

Wywoływanie obciążeń dynamicznych w badaniach stanowiskowych podzespołów hydrokinetycznych

Andrzej Kęsy, Pablo De La Fuente, Marcin Migus

Wzrost wydajności maszyn wymaga zwiększenia prędkości ruchów roboczych ich podzespołów, co pociąga za sobą zwiększenie obciążeń dynamicznych elementów maszyn. Duże obciążenia dynamiczne przyczyniają się z kolei do wzrostu intensywności drgań. Obciążenia dynamiczne w układzie napędowym są zazwyczaj wywoływane przez:

- zmienne obciążenia zewnętrzne wynikające z wykonywanej przez maszynę pracy;
- działania operatora maszyny (rozruch, nawroty, przyspieszanie, hamowanie);
- nierównomierną pracę silnika napędowego.

Podzespoły hydrokinetyczne (PH), tj. przekładnie, sprzęgła i hamulce hydrokinetyczne, mają tę właściwość, że tłumią drgania przenoszone przez układ napędowy. Przyczyną tego zjawiska jest przekazywanie energii z wału wejściowego na wał wyjściowy PH tylko przez ruch cieczy roboczej. Z tego powodu PH są obecnie szeroko stosowane w układach napędowych maszyn.

Proces konstruowania PH jest skomplikowany ze względu na fakt, że modele matematyczne opisujące ruch cieczy w przestrzeni roboczej PH są nadal niedoskonałe. Dlatego niezbędnym etapem procesu konstruowania PH są badania stanowiskowe prototypów.

Do badania ruchu nieustalonego PH, którego przyczyną są obciążenia dynamiczne, stosowane są specjalne stanowiska badawcze. Zależnie od rodzaju obciążeń wywołujących ruch nieustalony stosuje się do ich realizacji różne urządzenia: mechaniczne, hydrauliczne lub elektryczne, co ma istotny wpływ na budowę stanowisk.

Sposoby wywoływania obciążeń dynamicznych

Podczas badań stanowiskowych PH obciążenia dynamiczne są wywoływane za pomocą zmian czynników zewnętrznych oddziałujących na badany podzespół. Mogą to być:

Streszczenie: W artykule przedstawiono, na podstawie własnych doświadczeń oraz analizy literatury, sposoby wywoływania obciążeń dynamicznych podczas badań stanowiskowych nieustalonych stanów pracy podzespołów hydrokinetycznych. Artykuł zakończono wnioskami dotyczącymi wytycznych co do stosowania omówionych sposobów wywoływania obciążeń dynamicznych.

REALIZATION OF DYNAMIC LOADS IN TEST RIG INVESTIGATION OF HYDRODYNAMIC SUB-ASSEMBLIES

Abstract: In the paper ways of dynamic loads realization in a test rig investigation of hydrodynamic sub-assemblies was described. It was done based on authors experiences and literature analysis. In the result instructions of dynamic loads application for the test rigs were given.

- prędkość lub moment obrotowy na wejściu do badanej PH zadawane przez silnik napędowy;
- prędkość lub moment obrotowy na wyjściu z badanej PH zadawane przez hamulec;
- gęstość, lepkość lub ciśnienie cieczy roboczej zadawane przez układ zasilania.

Obciążenia dynamiczne powodują zmiany prędkości kątowych wałów wejściowego i wyjściowego PH oraz momentów obrotowych oddziałujących na te wały.

Zmiany czynników zewnętrznych są realizowane na drodze mechanicznej, hydraulicznej lub elektrycznej. Sposoby wywoływania obciążeń dynamicznych podczas badań stanowiskowych PH przedstawiono w tabeli 1.

Sposób wywoływania obciążeń dynamicznych	Urządzenie wywołujące obciążenia dynamiczne	Zmieniana wielkość
Mechaniczny	Wał z przegubami Cardana, planetarna przekładnia sumująca	Prędkość kąтова
	Pulsator mechaniczny	Moment obrotowy
	Łamany lub uderzany pręt, zrywane ciągnio	Prędkość kąтова, moment obrotowy
Hydrauliczny	Pulsator hydrauliczny	Moment obrotowy
	Sterowane układy hydrostatyczne, układ hydrauliczny zasilania PH cieczą roboczą o zmiennych właściwościach	Prędkość kąтова, moment obrotowy
Elektryczny	Pulsator elektryczny	Moment obrotowy
	Sterowane maszyny elektryczne	Prędkość kąтова, moment obrotowy

