

# Porównanie sprzęgła magnetoreologicznego 1- i 2-tarczowego z punktu widzenia wymiarów gabarytowych, współczynników wykorzystania materiałów czynnych, poboru mocy elektrycznej oraz rozkładu przestrzennego temperatury

**Abstract.** The article is devoted to magnetorheological clutches and focuses on the problem of a comprehensive comparison of a 1- and 2-disc design solution from the point of view of various criteria: mass, volume, characteristic factors  $T_c/m$  and  $T_c/V$  (where:  $T_c$  - clutch torque,  $m$  - clutch mass,  $V$  - clutch volume), electrical power consumption (necessary to maintain the clutching state), copper losses in the excitation coil and the maximum temperature increase of the magnetorheological fluid in the clutch working region. The comparison was made on the example of 6 designed clutches for a selected sequence of clutching torques:  $T_c = 20, 35$  and  $50$  Nm. It was indicated that the recommended constructional solution is a 2-disc clutch. (Comparison of the magnetorheological 1- and 2-disc clutch in terms of overall dimensions, coefficients of the use of active materials, electric power consumption and spatial temperature distribution)

**Streszczenie.** Artykuł jest poświęcony sprzęgłom magnetoreologicznym i w centrum uwagi stawia problem kompleksowego porównania rozwiązania konstrukcyjnego 1- i 2- tarczowego z punktu widzenia różnych kryteriów: masy, objętości, charakterystycznych współczynników  $T_c/m$  i  $T_c/V$  (gdzie:  $T_c$  - moment sprzęgający,  $m$  - masa sprzęgła,  $V$  - objętość sprzęgła), poboru mocy elektrycznej (niezbędnej do podtrzymania stanu sprzężenia), strat w miedzi cewki wzbudzenia oraz maksymalnego wzrostu temperatury cieczy magnetoreologicznej w strefie roboczej sprzęgła. Porównania dokonano na przykładzie 6 zaprojektowanych sprzęgieł dla wybranego ciągu momentów sprzęgających:  $T_c = 20, 35$  i  $50$  Nm. Wskazano, że rekomendowanym rozwiązaniem konstrukcyjnym jest sprzęgło 2-tarczowe.

**Keywords:** MR fluid, MR multi-disc clutch; industrial continuous duty drive systems; thermal clutch numerical calculations; electrical power consumption of MR clutches; MR clutch copper losses.

**Słowa kluczowe:** płyn MR, sprzęgło wielotarczowe MR; przemysłowe systemy napędowe do pracy ciągłej; obliczenia numeryczne sprzęgła termicznego; pobór mocy elektrycznej sprzęgieł MR; Straty miedzi sprzęgła MR

## Wprowadzenie

Ostatnio obserwuje się systematyczny wzrost zainteresowania zastosowaniami płynów magnetoreologicznych o lepkości kontrolowanej sygnałami magnetycznymi lub elektrycznymi; płyny te są stosowane w różnego rodzaju urządzeniach np. w robotach [1], urządzeniach do badań wytrzymałościowych [2], hamulcach liniowo-obrotowych [3], tłumikach liniowych [4] czy też w podnośnikach i windach [5]. Płyny magnetoreologiczne wydają się być szczególnie przydatne w układach napędowych samochodów i motocykli, gdzie są wykorzystywane w budowie hamulców i sprzęgieł [6, 7]. Spodziewany jest również wzrost zainteresowania wykorzystaniem płynów magnetoreologicznych w sprzęgłach przemysłowych układów napędowych, przeznaczonych do pracy ciągłej ze względu na łatwość sprzęgania i rozsprzęgania maszyny napędzającej i maszyny napędzanej w trakcie pracy oraz możliwość automatycznego zabezpieczenia się przed przeciążeniami.

Artykuł poświęcony jest sprzęgłom magnetoreologicznym tarczowym i stawia sobie za cel odpowiedź na pytanie, czy bardziej korzystny jest wybór rozwiązania konstrukcyjnego 1-tarczowego czy też rozwiązania konstrukcyjnego 2-tarczowego (nazwa: sprzęgło N-tarczowe odnosi się do liczby tarcz części pierwotnej czyli części sprzęgła znajdującej się po stronie maszyny napędzającej). Postanowiono dokonać szerokiego porównania sprzęgieł 1-tarczowych i 2-tarczowych z różnych punktów widzenia. W kolejnych rozdziałach wskazano na istotne zalety, ale też i na możliwe niedogodności rozwiązań konstrukcyjnych sprzęgieł 1-tarczowych i 2-tarczowych.

## Ogólna charakterystyka budowy magnetoreologicznego sprzęgła 1-tarczowego i 2-tarczowego

Na rysunku 1 przedstawiono widoki ogólne sprzęgła magnetoreologicznego 1-tarczowego (rys. 1a) oraz sprzęgła magnetoreologicznego 2-tarczowego (rys. 1b), a na kolejnych rysunkach - widoki ich części pierwotnych (rys. 1c,d) oraz części wtórnych (rys. 1e,f).

