

Badania heterogenicznej cieczy elektoreologicznej przeznaczonej do zastosowania w sprzęgle hydraulicznym

Kinga Skrzek, Karol Musiałek, Grzegorz Mędrak, Artur Olszak

Wstęp


Ze względu na rosnące wymagania stawiane maszynom konstruktorzy poszukują coraz to nowych możliwości udoskonalania ich konstrukcji. Nowym kierunkiem rozwoju maszyn jest zastosowanie w ich podzespołach cieczy o zmiennych właściwościach reologicznych jako cieczy roboczych. Takimi cieczami są ciecze elektoreologiczne (ER), których właściwości mogą być zmieniane za pomocą pola elektrycznego, oraz ciecze magnetoreologiczne (MR), których właściwości mogą być zmieniane za pomocą pola magnetycznego [1, 2]. Zastosowanie cieczy ER, MR – szczególnie w hydraulicznych podzespołach układów napędowych maszyn, takich jak sprzęgła hydrauliczne lub hamulce hydrauliczne – jest korzystne ze względu na możliwość ich sterowania za pomocą prądu elektrycznego. W sprzęgłach i hamulcach hydraulicznych najczęściej stosowane są dwufazowe ciecze ER lub MR, będące mieszaninami cząstek stałych o średnicy mniejszej niż 10 μm oraz oleju silikonowego. Ponadto ciecze te zawierają niewielkie ilości dodatków poprawiających ich właściwości, głównie zapobiegających sedymentacji i agregacji cząstek stałych.

Znane są dwa podstawowe rodzaje sprzęgieł i hamulców hydraulicznych: wiskotyczne oraz hydrokinetyczne. Sprzęgła i hamulce wiskotyczne są dzielone na cylindryczne i tarczowe, a sprzęgła i hamulce hydrokinetyczne na sprzęgła z pierścieniem wewnętrznym i bez pierścienia wewnętrznego. Głównymi elementami sprzęgieł i hamulców hydraulicznych są dwa wirniki umieszczone w szczelnej obudowie, wypełnionej hydrauliczną cieczą roboczą. Wirnik napędzający jest połączony z wałem wejściowym sprzęgła lub hamulca, a wirnik napędzany jest połączony z wałem wyjściowym sprzęgła lub jest unieruchomiony w przypadku hamulca. W sprzęgłach i hamulcach wiskotycznych moment obrotowy jest przenoszony w wyniku tarcia wywołanego występowaniem naprężenia stycznego w cieczy roboczej. W sprzęgłach i hamulcach hydrokinetycznych moment obrotowy przekazywany jest z wirnika napędzającego, będącego pompą, na wirnik napędzany, będący turbiną, na skutek oddziaływania cieczy roboczej na łopatki wirników [3, 4, 5].

Sterowanie sprzęgłami i hamulcami hydraulicznymi z cieczą roboczą typu ER lub MR polega na aktywacji odpowiednim polem fizycznym (elektrycznym lub magnetycznym), wywoływanym za pomocą prądu elektrycznego, cieczy roboczej znajdującej się w sprzęgle lub hamulcu. W cieczy roboczej

Streszczenie: We wstępie artykułu rozważono możliwości udoskonalenia konstrukcji maszyn w wyniku zastosowania jako cieczy roboczych cieczy o zmiennych właściwościach reologicznych, aktywowanych za pomocą pola elektrycznego. Następnie omówiono budowę cieczy elektoreologicznych i magnetoreologicznych oraz przedstawiono rodzaje sprzęgieł i hamulców hydraulicznych. Główną część artykułu stanowią badania charakterystyk cieczy elektoreologicznej o nazwie ERF#6 na specjalnym przyrządzie wyposażonym w głowicę pomiarową o kształcie zbliżonym do głowicy reometru cylindrycznego. Artykuł zakończono wnioskami potwierdzającymi konieczność badań właściwości i charakterystyk cieczy elektoreologicznych użytych jako cieczy roboczych na urządzeniach umożliwiających odwzorowanie warunków pracy oraz kształt geometryczny urządzenia, do którego ciecz jest dedykowana.