Tabela 2. Urządzenia wywołujące zmiany wielkości wejściowych podczas badań PH [1–9]	
Charakter zmian	Urządzenie wywołujące zmiany
Sinusoidalny	Wał z przegubami Cardana, przekładnia planetarna, układ hydrostatyczny, układ elektryczny
Okresowy	Układ hydrostatyczny, układ elektryczny
Skokowy	Hamulec mechaniczny, układ hydrostatyczny, układ elektryczny, układ hydrauliczny zasilający PH cieczą roboczą
Impulsowy	Łamany lub uderzany pręt, zrywane ciągnie

W celu porównywania wyników badań oraz budowy i identyfikacji modeli matematycznych PH, jako wielkości wejściowe stosowane są zdeterminowane obciążenia dynamiczne wywołane: zmianami prędkości kątowych, momentów obrotowych o ściśle określonym przebiegu: skokowym, liniowym, impulsowym, sinusoidalnym, okresowym lub skokową zmianą właściwości cieczy roboczej spowodowaną jej wymianą na inną. Urządzenia wywołujące takie zmiany zestawiono w tabeli 2.

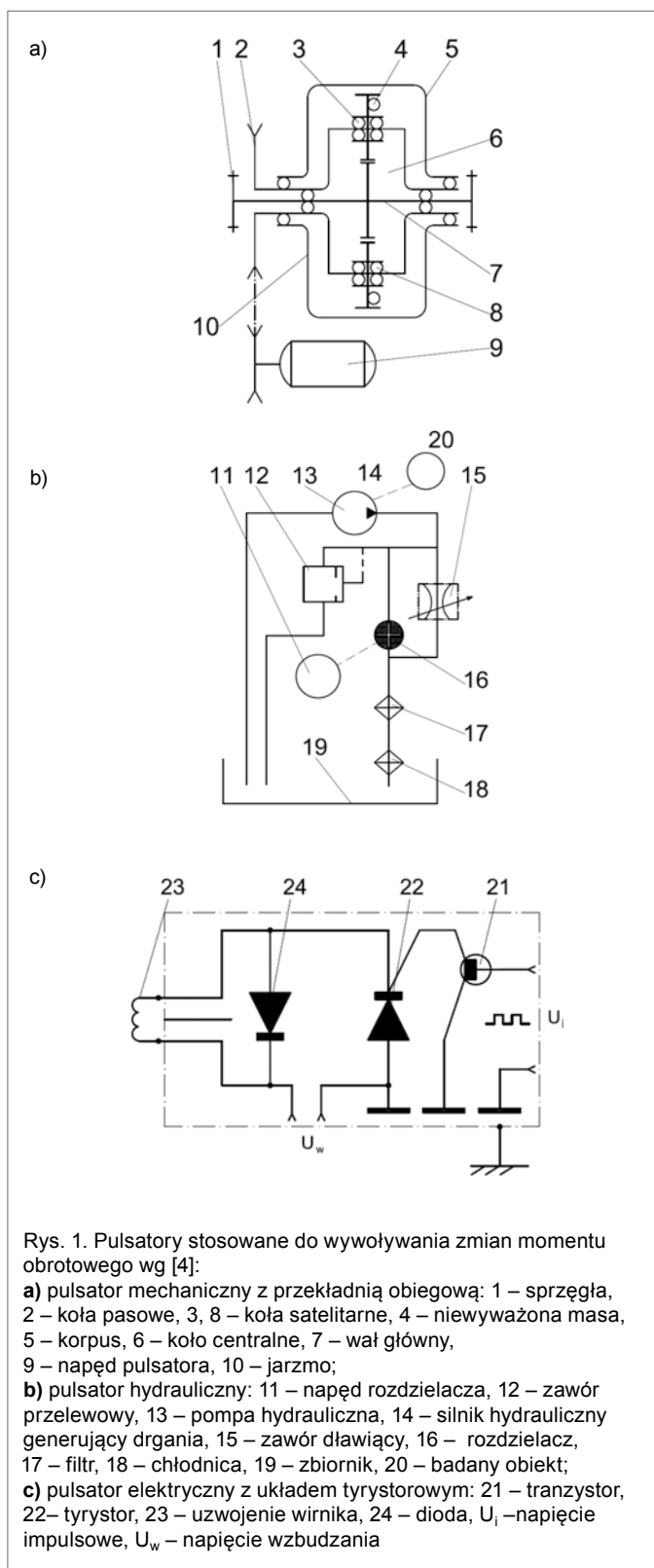
Obciążenia dynamiczne wywoływane za pomocą urządzeń mechanicznych są bardziej zbliżone do rzeczywistości, gdyż tego rodzaju obciążenia występują podczas eksploatacji maszyn. Mają krótsze czasy przebiegu i większe wartości maksymalne niż wywołane pozostałymi sposobami, lecz są mniej powtarzalne, a tym samym trudniejsze do zaprogramowania. Obciążenia dynamiczne uzyskiwane na drodze elektrycznej lub hydraulicznej są mniej intensywne, lecz łatwiejsze do realizacji, co ma istotne znaczenie podczas programowania przebiegu badań.