Wprowadzone nazewnictwo poszczególnych elementów

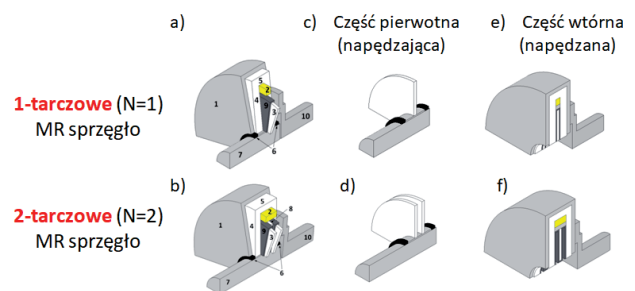


Fig. 1. Magnetoreologiczne sprzęgło 1-tarczowe i 2-tarczowe oraz jego główne części: a,b) widok części pierwotnych, c,d) widok części wtórnych, e,f) widok ogólny sprzęgieł.

sprzęgieł scharakteryzowano na przykładzie magnetoreologicznego sprzęgła 2-tarczowego na rys. 2. Jego przekrój wraz z oznaczeniami istotnych wymiarów geometrycznych został przedstawiony na kolejnym rysunku (rys. 3).

Warto podkreślić, że indeks 1 odnosi się do wymiarów geometrycznych związanych z częścią pierwotną, zaś indeks 2 - do wymiarów geometrycznych związanych z częścią wtórną. Indeks  $i$  (ang. *internal*) oznacza wymiary wewnętrzne, zaś indeks  $e$  (ang. *external*) - wymiary zewnętrzne. Wymiary geometryczne związane z cewką wzbudzenia wyróżniono indeksem  $c$  (ang. *coil*).

Uwidocznione na rysunku 3 wymiary geometryczne to:  $r_s$  - promień wału,  $d$  - grubość tarczy (jednakowa dla wszystkich tarcz),  $g$  - grubość warstwy cieczy magnetoreologicznej (jednakowa dla wszystkich warstw i kanałów bocznych),  $r_{1i}$  - wewnętrzny promień tarczy części pierwotnej,  $r_{1e}$  - zewnętrzny promień tarczy części pierwotnej,  $r_{2i}$  - wewnętrzny promień tarczy części wtórnej,  $r_{2e}$  - zewnętrzny promień tarczy części wtórnej,  $r_{ci}$  - wewnętrzny promień cewki wzbudzenia,  $r_{ce}$  - zewnętrzny promień cewki wzbudzenia,  $L_c$  - długość cewki wzbudzenia (równa długości strefy roboczej sprzęgła),  $Y$  - grubość pokrywy (równa grubości cylindra),  $z$  - liczba zwojów cewki wzbudzenia,  $r_e$  - zewnętrzny promień sprzęgła (wymiar gabarytowy

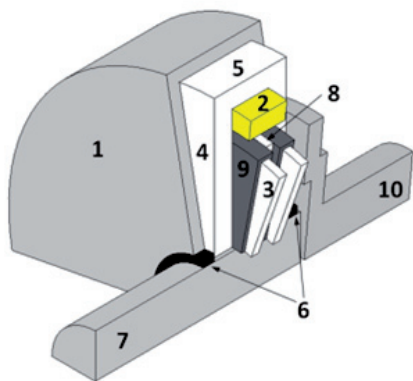


Fig. 2. Nazewnictwo elementów konstrukcyjnych sprzęgła na przykładzie magnetoreologicznego sprzęgła 2-tarczowego: 1- obudowa sprzęgła (stal niemagnetyczna), 2 - cewka wzbudzenia, 3 - tarcze części pierwotnej, 4 - pokrywy, 5 - cylinder, 6 - łożyska, 7 - wał części pierwotnej (stal niemagnetyczna), 8 - tarcze części wtórnej, 9 - płyn magnetoreologiczny, 10 - wał części wtórnej (stal niemagnetyczna).

bez obudowy),  $L_e$  - zewnętrzna długość sprzęgła (wymiar gabarytowy bez obudowy).

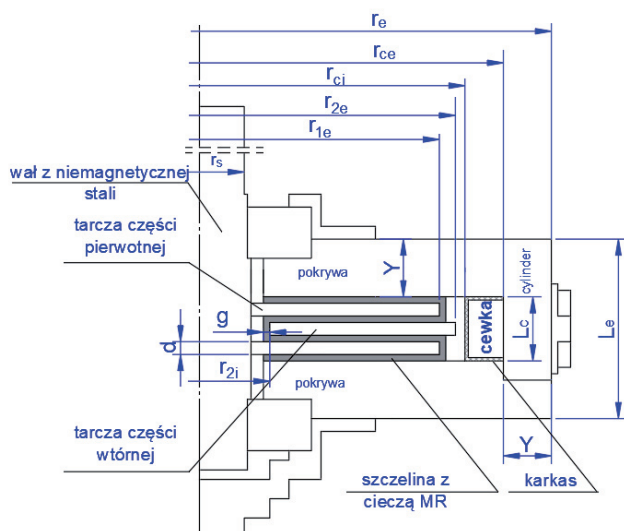


Fig. 3. Wymiarowanie magnetoreologicznego sprzęgła wielotarczowego na przykładzie sprzęgła 2-tarczowego (opis wymiarów geometrycznych w tekście).

### Wymiary geometryczne i dane nawojowe porównywanych magnetoreologicznych sprzęgieł 1-tarczowych i 2-tarczowych dla wybranego ciągu momentów sprzęgających

Dla wybranego ciągu momentów sprzęgających:  $T=20, 35, 50$  Nm zaprojektowano sprzęgła magnetoreologiczne o konstrukcji 1-tarczowej ( $N=1$ ) oraz konstrukcji 2-tarczowej ( $N=2$ ) na podstawie zintegrowanej analityczno-polowej metody projektowania, opisanej szczegółowo krok po kroku w [9].