Słowa kluczowe: sterowane sprzęgła hydrauliczne, ciecze elektoreologiczne, charakterystyki cieczy elektoreologicznych, krzywe płynięcia

 **Abstract:** The article considers the possibilities of machine designs improvements as a result of the application as working fluids those with varying rheological properties activated with use of an electric field. Moreover the construction of electrorheological and magnetorheological fluids was described and types of clutches and hydraulic brakes were presented. The main part of the article consists test characteristics of the ERF#6 electrorheological liquid on a special equipment with a measuring head with shape similar to the head of cylindrical rheometer. The article finishes with conclusions.

następuje zmiana naprężeń stycznych, co skutkuje zmianą momentu obrotowego przenoszonego przez sprzęgło lub obciążającego hamulec. Jak wynika z dotychczas prowadzonych prac [6, 7, 8, 9, 10], możliwy do uzyskania zakres zmian momentów obrotowych – przenoszonych przez sprzęgło lub hamulec z cieczą ER lub MR w wyniku takiego sterowania – jest bardzo szeroki i spełnia wymagania stawiane podczas konstruowania maszyn.

Sprzęgła i hamulce hydrauliczne z cieczami ER mają znacznie prostszą budowę niż sprzęgła i hamulce hydrauliczne z cieczami MR, gdyż elektrodami służącymi do wytworzenia pola elektrycznego mogą być odizolowane od siebie powierzchnie wirników. Elektrody te łączy się z biegunami regulowanego zasilacza wysokiego napięcia. Natomiast do wytworzenia pola magnetycznego w sprzęgłach i hamulcach hydraulicznych z cieczami MR konieczne jest stosowanie elektromagnesów o dużych rozmiarach, połączonych z zasilaczami niskiego napięcia. Ze względu na fakt, iż maksymalne naprężenia styczne możliwe do wywołania w cieczy MR są znacznie większe niż naprężenia maksymalne w cieczy ER, sprzęgła i hamulce z cieczami ER o zbliżonych wymiarach do sprzęgieł i hamulców z cieczami MR przenoszą moment obrotowy ponad 100-krotnie mniejszy [11, 12].

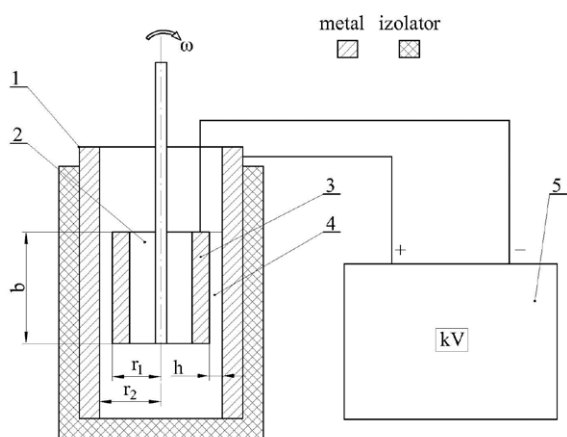
W artykule przedstawiono wyniki badań krzywych płynięcia cieczy elektoreologicznej ERF#6, uzyskane za pomocą prototypowego przyrządu pomiarowego. Głównym celem tych badań było uzyskanie danych, które będą wykorzystane do konstruowania sprzęgieł i hamulców wiskotycznych z tą cieczą.

1. Uzasadnienie potrzeby prowadzenia badań

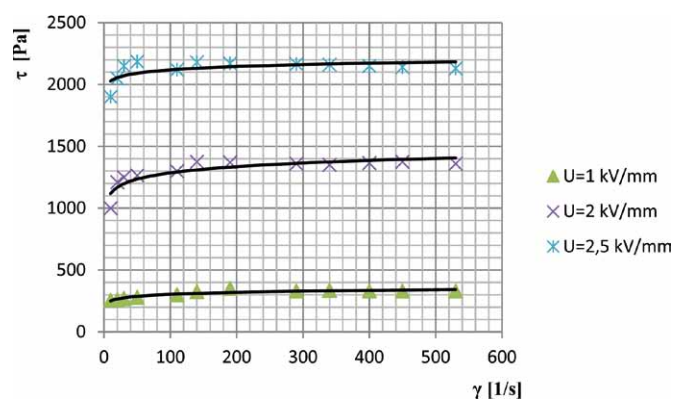
Podstawowymi charakterystykami cieczy ER, niezbędnymi do przeprowadzenia obliczeń projektowych sprzęgieł z tymi

