



POLITECHNIKA ŁÓDZKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY
Instytut obrabiarek i technologii
budowy maszyn



ADAM WIJATA
193709

PRACA MAGISTERSKA

na kierunku Automatyka i Robotyka

Studia stacjonarne

TEMAT

Modyfikacje charakterystyk tarcia suchego w zagadnieniach
kontaktowych poprzez wprowadzenie drgań.

kierujący pracą:
prof. dr hab. inż. Jan Awrejcewicz

ŁÓDŹ 2015

Spis treści

1. Wstęp	3
2. Cel pracy	5
3. Zakres pracy z odniesieniami do efektów kształcenia	6
4. Podstawy teoretyczne opisu zjawiska tarcia	9
4.1. Zjawisko tarcia	9
4.2. Tarcie technicznie suche	10
4.3. Tłumienie drgań tarcie suchym	15
5. Modyfikacja charakterystyk tarcia poprzez wprowadzenie drgań	17
5.1. Drgania prostopadłe do kierunku ruchu	17
5.2. Drgania zgodne z kierunkiem ruchu	19
6. Przegląd stosowanych modeli tarcia suchego	21
6.1. Modele statyczne	21
6.2. Modele dynamiczne	25
6.3. Implementacja modeli szczotkowych w symulacjach numerycznych	31
6.3.1. Reset Integrator Model	32
6.3.2. Model LuGre	36
6.4. Tarcie dwuwymiarowe	39
6.5. Prosty dwuwymiarowy model tarcia Coulomba	41
7. Opracowanie modelu matematycznego dwuwymiarowego tarcia suchego	47
8. Doświadczalna weryfikacja modelu matematycznego	55
8.1. Opis stanowiska doświadczalnego	55
8.2. Przebieg doświadczenia	55
8.3. Weryfikacja modelu	57
8.3.1. Model matematyczny stanowiska laboratoryjnego	57
8.3.2. Symulacyjna weryfikacja modelu tarcia	60
9. Eksperymenty numeryczne z wykorzystaniem zaproponowanego modelu tarcia	66
9.1. Zjawisko <i>stick-slip</i> i jego eliminacja	66

9.2. Ekonomiczny aspekt celowo wprowadzanych drgań	73
10. Stanowiska doświadczalnego badania dwuwymiarowego tarcia suchego	78
11. Podsumowanie	82
12. Abstract	84
13. Załączniki	85
Literatura	89

1. Wstęp

Zjawisko tarcia można najogólniej opisać jako opór, który pojawia się przy próbie przesunięcia względem siebie dwóch ciał. Siła tarcia pojawia się już w momencie przyłożenia siły do obiektu, który chcemy poruszyć, zanim jeszcze zostanie on wprowadzony w ruch. Ta siła tarcia nazywana jest siłą tarcia statycznego. Kiedy obiekt zostanie faktycznie wprowadzony w ruch, siła tarcia zazwyczaj się nieznacznie zmniejsza. Kiedy pomiędzy dwoma ciałami występuje poślizg, towarzyszącą temu siłą tarcia nazywa się tarcie kinetycznym.

Zazwyczaj siła tarcia postrzegana jest jako negatywne zjawisko, ponieważ rozprasza energię co przekłada się na obniżenie sprawności urządzeń mechanicznych. Jednak w świecie bez tarcia niemożliwe byłoby funkcjonowanie człowieka. Ludzie nie mogliby chodzić lub jeździć samochodami. Gdyby nie różnica pomiędzy wartościami siły tarcia statycznego i kinetycznego, nigdy nie usłyszelibyśmy dźwięku instrumentów smyczkowych. Tarcie nie zawsze niesie ze sobą negatywne efekty. Czasem jest nawet zjawiskiem pożądanym!