Aby zaprojektowane sprzęgła magnetoreologiczne mogły być porównywane, muszą się charakteryzować tym samym wykorzystaniem materiałów czynnych: **stali magnetycznej** (żelaza) i **cieczy magnetoreologicznej**, tworzących obwód magnetyczny sprzęgła oraz **miedzi**, z której wykonana jest cewka wzbudzenia (rys. 4, 5). Jednakowe wykorzystanie stali magnetycznej i cieczy magnetoreologicznej oznacza, że wszystkie zaprojektowane sprzęgła muszą mieć jednakową średnią wartość indukcji magnetycznej w strefie

roboczej sprzęgła; w przypadku sprzęgła 1-tarczowego strefa robocza jest złożona z 1 dysku części pierwotnej i 2 warstw cieczy magnetoreologicznej, zaś w przypadku sprzęgła 2-tarczowego - z 2 tarcz części pierwotnej, 1 tarczy części wtórnej i 4 warstw cieczy magnetoreologicznej. Strefy robocze oraz punkty, odpowiadające umownej średniej wartości indukcji magnetycznej dla sprzęgła 1- i 2-tarczowego, zaznaczono kolorem czerwonym na rys. 4 i rys. 5.

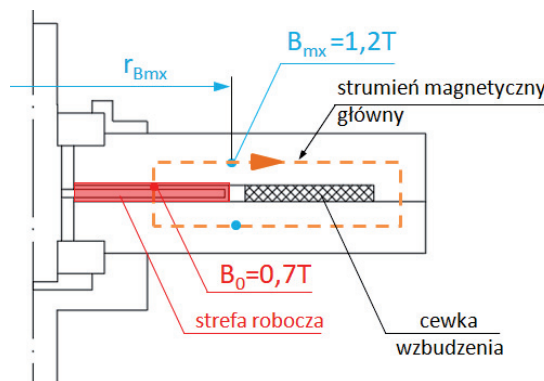


Fig. 4. Magnetoreologiczne sprzęgło 1-tarczowe z wyróżnioną strefą roboczą i zaznaczoną wartością średniej indukcji magnetycznej w strefie roboczej (kolor czerwony) oraz punktów największego nasycenia obwodu magnetycznego sprzęgła, które znajdują się w pokrywach (kolor niebieski).

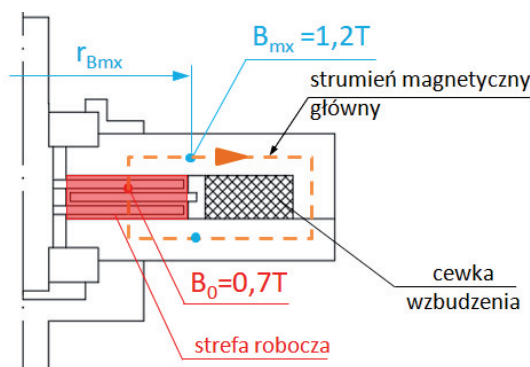


Fig. 5. Magnetoreologiczne sprzęgło 2-tarczowe z wyróżnioną strefą roboczą i zaznaczoną wartością średniej indukcji magnetycznej w strefie roboczej (kolor czerwony) oraz punktów największego nasycenia obwodu magnetycznego sprzęgła, które znajdują się w pokrywach (kolor niebieski).

Na podstawie literatury [8], jak też własnych doświadczeń [9], [10] przyjęto, że umowna średnia wartość indukcji magnetycznej dla wszystkich rozpatrywanych sprzęgieł powinna wynosić:  $B_0 = 0,7T$ . Również wartość maksymalna indukcji magnetycznej  $B_{mx}$  w obwodzie magnetycznym sprzęgła powinna być we wszystkich rozpatrywanych sprzęgłach taka sama (należy podkreślić, że powinna to być wartość mniejsza od tzw. wartości indukcji magnetycznej nasycenia, która dla przyjętej stali magnetycznej wynosi około 1,6T). Wartość maksymalna indukcji magnetycznej  $B_{mx}$  występuje w pokrywach sprzęgła na promieniu, równym sumie zewnętrznego promienia tarczy części pierwotnej  $r_{1e}$  oraz grubości warstwy cieczy magnetoreologicznej w kanale bocznym (która - jak przyjęto i jak to widać na rys. 3 - jest równa grubości warstwy cieczy pomiędzy dyskami):

$$(1) \quad r_{B_{mx}} \cong r_{1e} + g.$$

Promień  $r_{B_{mx}}$  oraz punkty, dla których w pokrywach występują maksymalne wartości indukcji magnetycznej,

oznaczono na rys. 4 i rys 5 kolorem niebieskim. Przyjęto dla wszystkich rozważanych sprzęgieł, że indukcja magnetyczna w punktach maksymalnego nasycenia obwodu magnetycznego powinna wynosić około 1,2T ( $B_{mx} = 1,2T$ ). Odnosnie do jednakowego wykorzystania miedzi, to założenie oznacza, że gęstość prądu w cewkach wzbudzenia wszystkich rozpatrywanych sprzęgieł musi być taka sama. Przy projektowaniu przyjęto gęstość prądu ( $j_{Cu} = 4,5 \text{ A/mm}^2$ ) [11] oraz dodatkowo założono jednakową wartość prądu wzbudzenia, wynoszącą:  $I = 0,6 \text{ A}$ .

Obliczone wymiary geometryczne oraz dane nawojowe dla sprzęgieł 1-tarczowych zestawiono w tabeli 1, zaś dla sprzęgieł 2-tarczowych - w tabeli 2 (wymiarów geometrycznych w tabelach 1 i 2 są zgodne z rysunkiem (rys. 3)).

