

# Stanowisko do badania nowych konstrukcji podzespołów hydrokinetycznych

Wojciech Iwanicki, Karol Musiałek, Grzegorz Mędrak, Adam Taraś, Artur Olszak, Andrzej Kęsy

## 1. Wstęp

Podzespoły hydrokinetyczne, tj. przekładnie, sprzęgła i hamulce hydrokinetyczne są tradycyjnie szeroko stosowane w układach napędowych pojazdów i maszyn. Wprowadzenie nowych materiałów, nowych technologii oraz pojawienie się nietypowych dla tych podzespołów zastosowań, np. w układach napędowych elektrowni wiatrowych [1], spowodowało intensyfikację prac nad nowymi konstrukcjami. Obecnie głównym kierunkiem prac rozwojowych jest zastosowanie w podzespołach hydrokinetycznych nowych „inteligentnych” cieczy roboczych, takich jak ciecze elektoreologiczne i magnetoreologiczne, które zmieniają swoje właściwości reologiczne pod wpływem oddziaływania odpowiednio pola elektrycznego lub magnetycznego [2]. Użycie cieczy „inteligentnych” pozwala na proste sterowanie prądem elektrycznym podzespołów hydrokinetycznych. Jednak, żeby to było możliwe, należy wokół kanałów w kołach łopatkowych, w których przepływa ciecz robocza, umieścić elementy wytwarzające odpowiednie pole. Ponadto pożądane jest, szczególnie w przypadku wytwarzania pola elektrycznego, żeby koła łopatkowe były wykonane z materiału nieprzewodzącego prądu elektrycznego. Ze względu na skomplikowaną geometrię kół łopatkowych korzystne jest użycie do wytworzenia takich kół łopatkowych technologii przyrostowej.

Praktyczne zastosowanie podzespołów hydrokinetycznych z nowymi „inteligentnymi” cieczami roboczymi oraz z kołami łopatkowymi wytworzonymi technologią przyrostową wymaga prowadzenia szerokich badań zarówno teoretycznych, jak i doświadczalnych.

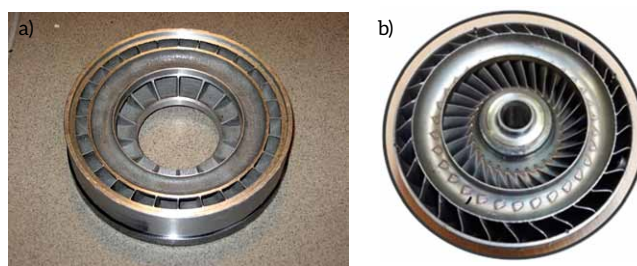
## 2. Uzasadnienie potrzeby prowadzenia badań stanowiskowych podzespołów hydrokinetycznych

Typowe koła łopatkowe podzespołów hydrokinetycznych, ze względu na skomplikowaną geometrię ich przestrzeni roboczej, dotychczas są wytwarzane głównie przez odlewanie lub łączenie elementów tłoczonych z blachy, natomiast bardzo rzadko są wykonywane przez obróbkę skrawaniem [3]. Przykładowe koła łopatkowe: odlewane koło łopatkowe i koło łopatkowe powstałe z łączenia elementów tłoczonych z blachy pokazano na rys. 1.

Podczas przygotowania produkcji nowych podzespołów hydrokinetycznych ważnym etapem procesu konstruowania jest badanie prototypowych kół łopatkowych [4, 5]. Konieczność wytwarzania i badania prototypowych kół łopatkowych, szczególnie przekładni hydrokinetycznych, wynika z braku modeli matematycznych opisujących w dostatecznie dokładny sposób zależność charakterystyk tych przekładni od parametrów opisujących geometrię przestrzeni roboczej kół

**Streszczenie:** W artykule opisano stanowisko badawcze przeznaczone do badania podzespołów hydrokinetycznych z nowymi cieczami roboczymi oraz z kołami łopatkowymi wykonanymi technologią przyrostową z tworzywa sztucznego. Celem sprawdzenia poprawności pracy stanowiska przeprowadzono badania ruchu ustalonego i nieustalonego dwóch sprzęgieł hydrokinetycznych. Badania potwierdziły przydatność stanowiska do prowadzenia planowanych badań.

