

Sylwester MARKUSIK, Tadeusz OPASIAK

WPLYW ZMIAN MOMENTU OBROTOWEGO NA CHARAKTERYSTYKĘ STATYCZNĄ I DYNAMICZNĄ SPRZĘGIEŁ PODATNYCH OPONOWYCH

Streszczenie. Prawidłowo zastosowane sprzęgło podatne w układzie napędowym maszyny roboczej powinno odpowiednio łagodzić nadwyżki dynamiczne w czasie pracy nieustalonej. Zastosowanie przez użytkownika tego rodzaju sprzęgieł wymaga znajomości ich współczynników tłumienia i sztywności, wyznaczanych na podstawie charakterystyk statycznych i dynamicznych [4]. Artykuł przedstawia wyniki wyznaczonych współczynników tłumienia ψ i sztywności c sprzęgieł podatnych oponowych. Badania przeprowadzone zostały przy zmiennych warunkach wymuszeń dynamicznych na stanowisku laboratoryjnym do wyznaczania charakterystyk sprzęgieł podatnych własnej konstrukcji.

INFLUENCE OF THE TORQUE CHANGE ON STATIC AND DYNAMIC CHARACTERISTICS OF TIRE FLEXIBLE COUPLINGS

Summary. Right chose flexible coupling to drive of work machine should to dump torsion vibration created during it work. Application of flexible coupling demands from user the knowledge of elastic and damping properties determined from static and dynamic characteristics. Those characteristics describe of flexible coupling in driving. In this paper is presented result of research work tire flexible coupling and dynamic model work stand to created dynamic characteristics. In this paper is presented result of research coefficient of viscoelastic damping of tire flexible coupling type ASO. Testing was done on test stand for determination of characteristics of flexible coupling.

1. WSTĘP

Nadwyżki dynamiczne powstające w układzie napędowym mogą zostać odpowiednio złagodzone przez łącznik elastomerowy (o własnościach lepko-sprężystych) sprzęgła podatnego. O wielkości energii rozproszonej decyduje wtedy praca tarcia wewnętrznego tego łącznika [2]. Szczególnie duże tarcie wewnętrzne wykazują różnego typu elastomery, stosowane w tego rodzaju sprzęgłach. Odpowiednio zastosowane sprzęgło podatne, w układzie napędowym, powinno przy przechodzeniu przez obszar rezonansu odpowiednio złagodzić nadwyżki momentu dynamicznego do wartości bezpiecznych [5]. Aby ta minimalizacja nadwyżek dynamicznych była możliwa do określenia, niezbędna jest znajomość współczynników sztywności „ c ” i tłumienia „ h ” zastosowanych sprzęgieł

podatnych. Współczynniki te umożliwią budowę modelu matematycznego układu napędowego dowolnej maszyny roboczej. Umożliwią one również analizę dynamiczną takiego modelu układu napędowego z zastosowanym sprzęgłem podatnym oponowym oraz rozwiązywanie równań różniczkowych ruchu w czasie pracy nieustalonej [1].

2. WSPÓŁCZYNNIKI SZTYWNOŚCI

Analizę własności dynamicznych układu napędowego ze sprzęgłem podatnym przeprowadzono za pomocą dwumasowego modelu dynamicznego złożonego z dwóch masowych momentów bezwładności połączonych modelem sprzęgła podatnego [1]. Z przeprowadzonej analizy wynika, że sprzęgła podatne, oprócz momentu statycznego M_{st} przenoszonego w ruchu ustalonym, przenoszą również moment dynamiczny M_{dyn} . W czasie pracy nieustalonej wartość współczynnika sztywności c_{st} wyznaczonego tylko w warunkach statycznych jest niewystarczająca. Na wartość współczynnika sztywności dynamicznej c_d , w przypadku sprzęgieł podatnych, mają wpływ zmienne składowe momentu dynamicznego, takie jak: amplituda momentu dynamicznego M_A , częstość zmian momentu dynamicznego ω_s . Zależność (1) przedstawia współczynnik sztywności dynamicznej sprzęgła podatnego pracującego w układzie napędowym.