Opis zjawiska tarcia wraz ze wszystkim parametrami wpływającymi na jego przebieg jest bardzo skomplikowany. Na przestrzeni lat powstało wiele teorii wyjaśniających zjawisko tarcia oraz wiele modeli matematycznych. W treści pracy przedstawiono przegląd wybranych modeli tarcia stosowanych w praktyce inżynierskiej.

Na szczególną uwagę zasługuje moment przejścia z tarcia statycznego do kinetycznego. Wprowadzenie jednego z trących się ciał w drgania, ogólnie mówiąc, łagodzi moment tego przejścia. Ta modyfikacja charakterystyki tarcia poprzez wprowadzenie drgań znalazła zastosowanie np. w wibrujących maszynkach do golenia. Maszynki te charakteryzują się zmniejszonymi oporami ruchu podczas przesuwania się po skórze, co wpływa na zwiększenie poczucia komfortu w trakcie golenia. Poznanie tego procesu modyfikacji i opisanie go matematycznie, pozwoli zastosować go w bardziej zaawansowanych technicznie konstrukcjach.

Aby przeprowadzić badania nad modyfikacją charakterystyki tarcia poprzez wprowadzenie drgań potrzebny jest matematyczny model tarcia. W tej pracy zaproponowano model tarcia dwuwymiarowego. Model dwuwymiarowy jest bardziej uniwersalny. Jest to szczególnie ważne w przypadku modelowania układów z wprowadzonymi drganiami. Pozwala na symulowanie zachowania takich układów z drganiami wprowadzonymi zarówno zgodnie z kierunkiem ruchu, jak i poprzecznie do niego. Zaproponowany model tarcia oparty jest na tzw. szcrotkowej teorii tarcia. Zanim będzie można wykorzystać nowy model matematyczny w symulacjach komputerowych, trzeba sprawdzić czy dobrze oddaje on charakter zjawiska tarcia. Weryfikację modelu przeprowadzono porównując wyniki doświadczenia przeprowadzonego na rzeczywistym obiekcie, z wynikami symulacji komputerowej ruchu tego obiektu z tarcie opisany zaproponowaną zależnością.

Po pomyślnej weryfikacji modelu, przeprowadzono serię eksperymentów symulacyj-

nych z jego wykorzystaniem. Eksperymenty dotyczą tzw. ruchu przerywanego i wpływu jaki na jego przebieg ma wprowadzenie drgań. Ruch przerywany występuje przy próbie przesuwania dwóch obiektów względem siebie z bardzo małą prędkością. Jest to problem, który dotyka wielu rzeczywistych konstrukcji. Na koniec pracy zaproponowano układ stanowiska laboratoryjnego, które pozwalałoby na prowadzenie badań nad zjawiskiem zmiany charakterystyki tarcia pod wpływem wprowadzonych drgań.

- [14] K. Canudas de Wit C. Gafvert M. Lischinsky P. Olson, H. Astrom. Friction models and friction compensation. *European Journal of Control*, 4(1998):176–195, 1998.
- [15] Z. Osiński. *Tłumienie drgań*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1997.
- [16] J. Piotrowski. Smoothing dry friction damping by dither generated in rolling contact of wheel and rail and its influence on ride dynamics of freight wagons. *International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 48(6):675–703, 2010.
- [17] Dahl P. R. A solid friction model. *The Aerospace Corporation*, Kalifornia, 1968.
- [18] Z. Towarek. *Mechanika ogólna. Zagadnienia wybrane*. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2004.
- [19] J. Wojewoda. Efekty histerezowe w tarciu suchym. In *Zeszyty naukowe Politechniki Łódzkiej*. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2008.
- [20] J. Wojewoda, A. Stefański, M. Wiercigroch, and T. Kapitaniak. Hysteretic effects of dry friction: modelling and experimental studies. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 366(1866):747–765, 2008.
- [21] F. Xia. Modelling of a two-dimensional coulomb friction oscillator. *Journal of Sound and Vibration*, 265(2003):1063–1074, 2002.