

# Optymalizacja tarczowego sprzęgła wiskotycznego z cieczą elektroteologiczną

Grzegorz Mędrek, Karol Osowski, Artur Olszak

## Wprowadzenie

Sprzęgła hydrauliczne stosowane w układach napędowych maszyn można podzielić na sprzęgła wiskotyczne i hydrokinetyczne. Sprzęgło wiskotyczne składa się z części napędzającej połączonej z wałem wejściowym i części napędzanej połączonej z wałem wyjściowym. Moment obrotowy przenoszony jest w wyniku tarcia wywołanego występowaniem naprężeń stycznych w cieczy roboczej znajdującej się pomiędzy częścią napędzającą a napędzaną. Ze względu na kształt części napędzającej i napędzanej wyróżnia się dwa podstawowe rodzaje sprzęgieł wiskotycznych: cylindryczne i tarczowe.

Istotną cechą sprzęgieł hydraulicznych jest zależność momentu obrotowego od prędkości kątowej wału wejściowego sprzęgła. Zmiana wartości prędkości kątowej umożliwia sterowanie momentem obrotowym przenoszonym przez sprzęgło. Sterowanie momentem obrotowym można uzyskać także przez zmianę warunków pracy cieczy roboczej, np. poprzez zmianę temperatury, ciśnienia czy ilości cieczy w sprzęgle [1]. Obecnie nowe możliwości sterowania umożliwiają stosowanie jako cieczy roboczych cieczy „inteligentnych”, zmieniających właściwości fizyczne w obecności pól fizycznych. Wyróżnia się ciecze magnetoreologiczne reagujące na obecność pola magnetycznego i elektroteologiczne reagujące na obecność pola elektrycznego. Ze względu na strukturę ciecze te można podzielić na homogeniczne (jednorodne) i heterogeniczne (koloidy fazowe lub mieszaniny niejednorodne składające się z cząstek stałych i cieczy bazowej). Przykładowe wyniki badań form zużycia cieczy elektroteologicznej pracującej w sprzęgle hydraulicznym przedstawiono w pracy [2]. Wyniki badań wpływu cieczy elektroteologicznej na trwałość sprzęgła hydraulicznego przedstawiono w pracy [3].

Do czynników mających bezpośredni wpływ na osiągi i pracę sprzęgieł hydraulicznych z cieczami magnetoreologicznymi lub elektroteologicznymi zalicza się:

- rodzaj i właściwości reologiczne zastosowanej cieczy;
- kształt i wielkość szczeliny roboczej sprzęgła;
- kształt i wielkość samego sprzęgła;
- rodzaj prądu zasilającego (stały lub zmienny);
- temperaturę cieczy roboczej.

Procedura projektowania sprzęgieł z cieczami magnetoreologicznymi i elektroteologicznymi powinna zatem uwzględniać:

- wybór rodzaju cieczy i ustalenie jej właściwości w postaci zależności;
- określenie modelu opisującego ciecz roboczą;
- ustalenie rodzaju przepływu na podstawie kształtu i wielkości szczeliny roboczej;

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki optymalizacji tarczowego sprzęgła wiskotycznego z cieczą elektroteologiczną, przeznaczonego do chwytaka robota przemysłowego ze zmienną siłą nacisku. We wstępie dokonano krótkiej charakterystyki sprzęgieł hydraulicznych z cieczami magneto- i elektroteologicznymi. Na podstawie przeglądu literatury przeprowadzono analizę metod optymalizacji tego typu sprzęgieł. W oparciu o opracowane założenia projektowe, a także analizę proporcji wymiarów sprzęgieł tarczowych z cieczą elektroteologiczną opracowano założenia do optymalizacji. Obliczenia optymalizacyjne przeprowadzono w oparciu metodę *Monte Carlo*, stosując do tego celu własne programy obliczeniowe napisane w języku *Object Pascal*. Wyniki obliczeń optymalizacyjnych przedstawiono w postaci tabelarycznej oraz w postaci graficznej prezentacji zbiorów rozwiązań. Następnie przeprowadzono dyskusję wyników badań. Pracę zakończono wnioskami.

