroizolator do redukcji drgań z cieczą magneto-reologiczną, pracującą w trybie ściskania. Charakteryzuje się tym, że posiada stacjonarny rdzeń o symetrii osiowej, tłoczysko, przenoszące zewnętrzną siłę na tłok, komorę kompensacyjną, szczelinę roboczą o zmiennej wysokości, wypełnioną cieczą magneto-reologiczną, umiejscowioną pomiędzy tłokiem a rdzeniem, współosiowy z uzwojeniem cewki pierścienia diamagnetyczny. Ponadto charakteryzuje się tym, że posiada układ dwóch tłoków połączonych ze sobą diamagnetycznymi łącznikami, prowadzonymi przez otwory w nieruchomym rdzeniu, w którym znajdują się system kanałów łączących dwie szczeliny robocze z komorami kompensacyjnymi. Istotą zastosowania cieczy magneto reologicznej jest dynamiczna zmiana lepkości, co skutkuje zmianą oporów przepływu cieczy a więc tłumieniem. Układ należy do grupy tłumików pasywnych, nie może sam wygenerować siły ani przemieszczenia. Znany jest z opisu US5458222 system aktywnej kontroli drgań konstrukcji poddawanych zginaniu. Aktywny podzespół sterujący drganiami konstrukcji, w której jest zainstalowany, poddawany jest jedynie zginaniu. Piezoceramiczna płyta-siłownik, jest generatorem drgań, poziom wibracji są uzależnione od poziomu elektrycznego sygnału wyjściowego. Płyta jest zamocowana do konstrukcji, tak że drgania płyty wywołane przez zmienny sygnał wejściowy, wpływają na poziom napięcia wstępnego płyty, tym samym zmieniając jej sztywność, co wpływa na sztywność fragmentu konstrukcji do której jest mocowana. Z opisu wynalazku US20060291973 A1 znany jest układ do redukcji drgań w uchwycie narzędziowym wkomponowany w narzędzie skrawające. Układ posiada czujnik drgań uchwytu narzędzia, w specjalnie skonstruowanym uchwycie narzędziowym zainstalowano dwa przeciwstawne siłowniki piezoelektryczne wpływające aktywnie na sztywność narzędzia. Wibracje w uchwycie narzędziowym są wykrywane i odpowiedni sygnał jest dostarczany do jednostki sterującej, która generuje odpowiednie sygnały do siłowników. Układ ten wymaga specjalnie przygotowanych narzędzi z wkomponowanymi siłownikami, nie nadaje się do narzędzi i opravek uniwersalnych. Z opisu wynalazku US6661157B1 znany jest aktywny system tłumienia

drgań narzędzi skrawających z użyciem siłowników piezoelektrycznych. Każde narzędzie skrawające posiada trzpień montażowy oraz wkładkę tnącą na przeciwległym końcu. Zaproponowane rozwiązanie posiada dodatkowo szereg elementów piezoelektrycznych do tłumienia wibracji umieszczonych pomiędzy wkładką tnącą, a trzpieniem montażowym. Montowana para współpracujących elementów piezoelektrycznych umieszczane po przeciwnych stronach trzpienia narzędzi, ich kierunek polaryzacji z piezoelektrycznych elementów jest równoległy do osi wzdłużnej narzędzia. Piezoelementy stanowią siłowniki, które są aktywnie sterowalne przez zastosowanie napięcia ze źródła energii elektrycznej za pomocą urządzenia sterującego w postaci układu sterowania logicznego, aby w ten sposób tłumić drgania gnące trzpienia. Istotą wynalazku jest m.in. zaproponowanie wkładki z siłownikami piezoelektrycznymi, której montaż jest możliwy na uniwersalnych narzędziach przy ich minimalnej modyfikacji – w przygotowanych specjalnie wnękach.

