

# Obliczenia numeryczne cieczy elektoreologicznej do zastosowania w sterowanym sprzęgle wiskotycznym

Grzegorz Mędrak, Karol Osowski, Artur Olszak

## 1. Wstęp


Sprzęgła wiskotyczne są szeroko stosowane w układach napędowych maszyn i urządzeń dzięki wielu swoim zaletom. Zalety tych sprzęgieł wynikają głównie z ich budowy i sposobu przenoszenia momentu obrotowego. Są to konstrukcje składające się z wałów wejściowego i wyjściowego, ułożyskowanych w obudowie. Na końcu każdego z wałów, w zależności od konstrukcji, umieszczone są w odpowiedniej odległości naprzemiennie tarcze lub cylindry zanurzone w cieczy roboczej. Moment obrotowy przenoszony jest więc poprzez ciecz, a właściwie przez naprężenia ścinające powstające w cieczy. Istotnym elementem sprzęgła wiskotycznego jest ciecz robocza. Na wartość przenoszonego momentu obrotowego mają wpływ geometryczne wymiary sprzęgła, takie jak wielkość powierzchni styku elementów roboczych, odległość pomiędzy nimi, kształt i gabaryty sprzęgła. Jednak w sprzęgłach hydraulicznych, do których należą sprzęgła wiskotyczne, najważniejszym czynnikiem decydującym o właściwościach i parametrach osiąganych przez sprzęgło jest ciecz robocza. Standardowe ciecze używane jako ciecze robocze charakteryzują się określonymi właściwościami reologicznymi, jak gęstość czy lepkość. Poprzez zmianę właściwości reologicznych cieczy roboczej w sprzęgle hydraulicznym można sterować wartością momentu obrotowego przenoszonego przez sprzęgło. Osiąga się to, wymieniając ciecz na inną, zmieniając lepkości cieczy w wyniku zmiany temperatury lub zmieniając ilość cieczy znajdującej się w sprzęgle. Są to jednak metody dość kłopotliwe i pozwalające na zmianę parametrów sprzęgła w niewielkim zakresie. Całkowicie nowym sposobem umożliwiającym szerszy zakres zmiany parametrów sprzęgła wiskotycznego jest zastosowanie jako cieczy roboczej cieczy o zmiennych właściwościach reologicznych. Do takich cieczy należą ciecze elektoreologiczne i magnetoreologiczne. Charakterystyczną cechą tych cieczy jest możliwość wpływania na ich właściwości reologiczne poprzez zmianę pola elektrycznego lub magnetycznego. Rozwój techniki, szczególnie układów elektroniki i komputerów, przyspieszył zastosowanie cieczy elektoreologicznych i magnetoreologicznych w sprzęgłach hydraulicznych. Sterowanie natężeniem pola elektrycznego czy magnetycznego powoduje wzrost naprężeń stycznych w cieczy, a tym samym otwiera nowe możliwości zastosowania sterowanych sprzęgieł w urządzeniach technicznych. W literaturze jest wiele przykładów zastosowania cieczy elektoreologicznych w sprzęgłach i hamulcach hydraulicznych [1–6]. Podstawowym problemem przy projektowaniu sprzęgieł z cieciami elektoreologicznymi i magnetoreologicznymi jest właściwy dobór

**Streszczenie:** We wstępie do artykułu omówiono budowę i sposoby sterowania sprzęgieł wiskotycznych, między innymi poprzez zmianę właściwości cieczy roboczej. Następnie przedstawiono dobór materiałów konstrukcyjnych sterowanego sprzęgła wiskotycznego z cieczą elektoreologiczną (ER).

Zasadniczą część artykułu stanowią obliczenia numeryczne cieczy elektoreologicznej oraz sprzęgła. Pokazano przykładowe charakterystyki elektoreologiczne cieczy ERF3-S-I, otrzymane za pomocą procedur obliczeniowych napisanych w programie Turbo Pascal 7 oraz przykładowe wyniki obliczeń sprzęgła tarczowego.

