

## Optymalizacja pasywnej przekładni magnetycznej

**Streszczenie.** Praca zawiera wybrane wyniki badań optymalizacyjnych dla pasywnej przekładni magnetycznej. W obliczeniach zastosowano algorytm ewolucyjny współpracujący z biblioteką obliczeń równoległych wsparty dodatkowo bazą danych. Obliczenia polowe wykonano za pomocą dwuwymiarowej metody elementów skończonych. Badania przeprowadzone dla kilku wariantów funkcji celu wskazały wartości parametrów konstrukcyjnych, dla których gęstość przenoszonego momentu jest bliska  $100\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ .

**Abstract.** The work contains chosen optimization results of a permanent magnetic (PM) gear. The calculations use an evolutionary algorithm in cooperation with a parallel calculations library additionally supported by a database. Field calculations are performed using a two-dimensional finite element method. The calculations conducted for several different objective functions showed the design parameters for which the transmitted torque density is close to  $100\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ . **Optimization results of a permanent magnetic (PM) gear**

**Słowa kluczowe:** pasywna przekładnia magnetyczna, optymalizacja, algorytm ewolucyjny, metoda elementów skończonych  
**Keywords:** magnetic gear, optimization, evolutionary algorithm, finite element method

### Wstęp

Współczesne czasy to ciągle poszukiwanie coraz doskonalszych i przyjaznych dla środowiska naturalnego źródeł energii, to również nieustanny rozwój i poszukiwanie wysokosprawnych przetworników elektromechanicznych. Kluczowym staje się nie tylko samo wykorzystanie energii wiatru lub wody, ale również maksymalizacja sprawności procesu przetwarzania – produkcji energii. Budowane współcześnie turbiny wiatrowe i wodne to zazwyczaj urządzenia wolnoobrotowe. Takie aplikacje wymagają stosowania specjalnych wolnoobrotowych maszyn elektrycznych lub przekładni mechanicznych.

Szeroko dostępne dzisiaj, zaawansowane energoelektroniczne układy przekształtnikowe z łatwością obsługują bardzo wymagające, względem prędkości lub momentu obrotowego, układy napędowe z silnikami elektrycznymi. Nadal jednak istotną rolę we współczesnych rozwiązaniach technologicznych pełni różnorodna rodzina przekładni mechanicznych. Pomimo licznych zalet, przekładnie mechaniczne w trakcie eksploatacji wykazują liczne wady. Wibracje, hałas i nagrzewanie się w trakcie pracy wynikają z fizycznego kontaktu pomiędzy poruszającymi się elementami. Nie bez znaczenia jest również konieczność zapewnienia okresowych przeglądów – smarowania czy wymiany oleju.

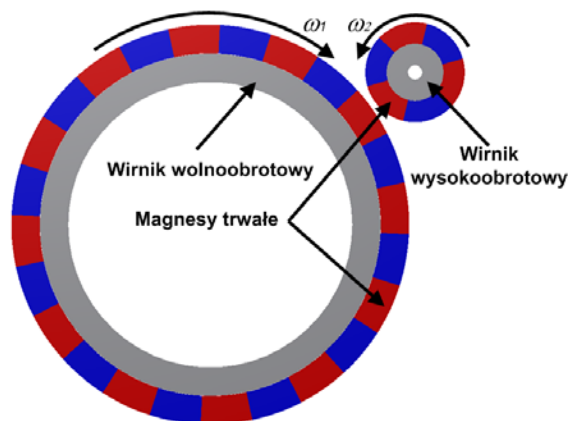
Nowoczesnym przetwornikiem zdolnym zastąpić przekładnię mechaniczną jest przekładnia magnetyczna bazująca na wysokoenergetycznych magnesach trwałych. Przenoszenie momentu obrotowego za pośrednictwem pola magnetycznego zapewnia fizyczną izolację pomiędzy elementami ruchomymi i eliminuje przedstawione wyżej wady klasycznego rozwiązania. Niski poziom drgań, hałasu, wysoka sprawność oraz bezobsługowość stawiają taki przetwornik jako element turbin wiatrowych, czy podwodnych turbin pływowych. Naturalne zabezpieczenie przed przeciążeniem jakie oferuje przekładnia magnetyczna, to dodatkowa zaleta, bardzo istotna w aplikacjach przemysłowych podatnych na częste przeciążenia [1-10].