Z opisu wynalazku US429880 A znana jest konstrukcja podtrzymki do tokarki. W konstrukcji tej zawarta jest cała idea działania podtrzymki tokarskiej, której zadaniem jest podtrzymywanie przedmiotu obrabianego – zwłaszcza wałów i tulei, które mają tendencję do nadmiernego odkształcania się pod działaniem sił zarówno grawitacji oraz skrawania, co może powodować błędy geometryczne obróbki. Zadaniem podtrzymki zasadniczo jest utrzymanie osi obrotu przedmiotu obrabianego, jako linii prostej, a nie łuku co świadczyłoby o odkształceniu przedmiotu pod wpływem działania sił, zarówno grawitacji jak i skrawania. Obecne konstrukcje podtrzymek tokarskich są układami pasywnymi, nie posiadają możliwości aktywnego oddziaływania na powstające w czasie obróbki drgania układu OUPN . Do chwili obecnej takie cechy uzyskały jedynie specjalne narzędzia skrawające i specjalizowane systemy chwytowe, traktowane jako specjalistyczne oprzyrządowanie obrabiarek skrawających. Eliminację drgań powstających w trakcie obróbki można przeprowadzić na kilka sposobów. Dla danej maszyny ustalić obszary obróbki wibrostabilnej i dobierać odpowiednie parametry obróbkowe, pozwalające uniknąć utraty wibrostabilności (wyznaczenie krzywych workowych). Innym sposobem jest już na etapie projektu obrabiarki tak kształtować konstrukcję, aby uniknąć prowadzenia procesu skrawania w zakresie drgań samowzbudnych. Kolejnym sposobem jest modyfikacja konstrukcji gotowej maszyny przez dokładanie do elementów korpusowych elementów tłumiących drgania. Ostatnim

znanym obecnie jest stosowanie specjalnych narzędzi skrawających o zmiennej sztywności i tłumieniu. W przytoczonych opisach patentowych jedynie narzędzia skrawające – przeznaczone do obrabiarek skrawających - posiadają regulowaną sztywność bądź tłumienie na wybranych kierunkach, tym samym wpływając na wibrostabilność układu OUPN.

Urządzenie do zmiany sztywności i eliminacji drgań układu OUPN, według wynalazku charakteryzuje się tym, że ma pierwszy korpus, drugi korpus, co najmniej jeden czujnik pomiaru liniowego przemieszczenia względem siebie pierwszego i drugiego korpusu i układ pomiaru siły na kierunku przemieszczenia korpusów. Pierwszy korpus połączony jest z aktuatorem. Urządzenie ma drugi korpus z masą bezwładnościową i gniazdo montażowe na część ruchomą liniowego aktuatora. Masa bezwładnościowa jest dobrana tak, aby zapewnić optymalny współczynnik tłumienia względnego. Masa może być dołączona jako dodatkowy obciążnik albo może stanowić jednolity element z korpusem. Pierwszy i drugi korpus połączone są ze sobą układem przewodnicowym. Masa bezwładnościowa dobierana jest indywidualnie do układu OUPN, na drodze eksperymentu numerycznego bądź badań doświadczalnych podczas których wyznaczane są częstotliwości oraz tłumienia modalne. Masa bezwładnościowa może być dobrana zgodnie z metodyką z publikacji Z.Osiński: Tłumienie drgań mechanicznych, PWN 1979, ISBN 830100553X. Dla układu o jednym stopniu swobody stosunek masy bezwładnościowej do masy przedmiotu obrabianego wynosi ok. 1:3. Wartość masy bezwładnościowej powinna być dobrana tak, aby częstotliwość przy której występują drgania o największej amplitudzie w zabezpieczanym układzie, była częstotliwością rezonansową masy bezwładnościowej. Urządzenie ma wspólny kierunek siły liniowego aktuatora, pomiaru przemieszczenia i przemieszczenia na układzie przewodnicowym. Pierwszy korpus pozwala na przymocowanie urządzenia do podtrzymki tokarskiej. Ruchoma masa ma możliwość poruszania się na kierunku działania siły odporowej skrawania ( $F_p$ ). Na tym kierunku najwyraźniej uwidacznia się utrata wibrostabilności układu, zwłaszcza, gdy drgania wzajemne przedmiotu i narzędzia doprowadzą do utraty ich wzajemnego styku. Masa może działać w dwóch trybach, aktywnym i pasywnym. Korzystnie w urządzeniu liniowy aktuator stanowi siłownik hydrauliczny, siłownik mechaniczny lub elektryczny.