**Tabela 1.** Obliczone wymiary geometryczne dla sprzęgieł 1-tarczowych przy wartościach momentu sprzęgającego  $T_c = 20, 35, 50 \text{ Nm}$ .

	N1, Tc=20	N1, Tc=35	N1, Tc=50
$r_s$ [mm]	5,9	7,1	8,0
$d$ [mm]	2	3	4
$g$ [mm]	1	1	1
$r_{2i}$ [mm]	11	12,5	13,5
$r_{1e}$ [mm]	47	56,5	63,7
$r_{2e}$ [mm]	50	59,5	66,7
$r_{ci}$ [mm]	51,9	61,5	68,7
$r_{ce}$ [mm]	83,9	85,9	93,1
$L_c$ [mm]	4	5	5
$Y$ [mm]	12,7	15,4	17,5
$z$ [-]	366	368	370
$m$ [-]	62	47	47
$r_e$ [mm]	96,2	100,8	110,6
$L_e$ [mm]	29,4	35,8	40,0

**Tabela 2.** Obliczone wymiary geometryczne dla sprzęgieł 2-tarczowych przy wartościach momentu sprzęgającego  $T_c = 20, 35, 50 \text{ Nm}$ .

	N2, Tc=20	N2, Tc=35	N2, Tc=50
$r_s$ [mm]	5,9	7,1	8,0
$d$ [mm]	2	3	4
$g$ [mm]	1	1	1
$r_{2i}$ [mm]	11	12,5	13,5
$r_{1e}$ [mm]	37,3	45	50,7
$r_{2e}$ [mm]	40,3	48	53,7
$r_{ci}$ [mm]	42,1	49,7	55,4
$r_{ce}$ [mm]	62,3	65,9	71,6
$L_c$ [mm]	10	13	13
$Y$ [mm]	9,7	11,9	13,5
$z$ [-]	694	695	697
$m$ [-]	39	31	31
$r_e$ [mm]	72,3	78,1	81,9
$L_e$ [mm]	29,4	36,8	43

Rozkłady przestrzenne pól magnetycznych dla wszystkich rozważanych wariantów, zostały przedstawione na rysunku 6 (obliczenia polowe wykonano w programie AGROS 2D [13]).

Rysunki te potwierdzają, że indukcja magnetyczna w

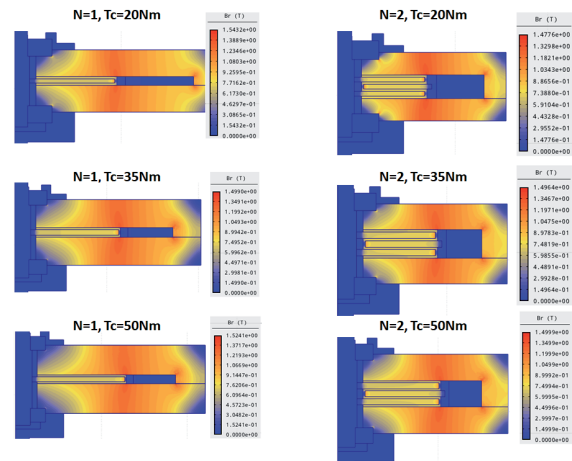


Fig. 6. Wyniki analizy polowej dla rozkładu wartości indukcji magnetycznej dla  $N = 1$  i  $N = 2$ , oraz różnych wartości momentu sprzęgającego  $T_c = 20, 35, 50 \text{ Nm}$  (przekroje poprzeczne są uwidocznione w różnych skalach).

strefie roboczej (w cieczy magnetoreologicznej pomiędzy dyskami) jest taka sama dla wszystkich sprzęgieł i wynosi około  $B_0 = 0,7T$  oraz to, że maksymalna wartość indukcji magnetycznej  $B_{mx}$  w tarczach jest taka sama i wynosi około  $B_{mx} = 1,2T$ .

Dla szybkiego zorientowania się, jak zmiana liczby dysków w sprzęgle magnetoreologicznym z wartości  $N=1$  (sprzęgło 1-tarczowe) na wartość  $N=2$  (sprzęgło 2-tarczowe), wpływa na wymiary gabarytowe sprzęgieł, zestawiono na rys. 7 przekroje wszystkich zaprojektowanych 6 sprzęgieł magnetoreologicznych:  $N=1$  ( $T=20, 35$  i  $50 \text{ Nm}$ ) i  $N=2$  ( $T=20, 35$  i  $50 \text{ Nm}$ ).

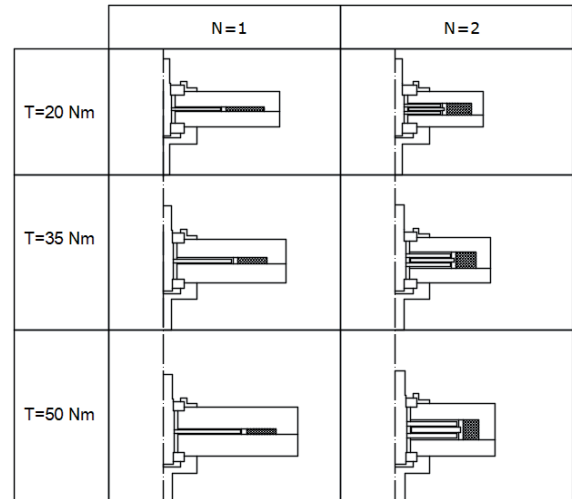


Fig. 7. Przekroje poprzeczne zaprojektowanych sprzęgieł magnetoreologicznych (uwidocznione w tej samej skali).