Urządzenia do wywoływania obciążeń dynamicznych

W stanowiskach, w których do napędu lub hamowania wałów badanej PH są stosowane sterowane jednostki hydrauliczne lub maszyny elektryczne, zdeterminowane obciążenia dynamiczne są wywoływane zazwyczaj za pomocą układów regulacji automatycznej. W stanowiskach o prostszej konstrukcji, sterowanymi w układzie otwartym możliwe jest uzyskanie obciążeń nieokresowych przez sterowanie ręczne. W stanowiskach z niesterowanymi jednostkami hydraulicznymi lub maszynami elektrycznymi do wywoływania obciążeń dynamicznych konieczne jest stosowanie dodatkowych urządzeń. Urządzenia te mają przeważnie prostą konstrukcję wykorzystującą np. przegub Cardana do realizacji zmian harmonicznych prędkości kątowych czy łamanie pręta lub zrywanie ciągnie do uzyskania obciążeń impulsowych. Bardziej skomplikowanymi pod względem konstrukcji są urządzenia do wywoływania okresowych zmian momentu obrotowego, zwane pulsatorami. Pulsatory powodują zmiany momentu obrotowego na wejściu do badanej PH, najczęściej generując drgania sinusoidalne o częstotliwościach występujących w silnikach napędowych maszyn (30–70 Hz) [4].

Istotą działania pulsatora mechanicznego z przekładnią obiegową, pokazanego na rys. 1a, jest zmiana zredukowanego masowego momentu bezwładności przekładni obiegowej w zależności od położenia kątowego niewyrównoważonych mas.

Głównym elementem pulsatora hydraulicznego, przedstawionego na rys. 1b, jest obrotowy rozdzielacz napędzany przez sil-



Rys. 1. Pulsatory stosowane do wywoływania zmian momentu obrotowego wg [4]:

- a) pulsator mechaniczny z przekładnią obiegową: 1 – sprzęgła, 2 – koła pasowe, 3, 8 – koła satelitarne, 4 – niewyważona masa, 5 – korpus, 6 – koło centralne, 7 – wał główny, 9 – napęd pulsatora, 10 – jarmzo;
 b) pulsator hydrauliczny: 11 – napęd rozdzielacza, 12 – zawór przelewowy, 13 – pompa hydrauliczna, 14 – silnik hydrauliczny generujący drgania, 15 – zawór dławiący, 16 – rozdzielacz, 17 – filtr, 18 – chłodnica, 19 – zbiornik, 20 – badany obiekt;
 c) pulsator elektryczny z układem tyrystorowym: 21 – tranzystor, 22 – tyrystor, 23 – uzwojenie wirnika, 24 – dioda, U_i – napięcie impulsowe, U_w – napięcie wzbudzenia

nik elektryczny. Zmiana położenia suwaka rozdzielacza wywołuje zmianę parametrów zasilania silnika hydraulicznego. Na skutek tych zmian na wale silnika hydraulicznego, połączonego z wałem badanego PH, pojawia się zmienny moment obrotowy.

Pulsator elektryczny to układ tyrystorowy włączony do obwodu elektrycznego wirnika silnika elektrycznego prądu stałego, będącego silnikiem napędowym stanowiska badawczego. Pulsator pracuje na zasadzie sumowania napięcia wzbudzenia wirnika z dodatkowym napięciem impulsowym. Jak pokazano