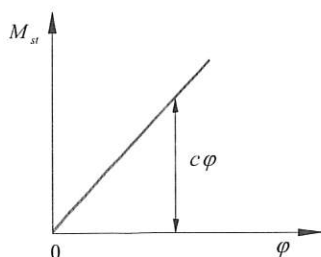
$$c_d(\nu) = \frac{M_A}{\varphi_A} = \omega_o^2 \cdot J_{zr} \cdot \sqrt{(1-\nu^2)^2 + 4 \cdot \xi^2 \cdot \nu^2} \quad (1)$$

gdzie: $\nu = \omega_s / \omega_o$ - współczynnik rozstrojenia, $\xi = H / \omega_o$ - względny współczynnik tłumienia układu, J_{zr} - zredukowany masowy moment bezwładności układu napędowego, φ_A - amplituda kąta względnego skręcenia członów sprzęgła.

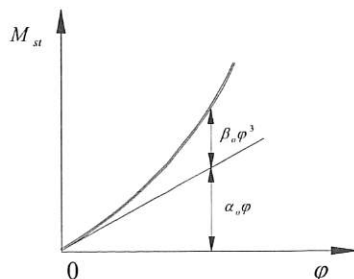
Dla sprzęgieł o charakterystykach niewiele odbiegających od liniowej, wyznaczony został liniowy współczynnik sztywności c_{st} i c_d (rys.1a). Natomiast dla sprzęgieł o charakterystykach odbiegających od liniowych, wyznaczone zostały współczynniki sztywności α_o i β_o (2) (rys.1b):

$$M_{st}(\varphi) = \alpha_o \varphi + \beta_o \varphi^3 \quad (2)$$

a) Charakterystyka liniowa bez tłumienia



b) Charakterystyka nieliniowa bez tłumienia



Rys. 1. Charakterystyki sprzęgieł podatnych oponowych
Fig. 1. Characteristics of tire flexible couplings

3. WSPÓŁCZYNNIKI TLUMIENIA

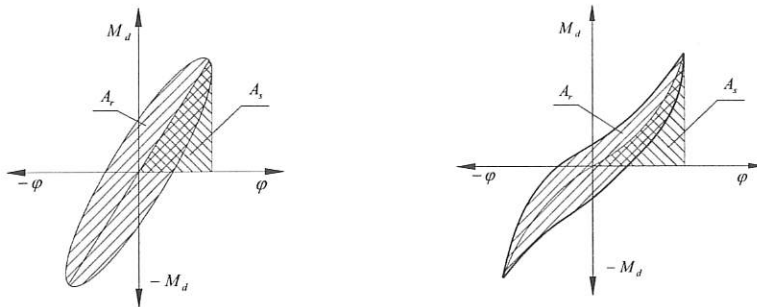
Własności tłumiące sprzęgła podatnego, dla układu napędowego, w którym tylko w sprzęgle podatnym występuje tłumienie, określono za pomocą współczynnik tłumienia ψ (3) (rys.2a, b).

$$\psi = \frac{A_r}{A_s} \quad (3)$$

Wszystkie straty energetyczne w łączniku sprzęgła podatnego (elastomerze i przekładkach), ujmowane są przez ten współczynnik. Jeżeli własności lepko-sprężyste sprzęgła podatnego opisane zostaną modelem Kelvina-Voigta, to powstająca pętla histerezy przybiera postać elipsy (rys.2a), a względny współczynnik tłumienia ψ (sprzęgła podatnego z charakterystyką liniową) jest proporcjonalny do współczynnika tłumienia wiskotycznego h i częstości drgań wymuszających ω_s , natomiast odwrotnie proporcjonalny do współczynnika sztywności dynamicznej sprzęgła c_d .

$$\psi = \frac{2\pi \cdot \omega_s \cdot h}{c_d} \quad (4)$$

a) Charakterystyka liniowa z tłumieniem b) Charakterystyka nieliniowa z tłumieniem