cieczami, są zależności naprężeń stycznych τ od szybkości ścinania $\dot{\gamma}$ – sporządzone dla stałego wysokiego napięcia U doprowadzanego do elektrod przy stałej temperaturze T – zwane krzywymi płynięcia. Krzywe płynięcia są publikowane przez producentów cieczy ER w różnej formie i zazwyczaj bez informacji, w jaki sposób zostały otrzymane. Dla przykładu, z porównania danych przedstawianych przez producentów dwóch cieczy elektoreologicznych: ERF#6 [13] oraz LID3354S [14] wynika, że chociaż te ciecze mają podobny skład (zawierają cząstki stałe wykonane z polimerów i olej silikonowy), to wytwórca cieczy ERF#6 podaje krzywe płynięcia, dane reometru i sposób ich otrzymania oraz dodatkowe wykresy określające wpływ zawartości wody na naprężenie styczne i gęstość prądu upływu. Natomiast producent cieczy LID3354S nie podaje krzywych płynięcia, lecz wzory i wykresy umożliwiające sporządzenie krzywych płynięcia, przy czym pomija całkowicie zależność naprężenia stycznego od zawartości wody w cieczy. Ponadto nie informuje, na jakim urządzeniu i w jaki sposób otrzymano przedstawione zależności.

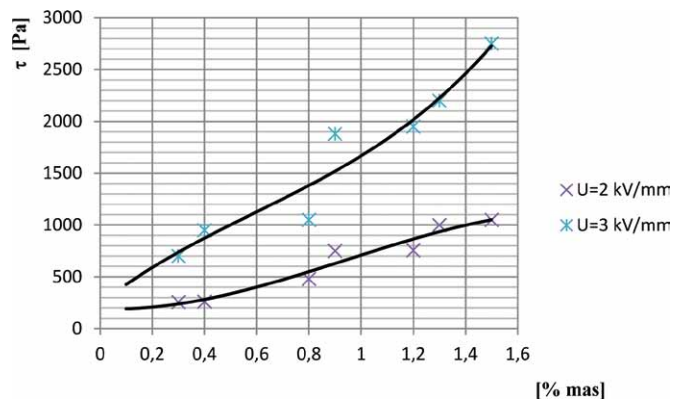
Jak pokazano w publikacji [15], dla poprawnego konstruowania hamulców z cieczami elektoreologicznymi istotne jest, by warunki badań krzywych płynięcia były jak najbardziej zbliżone do warunków, w jakich ciecz będzie pracować w sprzęgle lub hamulcu wiskotycznym.



Rys. 1. Schemat reometru cylindrycznego BohlinVisco 88 BV: 1, 3 – elektrody; 2 – ruchomy cylinder; 4 – ciecz ER; 5 – zasilacz wysokiego napięcia



Rys. 2. Zależność $\tau = f(\dot{\gamma})$ dla cieczy ERF#6



Rys. 3. Zależność naprężenia stycznego od zawartości wody w cieczy ERF#6

Tabela 1. Podstawowe dane cieczy ERF#6 [13]

Faza stała	Sulfonowana żywica styrenowo-divinylobenzenowa z kationem sodowym
Faza ciekła	Stabilny chemicznie olej silikonowy
Współczynnik lepkości dynamicznej w temperaturze 25°C	$\mu = 60 \text{ mPa} \times \text{s}$
Gęstość cieczy ERF#6	$\rho = 1,074 \text{ g/cm}^3$
Współczynnik lepkości dynamicznej fazy ciekłej	$\mu_c = 16\text{--}18 \text{ mPa} \times \text{s}$
Gęstość fazy ciekłej	$\rho_c = 0,98 \text{ g/cm}^3$
Gęstość fazy stałej	$\rho_s = 1,21 \text{ g/cm}^3$
Udział fazy stałej wagowo	$\phi_w = 40\%$
Udział fazy stałej objętościowo	$\phi_o = 35\%$
Temperatura zapłonu	$> 250^\circ\text{C}$
Temperatura krzepnięcia	$< - 20^\circ\text{C}$

2. Badania cieczy ERF#6 wykonane przez producentów

Ciecz elektoreologiczna ERF#6 została opracowana i wyprodukowana w Katedrze Chemii Nieorganicznej i Technologii Ciała Stałego Wydziału Chemicznego Politechniki Warszawskiej. Jest to ciecz dwufazowa. W tabeli 1 przedstawiono podstawowe dane dotyczące cieczy ERF#6 [13].

Ciecz elektoreologiczną ERF#6 badano za pomocą zaadaptowanego do tego celu reometru cylindrycznego BohlinVisco 88 BV, którego schemat przedstawiono na rys. 1, a podstawowe dane podano w tabeli 2.