Przedmiotem badań przedstawionych w niniejszej pracy jest przekładnia magnetyczna stanowiąca element pośredniczący/dopasowujący w turbinie wiatrowej lub jako alternatywa dla powszechnie stosowanych w przemyśle motoreduktorów. Głównym celem niniejszej pracy jest przedstawienie wielokryterialnej optymalizacji takiej przekładni w kierunku maksymalizacji wartości przenoszonego momentu przy jednoczesnym ograniczeniu jego tętnień. W obliczeniach zastosowano zmodyfikowany algorytm optymalizacyjny bazujący na klasycznym

algorytmie ewolucyjnym, połączony z oprogramowaniem do obliczeń za pomocą MES 2D i bazą danych. Wymieniona wyżej modyfikacja dotyczy rozbudowy i znacznego przyspieszenia procesu optymalizacji poprzez zrównoleglenie obliczeń polowych i optymalizację pracy samego algorytmu ewolucyjnego, eliminując wynikające z tolerancji powtórzenia.

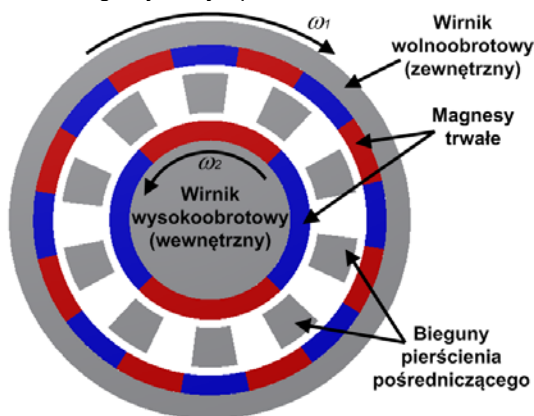
### Model bazowy przekładni magnetycznej

Transmisja momentu obrotowego w przekładni magnetycznej odbywa się za pośrednictwem pola magnetycznego wytwarzanego przez magnesy trwałe. Na rysunku 1 zilustrowano przykład tradycyjnej konstrukcji przekładni składającej się z dwóch elementów tj. wirnika wolnoobrotowego oraz wirnika wolnoobrotowego. Podstawową wadą tej konstrukcji jest bardzo mała wartość gęstości przenoszonego momentu magnetycznego, która w praktyce nie przekracza  $10\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ , a wynika ze znacznie ograniczonego obszaru wzajemnego oddziaływania obu elementów. Poprzez wprowadzenie tzw. pierścienia pośredniczącego (modulującego), wykonanego w postaci biegunów ferromagnetycznych (rys. 2.), przenoszony moment magnetyczny osiąga wartość dochodzącą do  $100\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ . Przekładnia taka zbudowana jest z trzech podstawowych elementów, a jeden z nich musi być zablokowany. Na tej podstawie można uzyskać kilka konfiguracji, dla których wartość przełożenia zawsze będzie inna. Szczegółowy opis zasady działania i budowy przedstawiono w pracach [1, 5-6].



Rys.1. Przykładowa konstrukcja tradycyjnej przekładni magnetycznej [5]

Badania przedstawione w niniejszej pracy dotyczą przekładni magnetycznej o przełożeniu 4:1.



Rys.2. Przekładnia magnetyczna z pierścieniem pośredniczącym [5]