Słowa kluczowe: sprzęgła wiskotyczne, ciecze inteligentne, optymalizacja

**Abstract:** *The article presents the results of optimisation the viscotic disc clutch with the electrorheological fluid intended for the industrial robot gripper with variable pressure force. In the introduction, a short characterization of hydraulic clutch with magneto and electrorheological fluids was made. On the basis of the literature review, the methods of optimization of this type of clutches were analyzed. Based on the developed design assumptions as well as an dimension analysis of the disk clutches with electrorheological fluid, assumptions for optimization were developed. The optimization calculations were based on the Monte Carlo method, using for this purpose own calculation programs written in Object Pascal language. The results of the optimization calculations are presented in tabular form and in the form of graphical presentation of sets of solutions. Then, the research results were discussed. The work was completed with applications.*

- obliczenie podstawowych wymiarów sprzęgła na podstawie przyjętego modelu cieczy i modelu przepływu;
- określenie charakterystyki sprzęgła na podstawie modelu cieczy, modelu przepływu i wymiarów;
- określenie wymiarów zewnętrznych sprzęgła, sposobu łożyskowania i uszczelnienia poszczególnych części ruchomych;

reklama

**Tabela 1.** Wymiary sprzęgła przyjęte do optymalizacji

Wymiar	Wzór
Promień wewnętrzny powierzchni ciernej $r_1$ [cm]	$r_1 = 1 \times sk$
Promień zewnętrzny powierzchni ciernej $r_2$ [cm]	$r_2 = 2,25 \times sk$
Promień zewnętrzny sprzęgła $r_z$ [cm]	$r_z = r_2 + 1,75 \times sk$
Szerokość szczeliny roboczej $h$ [cm]	$h = 0,1$
Grubość tarczy wewnętrznej $g_1$ [cm]	$g_1 = 0,1 \times sk$
Grubość tarczy zewnętrznej $g_2$ [cm]	$g_2 = 0,1 \times sk$
Szerokość sprzęgła* $s_z$ [cm]	$s_z = n \times h + g_1(n - 1) + 1,25 \times sk$
Objętość sprzęgła $O$ [cm <sup>3</sup> ]	$O = \pi r_z^2 \times s_z$
Powierzchnia boczna sprzęgła $S_z$ [cm <sup>2</sup> ]	$S_z = 2\pi r_z^2 + 2\pi r_z \times s_z$

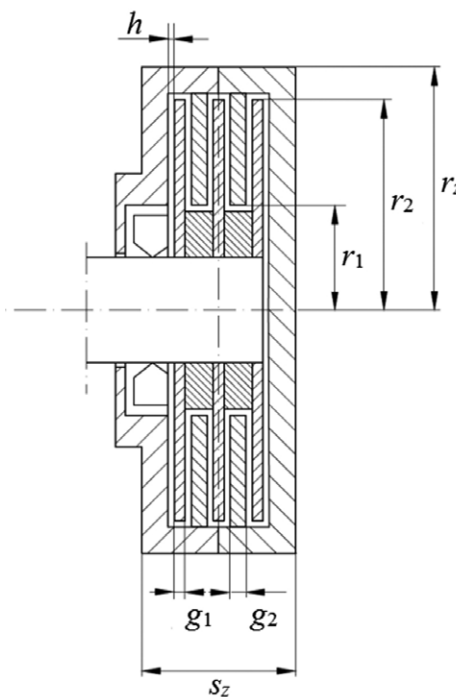
\* szerokość szczelin + szerokość tarcz + szerokość obudowy

- przyjęcie geometrii elektrod lub obwodu magnetycznego przy uwzględnieniu parametrów zasilacza wysokiego napięcia;
- przeprowadzenie obliczeń optymalizacyjnych parametrów sprzęgła;
- przeprowadzenie obliczeń cieplnych sprzęgła;
- wykonanie prototypu sprzęgła i przeprowadzenie badań stanowiskowych;
- wprowadzenie poprawek do konstrukcji na podstawie wyników badań stanowiskowych.

Ostateczne wymiary sprzęgła najczęściej określane są w oparciu o wyniki optymalizacji. Proces optymalizacji wynika najczęściej z dążenia do uzyskania maksymalnych osiągnięć sprzęgła przy minimalnych wymiarach, ciężarze czy kosztach produkcji.

W literaturze podmiotu istnieje niewiele prac poświęconych zagadnieniu optymalizacji sprzęgieł wiskotycznych z cieczami inteligentnymi, na ogół prace dotyczą optymalizacji hamulców wiskotycznych [4, 5, 6, 7] i tłumików drgań [8, 9]. Istnieje kilka prac przedstawiających optymalizację sprzęgieł wiskotycznych z cieczą magnetoreologiczną, np. [10, 11], natomiast brak jest prac dotyczących optymalizacji sprzęgieł wiskotycznych z cieczą elektroteoreologiczną. W obydwu przypadkach prowadzonej optymalizacji sprzęgieł wiskotycznych z cieczą magnetoreologiczną [10, 11] jako funkcję celu przyjęto maksymalny moment obrotowy przenoszony przez sprzęgło. Poszukiwanie maksimum funkcji realizowano w oparciu o analizę wyników symulacji komputerowej *FEM*. Za zmienne decyzyjne przyjęto: wymiary liniowe opisujące kształt szczeliny roboczej, wymiary liniowe opisujące wielkość i usytuowanie cewki elektromagnetycznej [10], promień płytki [11]. Ze względu na postać funkcji celu można sądzić, że w obydwu przypadkach realizowano zadanie optymalizacji jednokryterialnej.