Na końcu artykułu zawarto wnioski potwierdzające konieczność modelowania i obliczeń numerycznych właściwości i charakterystyk cieczy elektoreologicznych używanych jako ciecze robocze w sterowanych sprzęgłach wiskotycznych.

Słowa kluczowe: sterowane sprzęgła wiskotyczne, ciecze elektoreologiczne, charakterystyki cieczy elektoreologicznych

 **Abstract:** The construction and method of controlling the viscous clutch by changing the properties of working fluid were described in the introduction of the article. Then, the selection of construction materials of the controlled viscous clutch with electrorheological fluid (ER) was presented.

The major part of paper includes numerical calculations of electrorheological fluid and clutch. The exemplary characteristics of electrorheological ERF3-S-I fluid obtained using the calculation procedures presented in Turbo Pascal 7 and the samples of disc clutch were demonstrated.

Conclusions regarding the necessity of carrying out the mathematical modelling and numerical calculations of properties as well as characteristics of electrorheological fluids used as working fluid in the controlled viscous clutch were described in the final part of the article.

materiałów konstrukcyjnych. Jednak najważniejszym elementem sterowanego sprzęgła jest ciecz użyta jako ciecz robocza. Właściwy dobór cieczy determinuje osiągi sprzęgła oraz zakres jego sterowania.

W artykule przedstawiono dwa najbardziej istotne czynniki brane pod uwagę podczas projektowania sprzęgieł z cieczą elektoreologiczną: dobór materiałów konstrukcyjnych oraz

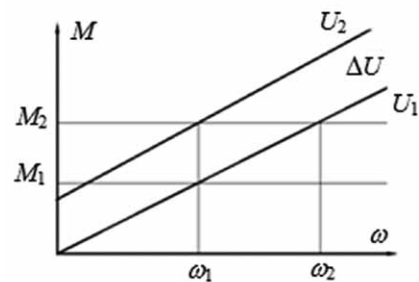
modelowanie cieczy elektoreologicznej przeznaczonej do sterowanego tarczowego sprzęgła wiskotycznego.

## 2. Dobór materiałów konstrukcyjnych

Do budowy sterowanego sprzęgła wiskotycznego stosuje się materiały konstrukcyjne, takie jak: stal, mosiądz, stopy miedzi, aluminium oraz materiały izolacyjne. Ze stali wykonywane są: korpus sprzęgła, wałki, tarcze lub cylindry. Na elementy sprzęgła, które są jednocześnie elektrodami wytwarzającymi pole elektryczne, powinny być stosowane materiały wykazujące dobrą przewodność prądu elektrycznego. Dodatkowo, z uwagi na możliwość zanieczyszczenia cieczy roboczej, należy stosować materiały odporne na korozję. Do takich należą stale nierdzewne, np. 3H13, OH18N9. Stopy miedzi stosowane są najczęściej na pierścieniu ślizgowe doprowadzające wysokie napięcie. Materiałami konstrukcyjnymi sprzęgieł używanymi na elementy izolacyjne są tworzywa sztuczne, np. tefalony (PTFE), polietylen (PE). Przy doborze tworzywa sztucznego należy zwrócić uwagę na jego właściwości elektryczne i termiczne. Materiał ten powinien mieć bardzo dobre właściwości elektroizolacyjne i dielektryczne oraz niską chłonność wody, co gwarantuje dobrą izolację i brak przebiegów elektrycznych w przypadku pracy sprzęgła pod wysokim napięciem.

