

Tadeusz Opasiak*

BADANIA PODSTAWOWYCH PARAMETRÓW SPRZĘGIEŁ PODATNYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań podstawowych parametrów charakteryzujących sprzęgła podatne. Badania ograniczyły się do wyznaczenia charakterystyk statycznych i dynamicznych. Na podstawie tych charakterystyk odczytano współczynniki sztywności i tłumienia. Badania przeprowadzono na sprzęgłach podatnie skrętnych z łącznikiem oponowym i łącznika w kształcie pierścienia elastycznego.

Słowa kluczowe: sprzęgło podatne, charakterystyka statyczna, charakterystyka dynamiczna, współczynnik sztywności, współczynnik tłumienia.

1. WSTĘP

W układach napędowych maszyn roboczych stosuje się różnego rodzaju sprzęgła podatne skrętnie. Dobór odpowiedniego sprzęgła podatnego, do danego układu napędowego, powinien odbywać się nie tylko na podstawie przenieszonego momentu obrotowego (jak to się odbywa w większości przypadków), ale głównie na podstawie parametrów lepko-sprężystych łącznika podatnego [4]. Aby ten sposób doboru sprzęgła podatnego, do układu napędowego maszyny roboczej, był możliwy niezbędna jest identyfikacja ilościowa takich parametrów eksploatacyjnych, sprzęgła podatnego, jak współczynnik tłumienia i sztywności, są to współczynniki niezbędne w momencie symulacji komputerowej [1]. Współczynniki te wyznaczane są na podstawie charakterystyk statycznych lub dynamicznych. Brak ogólnego dostępu do tego rodzaju badań powoduje, że konstruktorzy (eksploatatorzy) maszyn roboczych nie posługują się tymi parametrami w momencie wyboru sprzęgła podatnego do danych warunków pracy [4].

Zastosowanie sprzęgła podatnego o odpowiednich wartościach współczynników sztywności i tłumienia odpowiednio złagodzić, nadwyżki dynamiczne powstające w danym układzie napędowym. O wielkości energii rozproszonej decyduje głównie praca tarcia wewnętrznego łącznika sprzęgła podatnego [4].

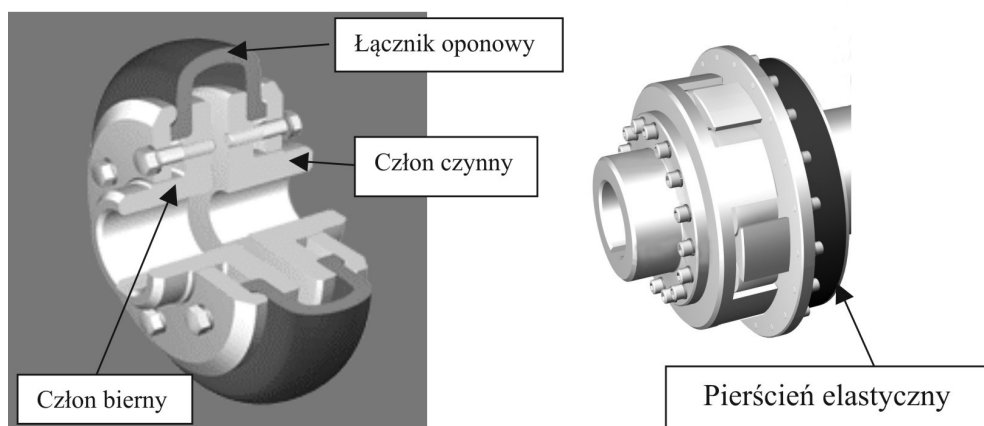
* Katedra Logistyki i Transportu Przemysłowego, Wydział Transportu, Politechnika Śląska, tadeusz.opasiak@polsl.pl

2. WPLYW OBJĘTOŚCI ŁĄCZNIKA PODATNEGO SPRZĘGŁA NA PRZENOSZONEGO MOMENTU OBROTOWEGO W UKŁADZIE NAPĘDOWYM

Przedmiotem badań laboratoryjnych były własności lepko-sprężyste sprzęgieł podatnych z łącznikiem podatnym w formie opony (rys. 1a) i pierścienia gumowego (rys. 1b).