**Abstract:** The paper describes a test stand designed for testing hydrodynamic subassemblies with new working fluids and blade wheels made of plastic using the Additive Technology. In order to check the correctness of the work of the test stand, a study of the steady-state and unsteady-state movement of two hydrodynamic clutches was carried out. The research confirmed the suitability of the test stand to conduct the planned research.



Rys. 1. Koła łopatkowe elementów hydrokinetycznych: a - koło odlewane; b - koło składane z elementów tłoczonych z blachy

łopatkowych. Skutkiem braku dokładnych modeli jest niezgodność obliczeniowych charakterystyk podzespołów hydrokinetycznych z rzeczywistymi. W efekcie powoduje to niespełnienie przez rzeczywistą konstrukcję napędu, w którym ten podzespół hydrokinetyczny ma być stosowany, założeń technicznych, a co za tym idzie – pogorszenie wydajności pojazdu czy maszyny. Jak wynika z praktyki inżynierskiej, żeby uzyskać wymaganą charakterystykę przekładni hydrokinetycznej, o której nie ma danych wstępnych, należy wykonać, zbadać i skorygować kolejno do pięciu prototypowych zestawów kół łopatkowych.

Prowadzone są prace zmierzające do zwiększenia dokładności procesu modelowania podzespołów hydrokinetycznych przez staranną identyfikację (szczególnie estymację



Rys. 2. Widok stanowiska do badania podzespołów hydrokinetycznych: 1 - rama; 2 - sterowany silnik elektryczny; 3 - badany podzespół hydrokinetyczny; 4 - sterowany silnik elektryczny spełniający rolę hamulca; 5 - komputer gromadzący dane pomiarowe; 6 - szafa sterownicza

parametrów modelu), jak i stosowanie nowych modeli matematycznych czy nowych metod identyfikacji i optymalizacji, np. z użyciem algorytmu genetycznego czy komputerowej dynamiki płynów (ang. CFD) [6, 7]. Jednak obecnie stosowane metody obliczeniowe, w tym najnowsze metody komputerowe, nie pozwalają na zaprojektowanie podzespołu hydrokinetycznego tak, by za pierwszym razem uzyskać zakładane charakterystyki statyczne i dynamiczne.

Dotychczas prototypowe koła łopatkowe podzespołów hydrokinetycznych były wytwarzane taką samą technologią jak podczas produkcji, tj. przez odlewanie [4]. Taki sposób produkcji powoduje powstawanie przypadkowych istotnych zniekształceń przestrzeni roboczej, ze względu na błędy procesu technologicznego, np. paczenie się rdzeni odlewniczych podczas wypalania czy przesuwania się tych rdzeni podczas zalewania formy metalem. Dla tej technologii nie można jednoznacznie stwierdzić, jaki jest wpływ błędów wytwarzania na obliczeniowe charakterystyki badanego podzespołu hydrokinetycznego z prototypowymi kołami łopatkowymi. Ponadto użycie tej technologii jest bardzo kosztowne i nieekonomiczne, gdyż

oprzyrządowanie pozwalające na wyprodukowanie kilku tysięcy kół łopatkowych wykorzystywane jest do wytworzenia jednego prototypowego koła.

Zatem często, ze względu na brak dokładnych metod obliczeniowych i trudnych do oszacowania błędów ich weryfikacji, rezygnuje się z obliczeń i do konstrukcji nowych podzespołów hydrokinetycznych wykorzystuje się przede wszystkim wyniki badań prototypów, prowadzonych na specjalistycznych stanowiskach badawczych.

## 2. Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze do badania prototypowych konstrukcji podzespołów hydrokinetycznych składa się z części mechanicznej, elektrycznego układu sterowania oraz komputerowego systemu pomiarowego. Widok stanowiska badawczego pokazano na rys. 2.