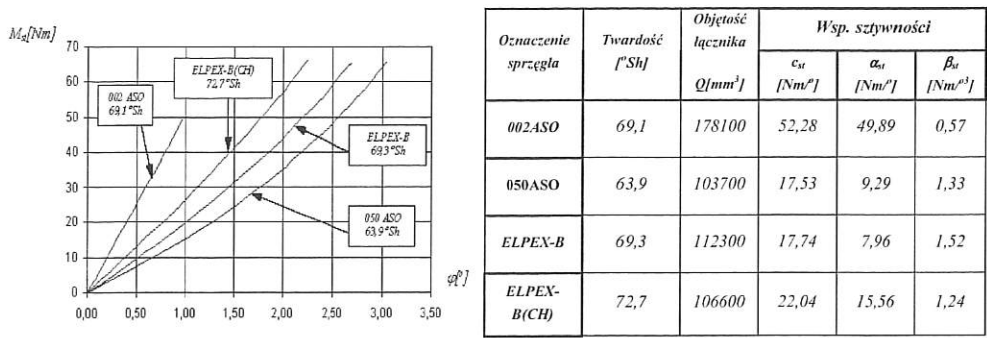
Rys. 2. Charakterystyki tłumienia sprzęgieł podatnych oponowych
Fig. 2. Characteristics of dumping of tire flexible coupling

Dla charakterystyki nieliniowej (rys.2b) współczynnik tłumienia ψ wynosi:

$$\psi = \frac{\pi \cdot h \cdot \omega_s}{\frac{1}{2} \cdot \alpha_o + \frac{1}{4} \cdot \beta_o \cdot \varphi^2} \quad (5)$$

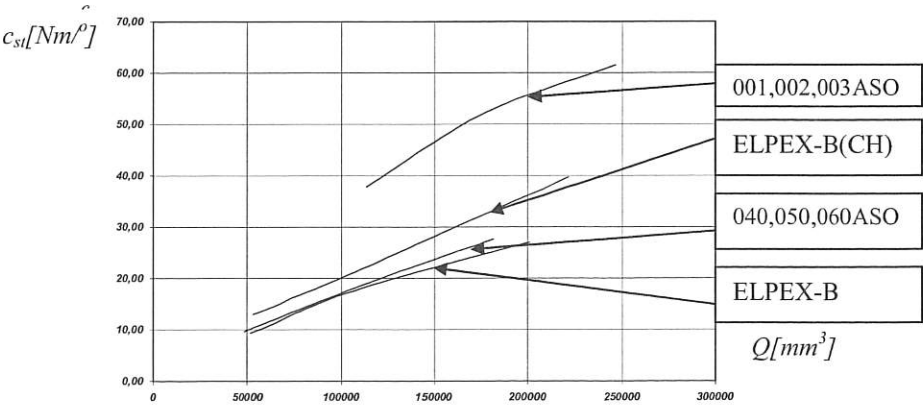
4. WYNIKI PRZEPROWADZONYCH BADAŃ

Przedmiotem badań były łączniki oponowe stosowane w budowie sprzęgieł podatnych oponowych typu ASO oraz ELPEX-B. Do przeprowadzenia badań wykorzystano 3 wielkości sprzęgieł podatnych, trzech niezależnych producentów, na podstawie ich katalogów [6,7,8]. W sumie badaniom laboratoryjnym zostało poddanych 12 łączników oponowych.

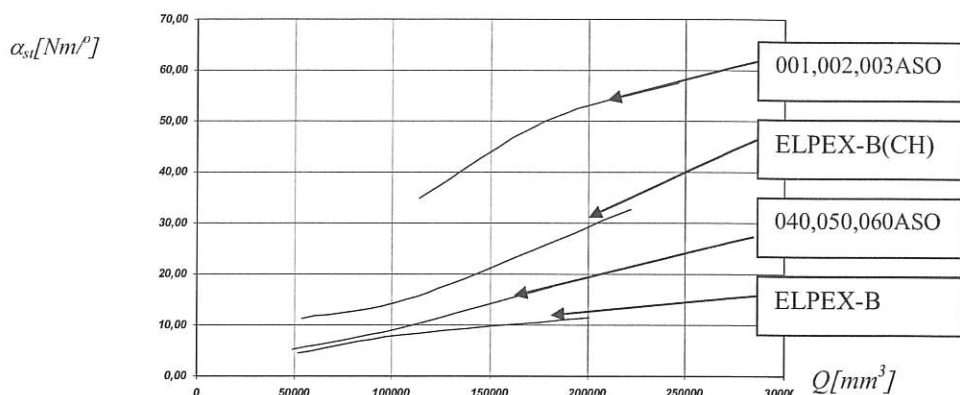
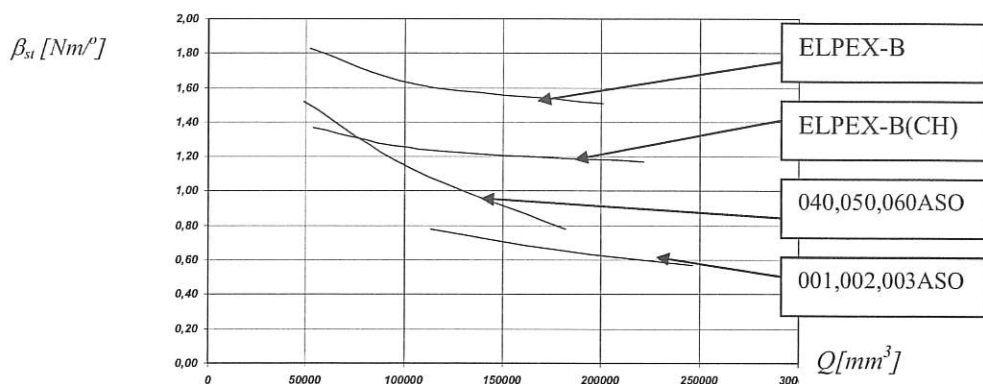