Korzystnie w urządzeniu układ pomiaru siły stanowi czujnik siły, ciśnienia, odkształcenia lub pomiaru prądu na silniku elektrycznym.

Korzystnie urządzenie ma czujnik przyspieszeń zamontowany na uchwycie przedmiotu. Na podstawie pomiaru drgań w kierunku działania siły odporowej skrawania ( $F_d$ ) wyznaczany jest sygnał sterujący pracą urządzenia. W układzie pasywnym tłumieniem, w układzie aktywnym generującym przeciwdrgania na aktuatorze.

Urządzenie może działać w dwóch trybach aktywnym i pasywnym. W trybie aktywnym masie można nadać ruch liniowy, posuwisto-zwrotny, o określonej amplitudzie i częstotliwości, wywołując pojawienie się siły na tym kierunku. Realizowane jest to za pomocą liniowego aktuatora umiejscowionego pomiędzy masą, a pierwszym korpusem urządzenia. Wielkość amplitudy i częstotliwości określana jest na podstawie pomiaru drgań na tym kierunku pierwszego korpusu. Zadaniem urządzenia w trybie aktywnej pracy jest wywołanie przeciw drgań masy, o fazie opóźnionej o co najmniej jeden okres lub wielokrotność całkowitą okresu drgań korpusu urządzenia zamocowanego do podtrzymki. Wygenerowane przeciw drgania masy mają za zadanie przeciwdziałać drganiom powstałym na kierunku siły odporowej skrawania, minimalizując ich wartość.

Drugą funkcją urządzenia, pracującego w trybie pasywnym jest umożliwienie masie ruchu tylko na tym kierunku. Ruch masy inicjowany jest na skutek drgań na tym kierunku korpusu podtrzymki wynikłego z procesu skrawania. Istnieje wówczas możliwość regulacji tłumienia ruchu aktywnej masy, wpływając tym samym na drgania układu OUPN. Wielkość masy oraz stopień tłumienia można zmieniać, dostrajając ich wartości do właściwości dynamicznych maszyny, parametrów procesu obróbczego, umożliwiając tym samym prowadzenie obróbki wibrostanbilnej.

Zaletą rozwiązania według wynalazku jest synergia cech funkcjonalnych podtrzymek tokarskich z układami aktywnego i pasywnego tłumienia drgań. Rozwiązanie nie ingeruje w konstrukcje stosowanych obecnie uchwytów tokarskich, korpusów podtrzymek oraz narzędzi skrawających. Rozwiązanie stanowi dodatkowy podzespół konstrukcyjny możliwy do bezinwazyjnego dołączenia do istniejącej konstrukcji maszyny. Urządzenie jest zaprojektowane w taki sposób, aby mogło wykorzystać miejsce montażowe istniejące w obrabiarce, nie wpływając negatywnie na podstawową funkcjonalność maszyny. Konstrukcja urządzenia charakteryzuje się