## 3. Dobór cieczy elektoreologicznej

Dokonując wyboru cieczy ER do zastosowania w sterowanym sprzęgle wiskotycznym, należy wybrać ciecz, dla której naprężenie styczne  $\tau$  nieznacznie zależy od szybkości ścinania  $\dot{\gamma}$ . Jak wynika z prac [7, 8], im silniejsza jest ta zależność, tym większy problem stwarza sterowanie urządzenia pracującego z cieczą ER. Najlepiej wymagania te spełniają heterogeniczne ciecz elektoreologiczne, w których fazą stałą jest czysty chemicznie krochmal. Jednak wadą takich cieczy ER jest wrażliwość na wilgoć. Podczas doboru cieczy ER do sterowanego sprzęgła wiskotycznego powinno się również uwzględnić fakt, że moment obrotowy  $M$  przenoszony przez sprzęgło jest sumą dwóch składników, z których pierwszy  $M_1$  zależy od  $\mu_p$  oraz  $\omega$ , a drugi  $M_2$  zależy od  $\tau_0$ , będącego funkcją napięcia  $U$  [1]. Jeżeli przewiduje się sterowanie sprzęgła za pomocą zmiany napięcia  $U$ , należy wybrać ciecz, dla której stosunek  $M_2/M_1$  będzie jak największy, czyli  $\tau_0/\mu_0$  będzie jak największe. Sterowanie prędkością kątową silnika w wymaga, by stosunek  $\tau_0/\mu_0$  był jak najmniejszy.



Rys. 1. Sposób sterowania momentem obrotowym w sprzęgle wiskotycznym

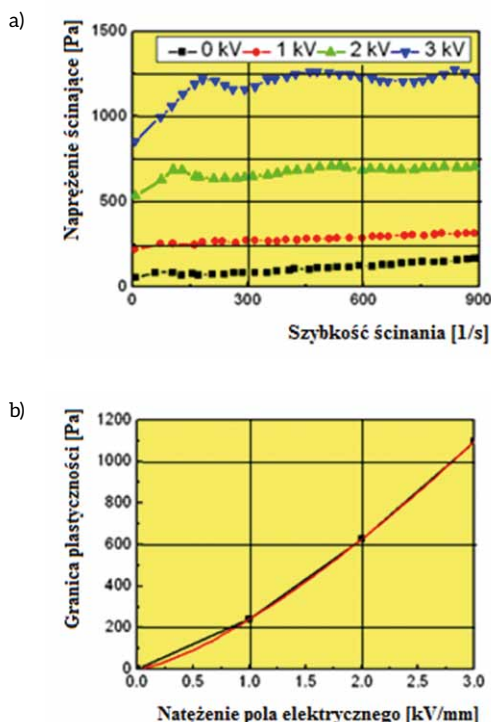
Jeżeli podczas sterowania wymagana jest zmiana momentu obrotowego od wartości  $M_1$  do  $M_2$ , to można ją uzyskać, zmieniając  $\omega$  od  $\omega_1$  do  $\omega_2$  przy  $U = 0$  lub zmieniając napięcie o  $\Delta U$  przy  $\omega_1 = \text{const.}$  (rys. 1). Jak wynika z literatury [1, 7–9], sterowanie przez zmianę wysokiego napięcia  $U$  jest szybsze.

Podczas doboru cieczy ER do sprzęgła wiskotycznego bierze się najczęściej pod uwagę ciecz ER, które są dostępne na rynku. Istnieje wielu producentów cieczy elektoreologicznych, np. Smart Technology, UK [10], Smart Structures and Systems Laboratory, Inha University, South Korea [11].

Do zastosowania w tarczowym sprzęgle wiskotycznym wytypowano ciecz ERF3-S-I produkcji Smart Structures and Systems Laboratory, ze względu na bardziej korzystny, niemal liniowy przy wyższych szybkościach ścinania, przebieg zależności  $\tau = f(\dot{\gamma})$ . Podstawowe informacje na temat cieczy ERF3-S-I, podane w [11], przedstawiono na rys. 2 i w tabeli 1.