a) Sprzęgło podatne oponowe

b) Sprzęgło podatne pierścieniowe



Rys. 1. Sprzęgła podatne skrętnie z łącznikiem oponowym i pierścieniowym

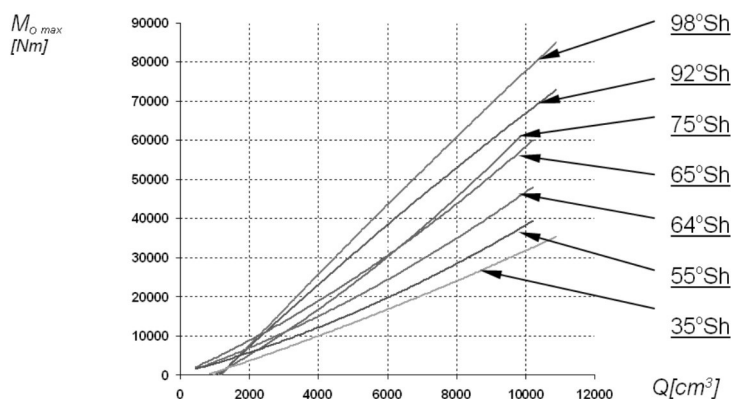
Fig. 1. Flexible coupling with a tire and a ring coupling

W praktyce inżynierskiej o doborze sprzęgła podatnego do danego układu napędowego decyduje znamionowy moment obrotowy M_{zn} jednostki napędowej układu maszyny roboczej.

Łączniki elastomerowe sprzęgieł podatnych skrętnie wykazują własności lepko-sprężyste przy słabych własnościach wytrzymałościowe w stosunku do metalowych elementów sprzęgła podatnego. Dlatego udział ilościowy, elementu podatnego, w całym typoszeregu sprzęgła podatnego podyktowany jest objętością i twardością. Dlatego też badania sprzęgieł podatnych prowadzono w odniesieniu do objętości łącznika podatnego badanych sprzęgieł Q (rys. 2) [4].

Na podstawie analizy objętości elementu podatnego zastosowanego do budowy sprzęgła stwierdzono, że każdy następny łącznik elastomerowy w typoszeregu sprzęgła posiada objętość zwiększoną proporcjonalnie w stosunku do poprzedniego sprzęgła w katalogowym typoszeregu sprzęgieł [3, 4].

Wielkość przenoszonego momentu obrotowego w typoszeregu poza objętością podyktowana jest również twardością danego łącznika podatnego. Wartość przenoszonego momentu obrotowego zależy nie tylko od objętości, ale również jego twardości. Można zauważyć, że przy tej samej objętości łącznik podatny o większej twardości przeniesie odpowiednio większą wartość momentu obrotowego M_o (rys. 2) ale będzie posiadał już inne własności lepko-sprężyste [4].



Rys. 2. Wpływ objętości Q łącznika podatnego na wielkość przenieszonego momentu obrotowego M_o dla badanych sprzęgieł podatnych

Fig. 2. Influence the volume of Q connecting flexible to the size of transmitted torque M_o of flexible couplings for test

3. WSPÓŁCZYNNIKI EKSPLOATACYJNE SPRZĘGIEŁ PODATNYCH

3.1. Sztywność sprzęgieł podatnych

Charakterystyki sprzęgieł podatnych skrętnie zbudowane zostały na podstawie zadanej wielkości momentu obrotowego M_o w funkcji otrzymanego kąta względnego skręcenia φ elementu podatnego sprzęgła (1)

$$M_o = f(\varphi). \quad (1)$$

Tworzona na tej podstawie charakterystyka służyły do wyznaczenia takich współczynników jak: bezwymiarowy współczynnik tłumienia ψ i współczynnik sztywności c . Wartości liczbowe tych współczynników mają szczególne znaczenie w czasie analizie dynamicznej (rys. 3) współpracującego ze sprzęgłem podatnym na podstawie równia (2) [1, 2, 3, 4].