Ze względu na fakt, iż w podzespole hydrokinetycznym zamontowanym w układzie napędowym maszyny czy pojazdu podczas eksploatacji występują zarówno ustalone warunki pracy, np. podczas jednostajnej jazdy pojazdu, jak i nieustalone warunki pracy, np. podczas rozpędzania czy hamowania pojazdu, stanowisko zbudowano tak, by

reklama

reklama

umożliwić badanie zarówno ustalonych, jak i niestabilnych warunków pracy. Dynamiczne zmiany momentu obrotowego podczas niestabilnych warunków pracy uzyskiwane są przy pomocy elektrycznego układu sterowania [8, 9].

Podstawę części mechanicznej stanowiska badawczego stanowi stalowa rama o wymiarach 1800 × 500 mm, skręcana śrubami z kształtownika walcowanego na gorąco typu C. Taki sposób łączenia elementów składowych ramy zastosowano, by nie dopuścić do odkształceń cieplnych, które mogłyby wystąpić podczas spawania. Do ramy zostały przykręcone śrubami stalowe płyty montażowe, a do płyt silniki elektryczne. Otwory śrub mocujących płyt do ramy oraz śrub mocujących silniki elektryczne do płyt montażowych mają owalny kształt, tak by umożliwić ustawienie osiowe silników. Prowadzenie badań dynamicznych wymaga dobrego fundamentowania stanowiska. Z tego powodu rama została przykręcona do żelbetowego fundamentu o odpowiednio dużej masie za pomocą dwóch stalowych łączników i 12 śrub M14. Pomiędzy fundamentem a łącznikami stalowymi umieszczono gumowe płyty o grubości 10 mm, w celu mechanicznego i elektrycznego odizolowania stanowiska od podłoża.

Rolę silnika napędowego stanowiska pełni silnik prądu zmiennego firmy Tamel 3SG132S-4-IE2. Jest to trójfazowy silnik o mocy 5,5 kW, zasilany napięciem 400 V o częstotliwości 50 Hz. Hamulec stanowi silnik prądu stałego firmy Multi Moto typu G 11.05 o mocy 5,5 kW. Taka moc zastosowanych silników elektrycznych pozwoliła na zasilanie stanowiska badawczego z laboratoryjnej sieci elektrycznej, bez konieczności budowy dodatkowej podstacji elektrycznej.

Badany podzespół hydrokinetyczny może być zamontowany do stanowiska przez przykręcenie do płyty ramy i połączenie jego wałów z silnikami elektrycznymi za pomocą sprzęgieł kłowych z elastycznymi wkładkami. Drugą możliwością ustalenia badanego podzespołu hydrokinetycznego jest zamocowanie go do kołnierza silnika napędowego za pomocą pierścienia dystansowego. W tym drugim przypadku wały elementu hydrokinetycznego i silnika napędowego także są łączone przez sprzęgło kłowe z elastycznymi wkładkami.

## 2.2. Elektryczny układ sterowania stanowiska

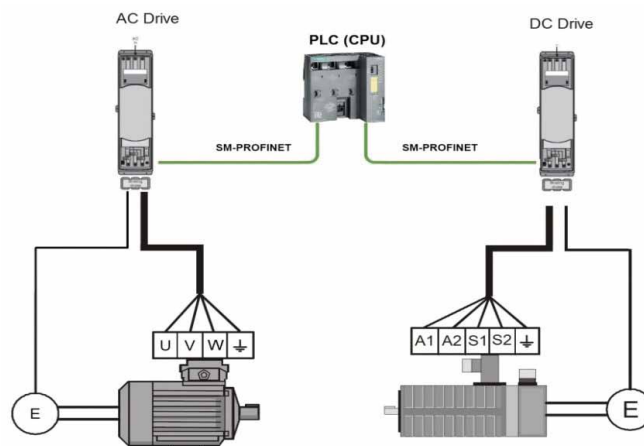
Silniki elektryczne, w które wyposażone jest stanowisko badawcze, są sterowane za pomocą PLC, z wykorzystaniem sterowników AC Drive oraz DC Drive [8]. Układ sterowania tego stanowiska jest programowalny, zatem pozwala symulować różne warunki pracy badanego podzespołu hydrokinetycznego. Schemat elektrycznego układu sterowania stanowiska badawczego pokazano na rys. 3, a dane dotyczące silników elektrycznych oraz podzespołów sterowania podano w tabeli 1.