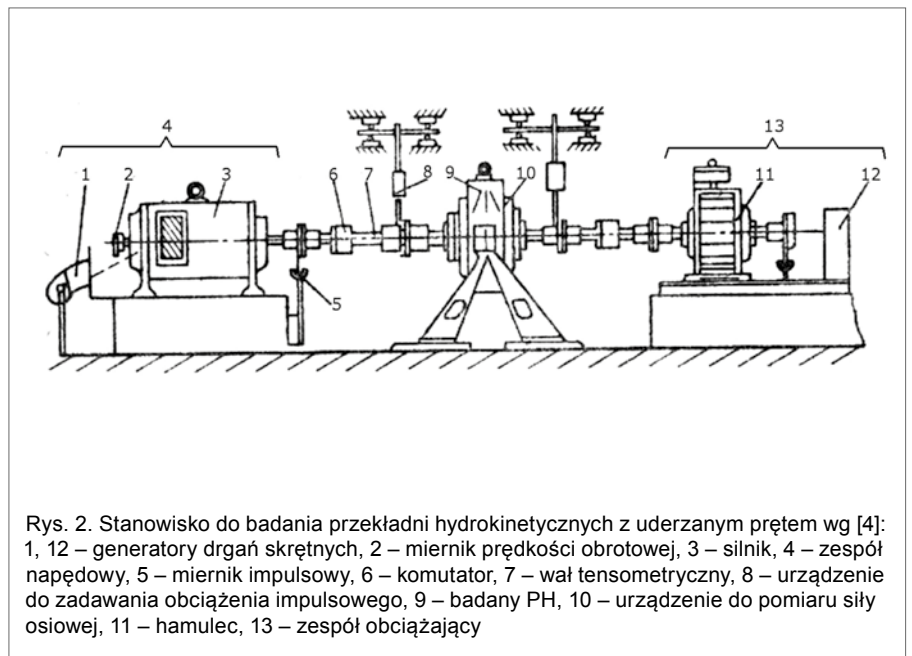
Tabela 3. Stanowiska badawcze do badania dynamiki PH [1 – 9]

Wielkość wywołująca obciążenia dynamiczne	Charakter obciążeń dynamicznych	Urządzenie wywołujące obciążenia dynamiczne	Kraj	Pozycja literatury
Prędkość kątowa wejściowa ω_1	Sinusoidalny	Wał z przegubami Cardana	Japonia	[1]
Prędkość kątowa wejściowa ω_1	Sinusoidalny	Przekładnia planetarna	Niemcy	[2]
Moment obrotowy wyjściowy M_2	Skokowy	Hamulec mechaniczny	Polska	[3]
Momenty obrotowe wejściowy i wyjściowy M_1, M_2	Impulsowy	Łamany pręt	Rosja	[4]
Momenty obrotowe wejściowy i wyjściowy M_1, M_2	Skokowy	Hamulec magnetyczny proszkowy	Polska	[6]
Moment obrotowy wyjściowy M_2	Impulsowy	Zrywane ciągnio	Polska	[7]
Prędkości kątowe, wejściowa i wyjściowa ω_1, ω_2	Harmoniczny	Sterowany układ hydrostatyczny	Niemcy	[5, 8]
Prędkości kątowe i momenty obrotowe $\omega_1, \omega_2, M_1, M_2$	Skokowy	Układ hydrauliczny zasilania PH cieczą roboczą	Polska	[6, 9]

na rys. 1c, regulowane napięcie o przebiegu prostokątnym o wymaganej częstotliwości podawane jest z generatora drgań na wejście tranzystora 21 sterującego bramką tyrystora 22. Wyjście tyrystora połączone jest z uzwojeniem wirnika 23. Dioda 24 zabezpiecza układ przed przepięciami w momencie wyłączenia tyrystora. Napięcie impulsowe zasilające uzwojenie wirnika generuje zmiany momentu obrotowego silnika napędowego stanowiska.

Stanowiska badawcze

Wybrane stanowiska badawcze, wykorzystujące opisane wyżej sposoby wywoływania obciążeń dynamicznych, których wykorzystanie najbardziej przyczyniło się do rozwoju badań dynamiki PH, zestawiono w tabeli 3.



Rys. 2. Stanowisko do badania przekładni hydrokinetycznych z uderzanym prętem wg [4]: 1, 12 – generatory drgań skrętnych, 2 – miernik prędkości obrotowej, 3 – silnik, 4 – zespół napędowy, 5 – miernik impulsowy, 6 – komutator, 7 – wał tensometryczny, 8 – urządzenie do zadawania obciążenia impulsowego, 9 – badany PH, 10 – urządzenie do pomiaru siły osiowej, 11 – hamulec, 13 – zespół obciążający

Budowę stanowisk badawczych posiadających oryginalną konstrukcję oraz mających duże możliwości badawcze przedstawiono na rys. 2–5.

Podstawowe dane dotyczące stanowisk badawczych, przedstawionych na rys. 2–5, podano w tabeli 4.