Na rys. 2 pokazano wyniki pomiarów naprężenia stycznego τ cieczy elektoreologicznej ERF#6 z wykorzystaniem reometru cylindrycznego, w zależności od szybkości ścinania $\dot{\gamma}$, uzyskane dla trzech różnych wysokich napięć U , w temperaturze otoczenia $T = 20^\circ\text{C}$ i dla zawartości wody w cieczy ER wynoszącej 1% [13]. Na rysunku tym punkty oznaczają wartości średnie uzyskane z pomiarów.

Na rysunku 3 przedstawiono zależność naprężenia stycznego τ dla cieczy ERF#6 od procentowej zawartości wody (wagowo) dla dwóch wartości wysokiego napięcia U .

Jak wynika z rysunków 2 oraz 3, zakres zmian naprężenia stycznego dla poszczególnych wartości szybkości ścinania jest znaczny, szczególnie dla małych wartości tego naprężenia, a ponadto naprężenia styczne w cieczy ERF#6 są tym większe, im większa jest zawartości wody.

3. Badania własne cieczy ERF#6

3.1. Przyrząd pomiarowy

Badania krzywych płynięcia cieczy ERF#6 przeprowadzono za pomocą przyrządu pomiarowego, którego schemat pokazano na rys. 4, o budowie zbliżonej do budowy reometru cylindrycznego, jednak o znacznie większej średnicy cylindrów [2].

Podstawowe dane dotyczące przyrządu pomiarowego podano w tabeli 3.

Tabela 2. Dane dotyczące reometru cylindrycznego

Nazwa parametru	Oznaczenie	Wartość	Jednostka
Promień cylindra ruchomego	r_1	10	mm
Promień cylindra nieruchomego	r_2	11	mm
Wysokość cylindra ruchomego	b	28	mm
Szczelina między cylindrami	h	1	mm
Prędkość kątowna cylindra ruchomego	ω	2-104	rad/s
Napięcie między cylindrami	U	0-5	kV

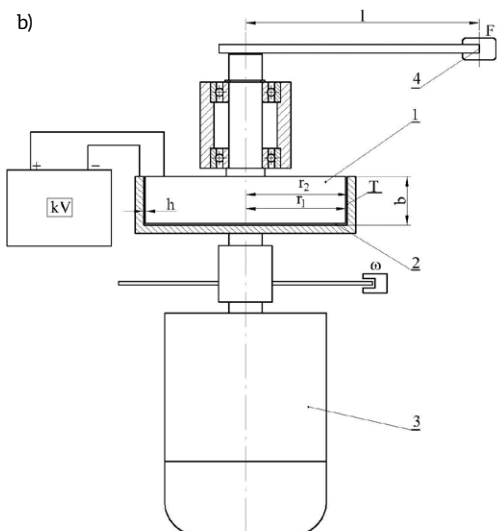
Główną częścią przyrządu pomiarowego jest głowica badawcza, składająca się z dwóch cylindrów: ruchomego i nieruchomego. Głowica jest osadzona na wale ustawionego pionowo asynchronicznego silnika elektrycznego, sterowanego za pomocą przemiennika częstotliwości, umożliwiającego płynną regulację prędkości kątowej ω silnika. Cylindry są odizolowane od siebie elektrycznie i połączone z odpowiednimi biegunami