## 2.3. Komputerowy system sterowania

Z uwagi na dużą liczbę wielkości fizycznych mierzonych podczas pracy stanowiska badawczego jednocześnie w czasie rzeczywistym, do rejestracji danych pomiarowych zastosowano komputerowy system pomiarowy. Głównymi elementami tego systemu są komputer typu PC oraz karty pomiarowe. Na stanowisku badawczym mogą być mierzone i rejestrowane w pamięci komputera następujące parametry pracy badanego podzespołu

**Tabela 1.** Dane silników elektrycznych oraz podzespołów sterowania stanowiska badawczego

Podzespół	Producent	Typ	Parametry
AC Motor	Tamel	3Skg 132S-4	$P_n = 5,5 \text{ kW}$ $U_n = 400 \text{ V}$ $I_n = 15,4 \text{ A}$
DC Motor	Tamel	G11.05	$P_n = 5,5 \text{ kW}$ $U_n = 400 \text{ V}$ $I_n = 15,4 \text{ A}$
PLC	Siemens	Simatic DP 6ES7151-8AB01- -0AB0	
AC Drive	Emerson	Unidrive SP 1406	Połączony z PLC przez Profinet Network
DC Drive	Emerson	Mentor MP 25A4R	Połączony z PLC przez Profinet Network



**Rys. 3.** Schemat elektrycznego układu sterowania stanowiska badawczego

hydrokinetycznego: prędkość obrotowa wału wejściowego, prędkość obrotowa wału wyjściowego, moment obrotowy na wale wejściowym, moment obrotowy na wale wyjściowym, temperatura cieczy roboczej.

## 3. Możliwości badawcze stanowiska

W celu oceny możliwości badawczych stanowiska przeprowadzono badania dwóch sprzęgieł hydrokinetycznych o różnych konstrukcjach i o różnych rozmiarach: prototypowego sprzęgła hydrokinetycznego o rozsuwanych kołach łopatkowych i zmiennym napełnieniu o średnicy czynnej wynoszącej 246 mm oraz typowego rozruchowego sprzęgła hydrokinetycznego produkcji firmy Voith o średnicy czynnej 274 mm. Sprzęgło prototypowe było badane w warunkach pracy ustalonej, a sprzęgło firmy Voith w warunkach pracy niestabilnej.

### 3.1. Badanie prototypowego sprzęgła hydrokinetycznego z rozsuwanymi kołami łopatkowymi

Dla prototypowego sprzęgła hydrokinetycznego z rozsuwanymi kołami łopatkowymi wykonano badania charakterystyki statycznej sprzęgła, będącej zależnością momentu obrotowego przenoszonego przez sprzęgło od przełożenia kinematycznego, definiowanego jako stosunek prędkości obrotowej wału wyjściowego do prędkości obrotowej wału wejściowego dla stałej wartości prędkości obrotowej wału wejściowego wynoszącej  $n_1 = 1200$  obr./min (rys. 4). Jako cieczy roboczej użyto oleju hydraulicznego HL46.

W celu sprawdzenia działania modułu pomiaru temperatury stanowiska wykonano badania charakterystyki statycznej prototypowego sprzęgła hydrokinetycznego przy  $i_k = 0$  dla różnych zakresów temperatur cieczy roboczej (rys. 5).