W artykule przedstawiono wyniki optymalizacji wiskotycznego sprzęgła tarczowego z cieczą elektroteoreologiczną, przeznaczonego do chwytaka robota przemysłowego ze zmienną siłą nacisku. Obliczenia przeprowadzono za pomocą metody *Monte Carlo*, wykorzystując generator liczb losowych zaimplementowany w procedurach języka *Object Pascal*.



**Rys. 1.** Wybrane parametry geometrii sprzęgła

### 1. Założenia do optymalizacji

Na podstawie przyjętych założeń projektowych, a także analizy proporcji wymiarów sprzęgieł tarczowych z cieczami ER dostępnych w literaturze przyjęto, że gabaryty sprzęgła będą określone z wykorzystaniem skalowania. Rozpatrzone wymiary sprzęgła przedstawiono na rys. 1 (dla przykładu przyjęto liczbę szczelin roboczych  $n = 5$ ), a ich wartości opisane z wykorzystaniem współczynnika skali  $sk$  zestawiono w tabeli 1.

Do zastosowania w sprzęgle wytypowano ciecz ERF3-S-I, ze względu na bardziej korzystny, niemal liniowy przy wyższych szybkościach ścinania, przebieg zależności  $\tau = f(\dot{\gamma})$ . Ciecz ta została opracowana i wyprodukowana w Smart Structures and Systems Laboratory, Inha University, South Korea.

Podczas optymalizacji prowadzono obliczenia: momentu obrotowego przenoszonego przez sprzęgło  $M$ , mocy sprzęgła  $P$ , objętości sprzęgła  $O$ , temperatury zewnętrznej sprzęgła  $T_z$  w stanie ustalonym (przy stałej mocy  $P$ ), przyspieszenia dośrodkowego  $a_d$ , w oparciu o wzory:

$$\begin{aligned}
 M &= n \frac{\pi \mu_p}{2h} \omega (r_2^4 - r_1^4) + n \frac{2\pi \tau_0}{3} (r_2^3 - r_1^3) \\
 P &= n \frac{\pi \mu_p}{2h} \omega^2 (r_2^4 - r_1^4) + n \frac{2\pi \tau_0}{3} \omega (r_2^3 - r_1^3) \\
 O &= \pi r_z^2 s_z \\
 a_d &= \omega^2 r_z \\
 T_z &= \frac{P}{\alpha S_z} + T_o \\
 i_c &= 10 \cdot n \cdot i_g \cdot S
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

gdzie:

$T_o$  – temperatura otoczenia;

$S$  – powierzchnia boczna elektrody.

Przyjęto, że wielkości opisane wzorami (1) są wskaźnikami konstrukcyjnymi sprzęgła, przedstawiającymi jego charakterystyczne cechy, obejmujące osiągi ( $P, M$ ), gabaryty ( $O$ ) i warunki pracy ( $T_o, T_z, a_d$ ).

## 2. Obliczenia optymalizacyjne

Po wybraniu cieczy elektroteologicznej i ustaleniu wartości wysokiego napięcia  $U$ , temperatury otoczenia  $T_o$  oraz wilgotności względnej  $w$ , określone zostają wartości  $\mu_p, \tau_0$  oraz  $i_g$ , tak więc zmianę wielkości opisanych za pomocą wzorów (1) można uzyskać przez zmianę parametrów, takich jak: wymiary liniowe  $r$  (zależne od współczynnika skali  $sk$ ), liczba szczelin roboczych  $n$ , prędkość kątowna sprzęgła  $\omega$ . W tabeli 2 przedstawiono w sposób symboliczny wpływ tych parametrów na wskaźniki konstrukcyjne sprzęgła, przy czym podane liczby oznaczają wykładniki w zależnościach funkcyjnych. W ostatniej kolumnie tabeli 2 wskazano wymagania stawiane sprzęgłom hydraulicznym pracującym w układach napędowych maszyn. Zgodnie z tymi wymaganiami celowe jest, by sprzęgło przenosiło duży moment obrotowy przy małych gabarytach, pracując w temperaturze nieodlegającej znacznie od temperatury otoczenia.