### Porównanie magnetoreologicznych sprzęgieł 1-tarczowych i 2-tarczowych z punktu widzenia ich wymiarów gabarytowych, masy i objętości.

Zmiany wartości gabarytowych sprzęgła: długości sprzęgła  $L_e$  i promienia sprzęgła  $r_e$  przy przejściu z rozwiązania konstrukcyjnego  $N=1$  na rozwiązanie konstrukcyjne  $N=2$ , charakteryzują odpowiednio wykresy słupkowe przedstawione na rysunkach: 8 i 9. Na wszystkich wykresach słupkowych pierwszy słupek każdej pary jest słupkiem odniesienia (100%), zaś nad drugim słupkiem podany jest w % przyrost analizowanej wielkości fizycznej, wymiaru geometrycznego lub parametru.

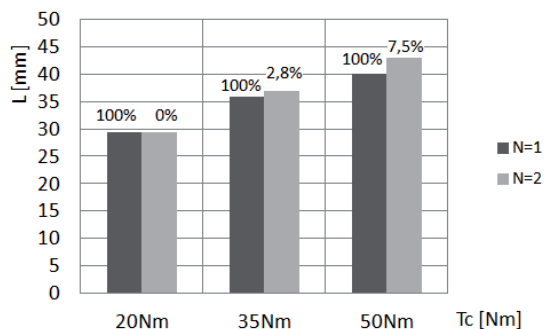


Fig. 8. Długość sprężęła  $L_e$  dla N=1 i N=2 przy wartościach momentu sprężęjącego  $T_c=20, 35$  i  $50$  Nm.

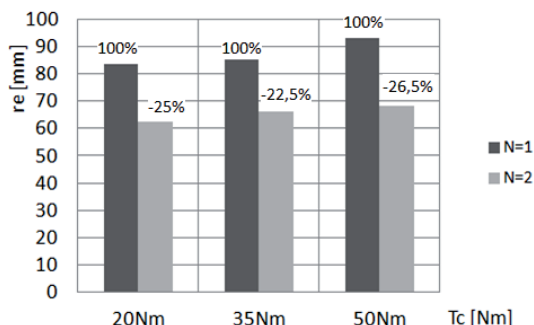


Fig. 9. Promień zewnętrzny sprężęła  $r_e$  dla N=1 i N=2 przy wartościach momentu sprężęjącego  $T_c=20, 35$  i  $50$  Nm.

Jak widać, promień zewnętrzny sprężęła  $r_e$  ulega zmniejszeniu o około 25% przy braku zmiany długości sprężęła  $L_e$  (wariant  $T=20$  Nm) lub przy nieznacznym zwiększeniu długości sprężęła do 7.5% (warianty 35 i 50 Nm). To, że długość sprężęła nie ulega zmianie lub ulega nieznacznemu zwiększeniu wynika z tego, że wzrasta długość strefy roboczej  $L_c$  czemu towarzyszy równoczesne zmniejszanie się grubości pokryw  $Y$ . Możliwość uzyskania mniejszej średnicy sprężęła ma znaczenie wtedy, gdy zależy nam na zmniejszeniu momentu bezwładności na wale, zmniejszeniu sił odśrodkowych, jak też również i wtenczas, gdy promień zabudowy układu napędowego jest ograniczony.

Istotną korzyścią przy przejściu z rozwiązania konstrukcyjnego 1-tarczowego na rozwiązanie konstrukcyjne 2-tarczowe jest zdecydowane zmniejszenie całkowitej masy materiałów czynnych sprężęła  $m$  (sumy mas stali magnetycznej, miedzi i cieczy magnetoreologicznej) o około 46,7% do 51,1% oraz znaczne zmniejszenie objętości sprężęła  $V$  o około 45%, co ilustrują wykresy słupkowe przedstawione na rysunkach 10 i 11.

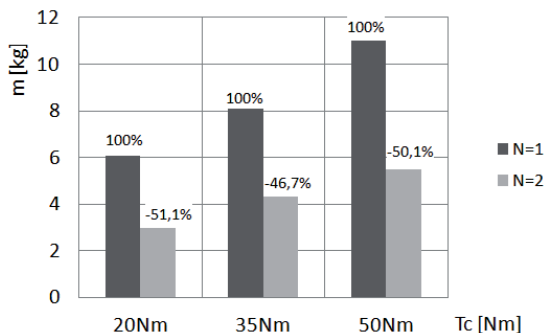


Fig. 10. Masa materiałów czynnych sprężęła  $m$  dla N=1 i N=2 przy wartościach momentu sprężęjącego  $T_c=20, 35$  i  $50$  Nm.

Przy porównywaniu przetworników elektromechanicznych oraz różnych elementów układów elektromechanicznych, istotną rolę odgrywają charakterystyczne współczynniki: stosunek rozwijanego momentu do masy oraz stosunek rozwijanego momentu do objętości.

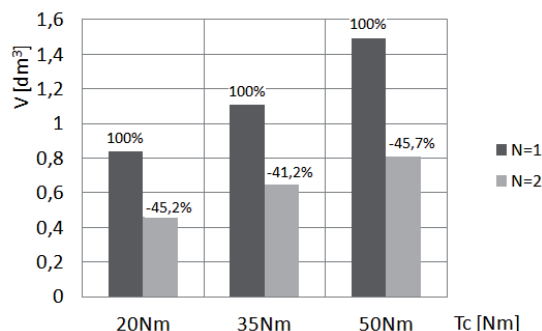


Fig. 11. Objętość sprężęła (bez obudowy)  $V$  dla N=1 i N=2 przy wartościach momentu sprężęjącego  $T_c=20, 35$  i  $50$  Nm.