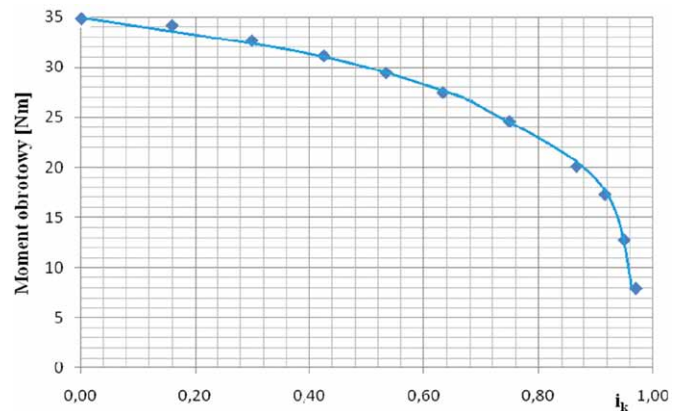
### 3.2. Badanie sprzęgła hydrokinetycznego firmy Voith

Dla sprzęgła hydrokinetycznego firmy Voith na stanowisku badano przebiegi charakterystyk dynamicznych, przedstawiających zmiany wyjściowego momentu obrotowego  $M_1$  oraz prędkości wyjściowej  $n_2$  w czasie wywołane zmianami wyjściowego momentu obrotowego  $M_2$  przy stałej wartości prędkości obrotowej wału wejściowego  $n_1$ . Układ sterowania napędu silnika zapewniał rozpędzanie i utrzymanie stałej prędkości obrotowej sprzęgła  $n_1$ . Zmiany wyjściowego momentu obrotowego  $M_2$  uzyskano dzięki układowi sterowania silnika hamującego wyposażonego w specjalny program umożliwiający stopniowe zadawanie momentu hamującego. Charakterystyki dynamiczne badanego sprzęgła sporządzono dla dwóch cieczy roboczych o różnych gęstościach: oleju hydraulicznego HL46 oraz cieczy magnetoreologicznej, będącej mieszaniną oleju hydraulicznego HL46 i sproszkowanego tlenku żelaza  $Fe_3O_4$ . Podczas badań mierzono także temperaturę cieczy roboczej. Na rys. 6 pokazano przebieg charakterystyki dynamicznej badanego sprzęgła napełnionego olejem hydraulicznym HL46, a na rys. 7 charakterystyki dynamicznej badanego sprzęgła napełnionego mieszaniną oleju hydraulicznego HL46 i sproszkowanego tlenku żelaza  $Fe_3O_4$ .

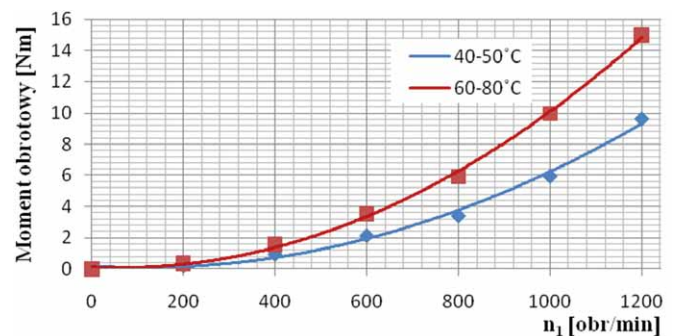
## 4. Planowane badania

Do wytwarzania kół łopatkowych nowych konstrukcji podzespołów hydrokinetycznych z cieczami „inteligentnymi” będzie zastosowana najnowsza technologia wytwarzania – technologia przyrostowa oparta na komputerowym modelowaniu geometrycznym i sterowanym komputerowo wytwarzaniu. Ta innowacyjna technologia wytwarzania zapewnia dużą dokładność odwzorowania modelu geometrycznego, jak i krótki czas wykonania obiektu fizycznego, przy ograniczonych kosztach. Jednak efektywne zastosowanie technologii przyrostowej do wytwarzania prototypowych kół łopatkowych podzespołów hydrokinetycznych nadal wymaga sformułowania oraz rozwiązania wielu istotnych problemów naukowych i technicznych.