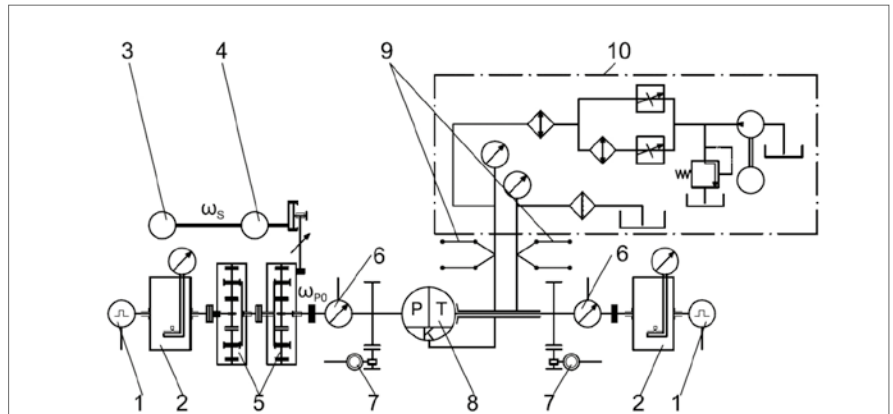
Wywołanie obciążeń dynamicznych poprzez zmianę właściwości cieczy roboczej może być zrealizowane na każdym z powyższych stanowisk przez wyposażenie układu zasilania cieczą roboczą w dodatkowy zbiornik i sterowany zawór umożliwiający dostarczanie cieczy roboczej na przemian ze zbiorników.

Stanowisko pokazane na rys. 2 wyróżnia się tym, że mimo prostej konstrukcji umożliwia prowadzenie badań o dużej dynamice, natomiast stanowisko pokazane na rys. 5, ze względu na zastosowanie pełnego sterowania silników hydrostatycznych, daje możliwość programowanego zadawania różnych zdeterminowanych obciążeń dynamicznych. Porównując przedstawione stanowiska badawcze, można stwierdzić, że napęd hydrostatyczny pozwala na uzyskanie większych momentów obrotowych i ma mniejsze momenty bezwładności niż napęd elektryczny. Z tego względu w stanowiskach ze sterowanym napędem elektrycznym np. czas narastania skoku jednostkowego momentu obrotowego wynosi od 1 do 3 s [3, 6], podczas gdy w stanowiskach ze sterowanym napędem hydrostatycznym czas ten jest znacznie krótszy i wynosi ok. 0,1 s [8].

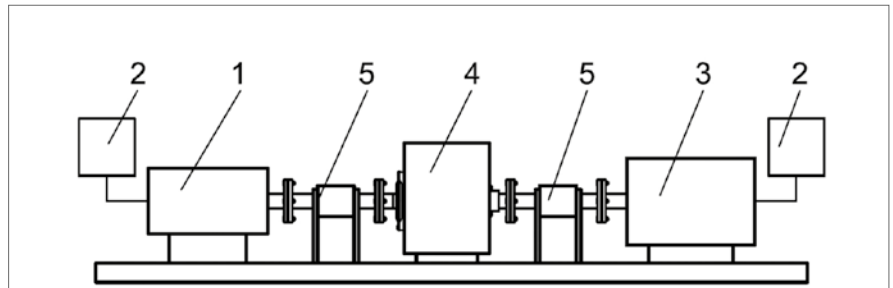
Przykładowe wyniki badań

Najczęściej wyniki badania dynamiki PH są przedstawiane w postaci przebiegów w dziedzinie czasu lub częstotliwości.

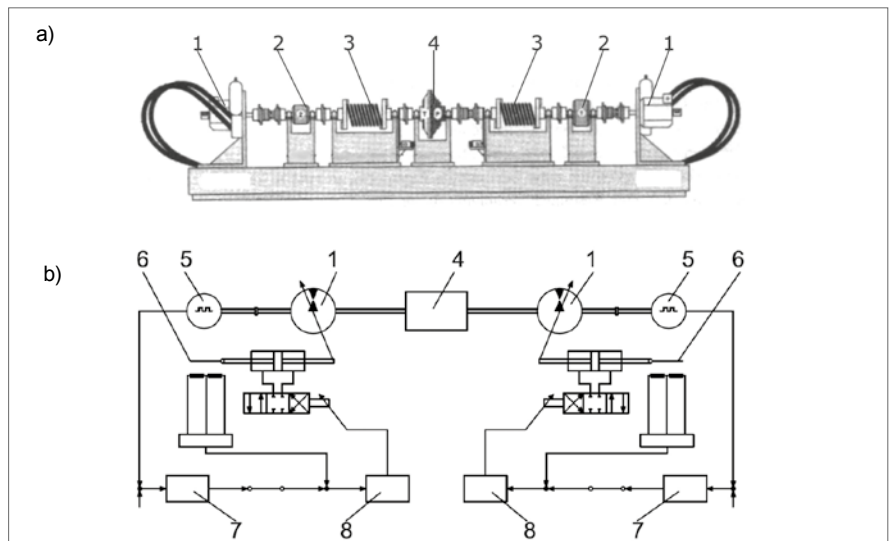
Na rys. 6 pokazano przykładowe wykresy w dziedzinie czasu, ilustrujące zmiany wejściowego momentu obrotowego M_1 i wyjściowej prędkości kątowej ω_2 w czasie, wywołane skokowymi zmianami wyjściowego momentu obrotowego M_2 , przy stałej prędkości wejściowej ω_1 , dla przekładni hydrokinetycznej o średnicy czynnej 150 mm [7, 10]. Badania te przeprowadzono na stanowisku badawczym o mocy 2,5 kW i konstrukcji podobnej do stanowiska przedstawionego na rys. 5. Układ automatycznego sterowania silnika napędowego stanowiska zapewniał utrzymanie stałej wejściowej prędkości kątowej ω_1 przekładni hydrokinetycznej, a skokowe zmiany wyjściowego momentu obrotowego M_2 uzyskano przez ręczne sterowanie prądnicą pracującą jako hamulec. Utrzy-