W przypadku sprężęł będzie to stosunek momentu sprężęjącego  $T_c$  do masy sprężęła  $m$ :  $T_c/m$  oraz stosunek momentu sprężęjącego  $T_c$  do objętości sprężęła  $V$ :  $T_c/V$ . Wartości tych charakterystycznych współczynników charakterystycznych dla sprężęł 1-tarczowych oraz sprężęł 2-tarczowych pokazują wykresy słupkowe na rysunkach 12, 13.

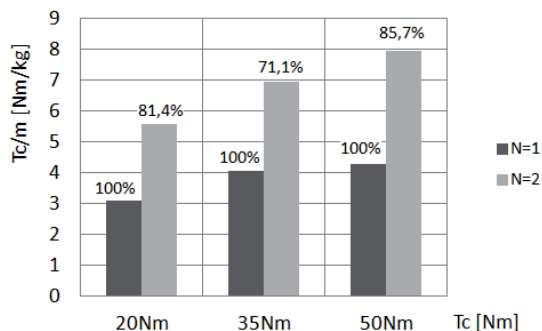


Fig. 12. Stosunek momentu sprężęjącego  $T_c$  do masy sprężęła  $m$ :  $T_c/m$  dla N=1 i N=2 przy wartościach momentu sprężęjącego  $T_c=20, 35$  i  $50$  Nm.

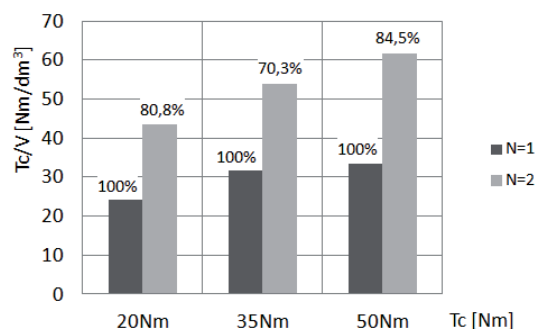


Fig. 13. Stosunek momentu sprężęjącego  $T_c$  do objętości sprężęła  $V$ :  $T_c/V$  dla N=1 i N=2 przy wartościach momentu sprężęjącego  $T_c=20, 35$  i  $50$  Nm.

Jak widać, wykresy te przemawiają na korzyść rozwiązania konstrukcyjnego 2-tarczowego: wartości współczynników  $T_c/m$  i  $T_c/V$  wzrastają o ponad 80%.

Reasumując, z punktu widzenia właściwości użytkowych scharakteryzowanych wykresami słupkowymi na rysunkach 8 do 13, rozwiązanie konstrukcyjne 2-tarczowe przeważa nad rozwiązaniem konstrukcyjnym 1-tarczowym. Należy jednak wziąć pod uwagę to, że konstrukcja sprężęła 2-tarczowego jest bardziej złożona niż sprężęła 1-tarczowego.



**Porównanie magnetoreologicznych sprzęgieł 1-tarczowych i 2-tarczowych z punktu widzenia poboru mocy czynnej, strat w miedzi oraz temperatury maksymalnej cieczy magnetoreologicznej.**

Sprzęgła magnetoreologiczne dla podtrzymania stanu sprężenia muszą pobierać ze źródła zasilania moc elektryczną  $P_1$  [12]. Jak wynika z rysunku 14 poszczególne sprzęgła magnetoreologiczne różnią się rezystancjami cewki wzbudzenia  $R_c$ , co wynika z różnej liczby zwojów (tabela 1 i tabela 2) oraz różnej, średniej długości zwojów (rys.7). W stanie ustalonym pobór mocy elektrycznej  $P_1$  jest równy stratom w miedzi cewki wzbudzenia  $\Delta P_{Cu}$ :

$$(2) \quad P_1 = \Delta P_{Cu} = I^2 R_c$$

Zmianę wartości rezystancji cewek wzbudzenia  $R_c$  oraz zmianę poboru mocy elektrycznej  $P_1$  dla rozważanych 6 wariantów sprzęgieł scharakteryzowano przy pomocy wykresów słupkowych na rysunkach 14 i 15.

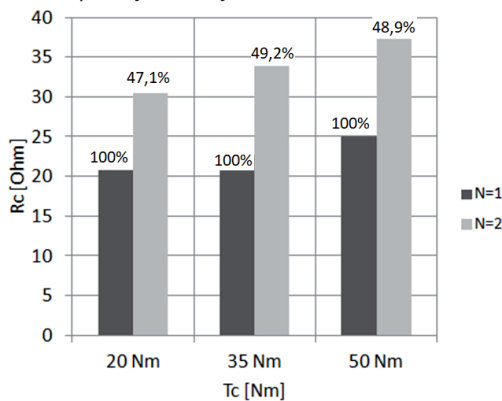


Fig. 14. Rezystancja cewki wzbudzenia  $R_c$  dla N=1 i N=2 przy wartościach momentu sprężającego  $T_c=20, 35$  i  $50$  Nm.

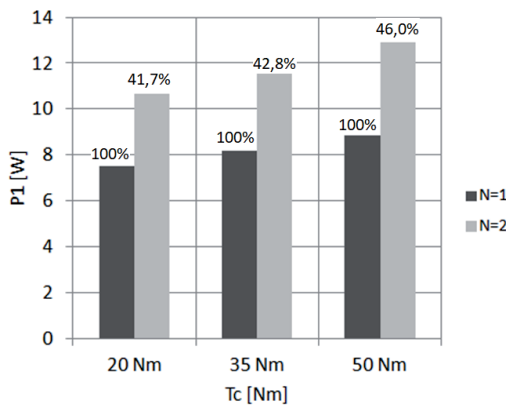


Fig. 15. Pobór mocy elektrycznej  $P_1$  dla N=1 i N=2 przy wartościach momentu sprężającego  $T_c=20, 35$  i  $50$  Nm.