Rys. 3. Charakterystyki statyczne sprężęł podatnych oponowych typu ASO, ELPEX-B
Fig. 3. Static characteristics of tire flexible coupling type ASO, ELPEX-B

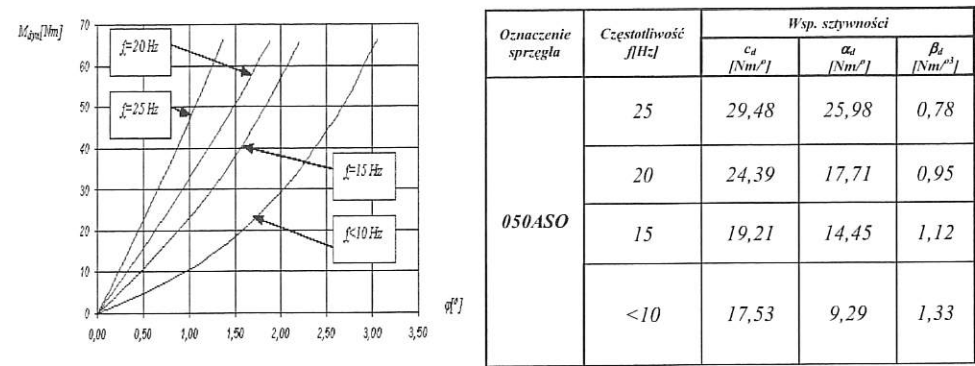
Z otrzymanych charakterystyk statycznych wynika, że ulegają one zmianie w wyniku zmieniającej się objętości i twardości elastomeru zastosowanego do budowy łącznika oponowego. Przykładowo porównując współczynnik $c_{st}=52,28\text{ Nm}^{\circ}$ dla sprężęła oponowego 002ASO o twardości $69,1^{\circ}\text{Sh}$ i przy objętości $Q=178100\text{ mm}^3$ łącznika oponowego, do sprężęła ELPEX-B o identycznej twardości $69,3^{\circ}\text{Sh}$, ale przy objętości badanego łącznika oponowego wynoszącego $Q=112300\text{ mm}^3$, stwierdzono, że sprężęło to posiada wartość współczynnika $c_{st}=17,74\text{ Nm}^{\circ}$ trzykrotnie mniejszą. Z analizy tych charakterystyk wynika, że najszywniejszą charakterystykę mają sprężęła o największej objętości wkładki oponowej, np. 001 ASO lub jej twardości, np. ELPEX-B(CH), natomiast charakterystykę o dużej podatności posiadają sprężęła z wkładką oponową wykonaną z elastomeru o twardości $61,8^{\circ}\text{Sh}$ np. ELPEX-B i $63,9^{\circ}\text{Sh}$ - 050ASO. Sprężęła te mają 2-krotnie mniejszą objętość wkładki oponowej w stosunku do sprężęła 002ASO, czyli wraz ze wzrostem objętości wkładki oponowej następuje wzrost współczynników c_{st} , α_{st} (rys.4, 5). Wzrost tych współczynników następuje szybciej przez zwiększenie objętości zastosowanego łącznika oponowego (np. 001ASO) niż w wyniku zwiększenia jego twardości (np. ELPEX-B(CH)).