## 4. Obliczenia numeryczne cieczy elektoreologicznej i sprzęgła tarczowego

W celu tworzenia modelu matematycznego sprzęgła przeznaczonego do obliczeń numerycznych, w pierwszej kolejności należy przystąpić do opracowania modelu matematycznego wytypowanej elektoreologicznej cieczy roboczej ERF3-S-I. Ze względu na brak na początkowym etapie konstruowania sprzęgła pełnych informacji dotyczących charakterystyk wybranej cieczy w broszurze informacyjnej [11], współczynniki występujące w tym modelu przyjęto na podstawie publikacji dotyczących zastosowania cieczy ER opartych na chemicznie czystym krochmalu [2, 12–13]. Założono, że na charakterystyki



Rys. 2. Charakterystyki reologiczne cieczy ERF3-S-I [11]:  
a – naprężenie ścinające w funkcji prędkości ścinania;  
b – granica plastyczności w funkcji natężenia pola elektrycznego

reologiczne cieczy ERF3-S-I oprócz temperatury ma wpływ wilgotność względna powietrza. Przyjęto też, że właściwości reologiczne tej cieczy opisuje model Binghama postaci:

$$\tau = \mu_p \dot{\gamma} + \tau_0 \quad (1)$$

gdzie:  $\mu_p$  – lepkość plastyczna;  $\tau_0$  – naprężenie graniczne.

Dla  $U = 0$

$$\tau = \mu_0 \dot{\gamma} \quad (2)$$

gdzie:

$\mu_0$  – współczynnik lepkości dynamicznej cieczy ER przy braku pola elektrycznego.

Zależność granicznego naprężenia stycznego  $\tau_0$  [kPa] od natężenia pola elektrycznego  $E$  [kV/mm] opisano za pomocą współczynnika  $a$ , wzór (3). We wzorze tym uwzględniono dodatkowo temperaturę  $T$  (współczynnik  $a_1$ ), szybkość ścinania  $\dot{\gamma}$  (współczynnik  $a_2$ ) oraz wilgotność  $w$  (współczynnik  $a_3$ ):

$$\tau_0 = a \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot E^{1,9} \quad (3)$$

gdzie:

$a = 0,09$  [kPa/(kV/mm)<sup>1,9</sup>] dla  $T = 20^\circ\text{C}$  przy  $w = 30\%$ ;  
 $a_1 = 1 + 1,8 (T - 20)/100$  [-];  
 $a_2 = 1$  [-];  
 $a_3 = 1 + (w - 30)/100$  [-].

Tabela 1. Podstawowe właściwości cieczy elektoreologicznej ERF3-S-I

Ciecz elektoreologiczna ERF3-S-I					
Faza stała	Faza ciekła	Gęstość cieczy	Lepkość	Temperatura krzepnięcia	Temperatura zapłonu
Krochmal	Olej silikonowy	1,54 g/cm <sup>3</sup>	0,127 Pa · s	-10°C	120°C

Zależność lepkości plastycznej  $\mu_0$  [Pa · s] od natężenia pola elektrycznego  $E$  [kV/mm] określono za pomocą współczynnika  $b$ , wzór (4). We wzorze tym uwzględniono dodatkowo temperaturę  $T$  (współczynnik  $b_1$ ):

$$\mu_0 = b \cdot b_1 \quad (4)$$

gdzie:

$b = 0,127$  Pa · s;

$b_1 = 1 - 2,6 (T - 20)/100$  [-].

Wzięto tu pod uwagę, że oleje silikonowe przy wyższych lepkościach mają lepkość zależną liniowo od temperatury [14].