Jak wynika z tabeli 2, uzyskanie optymalnych wartości wskaźników konstrukcyjnych podczas przeprowadzania optymalizacji wymagało uwzględnienia kilku kryteriów ich oceny, w tym kryteriów sprzecznych. Dla przykładu, uzyskanie dużego momentu obrotowego  $M$  wymaga zastosowania silnika napędowego o dużej mocy  $P$ , co powoduje wzrost temperatury  $T_z$ , która powinna być utrzymywana na możliwie niskim poziomie, z kolei uzyskanie dużego momentu obrotowego  $M$ , w wyniku zastosowania dużej prędkości kątowej  $\omega$ , powoduje wzrost mocy zamienianej na ciepło, a tym samym wzrost temperatury  $T_z$  oraz wzrost przyspieszenia dośrodkowego  $a_d$ , oddziałującego negatywnie na przepływ cieczy elektroteologicznej w szczelinach roboczych sprzęgła, co przyczynia się do spadku momentu obrotowego przenieszonego przez sprzęgło. Była to więc optymalizacja wielokryterialna, podczas której należy przeprowadzić poszukiwania rozwiązań optymalnych w sensie Pareto, czyli poszukiwać grupy rozwiązań niezdominowanych, tworzących front Pareto, a następnie przejść do optymalizacji

reklama

Tabela 2. Zależność wskaźników konstrukcyjnych sprzęgła od parametrów

	Wskaźniki konstrukcyjne						
	$M$	$P$	$V$	$a_d$	$T_z$	$M/O$	$T_z/T$
Zależność od $r$	4	4	3	1	2	1	2
Zależność od $\omega$	1	2	0	2	2	1	2
Zależność od $\omega \times r$	5	6	3	3	4	2	4
Zależność od $n$	1	1	1	0	1	0	1
Wymagania	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↓

jednokryterialnej, by z grupy rozwiązań niezdominowanych wybrać jedno rozwiązanie.

W przeprowadzonych obliczeniach optymalizacyjnych sprzęgła zastosowano dwa znane sposoby sprowadzenia optymalizacji wielokryterialnej do optymalizacji jednokryterialnej przez ustalenie:

- pojedynczego kryterium i przekształcenie reszty kryteriów w ograniczenia;
- sumy kilku kryteriów z wykorzystaniem metody sumy ważonej zgodnie z zależnością (2).

$$F_c = \sum_{i=1}^m w_i \cdot F_{ci} \quad (2)$$

gdzie:

$m$  – liczba kryteriów;

$w_i \in [0,1]$  – wagi kryteriów spełniające warunek  $\sum_{i=1}^m w_i = 1$ ;

$F_{ci}$  – kryteria cząstkowe.

Optymalizację prowadzono w oparciu o metodę optymalizacji *Monte Carlo*, wykorzystując generator liczb losowych zaimplementowany w procedurach obliczeniowych napisanych w języku *Object Pascal*.

### 2.1. Pojedyncze kryterium optymalizacji

Jako minimalizowaną funkcję celu  $F_c$  przyjęto:

$$F_c = \frac{T_z}{T} \cdot \frac{M}{O} \quad (3)$$

Stosunek  $T_z/T$  powinien uzyskiwać jak najmniejsze wartości, tak by ograniczyć zmiany temperatury, a tym samym jej wpływ na właściwości cieczy ER. Natomiast stosunek  $M/O$  powinien być jak największy, by otrzymać jak największy moment obrotowy  $M$  z konstrukcji o jak najmniejszej objętości  $O$ . Jak wynika z tabeli 2, stosunek  $T_z/T$  – przy równoczesnej zmianie wymiaru liniowego  $r$  oraz  $\omega$  – rośnie do 4 potęgi, natomiast stosunek  $M/O$  rośnie do 2 potęgi.

Minimalizowanie funkcji celu przeprowadzono przez poszukiwanie takich wartości skali  $sk$  oraz prędkości kątowej  $\omega$ , przy ustalonych wartościach  $n$ , dla których temperatura  $T_z$  byłaby możliwie niska przy możliwie dużym wykorzystaniu gabarytów konstrukcji. Przyjęto, że ograniczone zostaną wartości mocy  $P$ , przyspieszenia dośrodkowego  $a_d$  oraz prądu  $i_c$ .

Problem optymalizacji wielokryterialnej został sprowadzony do zadania minimalizacji funkcji:

$$F_c = \frac{T_z}{T} \cdot \frac{M}{O} \quad (4)$$

dla zmiennych decyzyjnych z zakresów  $1 \leq sk \leq 3,5$ ;  $30 \leq \omega \leq 100$  rad/s i ograniczeniach  $P \leq 500$  W;  $a_d < 300$  rad/s<sup>2</sup>;  $i_c < 100$  mA.