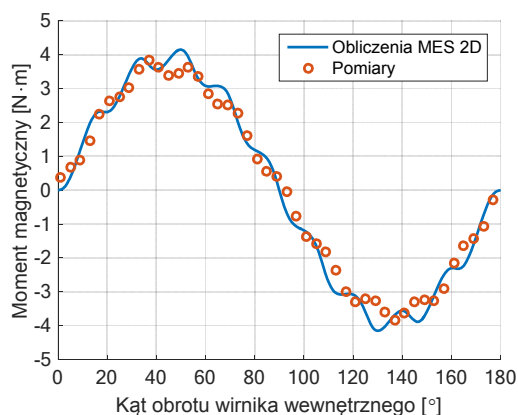
W rozważaniach przyjęto, iż napędzającym (czynnym) elementem będzie wirnik wewnętrzny a napędzanym (biernym) wirnik zewnętrzny. Blokowany będzie natomiast pierścień pośredniczący. Z zależności opisujących przełożenie przetwornika [1, 6], wyznaczono liczbę biegunów, która wynosi odpowiednio dla wirnika wewnętrznego 4, wirnika zewnętrznego 16 oraz dla pierścienia pośredniczącego 10. Promień wirnika wewnętrznego wynosi  $r_1=25\text{mm}$  natomiast zewnętrznego  $r_7=52\text{mm}$ . Grubość pierścienia pośredniczącego równa jest  $g_{ph}=10\text{mm}$ , szczelina powietrzna pomiędzy wirnikiem wewnętrznym a pierścieniem pośredniczącym oraz pierścieniem pośredniczącym a wirnikiem zewnętrznym, jest taka sama i wynosi  $2\text{mm}$ . W przekładni zastosowano magnesy neodymowe N35 o grubości  $g_w=g_z=5\text{mm}$ . Dla podanych powyżej wartości parametrów konstrukcyjnych zbudowano prototyp przekładni, którego długość czynna wynosi  $l=50\text{mm}$ . Na stanowisku badawczym, wyposażonym w silnik krokowy wraz z przekładnią planetarną, sterownik silnika krokowego, dwa momentomierze tensometryczne z wbudowanymi enkoderami inkrementalnymi oraz autorski program do sterowania i rejestracji danych, przeprowadzono szereg pomiarów momentów magnetycznych działających na poszczególne elementy przetwornika.

Kolejnym etapem prac było opracowanie sparametryzowanego dwuwymiarowego modelu numerycznego badanego przetwornika i wykonanie obliczeń pola magnetycznego za pomocą metody elementów skończonych (MES). W modelu połowym pominięto histerezę magnetyczną ferromagnetyka oraz zjawisko indukowania prądów wirowych. Na rysunku 3 i 4 zilustrowano porównanie zmienności momentu magnetycznego działającego na wirnik wewnętrzny oraz zewnętrzny w funkcji kąta obrotu wirnika wewnętrznego (przy zablokowanym pierścieniu pośredniczącym i wirniku zewnętrznym). Rysunek 5 przedstawia momenty działające na wybrane elementy przekładni magnetycznej w stanie obciążenia.

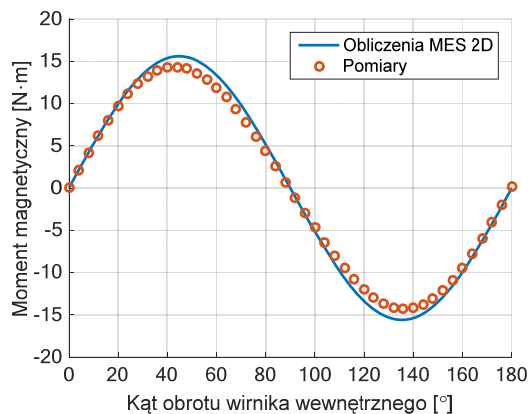
Dla modelu bazowego uzyskano gęstość przenoszonego momentu magnetycznego na poziomie  $36,8\text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ . Wartość współczynnika tętnień momentu ( $\varepsilon$ ) wyniosła  $7,9\%$  i została obliczona na podstawie zależności:

$$(1) \quad \varepsilon = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2T_{av}} \cdot 100\%$$

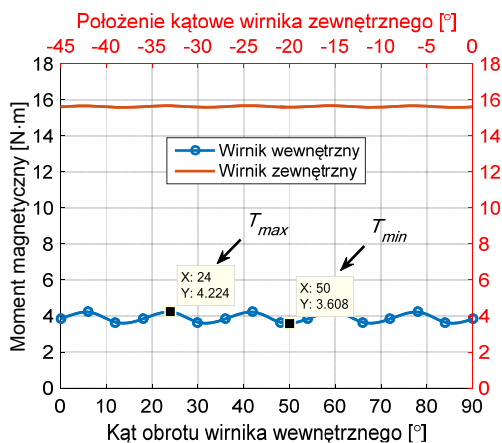
gdzie:  $T_{\min}$ ,  $T_{\max}$ ,  $T_{av}$ , – wartość minimalna, maksymalna oraz średnia momentu magnetycznego.