Zależność gęstości prądu upływu  $i_g$  [μA/cm<sup>2</sup>] od natężenia pola elektrycznego  $E$  [kV/mm] opisano za pomocą współczynnika  $c$ . Uwzględniono dodatkowo temperaturę  $T$  (współczynnik  $c_1$ ), wilgotność  $w$  (współczynnik  $c_2$ ) oraz szybkość ścinania  $\dot{\gamma}$  (współczynnik  $c_3$ ):

$$i_g = c \cdot c_1 \cdot c_2 \cdot c_3 \cdot E^{1,7} \quad (5)$$

gdzie:

$c = 0,12$  [(μA/cm<sup>2</sup>)/(kV/mm)<sup>1,7</sup>] dla  $T = 20^\circ\text{C}$  przy  $w = 30\%$ ;

$c_1 = 1 + 120 (T - 20)/100$  [-];

$c_2 = 1 + 10 (w - 30)/100$  [-];

$c_3 = (1 - 0,000056 \dot{\gamma})$  [-].

Przykładowe charakterystyki elektoreologiczne cieczy ERF3-S-I, obliczone za pomocą procedur obliczeniowych napisanych w programie Turbo Pascal 7 na podstawie zależności (3), (4), (5), przedstawiono na rys. 3.

Obliczenia numeryczne tarczowego sprzęgła wiskotycznego z cieczą ER przeprowadzono w oparciu o następujące wzory:

• natężenie pola elektrycznego:

$$E = \frac{U}{h} \quad (6)$$

gdzie:  $h$  – szczelina między elektrodami;

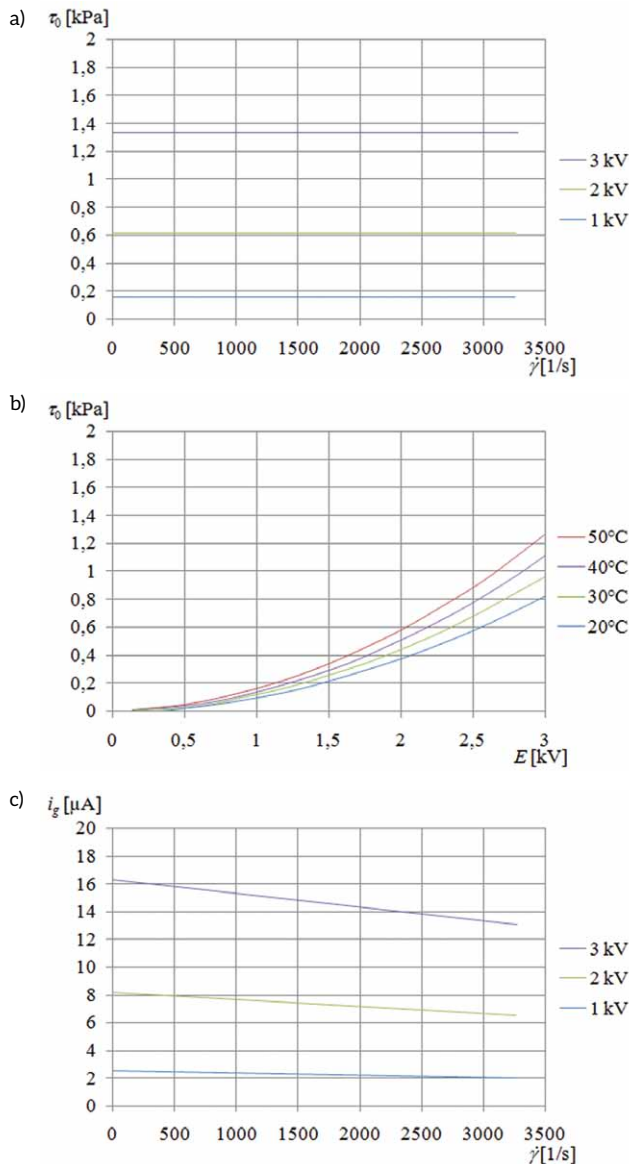
• moc mechaniczna:

$$P_s = M \cdot \omega \quad (7)$$

gdzie:

$M$  – moment obrotowy;

$\omega$  – prędkość kątowna;