W tabeli 3 przedstawiono rezultaty obliczeń optymalizacyjnych, opartych o wzór (4), przeprowadzonych z użyciem własnych programów obliczeniowych. W trakcie obliczeń numerycznych wykonywano 2500 losowań. W tabeli tej

**Tabela 3.** Wyniki obliczeń optymalizacyjnych,  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ,  $U = 3$  kV,  $n = 12$ ,  $w = 30\%$

$\omega$ [rad/s]	$sk$ [-]	$T$ [ $^\circ\text{C}$ ]	$O/M$ [ $\text{cm}^3/\text{Nm}$ ]
31	3,449	28,2	804
10	3,499	21,8	1067
20	3,499	24,6	918
30	3,498	28,1	806
40	3,384	31,7	731
50	2,865	32,5	730
60	2,504	33,3	730
70	2,237	341	731
80	2,030	34,8	732
90	1,864	35,4	734
100	1,728	36,0	735

**Tabela 4.** Współczynniki występujące w funkcji celu

Oznaczenie	Wartość	Uwagi
$w_1$	0,5	Założono, że kryteria cząstkowe są tak samo ważne
$w_2$	0,5	
$T_z$	$30^\circ\text{C}$	Przyrost temperatury o $10^\circ\text{C}$ przy $T_0 = 20^\circ\text{C}$
$(O/M)_z$	$1000 \text{ cm}^3/\text{Nm}$	Dla rzeczywistych konstrukcji sprzęgieł $O/M = 100 \div 4000 \text{ cm}^3/\text{Nm}$

w pierwszej kolumnie przedstawiono wynik optymalny, dodatkowo w pozostałych kolumnach cząstkowe wyniki otrzymane dla ustalonych wartości prędkości kątowej  $\omega = 10 \div 100$  rad/s.

### 2.2. Suma ważona kilku kryteriów optymalizacji

Jako minimalizowaną funkcję celu  $F_c$  przyjęto:

$$F_c = w_1 \cdot T_z / T_r - w_2 \cdot \frac{O}{M} / \left( \frac{O}{M} \right)_r \quad (5)$$

gdzie indeksem  $r$  oznaczono wartości referencyjne kryteriów, (tabela 4).

Wielkości referencyjne podane w tabeli 4 można interpretować w taki sposób, że temperatura  $T_z$  nie powinna być większa niż  $30^\circ\text{C}$ , a stosunek  $O/M$  powinien być mniejszy niż  $1000 \text{ cm}^3/\text{Nm}$ .

Minimalizowanie funkcji celu przeprowadzono dwoma sposobami przy:

- $n = \text{const.}$ ;
- $n = \text{var.}$

Dla  $n = \text{const.}$  problem optymalizacji wielokryterialnej został sprowadzony do zadania minimalizacji funkcji:

$$F_c = w_1 \cdot T_z / T_r - w_2 \cdot \frac{O}{M} / \left( \frac{O}{M} \right)_r \quad (6)$$

dla zmiennych decyzyjnych z zakresów  $1 \leq sk \leq 3,5$ ;  $30 \leq \omega \leq 60$  rad/s i ograniczeniach  $P \leq 500$  W;  $a_d < 300$  rad/s<sup>2</sup>;  $i_c < 100$  mA.

**Tabela 5.** Wyniki obliczeń optymalizacyjnych,  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ,  $U = 3 \text{ kV}$ ,  $n = 12$ ,  $w = 30\%$

$\omega$ [rad/s]	32	41	45	49	58
$sk$ [-]	2,002	2,286	2,157	1,992	1,747
$T$ [ $^\circ\text{C}$ ]	27,1	26,8	26,9	27,2	27,5
$O/M$ [ $\text{cm}^3/\text{Nm}$ ]	903	892	897	905	915
$r_1$ [cm]	2,01	2,29	2,16	1,99	1,75
$r_2$ [cm]	4,51	5,15	4,85	4,48	3,93
$r_z$ [cm]	8,02	9,15	8,63	7,97	6,98
$s_z$ [cm]	5,91	6,57	6,27	5,88	5,30
$F_c$	$-3,19 \times 10^{-7}$	$1,91 \times 10^{-7}$	$-2,97 \times 10^{-8}$	$3,81 \times 10^{-7}$	$-4,08 \times 10^{-8}$

W trakcie obliczeń numerycznych wykonywano wiele milionów losowań, zależnie od czasu trwania obliczeń. Szacunkowo w ciągu 1 sekundy funkcja celu była obliczana 1000 razy. W tabeli 5 przedstawiono rezultaty obliczeń optymalizacyjnych, opartych o wzór (6), przeprowadzonych z użyciem własnych programów obliczeniowych. Dodatkowo w tabeli 6 przedstawiono wynik optymalizacji, wyniki otrzymane dla ustalonych wartości prędkości kątowej  $\omega$ .