Rys. 3. Stanowisko do badania przekładni hydrokinetycznej z pulsatorem wykorzystującym przekładnię obiegową wg [2]: 1 – miernik impulsowy, 2 – silnik elektryczny z wagowym miernikiem momentu obrotowego, 3 – silnik napędowy pulsatora, 5 – przekładnia obiegowa, 6 – momentomierz, 7 – miernik prędkości kątowej, 8 – badany PH, 9 – miernik temperatury, 10 – układ zasilania PH cieczą roboczą



Rys. 4. Stanowisko do badania dynamiki przekładni hydrokinetycznych z elektrycznym układem napędowym wg [9]: 1 – sterowany elektryczny silnik napędzający, 2 – przemiennik częstotliwości, 3 – sterowana prądnica hamująca, 4 – badany PH, 5 – momentomierz z wbudowanymi miernikami prędkości kątowej

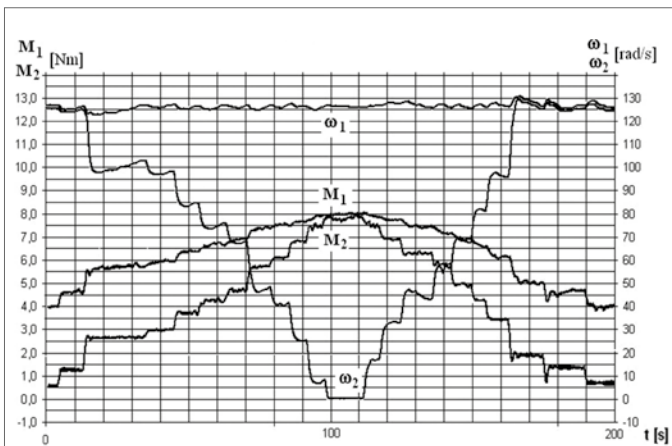


Rys. 5. Stanowisko do badania sprzęgieł hydrokinetycznych ze sterowanym napędem hydraulicznym wg [5]:
a) schemat stanowiska: 1 – silnik hydrauliczny, 2 – masa bezwładna, 3 – sprężyna stanowiąca podatny wał, 4 – badany PH;
b) schemat sterowania stanowiska: 5 – cyfrowy miernik prędkości, 6 – czujnik indukcyjny przesunięcia, siłownik, rozdzielacz, 7 – regulator prędkości obrotowej, 8 – regulator kąta wychylenia tarczy silnika hydraulicznego

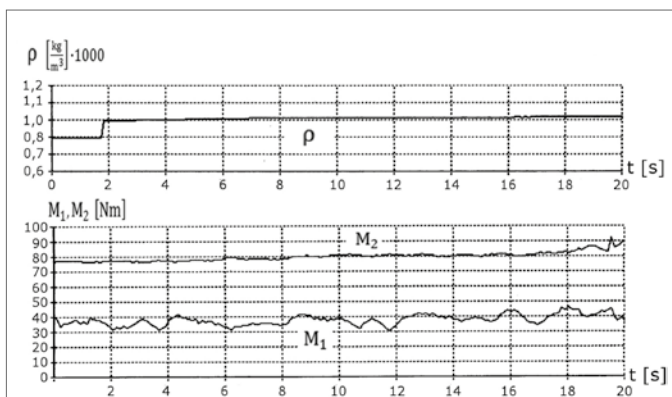
Tabela 4. Dane stanowisk przedstawionych na rysunkach