Rys. 3. Charakterystyki elektroreologiczne cieczy ERF3-S-I: a -  $\tau_0$  w funkcji  $\dot{\gamma}$ ; b -  $\tau_0$  w funkcji E; c -  $i_g$  w funkcji  $\dot{\gamma}$

- moc  $P_z$  zasilacza wysokiego napięcia:

$$P_z = i_g S U \quad (8)$$

gdzie: S – powierzchnia elektrod;

- temperatura  $T_u$  pracy sprzęgła w warunkach ustalonych ( $P = \text{const.}$ ):

$$T_u = \frac{P}{\alpha S_s} + T_p \quad (9)$$

gdzie:

$\alpha = 125 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  – współczynnik przejmowania ciepła (wartość współczynnika  $\alpha$  może być przyjmowana z zakresu 100–150  $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ );

$S_s$  – powierzchnia zewnętrzna sprzęgła;

$T_p$  – temperatura otaczającego powietrza;

- moment obrotowy sprzęgła tarczowego składającego się z  $n$  powierzchni roboczych:

$$M = n \frac{\pi \mu_p}{2h} \omega (r_2^4 - r_1^4) + n \frac{2\pi \varepsilon \tau_0}{3} (r_2^3 - r_1^3) \quad (10)$$

gdzie:

$n$  – liczba szczelin roboczych;

$r$  – promień (rys. 4);

$\varepsilon = 0,8$  – współczynnik uwzględniający fakt, że charakterystyki reologiczne zostały wykonane za pomocą reometru;

- szybkość ścinania dla sprzęgła tarczowego:

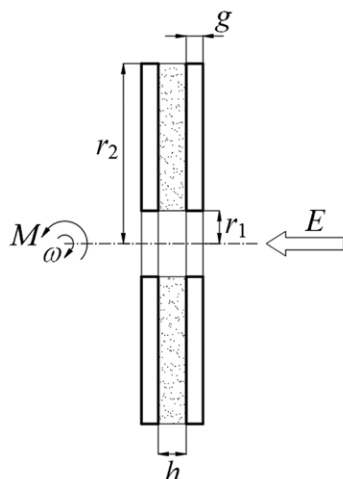
$$\dot{\gamma} = \frac{r_2 \omega}{h} \quad (11)$$

Przykładowe wyniki obliczeń podano na rys. 5.

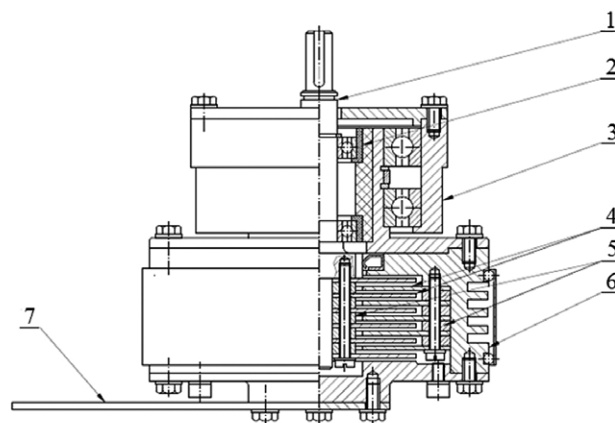
### 5. Konstrukcja tarczowego sprzęgła wiskotycznego z cieczą ER

Mając wybrane i zweryfikowane materiały konstrukcyjne oraz modele matematyczne cieczy i sprzęgła, można przystąpić do projektowania tarczowego sprzęgła wiskotycznego z cieczą ER. Jednym z możliwych zastosowań sterowanych sprzęgieł wiskotycznych z cieczą ER jest użycie ich do kontroli