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2H \frac{d\varphi}{dt} + \omega_o^2 \varphi = M(t) , \quad (2)$$

gdzie:

φ – kąt względnego skręcenia członów sprzęgła,

H – współczynnik tłumienia układu,

ω_o – częstość drgań własnych,

$M(t)$ – moment wymuszający.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że sprzęgła podatne, oprócz momentu statycznego M_{st} przenoszonego w ruchu ustalonym, przenoszą również moment dynamiczny M_d (w ruchu nieustalonym) (3)

$$M_{max}(t) = M_{st} + M_d(t). \quad (3)$$

W czasie pracy nieustalonej, wartość współczynnika sztywności c_{st} (8) wyznaczonego tylko w warunkach statycznych jest niewystarczająca (4)

$$c_s = \frac{M_s}{\varphi_s}. \quad (4)$$

Współczynnik sztywności dynamicznej c_d dla badanego układu dwumasowego wynosi:

$$c_d(\nu) = \frac{M_A}{\varphi_A} = \omega_o^2 \cdot J_z \cdot \sqrt{(1 - \nu^2)^2 + 4 \cdot \xi^2 \cdot \nu^2}, \quad (5)$$

gdzie:

- ν – współczynnik rozstrojenia,
- ξ – względny współczynnik tłumienia układu,
- φ_A – amplituda kąta względnego skręcenia członów sprzęgła.

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 .

Dla sprzęgieł o charakterystykach odbiegającej od charakterystyki liniowej, wyznaczony został liniowy współczynnik sztywności c_{st} i c_d . Natomiast dla sprzęgieł o charakterystykach odbiegających od liniowych, wyznaczone zostały współczynniki sztywności α_o i β_o dla wielomianu trzeciego stopnia według równania (6)

$$M_{st}(\varphi) = \alpha_o \varphi + \beta_o \varphi^3. \quad (6)$$

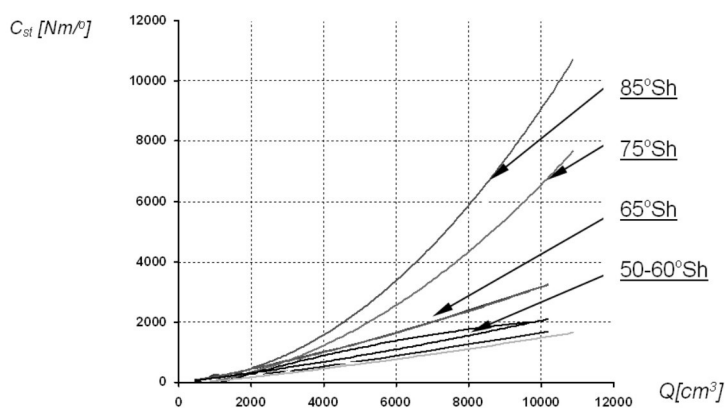
W tabeli 1 przedstawiono przykładowe wartości tych współczynników dla kilku wybranych wielkości sprzęgieł podatnych oponowych o różnej objętości zastosowanego łącznika i jego twardości.

Tabela 1. Przykładowe wartości współczynników sztywności

Rodzaj łącznika sprzęgła podatnego	Twardość [°Sh]	Objętość łącznika Q [mm ³]	Współczynnik sztywności		
			c_{st} [Nm/°]	α_{st} [Nm/°]	β_{st} [Nm/° ³]
1 opona	69,1	178 100	52,28	49,89	0,57
2 opona	63,9	103 700	17,53	9,29	1,33
3 opona	69,3	112 300	17,74	7,96	1,52
4 opona	72,7	106 600	22,04	15,56	1,24

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

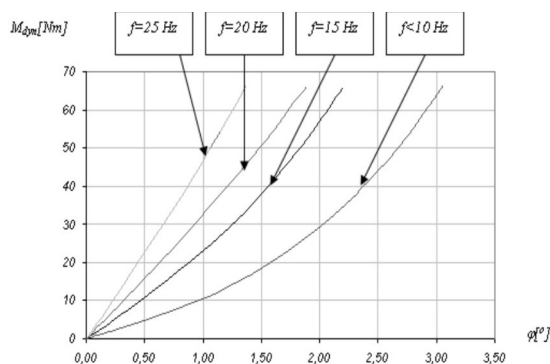
Na rysunku 3 przedstawiono wpływ objętości i twardości na wartość współczynnika sztywności c_{st} .