budową kompaktową. Zaletą rozwiązania według wynalazku, w odróżnieniu do dotychczasowych podtrzymek tokarskich, jest możliwości wywołania przeciw drgań korpusu podtrzymki i jej uchwytu obróbkowego, oraz regulacji wielkości tłumienia drgań na kierunku działania siły odporowej skrawania. Efektem finalnym rozwiązania według wynalazku jest umożliwienie prowadzenia obróbki przedmiotu z optymalnymi, dla danego procesu, parametrami obróbkowymi oraz poszerzenie granicy obróbki wibrostabilnej dla maszyny wyposażonej w taki układ. Polepszenie wibrostabilności realizowane jest przez dołączenie do podtrzymki tokarki, urządzenia według wynalazku, montowanego do korpusu nośnego podtrzymki, po przeciwnej stronie mocowania uchwytu podtrzymki. Montaż urządzenia polega na zainstalowaniu go do podtrzymki w taki sposób, aby kierunek wymuszenia siłowego oraz tłumienia drgań (przemieszczenia względnego płyt) pokrywał się z kierunkiem osi X tokarki (siły odporowej  $F_p$  procesu skrawania).

Wynalazek jest bliżej przedstawiony w przykładach wykonania i na rysunku, na którym Fig. 1 przedstawia urządzenie z rozłączonymi elementami w widoku izometrycznym, Fig. 2 przedstawia urządzenie w widoku izometrycznym, Fig.3 przedstawia urządzenie z serwozaworem, połączone z podtrzymką w widoku izometrycznym, Fig. 4 przedstawia urządzenie z Fig. 3 z rozłączonymi elementami, Fig. 5 przedstawia schemat układu hydraulicznego dla urządzenia działającego w trybie pasywnym, Fig. 6 przedstawia schemat układu hydraulicznego dla urządzenia działającego w trybie aktywnym.

### **Przykład I**

Urządzenie do aktywnej zmiany sztywności i eliminacji drgań układu OUPN, ma pierwszy 1 i drugi 2 korpus. Pierwszy korpus 1 połączony jest z liniowym aktuatorem (siłownik mechaniczny) 3. Drugi korpus 2 ma gniazdo montażowe na część ruchomą liniowego aktuatora 3 i ma dołączoną masę bezwładnościową 4. Urządzenie ma jeden czujnik 5 pomiaru liniowego przemieszczenia względem siebie korpusów 1 i 2 oraz czujnik pomiaru siły 6 (czujnik siły) na tym kierunku. Czujnik 5 zamocowany jest na drugim korpusie 2, a czujnik pomiaru siły 6 zamocowany jest na liniowym akuatorze 3. Na korpusie 1 zamontowany jest czujnik przyspieszenia 7, mierzący drgania korpusu 1 na kierunku liniowego przemieszczania się korpusów. Pomędzy korpusami 1 i 2

urządzenie ma układ prowadnicowy 8 (jeden prowadnik i jedną prowadnicę) umożliwiające przesuwanie się względem siebie korpusów 1 i 2. Urządzenie ma wspólny kierunek: siły liniowego aktuatora 3, pomiaru przemieszczenia 5, przemieszczenia na układzie prowadnicowym 8 i pomiaru przyspieszenia 7.

Montaż urządzenia polega na zamontowaniu go na podtrzymce 9, po przeciwnej stronie niż uchwyt przedmiotu 10, w taki sposób, aby kierunek przemieszczenia względnego korpusów pokrywał się z kierunkiem osi X tokarki (siły odporowej  $F_p$  procesu skrawania). Czujnik przyspieszenia 7 rejestruje drgania na kierunku działania siły odporowej skrawania. Jeżeli wartość amplitudy drgań przekroczy wartość graniczną (ustalaną indywidualnie w zależności od prowadzonej obróbki), aktuator 3 zaczyna wykonywać ruch posuwisto-zwrotny generując przeciwdrgania. Siłę, kierunek oraz przemieszczenie względne korpusów 1 i 2 kontroluje system na podstawie pomiaru siły 6 i przemieszczenia 5, minimalizując wskazanie czujnika przyspieszenia 7.

### **Przykład II**

Urządzenie wykonane analogicznie jak w Przykładzie I, przy czym aktuator 3 ma postać siłownika hydraulicznego, dwu tłoczkowego obustronnego działania, z serwozaworem 11, na którym zamocowany jest układ 6 pomiaru siły (czujnik ciśnienia). Urządzenie ma układ prowadnicowy 8 składający się z dwóch par prowadnik- prowadnica.