Rys. 4. Zależność współczynnika c_{st} od objętości łącznika oponowego
Fig. 4. Dependence of the coefficient c_{st} in function of tire flexible element volume

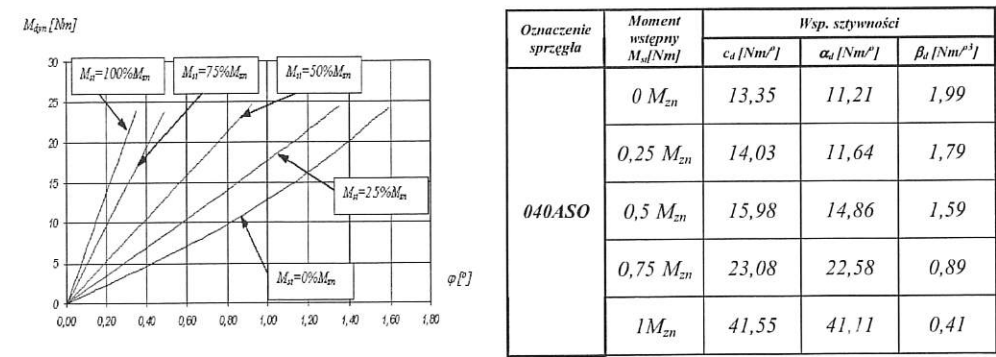
Rys. 5. Zależność współczynnika α_{st} od objętości łącznika oponowegoFig. 5. Dependence of the coefficient α_{st} in function of tire flexible element volumeRys. 6. Zależność współczynnika β_{st} od objętości łącznika oponowegoFig. 6. Dependence of the coefficient β_{st} in function of tire flexible element volume

Porównując wartości współczynników sztywności statycznej i dynamicznej zauważono, że przy wymuszeniu dynamicznym wartość współczynników c_d , α_d ulega wzrostowi w stosunku do współczynników wyznaczonych w sposób statyczny. Na wartości współczynników c_d , α_d , β_d badanych sprzęgieł wyraźnie wpływa częstotliwość drgań wymuszających, w czasie których łącznik oponowy ulega usztywnieniu. Pod tym kątem przeprowadzono dalsze badania, których celem było wyznaczenie zmian wielkości współczynników c_d , α_d , β_d pod wpływem wzrostu częstotliwości wymuszającej. W pierwszym etapie badań wyznaczano charakterystyki dynamiczne dla sprzęgieł podatnych oponowych przy częstotliwości wymuszającej $f = 10, 15, 20, 25 \text{ Hz}$ (rys.7). Natomiast uzyskane charakterystyki dynamiczne, przy zmianie obciążenia wstępnego, przedstawiono na rysunku 8.



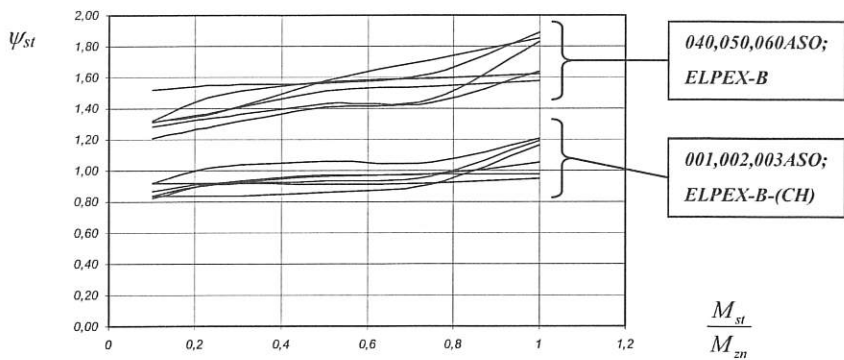
Rys. 7. Wpływ częstotliwości wymuszającej na charakterystykę dynamiczną sprzęgła 050ASO
Fig. 7. Influences frequency on dynamic characteristics of the tire flexible coupling 050ASO

Podobnie jak przy badaniach statycznych, główny wpływ na wartość współczynników c_d , α_d , β_d ma objętość łącznika oponowego. Analizując te współczynniki można zauważyć, że przy wymuszeniu dynamicznym charakterystyki zbiegają do liniowych (przy wzroście częstotliwości wymuszającej) (rys.7), w wyniku usztywnienia się łącznika oponowego sprzęgła. Usztywnienie to jest tym większe, im większą objętość ma dany łącznik oponowy. Również wzrost obciążenia wstępnego wywołuje wzrost współczynników c_d i α_d dla wszystkich badanych sprzęgieł podatnych oponowych (rys.8).