Tabela 3. Dane dotyczące reometru cylindrycznego

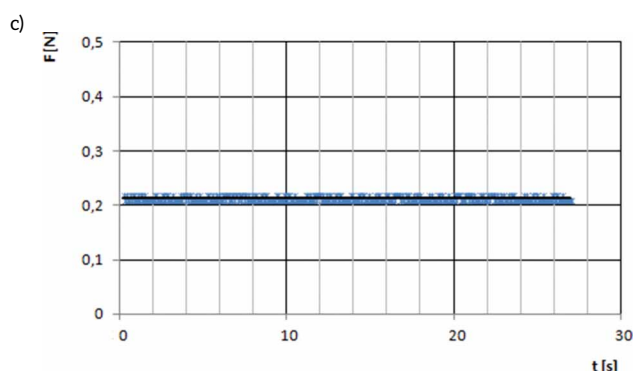
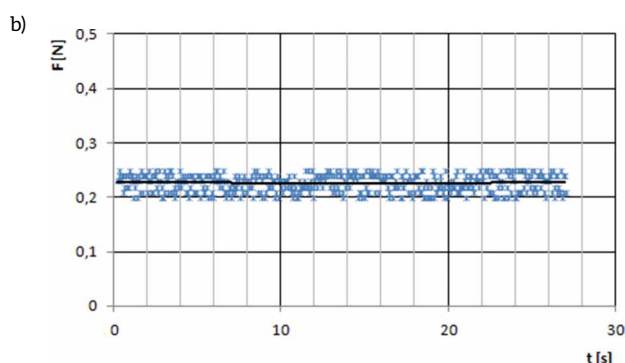
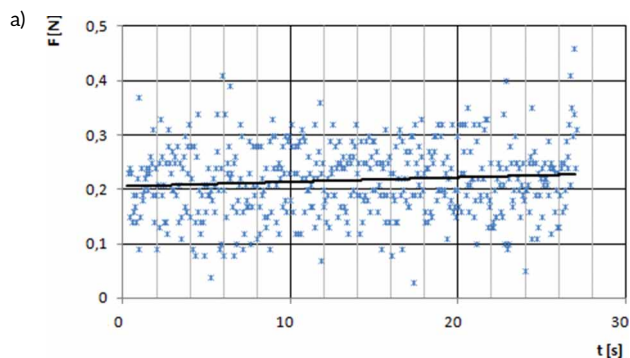
Nazwa parametru	Oznaczenie	Wartość	Jednostka
Promień cylindra ruchomego	r_1	60	mm
Promień cylindra nieruchomego	r_2	61	mm
Wysokość cylindra ruchomego	b	29	mm
Szczelina między cylindrami	h	1	mm
Prędkość kątowna cylindra ruchomego	ω	0-100	rad/s
Napięcie między cylindrami	U	0-3	kV
Długość dźwigni	l	140	mm

zasilacza wysokiego napięcia o regulowanym napięciu. Temperatura badanej cieczy ER jest mierzona za pomocą rezystancyjnego czujnika temperatury umieszczonego w połowie wysokości ścianki bocznej nieruchomego cylindra, tuż przy jego powierzchni. Cylinder ruchomy osadzony jest obrotowo w dwóch łożyskach i połączony z dźwignią, której koniec naciska na tensometryczny czujnik siły F.

reklama



Rys. 4. Urządzenie pomiarowe do badania krzywych płynięcia cieczy ER: a – widok; b – schemat budowy: 1 – głowica do badania cieczy elektrotreologicznych; 2 – przestrzeń, w której znajduje się ciecz ER; 3 – silnik elektryczny; 4 – czujnik pomiarowy



Rys. 5. Wahania siły podczas pomiarów: a – dźwignia styka się bezpośrednio z tensometrycznym czujnikiem siły; b – dźwignia styka się z tensometrycznym czujnikiem siły przez piankę poliuretanową; c – dźwignia jest obciążona

3.2. Sposób prowadzenia badań krzywych płynięcia

W celu otrzymania krzywych płynięcia dla ustalonych wartości: prędkości kątowej ω , wysokiego napięcia U oraz temperatury cieczy roboczej T mierzono siłę F , wywieraną przez dźwignię na czujnik siły. Podczas wykonywania pomiarów wszystkie wielkości fizyczne były zapisywane za pomocą komputerowego układu pomiarowego.

Wpływ zawartości wody w cieczy ERF#6 na krzywe płynięcia uwzględniono, przetrzymując ciecz w otwartym naczyniu przez okres 1 tygodnia w pomieszczeniu laboratoryjnym, w którym wilgotność względna wynosiła 30%, a następnie prowadząc badania za pomocą przyrządu pomiarowego. Po

podniesieniu wilgotności względnej do 43% po tygodniu badania powtórzono.

W trakcie badań wstępnych zwrócono uwagę na duże drgania mierzonej siły F . W celu ograniczenia tych drgań zastosowano dwa sposoby: do dźwigni w miejscu styku z tensometrycznym czujnikiem siły przyklejono piankę polietylenową o module Younga wynoszącym 25 MPa, zaś ramię obciążono za pomocą zawieszono ciężarka, którego masę i położenie określono podczas prób. Najmniejsze wahania siły uzyskano dla ciężarka o masie 50 g, umieszczonego w odległości 40 mm od styku dźwigni z czujnikiem. Na rys. 5 przedstawiono zakresy wahań siły

siły podczas pomiarów dla przyjętych sposobów badań. Badania zasadnicze prowadzono dla dźwigni obciążonej.

3.3. Wyniki badań

Wyniki pomiarów siły F uzyskane dla temperatury 20°C przedstawiono na rys. 6 dla wilgotności względnej wynoszącej 30%, a na rys. 7 dla wilgotności względnej wynoszącej 43%.

Wyniki pomiarów siły F uzyskane dla różnych temperatur dla napięcia $U = 1 \text{ kV}$ przy wilgotności 30%, przedstawiono na rys. 8.