Stanowisko z rys.	Badany PH	Typ	Moc stanowiska [kW]
2	Przekładnia hydrokinetyczna	U358011E	100
3	Przekładnia hydrokinetyczna	F&S W 240	20
4	Przekładnia hydrokinetyczna	ZM 130	35
5	Sprzęgło hydrokinetyczne	Voigt 422TH	85

reklama



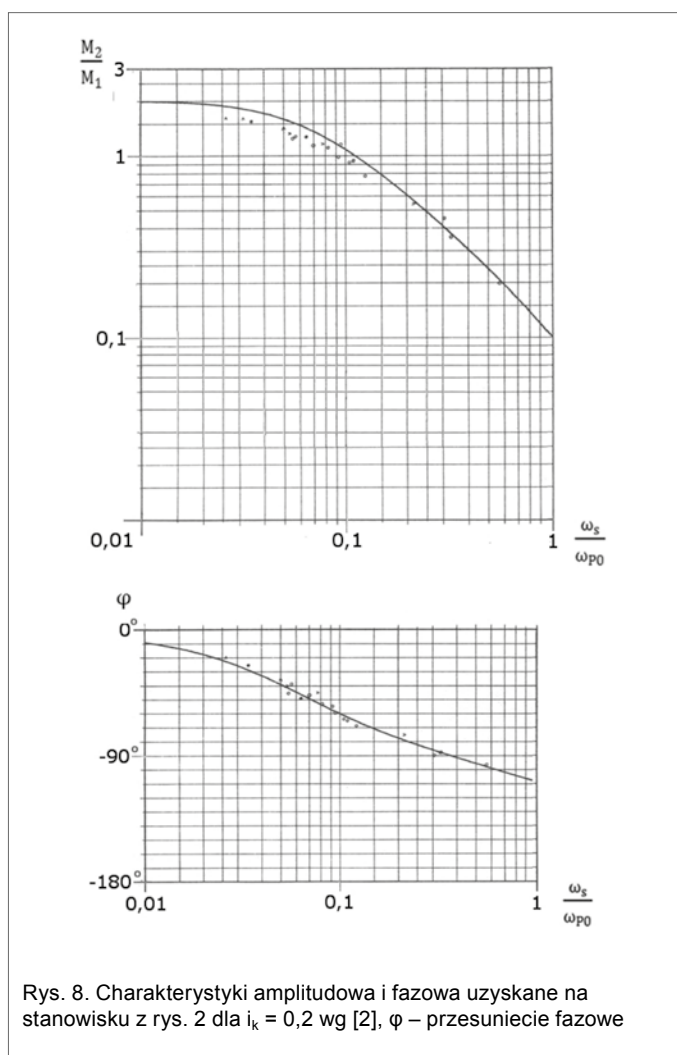
Rys. 6. Zmiany wejściowego momentu obrotowego M_1 i wyjściowej prędkości kątowej ω_2 na skutek skokowych zmian wyjściowego momentu obrotowego M_2 przy stałej wejściowej prędkości kątowej ω_1 , dla przekładni hydrokinetycznej o średnicy czynnej 150 mm wg [7]



Rys. 7. Zmiany momentów obrotowych M_1 i M_2 na skutek skokowego wzrostu gęstości ρ dla przekładni hydrokinetycznej typu PH 280 stosowanej w napędzie jazdy wózka widłowego wg [6]

mywanie stałej wartości wejściowej prędkości kątowej ω_1 pozwalało na jednoznaczne określenie zmian wartości momentów tylko od jednej wielkości, to jest od wyjściowej prędkości kątowej ω_2 . Zastosowany sposób wywoływania obciążeń dynamicznych uniemożliwia otrzymanie powtarzalnych przyrostów momentu obrotowego.

Przebiegi w czasie wejściowego i wyjściowego momentu obrotowego M_1 oraz M_2 , wywołane skokiem gęstości cieczy ro-



Rys. 8. Charakterystyki amplitudowa i fazowa uzyskane na stanowisku z rys. 2 dla $i_k = 0,2$ wg [2], φ – przesunięcie fazowe

boczej spowodowanym dostarczeniem do przestrzeni roboczej nowej cieczy o większej gęstości, pokazano na rys. 7. Badania przeprowadzono na stanowisku badawczym podobnym do stanowiska przedstawionego na rys. 5. Zmianę gęstości uzyskano przez przestawienie zaworu dwudroźnego łączącego dwa zbiorniki z cieczami o różnych gęstościach i zbliżonych lepkościach z pompą hydrauliczną zasilającą przekładnię hydrokinetyczną. Zmiana ta, mierzona na przewodzie ssącym pompy hydraulicznej, trwała 0,1 s [6]. Wzrost gęstości cieczy roboczej wywołał wzrost momentów obrotowych, jednak z dużą zwłoką czasową, wynoszącą w tym przypadku kilkanaście sekund.