Rys. 3. Wpływ objętości łącznika podatnego na wartość współczynnika sztywności dla sprzęgieł podatnych

Fig. 3. Influence the volume of the flexible connector to stiffness coefficient for flexible couplings

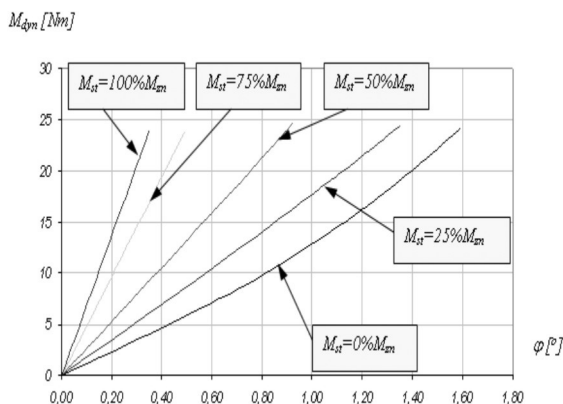
Porównując wartości współczynników sztywności statycznej i dynamicznej zauważono, że przy wymuszeniu dynamicznym wartość współczynników c_d , α_d ulega wzrostowi w stosunku do współczynników wyznaczonych w sposób statyczny. Na wartości współczynników c_d , α_d , β_d badanych sprzęgieł wyraźnie wpływa częstość wymuszająca ω_s . Pod tym kątem przeprowadzono dalsze badania, których celem było wyznaczenie zmian wielkości współczynników c_d , α_d , β_d pod wpływem wzrostu częstotliwości wymuszającej moment dynamiczny (rys. 4).



Rys. 4. Wpływ częstotliwości wymuszającej na charakterystykę dynamiczną dla sprzęgła nr 2
Influence frequency on the dynamic characteristics for the coupling No. 2

Podobnie jak przy badaniach statycznych, główny wpływ na wartość współczynników c_d , α_d , β_d ma objętość łącznika podatnego. Analizując te współczynniki można zauważyć, że przy wymuszeniu dynamicznym charakterystyki zmierzają do liniowych (przy wzroście częstości wymuszającej ω_s) (rys. 5), jest tym większe im większą objętość posiada dany element podatny. Również wzrost obciążenia momentem statycznym powoduje wzrost współczynników c_d i α_d dla wszystkich badanych sprzęgieł podatnych oponowych.

Na podstawie rysunku 5 można zaobserwować wyraźną zmianę charakterystyki dynamicznej sprzęgła podatnego oponowego wyniku wzrostu momentu znamionowego. Z dalszej analizy charakterystyk wynika, że najszywniejszą charakterystykę posiadają sprzęgła o największej objętości zastosowanego łącznika elastomerowego np. nr 1 lub twardości np. nr 4, natomiast charakterystykę o dużej podatności posiadają sprzęgła z łącznika podatnego wykonanego z elastomeru o niższej twardości 65°Sh np. nr 2 i 3. Wzrost tych współczynników sztywności następuje szybciej przez zwiększenie objętości zastosowanego łącznika oponowego (np. nr 2) niż wyniku zwiększenia jej twardości (np. nr 4).

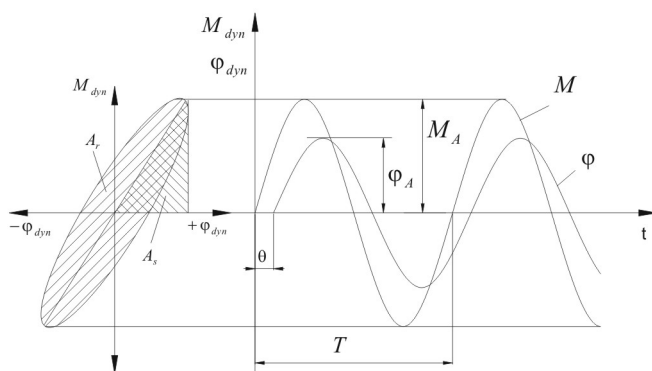


Rys. 5. Wpływ wstępnego obciążenia na charakterystykę dynamiczną sprzęgła podatnego
Fig. 5. Influence preload on the dynamic characteristics of flexible coupling