4. Sporządzenie krzywych płynięcia cieczy ERF#6

Na podstawie wyników badań przedstawionych na rys. 6, 7 oraz 8 sporządzono krzywe płynięcia postaci $\tau = f(\dot{\gamma})$ dla $E = \text{const.}$ oraz $T = \text{const.}$ Prędkość kątowa ω była przeliczana na szybkość ścinania $\dot{\gamma}$, a wartość siły F na naprężenie ścinające τ według wzorów [2]:

$$\dot{\gamma} = \frac{\omega r_2}{h} \quad [1/\text{s}] \quad \tau = \frac{M}{r_2 S} = \frac{Fl}{2\pi r_2^2 b} \quad [\text{Pa}] \quad (1)$$

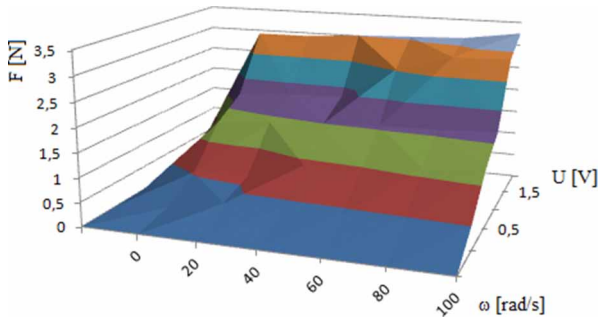
gdzie: r_2 – promień nieruchomego cylindra; h – wielkość szczeliny; M – moment obrotowy; S – pole powierzchni ścinania; l – długość ramienia działania siły; b – wysokość cylindra ruchomego.

Otrzymane krzywe płynięcia cieczy ERF#6 przedstawiono na rys. 9, 10 oraz 11.

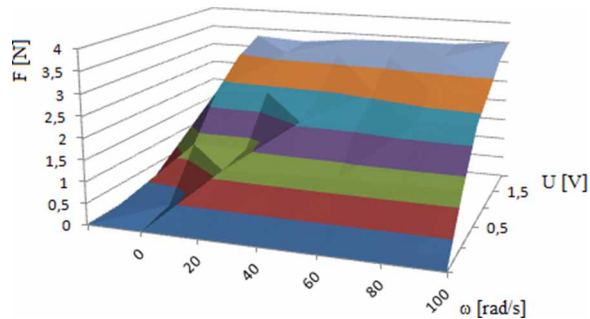
5. Dyskusja wyników badań cieczy ERF#6

Jak wynika z rys. 6 oraz rys. 7, wzrost wilgotności cieczy o 13% spowodował wzrost wartości siły wywieranej przez dźwignię na czujnik maksymalnie od 0,2 N do 1 N, przy czym większy wzrost siły występuje dla niższych napięć. Ze wzrostem temperatury cieczy od 20°C do 24°C wartość siły wzrosła średnio o 2 N, jednak zależność siły od temperatury nie była liniowa, gdyż wzrost siły od 20°C do 22°C był dwukrotnie większy w porównaniu ze wzrostem siły od 22°C do 24°C (rys. 8).

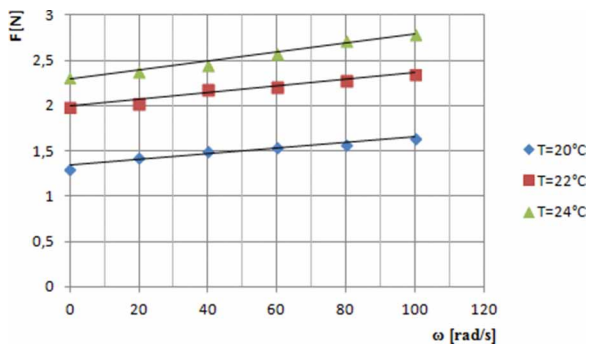
Krzywe płynięcia otrzymane za pomocą przedstawionego przyrządu pomiarowego, pokazane na rys. 9 oraz rys. 10, różnią się istotnie od podanych przez producenta, rys. 2. Choć przebiegi zależności naprężenia stycznego od szybkości ścinania dla ustalonych napięć, zarówno dla przyrządu pomiarowego, jak i reometru, mają podobny charakter, to jest rosłą niemal liniowo, to różnice w wartościach naprężeń stycznych