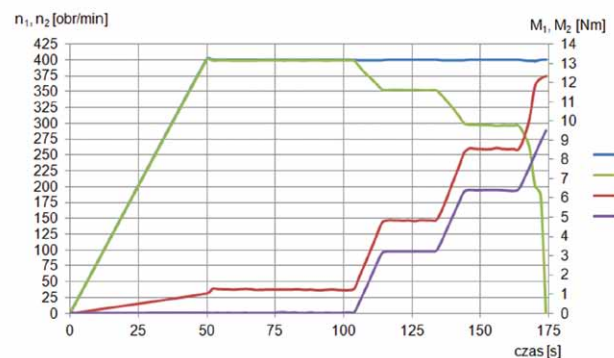
W wytwarzaniu prototypowych kół łopatkowych technologią przyrostową istnieją też pewne ograniczenia. Koszt wykonywania prototypowych kół łopatkowych tą technologią z metalu jest wysoki, ze względu na początkową fazę rozwoju stosowania metali w tej technologii. Natomiast koszt wytwarzania



Rys. 4. Charakterystyka statyczna prototypowego sprzęgła hydrokinetycznego o średnicy czynnej 246 mm dla prędkości wału wejściowego  $n_1 = 1200$  obr./min

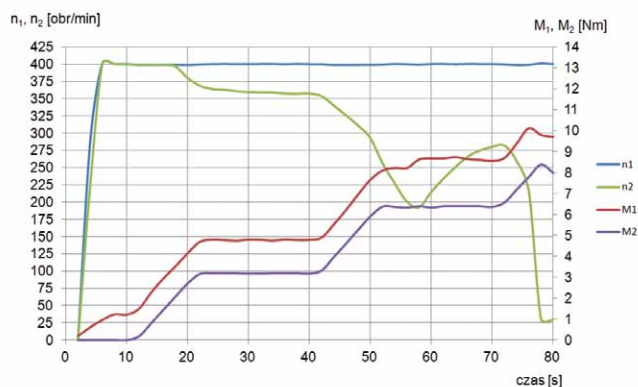


Rys. 5. Charakterystyka prototypowego sprzęgła hydrokinetycznego o średnicy czynnej 246 mm przy  $i_k = 0$  dla różnych temperatur cieczy roboczej



Rys. 6. Przebiegi w czasie wyjściowego momentu obrotowego  $M_1$  i wyjściowej prędkości obrotowej  $n_2$  wywołane zmianą wyjściowego momentu obrotowego  $M_2$ , przy stałej prędkości obrotowej wału wejściowego  $n_1 = 400$  obr./min, dla sprzęgła hydrokinetycznego firmy Voith o średnicy czynnej 274 mm, napełnionego olejem HL46

prototypowych kół łopatkowych technologią przyrostową z tworzyw sztucznych jest istotnie mniejszy, co już obecnie umożliwia wykorzystanie tej technologii w praktyce inżynierskiej. Obecnie konstruktor ma do wyboru kilka metod



**Rys. 7.** Przebiegi wyjściowego momentu obrotowego  $M_1$  i wyjściowej prędkości obrotowej  $n_2$  wywołane zmianą wyjściowego momentu obrotowego  $M_2$  przy stałej prędkości obrotowej wału wejściowego  $n_1 = 400$  obr./min, dla sprzęgła hydrokinetycznego firmy Voith o średnicy czynnej 274 mm, napełnionego cieczą magnetoreologiczną, będącą mieszaniną oleju hydraulicznego HL46 i sproszkowanego tlenku żelaza  $Fe_3O_4$

wytwarzania technologią przyrostową oraz bardzo wiele rodzajów tworzyw sztucznych.