3.2. Bezwymiarowy współczynnik tłumienia łącznika podatnego

Narastanie względnego kąta skręcenia członów sprzęgła $\varphi(t)$ w czasie pracy następuje z pewnym opóźnieniem w stosunku do momentu dynamicznego $M_d(t)$ i w łączniku sprzęgła powstaje pętla histerezy, na podstawie, którego można wyznaczany jest bezwymiarowy współczynnik tłumienia ψ (7) elementu podatnego, gdzie pole A_r przedstawia wielkość powstającej pętli histerezy, a pole A_s pracę sprężystego odkształcenia [3]:

$$\psi = \frac{A_r}{A_s} \quad (7)$$



Rys. 6. Pętla histerezy pod wpływem drgań wymuszonych harmonicznie
Fig. 6. Hysteresis loop under the influence of a harmonically forced vibration

Pole powierzchni histerezy ograniczonej elipsą (rys. 6) opisuje zależność:

$$A_r = \pi h \omega_s \varphi_A^2, \quad (8)$$

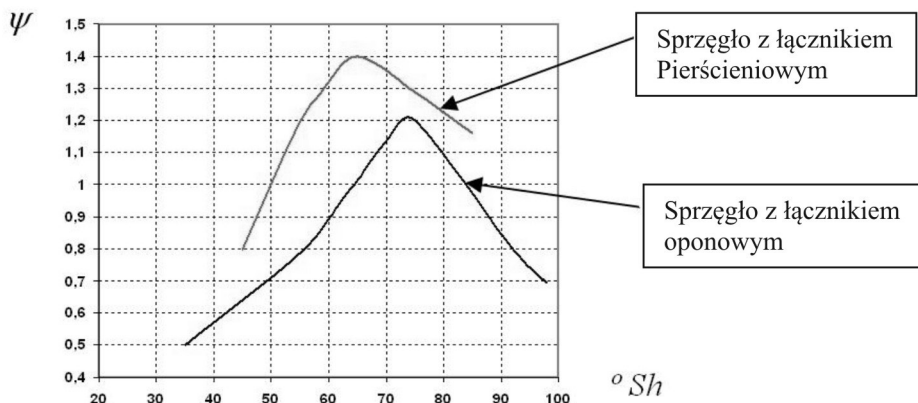
i przedstawia energię rozproszoną podczas jednego okresu. Natomiast pole sprężystego odkształcenia wkładki elastomerowej sprzęgła podatnego określa zależność:

$$A_s = \frac{1}{2} c \cdot \varphi_A^2 \quad (9)$$

Po podstawieniu zależności (8) i (9) do równania (13) otrzymuje się zależność 10

$$\psi = \frac{2\pi \cdot h \cdot \omega_s}{c_d} \quad (10)$$

Względny współczynnik tłumienia ψ dla modelu Kelvina-Voigta jest proporcjonalny do współczynnika tłumienia wiskotycznego h i częstości drgań wymuszających ω_s , natomiast odwrotnie proporcjonalny do współczynnika sztywności dynamicznej sprzęgła c_d (rys. 7).