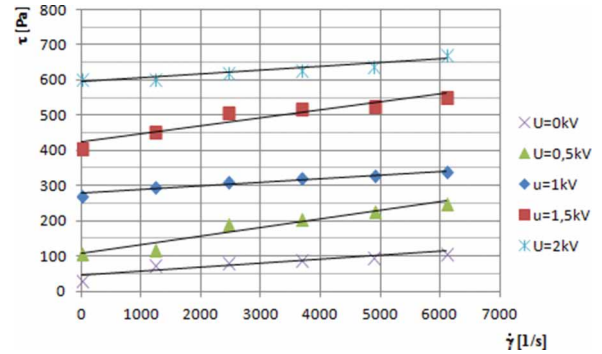
Rys. 6. Zależność siły F od prędkości kątowej ω przy stałej temperaturze $T = 20^\circ\text{C}$ oraz wilgotności $w = 30\%$



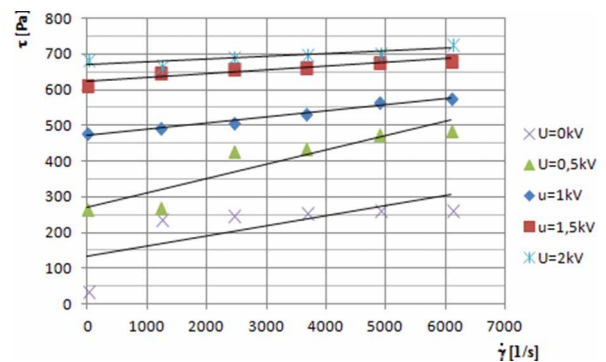
Rys. 7. Zależność siły F od prędkości kątowej ω przy stałej temperaturze $T = 20^\circ\text{C}$ oraz wilgotności $w = 43\%$



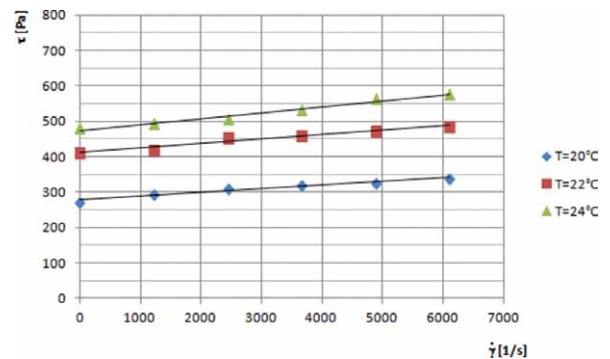
Rys. 8. Zależność siły F od prędkości kątowej ω przy stałym napięciu $U = 1\text{ kV}$ oraz wilgotności $w = 30\%$



Rys. 9. Zależność $\tau = f(\dot{\gamma})$ dla cieczy ERF#6 przy stałej temperaturze $T = 20^\circ\text{C}$ i wilgotności $w = 30\%$



Rys. 10. Zależność $\tau = f(\dot{\gamma})$ dla cieczy ERF#6 przy stałej temperaturze $T = 20^\circ\text{C}$ i wilgotności $w = 43\%$



Rys. 11. Zależność $\tau = f(\dot{\gamma})$ dla cieczy ERF#6 przy stałym napięciu $U = 1\text{ kV}$ oraz wilgotności $w = 30\%$

są znaczne. Przyczyną tych różnic nie jest mniejsza niż 1% zawartość wody w cieczy ERF#6, gdyż jak wynika z innych badań hamulców wiskotycznych z tą samą cieczą, prowadzonych w tym samym laboratorium przy wilgotności 30%, zawartość wody w cieczy ERF#6 wynosiła kilka procent [16]. Należy sadzić, że wpływ na wartość naprężeń stycznych mają wymiary geometryczne cylindrów oraz stan ich powierzchni. Zarówno

szerokość szczeliny, jak i jej wysokość są porównywalne w obu urządzeniach: reometrze i w przyrządzie pomiarowym. Obydwa urządzenia różnią się natomiast średnicą cylindrów oraz sposobem obróbki i gładkością powierzchni. W przyrządzie pomiarowym średnica cylindra jest dziesięciokrotnie większa niż w reometrze. Z tego powodu zarówno szybkości ścinania, jak i przyspieszenia dośrodkowe są znacznie większe w przyrządzie

miarowym, co pozostaje nie bez wpływu na przepływ cieczy elektoreologicznej w szczelinie i może powodować, że przepływ ten odbiega od przepływu laminarnego, w którym opory przepływu, a w tym przypadku również naprężenia styczne, są większe. Nie można jednak w pełni przyjąć takiego uzasadnienia, gdyż, jak wynika z przedstawionych krzywych płynięcia, obniżenie wartości naprężenia stycznego otrzymanego za pomocą przyrządu pomiarowego ma miejsce również w zakresie szybkości ścinania występującej w reometrze.