Rys. 3. Kątowa zmienność momentu magnetycznego działającego na wirnik wewnętrzny



Rys. 4. Kątowa zmienność momentu magnetycznego działającego na wirnik zewnętrzny



Rys. 5. Moment magnetyczny przekładni dla maksymalnego obciążenia

Określono również współczynnik zawartości momentu zaczepowego w momencie użytecznym ( $\tau$ ) na podstawie wzoru (2), który wyniósł  $7,3\%$ .

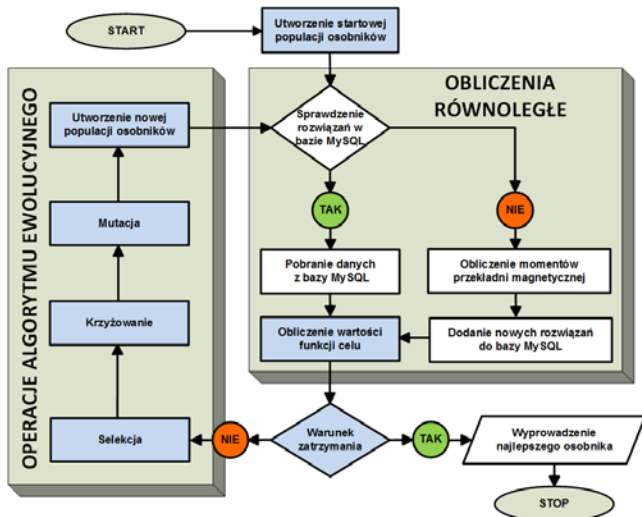
$$(2) \quad \tau = \frac{T_z}{T_{\max}} \cdot 100\%$$

gdzie:  $T_z$  – wartość amplitudy momentu zaczepowego.

Na rysunku 5 przedstawiono przykładowy rozkład modułu indukcji magnetycznej oraz linie pola magnetycznego dla położenia, w którym moment działający na wszystkie elementy przekładni równy jest zeru.

## Proces optymalizacji

Właściwości ruchowe przekładni magnetycznej zależą od wielu parametrów konstrukcyjnych. Istotny jest dobór liczby par biegunów magnetycznych, rozpiętości i grubości magnesów trwałych wirnika wewnętrznego i zewnętrznego, grubości szczelin powietrznych oraz wymiarów geometrycznych biegunów pierścienia modulującego. Wyznaczenie optymalnych wartości tak wielu parametrów konstrukcyjnych wymaga znacznych nakładów czasowych. W szczególności znaczenie ma wybór metody obliczeń rozkładu pola magnetycznego. Stosowana przez autorów metoda elementów skończonych w ujęciu dwuwymiarowym wymaga znacznie większych nakładów obliczeniowych niż np. chętnie stosowana alternatywna metoda reluktancyjnych (MSR) [4]. Jednak niewątpliwą zaletą MES jest łatwiejsze i dokładniejsze odwzorowywanie oraz obliczenia dla złożonych wieloelementowych struktur. Każdy proces optymalizacji to nieliniowy problem z licznymi ograniczeniami, rozwiązywany z zastosowaniem różnych postaci funkcji celu. Analiza z zastosowaniem MSR jest obarczona zdecydowanie mniejszymi nakładami obliczeniowymi, jednak wymaga bardzo dokładnie przygotowanego modelu. Mając na uwadze te uwarunkowania autorzy niniejszej pracy zaproponowali procedurę optymalizacji opartą o algorytm ewolucyjny z zastosowaniem równoległych obliczeń za pomocą MES 2D, wspartych dodatkowo bazą danych. Algorytm postępowania dla zaproponowanej procedury optymalizacji, przedstawiono na rysunku 7.