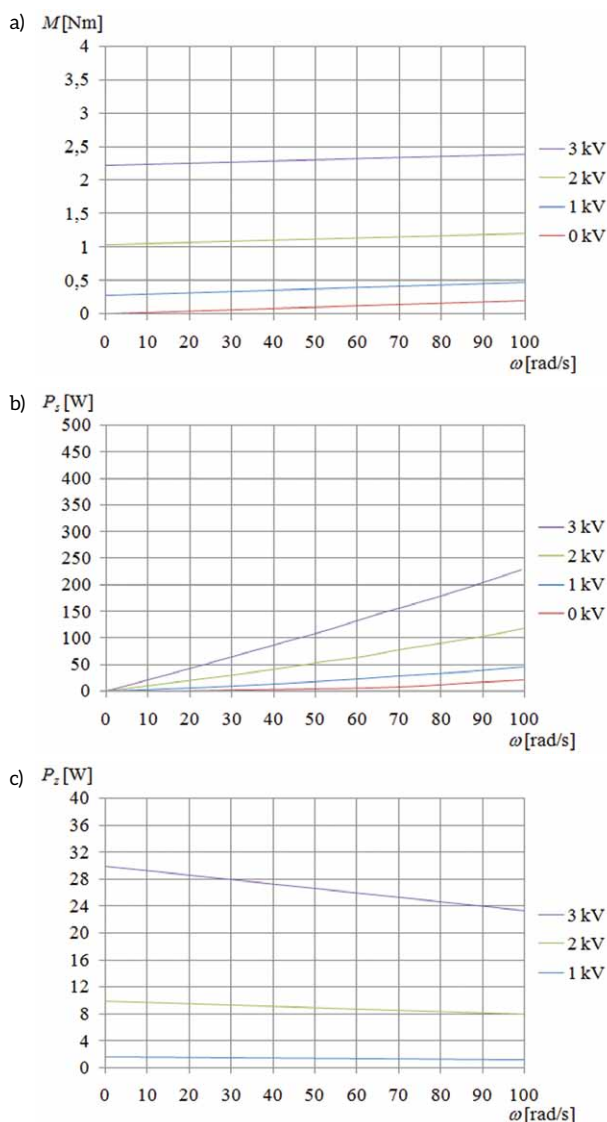




Rys. 4. Oznaczenia dla sprężła tarczowego



Rys. 6. Konstrukcja sprężła tarczowego z cieczą elektoreologiczną: 1 – wał wejściowy; 2 – tuleja izolująca wału; 3 – tuleja łożyskowa korpusu; 4 – tarcze; 5 – pierścienie dystansowe tarcz; 6 – korpus; 7 – ramię



Rys. 5. Charakterystyki sprężła dla temperatury 20°C i wilgotności względnej 30%: a – moment obrotowy  $M$  przenoszony przez sprężło w funkcji prędkości kątowej  $\omega$ ; b – moc mechaniczna  $P_s$  w funkcji prędkości kątowej  $\omega$ ; c – moc elektryczna zasilacza wysokiego napięcia  $P_z$  w funkcji prędkości kątowej  $\omega$

siły nacisku. W takim przypadku należy przewidzieć możliwość zamocowania ramienia na wale wyjściowym sprężła, które będzie użyte do wywierania nacisku na przedmiot. Stosując regulację ze sprzężeniem zwrotnym, można utrzymywać wartość przeniesionego momentu na ustalonym poziomie za pomocą zmiany wysokiego napięcia lub prędkości kątowej wału wejściowego sprężła. Przykładową konstrukcją sprężła tarczowego z cieczą elektoreologiczną, przeznaczonego do kontroli siły nacisku, przedstawiono na rysunku 6.

Sprężło wiskotyczne składa się z wału wejściowego ułożyskowanego w tulei izolującej, osadzonej w tulei łożyskowej korpusu. Przestrzeń robocza sprężła zbudowana jest z umieszczonych naprzemiennie tarcz. Tarcze zamocowane na wale wejściowym są oddzielone od siebie pierścieniami o grubości dobranej tak, by zachować stałą szczelinę roboczą, w której znajduje się ciecz ER. Do korpusu, będącego jednocześnie wałem wyjściowym, zamocowano za pomocą śrub ramię do kontroli siły nacisku.