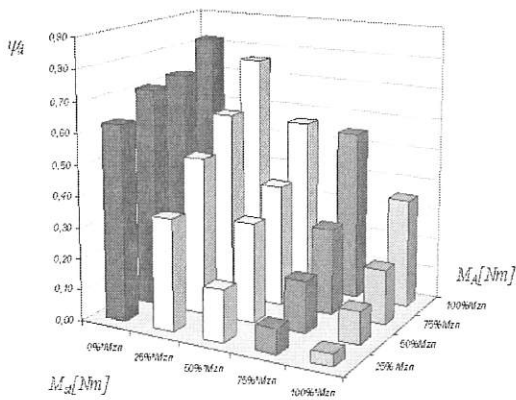
Rys. 8. Wpływ wstępnego obciążenia na charakterystykę dynamiczną sprzęgła podatnego 040ASO
Fig. 8. Influence of initial load on dynamic characteristics of the tire flexible coupling 040ASO

W dalszym etapie przeprowadzono badania statyczne współczynników tłumienia, na podstawie wyznaczonej pętli histerezy badanych sprzęgieł. Badania przeprowadzono dla amplitud obciążeń stanowiących $M_{st}=25;50;75;100\%M_{zn}$ badanego sprzęgła. Po zestawieniu otrzymanych współczynników tłumienia ψ_{st} , stwierdza się ich wzrost w miarę wzrostu amplitudy momentu. Wynika to z faktu, że w miarę wzrostu amplitudy obciążenia następuje silniejsze odchylenie się charakterystyki statycznej (rys.1b) od linii prostej. Na podstawie analizy rys.9 można również stwierdzić, że wzrost objętości wkładki oponowej, jak i jej twardość powodują spadek współczynnika tłumienia ψ_{st} (sprzęgła 001; 002; 003ASO i ELPEX-B(CH)).



Rys. 9. Wpływ wartości M_{st}/M_{zn} na współczynnik tłumienia ψ_{st} badanych sprzęgieł podatnych
Fig. 9. Influence of value M_{st}/M_{zn} on coefficient of dumping for tested flexible couplings

Natomiast przeprowadzone badania w warunkach dynamicznych dostarczyły informacji odnośnie do współczynnika tłumienia ψ_d . Wartość tego współczynnika zależy od składowej momentu M_A i M_{st} . Współczynnik ψ_d nie ma, w przypadku sprzęgieł podatnych oponowych, wartości stałej i nie może być jednoznacznie określony, ponieważ ulega on zmianie w wyniku zmieniającej się amplitudy M_A . Może być on określony dla konkretnych warunków pracy w układzie napędowym. W miarę spadku częstości wymuszającej współczynnik tłumienia rośnie i największą wartość osiąga w obszarze przy niskich częstotliwościach wymuszających. Rysunek 10 przedstawia jego wartość w układzie $\psi_d=f(M_A, M_{st})$. Można w ten sposób przyjąć, że dla badanych opon znaczący wpływ na zmianę współczynnika tłumienia mają zewnętrzne warunki obciążenia (M_{st} i M_A).



Oznaczenie sprzęgła	Moment wstępny M_{st} [Nm]	Amplituda momentu dynamicznego M_A [Nm]	Wsp. tłumienia ψ_d
050 ASO	0 M_{zn}	0,25 M_{zn}	0,63
		0,5 M_{zn}	0,71
		0,75 M_{zn}	0,72
		M_{zn}	0,82
	0,25 M_{zn}	0,25 M_{zn}	0,36
		0,5 M_{zn}	0,49
		0,75 M_{zn}	0,61
		M_{zn}	0,76
	0,5 M_{zn}	0,25 M_{zn}	0,17
		0,5 M_{zn}	0,32
		0,75 M_{zn}	0,39
		M_{zn}	0,56
	0,75 M_{zn}	0,25 M_{zn}	0,11
		0,5 M_{zn}	0,17
		0,75 M_{zn}	0,28
		M_{zn}	0,55
	M_{zn}	0,25 M_{zn}	0,04
		0,5 M_{zn}	0,10
		0,75 M_{zn}	0,18
		M_{zn}	0,35