Jak widać, przy przejściu z rozwiązania konstrukcyjnego N=1 do rozwiązania konstrukcyjnego N=2 rezystancja cewek wzbudzenia  $R_c$  rośnie o około 47% do 49%, a wraz ze wzrostem tej rezystancji (przy tym samym założonym prądzie wzbudzenia  $I = 0,6A$ ), rośnie pobór mocy elektrycznej, potrzebnej do podtrzymania stanu sprężenia. Pobrana moc elektryczna  $P_1$  (równa stratom w miedzi  $\Delta P_{Cu}$ ), zamienia się w ciepło, które przenika do strefy roboczej sprzęgła i powoduje wzrost temperatury cieczy magnetoreologicznej. Należy zwrócić uwagę, że źródłem ciepła są również straty mocy mechanicznej w łożyskach, jednak to ciepło jest przekazywane głównie do otoczenia i tylko w bardzo nieznacznym stopniu oddziałuje na temperaturę cieczy magnetoreologicznej w strefie roboczej sprzęgła.

Przyjmując na podstawie powyższego komentarza, że straty mechaniczne w łożyskach są równe 0, dokonano obliczenia rozkładu przestrzennego 2D temperatury przy uwzględnieniu wyłącznie strat w miedzi  $\Delta P_{Cu}$  (jako jedyne źródła ciepła). Obliczenia polowe ciepłe zostały wykonane w programie AGROS 2D [13]. Wyniki symulacji dla 6 rozważanych wariantów przedstawione są na rysunku 16.

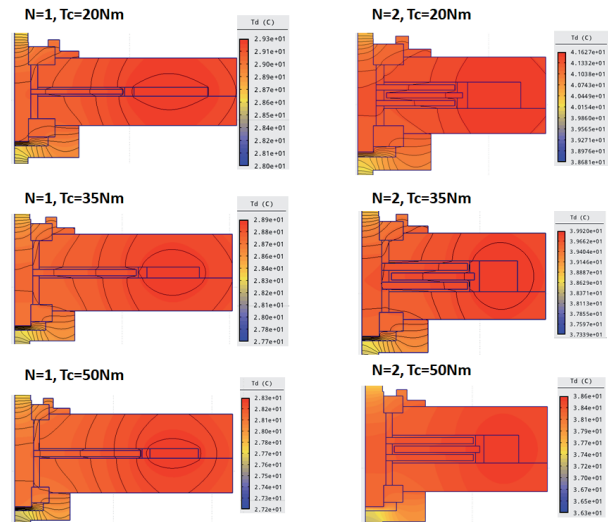


Fig. 16. Rozkłady przestrzenne 2D temperatury dla N=1 i N=2 wartościach momentu sprężającego  $T_c=20, 35$  i  $50$  Nm.

Jak widać, konsekwencją wzrostu strat w miedzi  $\Delta P_{Cu}$  jest wzrost maksymalnej temperatury cieczy magnetoreologicznej w strefie roboczej. Ciecz magnetoreologiczna w sprzęgłach 2-tarczowych nagrzewa się bardziej niż w sprzęgłach 1-tarczowych. Przyrosty temperatur  $\Delta\theta$  dla sprzęgieł magnetoreologicznych 1-tarczowych i 2-tarczowych w postaci wykresów słupkowych na rys. 17.

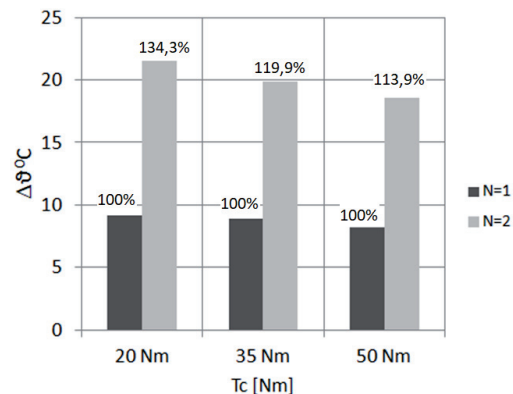


Fig. 17. Maksymalne przyrosty temperatur  $\Delta\theta$  dla płynu magnetoreologicznego sprzęgieł dla N=1 i N=2 przy wartościach momentu sprężającego  $T_c=20, 35$  i  $50$  Nm.

Przyrost maksymalnej temperatury cieczy magnetoreologicznej w sprzęgłach 2-tarczowych jest wyższy od przyrostu temperatury cieczy magnetoreologicznej w sprzęgłach 1-tarczowych o około 114% do 134%. Taki przyrost temperatury nie stanowi jednakże zagrożenia dla właściwości magnetycznych cieczy magnetoreologicznej i nie stanowi ograniczenia dla wyboru rozwiązania konstrukcyjnego 2-tarczowego. Temperatura pracy cieczy magnetoreologicznej wynosi do  $130^{\circ}C$  [14]. Powyżej tej temperatury dochodzi do degradacji właściwości cieczy i utraty właściwości magnetycznych.