Urządzenie działa w trybie pasywnym. Czujnik przyspieszenia 7 rejestruje drgania na kierunku działania siły odporowej skrawania. Jeżeli wartość amplitudy drgań przekroczy wartość graniczną (ustalaną indywidualnie w zależności od prowadzonej obróbki), aktuator 3 zaczyna działa jako układ dyssypacji energii. W urządzeniu regulację tłumienia realizuje się na drodze dławienia, czyli ograniczania przepływu oleju hydraulicznego między komorami roboczymi siłownika. W układzie pasywnym serwozawór 11 realizuje funkcję dławienia przepływu cieczy roboczej między komorami roboczymi aktuatora 3. W trybie pasywnym urządzenie działa na zasadzie serwohydraulicznego układu tłumiącego, dyssypując - rozpraszając energię, umożliwiając odbieranie energii z drgań przez ruch tzw. masy bezwładnościowej 4. Prędkością ruchu i amplitudą wychyleń masy 4 z położenia równowagi, reguluje się przez sterowany serwozawór 11 dławiący, realizujący sterowanie przepływem cieczy

hydraulicznej pomiędzy komorami roboczymi aktuatora 3 hydraulicznego. Pozycja początkowa masy bezwładnościowej 4 ustala się przez układ sprężyn zamocowanych w hydraulicznym siłowniku 3. Serwowaworem 11 steruje się na podstawie rejestracji amplitudy drgań pierwszego korpusu 1 za pomocą czujnika przyspieszeń 7 oraz pomiaru przemieszczenia względnego korpusów 1 i 2 przy pomocy czujników przemieszczeń 6. Serwohydrauliczne urządzenie działa wg. schematu hydraulicznego z Fig. 5.

Siłę, kierunek oraz przemieszczenie względne korpusów 1 i 2 kontroluje system na podstawie pomiaru siły 6 i przemieszczenia 5, wpływając na poziom tłumienia, minimalizując wskazanie czujnika przyspieszenia 7.

### **Przykład III**

Urządzenie wykonane analogicznie jak w Przykładzie II, przy czym ma czujnik przyspieszenia 7 i działa w trybie aktywnym. W trybie aktywnym serwowawór 11, sterujący kierunkiem przepływu do dwóch komór roboczych aktuatora 3, dostarcza energię z układu hydraulicznego. W układzie aktywnym układ działa na zasadzie serwomechanizmu ze sprzężeniem zwrotnym generującego siłę o określonej amplitudzie i częstotliwości. Rejestrowane są drgania pierwszego korpusu 1 zamocowanego do podtrzymki 9 za pomocą czujnika przyspieszeń 7 oraz przemieszczenie względne korpusów 1 i 2 przy pomocy czujników przemieszczeń 5. Do drugiego korpusu 2 mocuje się tzw. masę bezwładnościową 4 i wraz z nią korpus 2 ma możliwość ruchu na kierunku siły  $F_p$ . Na podstawie pomiaru drgań korpusu 1, algorytm sterowania wpływa na zmianę wzajemnego przemieszczenia korpusów 1 i 2, przez zmianę wartości i kierunku siły generowanej przez aktuator 3 między korpusami 1 i 2. Skutkiem jest przeciwdziałanie przemieszczeniom wywołanym na tym kierunku przez siłę z procesu skrawania ( $F_p$ ). Urządzenie nadaje ruch masy bezwładnościowej 4 o amplitudzie i częstotliwości zbliżonej do zmierzonej czujnikiem przyspieszeń 7, opóźniony o co najmniej jeden okres. w porównaniu do mierzonych drgań urządzenia, wywołując przeciwdrgania. Efektem działania jest minimalizacja drgania urządzenia, a dokładnie pierwszego korpusu 1 przymocowanego do podtrzymki 8. Urządzenie działa wg. schematu hydraulicznego z Fig 6.