## 6. Wnioski

Duży wybór materiałów, w tym cieczy ER, dostępny na rynku wymaga szczegółowej analizy ich parametrów pod kątem zastosowania w sterowanym sprężle wiskotycznym.

Modelowanie matematyczne i obliczenia numeryczne cieczy i sprężła pozwalają na wstępną ocenę parametrów pracy konstruowanego sprężła z cieczą elektoreologiczną i stanowią bazę do opracowania koncepcji konstrukcji sprężła.

Z uwagi na różnorodność charakterystyk oferowanych przez producentów cieczy ER ważne jest modelowanie właściwości cieczy w konkretnym rozwiązaniu konstrukcyjnym sterowanego sprężła, do którego są dedykowane.

Przedstawione wyniki obliczeń numerycznych pozwalają ocenić, że ciecz ERF3-S-I została właściwie dobrana do tarczowego sprężła wiskotycznego z cieczą ER przeznaczonego do badań kontroli siły nacisku.

## Literatura

[1] Kęsy Z.: *Sprężła z cieczami elektro- i magnetoreologicznymi*. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2008.

- [2] KĘSY Z.: *Modelowanie i badanie elektoreologicznych i magneto-reologicznych cieczy roboczych*. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom 2009.
- [3] ŁAWNICZAK A., MILECKI A.: *Ciecze elektro- i magneto-reologiczne oraz ich zastosowania w technice*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1999.
- [4] KĘSY Z., OLSZAK A.: *Badania eksperymentalne hamulca wiskotycznego z cieczą ER*. „Hydraulika i Pneumatyka” 5/2004.
- [5] KĘSY Z., OLSZAK A.: *Modelowanie sprzęgła hydrokinetycznego z cieczą magnetyczną*. „Napędy i Sterowanie” 5/2009.
- [6] OLSZAK A., KĘSY Z.: *Przegląd hamulców i sprzęgieł hydraulicznych z cieczami o sterowanych właściwościach reologicznych*. „Napędy i Sterowanie” 2/2009.
- [7] NAKAMURA T., SAGA N., NAKAZAWA M.: *Variable Viscous Control of a Homogeneous ER Fluid Device Considering its Dynamic Characteristics*. „Mechatronics” 14/2004.
- [8] NAKAMURA T., SAGA N., NAKAZAWA M.: *Impedance Control of a Single Shaft-type Clutch. Using Homogeneous Electrorheological Fluid*. „Journal of Intelligent Material and Structures” 13/2002.
- [9] CHOI S.B., HONG R.R., PARK D.W., CHEONG C.C., PARK Y.K.: *Comparison of Field-Controlled Characteristics Between ER and MR Clutches. Electro-rheological Fluids and Magneto-Rheological Suspensions*. Word Scientific Publishing. 2000.
- [10] [www.smarttec.co.uk](http://www.smarttec.co.uk)
- [11] [www.ssslabs.com](http://www.ssslabs.com)
- [12] MADEJA J.: *Kształtowanie charakterystyk sprzęgła hydrokinetycznego za pośrednictwem elektoreologicznej cieczy roboczej*. Rozprawa doktorska. Radom 2005.
- [13] CHOI S.B., CHEONG C.C., JUNG J.M., CHOI Y.T.: *Position Control of an ER Valve-Cylinder System via Neutral Network Controller*. „Mechatronics” 1(7)/1997.
- [14] [www.silikonypolskie.pl](http://www.silikonypolskie.pl)



mgr inż. Grzegorz Mędrak – doktorant, Wydział Mechaniczny Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu;

dr Karol Osowski – Wydział Mechaniczny Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu;

dr inż. Artur Olszak – Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Nowych Syntez Chemicznych, Puławy

artykuł recenzowany

reklama

reklama