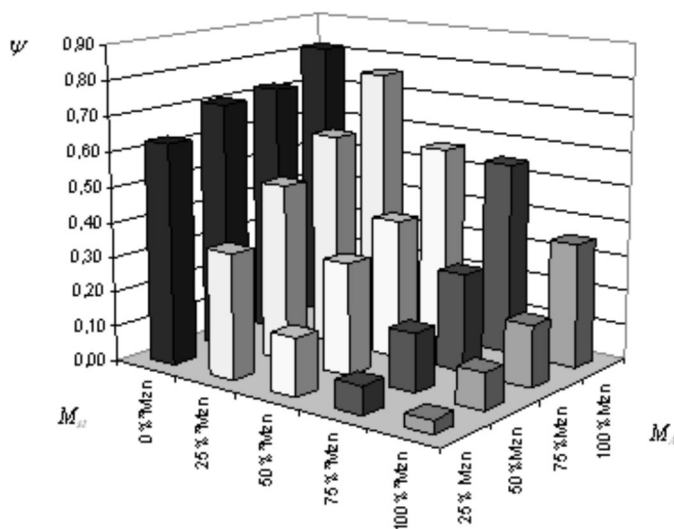


Rys. 7. Wpływ twardości łączników elastomerowych na wartość współczynnika tłumienia dla badanych sprzęgieł

Fig. 7. Influence hardness of elastomeric couplings on the value of damping factor for the tested couplings

Z przeprowadzonych badań wynika również, że względny współczynnik tłumienia Ψ zależy głównie od twardości łącznika zastosowanego do budowy sprzęgła podatnego skrętnie. Do sprzęgieł o najlepszych właściwościach tłumiących, drgania skrętne w układzie napędowym, należą sprzęgła podatne z pierścieniem gumowym o twardości $65^{\circ}Sh$, wynosi on $\psi = 1,4$, natomiast sprzęgła oponowe posiadają $\psi = 1,2$ przy twardości $74^{\circ}Sh$.

Natomiast badania dynamiczne odnośnie współczynnika tłumienia ψ_d . Wartość tego współczynnika zależy głównie od składowej momentu M_A i M_{sr} . Współczynnik ψ_d nie posia-



Rys. 8. Wartość współczynnika tłumienia $\psi_d = f(M_{sr}, M_A)$ dla sprzęgła oponowego przy $f = 20Hz$

Fig. 8. Value of damping coefficient $\psi_d = f(M_{sr}, M_A)$ for a tire coupling przy $f = 20Hz$

da, w przypadku sprzęgieł podatnych, 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 8 przedstawia jego wartość w układzie $\psi_d=f(M_A, M_{st})$. Można w ten sposób przyjąć, że dla badanych sprzęgieł, znaczący wpływ na zmianę współczynnika tłumienia posiadają zewnętrzne warunki obciążenia (M_{st} i M_A).

4. WNIOSKI

W oparciu o wyniki badań stwierdzono, że sztywność statyczna i dynamiczna uzależniona jest od objętości i twardości zastosowanego elastomeru do budowy sprzęgła podatnego. Wszystkie charakterystyki badanych sprzęgieł są nieliniowe ze względu na znaczne odkształcenia łącznika podatnego przy charakterystykach statycznych, natomiast charakterystyki dynamiczne, początkowo nieliniowe zmiernają do charakterystyk liniowych, głównie pod wpływem wzrostu obciążenia wstępnego i wzrostu częstotliwości wymuszającej.

Wyznaczone współczynniki tłumienia wykazały, że ich wartości uzależnione są głównie od wielkości amplitudy momentu wymuszającego i częstotliwości wymuszającej.

LITERATURA

1. Opasiak T. Rozruch przenośnika taśmowego z zastosowanym sprzęgłem podatnym” XVIII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna, TEMAG 2010, Gliwice-Ustroń 2010.
2. Opasiak T., Nowakowski P. The overload characteristics of flexible couplings in drive system of transportation machines. *Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze*, nr 4 (10) 2010.
3. Markusik S., Opasiak T. Wpływ zmian momentu obrotowego na charakterystykę statyczną i dynamiczną sprzęgieł podatnych. *Problemy Transportu*, t. 1, z. 1, Wyd. Pol. Śl., Gliwice 2006.
4. 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 2005.

THE STUDY OF THE BASIC PARAMETERS OF FLEXIBLE COUPLINGS

Summary

This article presents a results of study of the basic parameters characterizing the flexible couplings. The study was limited to determine the static and dynamic characteristics. Based on these characteristics read out the coefficients of stiffness and damping. Tests were conducted on flexible coupling, with a tire rubber coupling and witch a ring rubber coupling.

Keywords: flexible coupling, static characteristic, dynamic characteristic, coefficients of stiffness, coefficients of damping.