Dla  $n = \text{var.}$  problem optymalizacji wielokryterialnej został sprowadzony do zadania minimalizacji funkcji:

**Tabela 6.** Wyniki obliczeń optymalizacyjnych,  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ,  $U = 3 \text{ kV}$ ,  $n = 12$ ,  $w = 30\%$

$\omega$ [rad/s]	50	50	50	50	50
$sk$ [-]	1,927	1,975	1,975	1,976	1,976
$T$ [ $^\circ\text{C}$ ]	27,1	27,1	27,1	27,1	27,1
$O/M$ [ $\text{cm}^3/\text{Nm}$ ]	904	904	904	904	904
$r_1$ [cm]	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98
$r_2$ [cm]	4,45	4,45	4,45	4,45	4,45
$r_z$ [cm]	7,90	7,90	7,90	7,90	7,90
$s_z$ [cm]	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84
$F_c$	$-1,92 \times 10^{-7}$	$2,56 \times 10^{-7}$	$1,72 \times 10^{-8}$	$-2,49 \times 10^{-9}$	$7,29 \times 10^{-8}$

$$F_c = w_1 \cdot T_z / T_r - w_2 \cdot \frac{O}{M} \left( \frac{O}{M} \right)_r \quad (7)$$

dla zmiennych decyzyjnych z zakresów  $1 \leq sk \leq 3,5$ ;  $30 \leq \omega \leq 60 \text{ rad/s}$ ;  $5 \leq n \leq 13$ ; przy ograniczeniach  $P \leq 500 \text{ W}$ ;  $a_d < 300 \text{ rad/s}^2$ ;  $i_c < 100 \text{ mA}$ .

W tabeli 7 przedstawiono rezultaty obliczeń optymalizacyjnych, opartych o wzór (7), przeprowadzonych z użyciem własnych programów komputerowych dla  $\omega = 50 \text{ rad/s}$ .

reklama

reklama

**Tabela 7.** Wyniki obliczeń optymalizacyjnych,  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ,  $U = 3\text{ kV}$ ,  $n = 5 \div 13$ ,  $w = 30\%$

$\omega$ [rad/s]	50	50	50	50	50
$sk$ [-]	2,086	2,222	2,086	1,884	1,975
$T$ [ $^\circ\text{C}$ ]	27,2	27,4	27,3	27,0	27,1
$O/M$ [ $\text{cm}^3/\text{Nm}$ ]	908	913	908	901	904
$r_1$ [cm]	2,09	2,22	2,09	1,88	1,98
$r_2$ [cm]	4,69	5,00	4,69	4,24	4,45
$r_z$ [cm]	8,35	8,89	8,35	7,53	7,90
$s_z$ [cm]	6,41	6,42	5,79	5,63	5,84
$F_c$	$3,99 \times 10^{-7}$	$7,53 \times 10^{-7}$	$4,26 \times 10^{-7}$	$3,07 \times 10^{-7}$	$8,09 \times 10^{-9}$

### 3. Graficzna prezentacja zbiorów rozwiązań

Wyniki obliczeń optymalizacyjnych w postaci graficznej prezentacji zbiorów rozwiązań przedstawiono na rys. 2–4.

Na rys. 2 przedstawiono zależność stosunku  $O/M$  od temperatury  $T_z$  obliczonej dla współczynnika skali  $sk$  zmieniającego się w zakresie od 1 do 3,5 dla różnych wartości prędkości kątowej  $\omega$ .

Na rys. 3 przedstawiono zbiory wartości stosunku  $O/M$  zależnie od temperatury  $T_z$ , obliczone dla współczynnika skali  $sk$ , zmieniającego się w zakresie od 1 do 3,5 dla wartości prędkości kątowej z zakresu  $0 < \omega < 100\text{ rad/s}$  oraz liczby szczelin roboczych  $n$  z zakresu  $5 < n < 13$  dla  $U = 3\text{ kV}$ . Wylosowanym trzem wartościom  $sk$ ,  $\omega$ ,  $n$  odpowiada jeden punkt na wykresie o osiach: rzędnej  $O/M$  oraz odciętej  $T_z$ .