Rys. 10. Wartość współczynnika tłumienia $\psi_d=f(M_{st}, M_A)$ dla sprzęgła 050 ASO przy $f=20$ Hz
Fig. 10. Value the coefficient of dumping $\psi_d=f(M_{st}, M_A)$ for coupling 050 ASO for $f=20$ Hz

Najmniejszymi właściwościami tłumiącymi drgania skrętne charakteryzują się łączniki oponowe o twardości 75°Sh, a najlepszymi właściwościami tłumiącymi łączniki oponowe o twardości w granicach 60°Sh.

5. PODSUMOWANIE

Analizując uzyskane z badań charakterystyki statyczne $M_{st}=f(\varphi)$ oraz dynamiczne $M_{dyn}=f(\varphi)$ można zauważyć, że mają one przebieg nieliniowy. Statyczny współczynnik tłumienia ψ_{st} niewiele wzrasta w miarę wzrostu amplitudy obciążenia statycznego i zmienia się jedynie w zależności od twardości i objętości opony (tzn. wielkości sprzęgła). Wyznaczone na podstawie charakterystyk dynamicznych współczynniki c_d i ψ_d mają przebieg odbiegający wyraźnie od charakterystyk statycznych. Decydujący wpływ na dynamiczny współczynnik tłumienia ψ_d oraz współczynnik sztywności c_d , poza objętością i twardością wkładki oponowej, ma: wielkość momentu w ruchu ustalonym M_{st} , amplituda momentu dynamicznego M_d i częstość wymuszająca ω_s . Porównując współczynniki wyznaczone w sposób statyczny i dynamiczny (poszczególnych sprzęgieł) można stwierdzić, że sprzęgła 001;002;003ASO mają największą sztywność (ze względu na objętość wkładki oponowej), zaś najmniejszą sprzęgła 040;050;060ASO. Sprzęgła podatne oponowe badane w warunkach statycznych mają charakterystyki nieliniowe (wysoki współczynnik β_{st}), natomiast w warunkach dynamicznych zbliżają się one do charakterystyk liniowych (niski współczynnik β_d) wraz ze wzrostem obciążenia wstępnego M_{st} . Zmiana współczynników c_d , α_d , β_d wraz ze wzrostem wartości momentu ustalonego M_{st} jest tym większa, im większa jest wartość tego momentu. Natomiast wartość dynamicznego współczynnika tłumienia ψ_d zależy również od wielkości obciążenia wstępnego M_{st} oraz amplitudy obciążenia M_d . Nie jest on, jak w przypadku statycznego współczynnika tłumienia ψ_{st} , stały, ale zmienia się w zależności od wielkości sprzęgła. Jego zmiana zależy od częstotliwości momentu wymuszającego M_d , można to uznać za dostosowanie do charakterystyki rezonansowej w zakresie pracy nadkrytycznej.

Literatura

1. Opasiak T.: Wpływ zmian momentu obrotowego na charakterystykę statyczną i dynamiczną sprzęgieł podatnych oponowych (rozprawa doktorska). Katedra Logistyki i Transportu Przemysłowego, Wydział Transportu, Politechnika Śląska, Gliwice 2005.
2. Opasiak T.: Wpływ charakterystyk sprzęgieł podatnych na własności dynamiczne układów napędowych maszyn roboczych. VII Seminarium Naukowe, Studentów i Młodych Inżynierów Mechaników, Gdańsk 2005.

3. Markusik S.: Charakterystyki sprzęgieł podatnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Transport, z.34, Gliwice 1998.
4. Markusik S.: Sprzęgła mechaniczne. WNT, Warszawa 1979.
5. Katalog firmy Fena, Polska 2004.
6. Katalog firmy Fenner, Austria 2003.
7. Katalog firmy Flender, Niemcy 2000.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jerzy Antoniak

Praca badawcza w ramach BK - 262/RT-3/2005