Dotychczas podjęte próby zastosowania prototypowych kół łopatkowych wytworzonych technologią przyrostową z tworzyw sztucznych wykazały, że koła takie nie posiadają wytrzymałości pozwalającej na przeprowadzenie badań z ich udziałem w pełnym zakresie obciążeń. Dla przykładu: badane koło łopatkowe kierownicy, pracujące w przekładni hydrokinetycznej o średnicy czynnej 330 mm, wykonane technologią przyrostową z nylonu, metodą SLS (selektywnego spiekania warstwy proszku promieniem lasera), w zakresie dużych obciążeń ulegało odkształceniu, powodując istotne pogorszenie charakterystyki przekładni na skutek spadku przełożenia dynamicznego przekładni o 15% [5]. Zatem w najbliższym czasie na zbudowanym stanowisku będą prowadzone prace badawcze zmierzające do wyboru zarówno metody technologii przyrostowej, jak i materiału, tak by zapewnić wystarczającą sztywność kół łopatkowych.

## 5. Wnioski

Na podstawie wykonanych badań wstępnych dwóch sprzęgieł hydrokinetycznych o różnych konstrukcjach i o różnych średnicach czynnych, pracujących w warunkach ruchu ustalonego i nieustalonego, przy różnych temperaturach cieczy roboczej, stwierdzono, że zbudowane stanowisko badawcze spełnia stawiane mu wymagania. Na stanowisku będą mogły być prowadzone badania, mające na celu zastosowanie w napędach

hydrokinetycznych „inteligentnych” cieczy roboczych, w tym badania kół łopatkowych z tworzyw sztucznych, wytworzonych przy użyciu technologii przyrostowej.

## Literatura

- [1] KOENEMANN D.: *It's possible without*. „Sun & Wind Energy” 05/2009.
- [2] KĘSY Z.: *Sprzęgła z cieczami elektro- i magnetoreologicznymi*. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2008.
- [3] SZYDELSKI Z.: *Pojazdy samochodowe. Sprzęgła, hamulce i przekładnie hydrokinetyczne*. WKŁ. Warszawa 1981.
- [4] KĘSY A.: *Metody komputerowe w budowie kół łopatkowych podzespołów hydrokinetycznych*. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej. Radom 2010.
- [5] KĘSY A., SARNIK P.: *Przekładnia hydrokinetyczna z kołami łopatkowymi wykonanymi metodą szybkiego prototypowania*. „Napędy i Sterowanie” 2/2010.
- [6] KĘSY A., KADZIELA A.: *Construction Optimisation of Hydrodynamic Torque Converter with Application of Genetic Algorithm*. Archives of Civil and Mechanical Engineering. Vol. XI, No 4, Year 2011, pp. 910–920.
- [7] KĘSY Z., KĘSY A.: *Application of Numerical Methods to the Modeling of Transmission Systems with Hydrodynamic Torque Converter*. Int. J. Computer Applications in Technology, 2008, Vol. 31 No ¾ pp. 275–283.
- [8] SPOTOWSKI T., OSOWSKI K., KĘSY Z.: *Control System of Laboratory Stand for Gearbox and Coupling Testing*. „Technical Transactions, Mechanics”, Issue 1-M (5), 2015, pp. 269–276.
- [9] KĘSY A., DE LA FUENTE A. P., MIGUS M.: *Wywoływanie obciążeń dynamicznych w badaniach stanowiskowych podzespołów hydrokinetycznych*. „Napędy i Sterowanie” 7–8/2011.



Mgr inż. Wojciech Iwanicki, mgr inż. Karol Musiałek, mgr inż. Grzegorz Mędrak, mgr inż. Adam Taraś – doktoranci, studenci studiów doktoranckich (studiów III stopnia) na Wydziale Mechanicznym Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu w dyscyplinie naukowej budowa i eksploatacja maszyn.  
Dr inż. Artur Olszak – Instytut Nowych Syntez Chemicznych, Puławy Zakład Wsparcia Technicznego, Kierownik Wydziału Przygotowania i Nadzoru Technicznego.  
Prof. dr hab. inż. Andrzej Kęsy, profesor zwyczajny – Wydział Mechaniczny Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu.

artykuł recenzowany