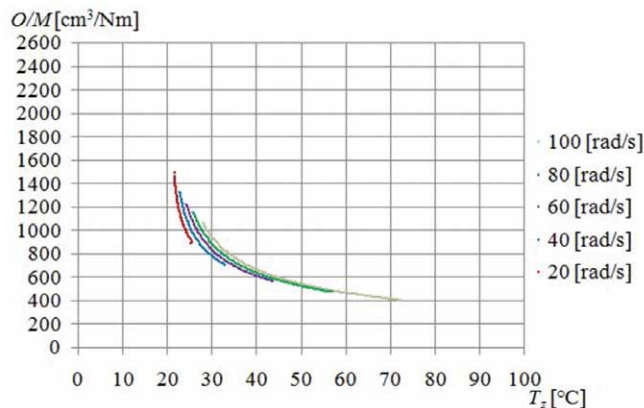
Na rys. 4 przedstawiono zbiory wartości stosunku  $O/M$  zależnie od temperatury  $T_z$ , podobnie jak na rys. 3, ale obliczone dla wybranych prędkości kątowych  $\omega$ .

### 4. Dyskusja wyników badań

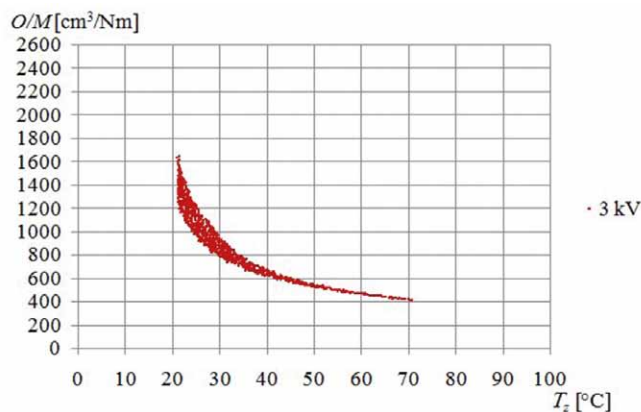
Przy zastosowaniu jednego kryterium optymalizacji, jak wynika z tabeli 3, najlepszy wynik dla ustalonych parametrów  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ,  $U = 3\text{ kV}$ ,  $n = 12$  uzyskano dla prędkości kątowej  $\omega = 31\text{ rad/s}$ . Najniższa temperatura  $T_z$  występuje dla najmniejszej prędkości kątowej i ze wzrostem tej prędkości rośnie, natomiast najkorzystniejszą, najniższą wartość stosunku  $O/M$  uzyskuje się około prędkości kątowej  $\omega = 50\text{ rad/s}$ , przy niewielkim, kilkustopniowym wzroście temperatury  $T_z$ .

Przy zastosowaniu sumy ważonej dwóch kryteriów optymalizacji, jak wynika z tabeli 5, najlepszy wynik dla tych samych parametrów uzyskano dla prędkości kątowej  $\omega = 45\text{ rad/s}$ . Z tych powodów oraz biorąc pod uwagę, że wyższe prędkości kątowe są korzystne ze względu na większe wartości momentu obrotowego  $M$ , do dalszych obliczeń przyjęto prędkość kątową  $\omega = 50\text{ rad/s}$ . Jak wynika z tabeli 6, najlepszy wynik dla  $n = 12$  uzyskano dla  $sk = 1,976$ , co potwierdzają dane zawarte w tabeli 7, w której można zauważyć, że najlepszy wynik otrzymano dla  $n = 12$  oraz  $sk = 1,975$ .

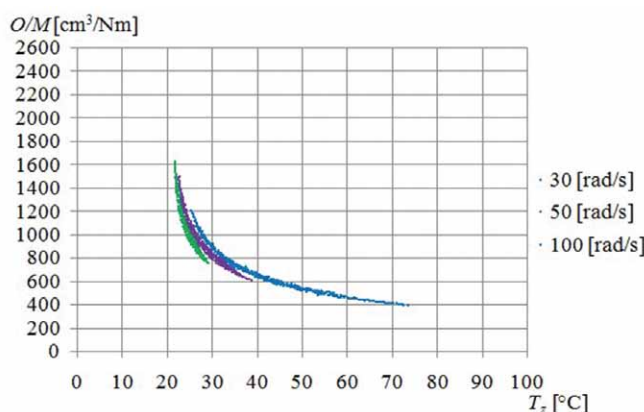
Jak wynika z rys. 2, większe wartości prędkości kątowej w powodują spadek wartości stosunku  $O/M$  i zwiększanie wartości temperatury  $T_z$  i zakresu jej zmian. Na podstawie rys. 2, 3 oraz 4 należy sądzić, iż zbiór możliwych wartości stosunku  $O/M$  powstaje przez „rozmycie” hiperbolicznej zależności  $O/M$  od  $T_z$ .