Na rys. 8 przedstawiono charakterystyki: amplitudową i fazową sporządzone na podstawie wyników badań przekładni hydrokinetycznej typu F&S W 240 na stanowisku z rys. 3 [2] dla przełożenia kinematycznego $i_k = \omega_2 / \omega_1 = 0,2$.

Stanowisko to umożliwia wykonywanie pomiarów w zakresie prędkości kątowej wału wejściowego pulsatora od 60 rad/s do 125 rad/s, co pozwala na uzyskanie dziesięciokrotnego zmniejszenia amplitudy drgań momentu obrotowego oraz otrzymanie $\varphi = 100^\circ$ przesunięcia fazowego między sygnałami.

Wnioski

Rzeczywiste obciążenia dynamiczne PH pracującego w układzie napędowym maszyny zmieniają się w bardzo szerokim zakresie. W związku z tym w celu badania dynamiki PH należy wybrać najbardziej istotny, dla stosowanego kryterium ba-

dań, zakres obciążeń i zbudować stanowisko do badania tego zakresu. Podczas doboru urządzenia do wywoływania obciążeń dynamicznych należy uwzględnić podział rozpatrywanych wielkości na wielkości wejściowe i wyjściowe oraz charakter zmian wielkości wejściowych. Od rodzaju badań zależy także wybór układu napędowego stanowiska. Gdy wymagane są duże zmiany badanych wielkości w krótkim czasie, to należy stosować napęd hydrauliczny, który zapewnia większe momenty obrotowe niż napęd elektryczny przy mniejszej bezwładności. Zastosowanie układów elektrycznych czy hydraulicznych pozwala na pełne sterowanie stanowiska badawczego i zapis wyników badań za pomocą komputera. Istotne znaczenie przy wyborze stanowiska, przeznaczonego do badania dynamiki PH, odgrywają również koszty jego budowy.

Literatura

- [1] ISHIHARA T.: *A Study of Hydraulic Torque Converter*. II Report of University of Tokyo, Vol. 5, No 7, Tokyo 1955.
- [2] HERBERTZ R.: *Untersuchung des dynamischen Verhaltens von Fttinger – Getrieben*. Dissertation. Technischen Universitt Hannover. Hannover 1973.
- [3] PAWELSKI Z.: *Badanie charakterystyk przekładni hydrokinetycznej przy wybranych nieustalonych stanach obciążeń*. Praca doktorska. Politechnika Łódzka, Łódź 1980.
- [4] СТЕСИН С. П.: *Новые методы испытаний гидродриводоов строительных и дорожных машин*. Строительное, дорожное и коммунальное машиностроение, серия 4, вып. 2, Москва 1982.
- [5] BEHRENS H.: *Nichtlineare Modellierung und Identifikation hydrodynamischer Kupplungen mit allgemeinen diskreten Modellsätzen*. Dissertation. Ruhr Universität Bochum, Bochum 1977.
- [6] KĘSY Z.: *Sterowanie przekładni hydrokinetycznej cieczą roboczą*. Monografia Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2003.
- [7] KĘSY Z., KĘSY A., MADEJA J., OLSZAK A.: *Wykorzystanie cieczy magnetycznych i elektoreologicznych w elementach hydraulicznych*. Sprawozdania z prac Instytutu Mechaniki Stosowanej. Politechnika Radomska, Radom 2006.
- [8] BEHRENS, H., JASCHKE, P., STEINHAUSEN, J. AND WALLER, H.: *Modelling of Technical Systems: Application to Hydrodynamic Torque Converters and Couplings*. Mathematical and Computer Modeling of Dynamical Systems, no 3/2006.
- [9] WOŹNIAK M.: *Badania stanowiskowe i symulacyjne własności dynamicznych przekładni hydrokinetycznej*. Praca doktorska. Politechnika Łódzka, Łódź 2010.
- [10] KĘSY A., OLSZAK A., SARNIK P.: *Przekładnia hydrokinetyczna o malej mocy*. „Hydraulika i Pneumatyka” nr 4/2010.

Artykuł w formie referatu został wygłoszony na XXIV Konferencji Naukowej „Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych”, która odbyła się w dniach 24–27 stycznia 2011 r. w Zakopanem.

prof. nadzw. dr hab. inż. Andrzej Kęsy – Politechnika Radomska, e-mail: akesy@op.pl;
inż. Pablo De la Fuente – Ruhr Universität Bochum, Niemcy, e-mail: Pablo.DelaFuente@ruhr-uni-bochum.de;
dr inż. Marcin Migus – Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie, e-mail: mmigus@gmail.com