## Podsumowanie

W artykule dokonano szerokiego porównania magnetoreologicznych sprzęgieł 1-tarczowych i 2-tarczowych z różnych punktów widzenia. Pokazano, że przyjęcie rozwiązania konstrukcyjnego 2-tarczowego prowadzi do obniżenia masy i objętości sprzęgła, jak też skutkuje istotnymi zmianami proporcji wymiarów gabarytowych sprzęgieł. Sprzęgła magnetoreologiczne 2-tarczowe charakteryzują się mniejszym promieniem zewnętrznym przy nieznacznym tylko zwiększeniu ich długości. Również wartości współczynników charakterystycznych:  $T_c/m$  i  $T_c/V$  są dla sprzęgieł 2-tarczowych znacznie korzystniejsze.

Sprzęgła magnetoreologiczne dla podtrzymania stanu sprzężenia wymagają ciągłego poboru mocy elektrycznej, ale w zamian za to oferują łatwość sprzęgania i rozsprzęgania maszyny napędzającej i maszyny napędzanej w trakcie pracy oraz możliwość automatycznego zabezpieczenia się przed przeciążeniem.

Ten pobór mocy elektrycznej jest w przypadku sprzęgieł 2-tarczowych wyższy niż w przypadku sprzęgieł 1-tarczowych o około 42% do 46%. Większy pobór mocy elektrycznej skutkuje większymi stratami w miedzi cewki wzbudzenia, ale wynikający z tego faktu przyrost temperatury maksymalnej cieczy magnetoreologicznej w strefie roboczej, nie zagraża utracie właściwości magnetycznych cieczy magnetoreologicznej. Można stwierdzić, że nieco gorsze warunki cieplne pracy sprzęgieł 2-tarczowych nie stanowią jednak ograniczenia, eliminującego wybór rozwiązania konstrukcyjnego 2-tarczowego. W kontekście wszystkich rozważonych kryteriów, rekomendowanym rozwiązaniem konstrukcyjnym sprzęgła magnetoreologicznego jest sprzęgło 2-tarczowe.

**Authors:** Prof. K. Kluszczyński, Ph.D. Z. Pilch, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Cracow University of Technology, Warszawska Str. 24, 31155 Cracow, Poland; email: krzysztof.kluszczyński@pk.edu.pl, ORCID: 0000-0002-3685-3756, zbigniew.pilch@pk.edu.pl, ORCID: 0000-0003-4846-523X

## REFERENCES

- [1] Pisetskiy S. and Kermani M. R. A Concept of a Minia-

- turized MR Clutch Utilizing MR Fluid in Squeeze Mode. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2020, pp. 6347-6352, doi: 10.1109/IROS45743.2020.9341643.
- [2] Hao Xiong and Yiping Luo and Dongsheng Ji and Hongjuan Ren and Dan Wei and Wentao Liu. Analysis and evaluation of temperature field and experiment for magnetorheological fluid testing devices. *Advances in Mechanical Engineering* 2021, Volume 13, DOI: 10.1177/16878140211012538.
- [3] Kowol P. Hamulce magnetoreologiczne o jednym i dwóch stopniach swobody. (Magnetorheological brakes with 1 or 2 DoF.) *PhD. Thesis*, Silesian University of Technology, Gliwice 2007, supervisor: K. Kluszczyński, in Polish.
- [4] Szelaż W., Przetworniki elektromagnetyczne z cieczą magnetoreologiczną modele matematyczne, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2010, stron 138, ISBN 978-83-7143-879-0.
- [5] Piech Z., IV, Szelaż W. Elevator brake with magnetorheological fluid, US Patent, US 8,631,917 B2, 2014.
- [6] Daoming Wang and Bin Zi and Yishan Zeng and Fangwei Xie and Youfu Hou. An investigation of thermal characteristics of a liquid-cooled magnetorheological fluid-based clutch. *Smart Materials and Structures* 2015, DOI: 10.1088/0964-1726/24/5/055020
- [7] William East and Jérôme Turcotte and Jean-Sébastien Plante and Guifré Julio. Experimental assessment of a linear actuator driven by magnetorheological clutches for automotive active suspensions. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 2021, DOI: 10.1177/1045389X21991237
- [8] Jung Woo Sohn and Juncheol Jeon and Quoc Hung Nguyen and Seung-Bok Choi, Optimal design of disc-type magnetorheological brake for mid-sized motorcycle: experimental evaluation. *Smart Materials and Structures* 2015, doi = 10.1088/0964-1726/24/8/085009
- [9] Kluszczyński K.; Pilch Z. Integrated analytical-field design method of multi-disc magnetorheological clutches for automotive applications. *Bull. Pol. Acad. Sci. Tech. Sci.* 2021, DOI: 10.24425/bpasts.2021.139392.
- [10] Kluszczyński K.; Pilch Z. The Choice of the Optimal Number of Discs in an MR Clutch from the Viewpoint of Different Criteria and Constraints. *Energies* 2021, VOLUME 14, DOI: 10.3390/en14216888.
- [11] Standard Specification for Standard Nominal Diameters and Cross-Sectional Areas of AWG Sizes of Solid Round Wires Used as Electrical Conductors, ASTM International, 2014, <http://www.astm.org/Standards/B258.htm>
- [12] Kowol P., Pilch Z. Analysis of the magnetorheological clutch working at full slip state. *Electrical Review*. 2015. pp 108–111. DOI: 10.15199/48.2015.06.21.
- [13] [web page] <http://www.agros2d.org/>. [Accessed on 06 Jun. 2022.].
- [14] MRF-140CGMRFluid <https://lordfulfillment.com>. [Accessed on 06 Jun. 2022.].