**Rys. 2.** Zależność stosunku  $O/M$  od temperatury  $T_z$  dla  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ,  $U = 3\text{ kV}$ ,  $n = 12$ ,  $w = 30\%$



**Rys. 3.** Zbiory wartości stosunku  $O/M$  w zależności od temperatury  $T_z$  dla  $0 < \omega < 100\text{ rad/s}$ ,  $5 < n < 13$ ,  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ,  $U = 3\text{ kV}$ ,  $w = 30\%$



**Rys. 4.** Zbiory wartości stosunku  $O/M$  w zależności od temperatury  $T_z$  dla  $0 < \omega < 100\text{ rad/s}$ ,  $n = 12$ ,  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ,  $U = 0, 1, 2, 3\text{ kV}$ ,  $w = 30\%$


### 5. Wnioski

1. Jak wynika z przeglądu literatury, brak jest prac dotyczących optymalizacji sprzęgieł wiskotycznych z cieczą elektreoleologiczną, stąd przedstawione wyniki badań stanowią *novum* zagadnienia.

2. Otrzymane wyniki obliczeń potwierdzają zasadność prowadzenia optymalizacji oraz uwzględniania jej w procedurze projektowania sprzęgła z cieczą elektroreologiczną.
3. Z przeprowadzonej optymalizacji wynika, że zastosowana metoda *Monte Carlo* oraz własne programy komputerowe napisane w języku *Object Pascal* mogą być stosowane zarówno w optymalizacji jednokryterialnej, jak i wielokryterialnej.

## Literatura

- [1] OLSZAK A., OSOWSKI K., KĘSY A., KĘSY Z.: *Experimental Researches of Hydraulic Clutches with Smart Fluids*. „International Review of Mechanical Engineering” Vol. 10, No. 6, 2016.
- [2] ZIĄBSKA E., DUCHOWSKI J., OLSZAK A., OSOWSKI K., KĘSY A., KĘSY Z., CHOI S.B.: *Wear forms of heterogeneous electro-rheological fluids working in a hydraulic clutch system*. „Smart Materials and Structures” Vol. 26, No. 9, 2017.
- [3] OLSZAK A., ZIĄBSKA E., OSOWSKI K., KĘSY A., KĘSY Z.: *Durability of hydraulic clutches filled with electrorheological fluids*. „Technical Transactions. Mechanics” 5-M, 2016.
- [4] PARK E.J., FALCÃO DA LUZ L., SULEMAN A.: *Multidisciplinary design optimization of an automotive magnetorheological brake design*. „Computers & Structures” Vol. 86, Issue 3–5, 2008.
- [5] ASSADSANGABI B., DANESHMAND F., VAHDATI N., EGHTEHAD M., BAZARGAN-LARI Y.: *Optimization and design of disk-type MR brakes*. „International Journal of Automotive Technology” Vol. 12, Issue 6, 2011.
- [6] EROL O., GUROCAK H.: *Interactive design optimization of magnetorheological-brake actuators using the Taguchi method*. „Smart Materials and Structures” Vol. 20, No. 10, 2011.
- [7] NGUYEN Q.H., CHOI S.B.: *Optimal design of an automotive magnetorheological brake considering geometric dimensions and zero-field friction heat*. „Smart Materials and Structures” Vol. 19, No. 11, 2010.
- [8] NGUYEN Q. H., CHOI S.B.: *Optimal design of a vehicle magnetorheological damper considering the damping force and dynamic range*. „Smart Materials and Structures” Vol. 18, No. 1, 2008.
- [9] GAO F., LIU Y. N., LIAO W. H.: *Optimal design of a magnetorheological damper used in smart prosthetic knees*. „Smart Materials and Structures” Vol. 26, No. 3, 2017.
- [10] BUCCHI F., FORTE P., FRENDO F.: *Geometry optimization of a magnetorheological clutch operated by coils*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, Vol. 231, Issue 1–2, 2017.
- [11] HORVÁTH P., TÖRÖCSIK D.: *Optimization of A Disc-Type Magneto-Rheological Clutch*. Scientific Proceedings Faculty of Mechanical Engineering STU in Bratislava, Vol. 19, Issue 1, 2011.

 mgr inż. Grzegorz Mędrak - Wydział Mechaniczny, Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu; dr Karol Osowski - Wydział Mechaniczny, Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu; dr inż. Artur Olszak - Wydział Przygotowania i Nadzoru Technicznego, Instytut Nowych Syntezy Chemicznych

artykuł recenzowany