6. Wnioski


Zastosowanie przyrządu pomiarowego, mimo problemów pomiarowych związanych z występowaniem drgań dźwigni naciskającej na czujnik siły, umożliwiło sporządzenie krzywych płynięcia cieczy ERF#6 dla różnych temperatur oraz dwóch wartości wilgotności względnej powietrza. Drgania dźwigni znacznie ograniczono, stosując bezwładnościową metodę tłumienia drgań.

Przedstawione wyniki badań oraz otrzymane krzywe płynięcia mogą być pomocne podczas projektowania sprzęgła i hamulców wiskotycznych z cieczą ERF#6, pracujących w warunkach zmiennej wilgotności względnej powietrza oraz zmiennych temperatur.

Uzyskane wyniki badań potwierdzają, że zasadne jest sporządzanie krzywych płynięcia cieczy elektoreologicznych z wykorzystaniem cylindrów pomiarowych o geometrii jak najbardziej zbliżonej do geometrii projektowanego sprzęgła lub hamulca wiskotycznego z cieczą elektoreologiczną.

Literatura

- [1] ŁAWNICZAK A., MILECKI A.: *Ciecze elektro- i magnetoreologiczne oraz ich zastosowania w technice*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1999.
- [2] KĘSY Z.: *Modelowanie i badanie elektoreologicznych i magnetoreologicznych cieczy roboczych*. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2009.
- [3] KĘSY Z.: *Hydrokinetyczne układy napędowe*. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2002.
- [4] KIJEWSKI J., MILLER A., PAWLICKI K. I INNI: *Maszynoznawstwo*. WSiP, Warszawa 2009.
- [5] SZYDELSKI Z.: *Pojazdy samochodowe. Napęd i starowanie hydrauliczne*. WKŁ. Warszawa 1993.
- [6] KĘSY Z., OLSZAK A.: *Badania eksperymentalne hamulca wiskotycznego z cieczą ER*. „Hydraulika i Pneumatyka” 5/2004.
- [7] KĘSY Z.: *Sprzęgła z cieczami elektro- i magnetoreologicznymi*. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2008.
- [8] KĘSY Z.: *Zastosowanie hamulców hydraulicznych z cieczą o zmiennych właściwościach fizycznych w systemach naciągu wstęgi*. „Napędy i Sterowanie” 5/2008.
- [9] KĘSY Z., OLSZAK A.: *Badanie sprzęgła hydrokinetycznego z cieczą magnetoreologiczną*. „Hydraulika i Pneumatyka” 2/2006.
- [10] KĘSY Z., OLSZAK A.: *Modelowanie sprzęgła hydrokinetycznego z cieczą magnetyczną*. „Napędy i Sterowanie” 5/2009.
- [11] CHOI S.B., HONG S.R., CHEONG C.C.: *Comparison of field controlled characteristics between ER and MR clutches*. „Journal of Intelligent Material Systems and Structures” 10/1999.
- [12] OLSZAK A., KĘSY Z.: *Przegląd hamulców i sprzęgieł hydraulicznych z cieczami o sterowanych właściwościach reologicznych*. „Napędy i Sterowanie” 2/2009.
- [13] PŁOCHARSKI J. I INNI: *Opracowanie cieczy elektoreologicznych do zastosowania w zaawansowanej technice*. Raport z projektu badawczego PW-004/ITE/05/2005 Politechnika Warszawska, Wydział Chemiczny, 2006.
- [14] www.smarttec.co.uk
- [15] KESY Z., KESY A., PŁOCHARSK J., JACKSON M., PARKIN R.: *An Example of Design – Embodiment for Electrorheological Fluid Based Mechatronic Transmission Components*. „International Journal of Mechatronics” 16/2006.
- [16] OLSZAK A., ZIABSKA E., OSOWSKI K., KESY A., KESY Z.: *Durability of Hydraulic Clutches Filled with Smart Fluids*. The 14th IFToMM World Congress, Taipei, Taiwan, 2015.

 Kinga Skrzek – studentka UTH w Radomiu;
inż. Musiałek Karol – student UTH w Radomiu;
mgr inż. Grzegorz Mędrak – absolwent AGH w Krakowie;
dr inż. Artur Olszak – Instytut Nowych Syntezy Chemicznych, Puławy