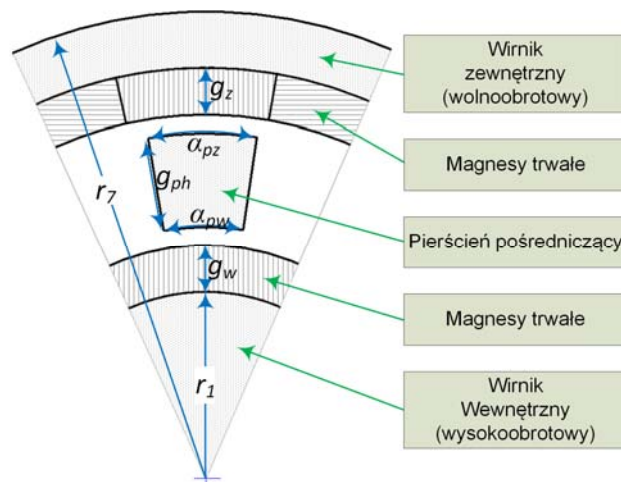


Rys. 7. Diagram obrazujący działanie procedury optymalizacji

Zastosowanie do optymalizacji algorytmu ewolucyjnego, który w drodze operacji genetycznych tj. krzyżowania oraz mutacji poprzez selekcję wyłania osobniki lepiej przystosowane, wiąże się ze znacznymi nakładami obliczeniowymi. Konieczność wyznaczenia wartości funkcji celu (przystosowania osobników), a tym samym obliczeń połowych dla dużej liczby osobników i generacji, zwiększa znacząco szansę odnalezienia ekstremum globalnego, ale również koszt obliczeniowy. Architektura obecnych komputerów – systemy wielordzeniowe, znacząco sprzyja prowadzeniu obliczeń dla zagadnień drobnoziarnistych. Zaproponowana w pracy procedura optymalizacji korzysta z biblioteki obliczeń równoległych, rozdzielającej obliczenia połowe dla wygenerowanej grupy osobników pomiędzy dostępne procesory. Eliminując w drodze przeszukiwania bazy danych konieczność prowadzenia obliczeń dla powtarzających się osobników, uzyskano dodatkowe oszczędności czasu. Tak przygotowana procedura

optymalizacji uruchamiana w sieci zbudowanej z wielu węzłów (wieloprocessorowych jednostek obliczeniowych), współpracujących z jedną bazą danych pozwala na szybkie przeprowadzenie wielokryterialnej optymalizacji.

Przed przystąpieniem do procesu optymalizacji, przeprowadzono analizę wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych przekładni na wartość oraz kształt momentu magnetycznego, działającego na wybrane elementy przetwornika. Analiza ta pozwoliła na określenie liczby zmiennych decyzyjnych w procesie optymalizacji oraz przedziału zmienności tych parametrów. Prace te zostały szczegółowo opisane w [7-8]. Na tej podstawie wybrano sześć parametrów konstrukcyjnych, które przedstawiono na rysunku 8. Wszelkie modyfikacje wprowadzane w trakcie obliczeń optymalizacyjnych prowadzono z zachowaniem stałej wartości promienia zewnętrznego przetwornika ( $r_7$ ).



Rys. 8. Zmienne decyzyjne wybrane w procesie optymalizacji przekładni magnetycznej

## Wyniki obliczeń

Prowadzone przez autorów wcześniejsze badania wskazały kierunki poszukiwań, redukując jednocześnie liczbę zmiennych decyzyjnych. Analizy te, nie uwzględniały jednak dyskusji doboru i określenia wpływu współczynników wagowych oraz zawartości momentu zaczepowego w użytecznym dla zaproponowanych funkcji celu. Zastosowanie przekładni magnetycznej jako elementu zespołu napędowego w pojazdach elektrycznych lub typowej aplikacji przemysłowej wiąże się z zapewnieniem odpowiednio wysokiej gęstości momentu przy niskim poziomie tętnień. Funkcja celu w takim przypadku, powinna zatem posiadać składnik odpowiedzialny za maksymalizację momentu oraz minimalizację tętnień. Zaproponowaną dla takich warunków postać funkcji celu opisano poniższym wzorem:

$$(3) \quad \max_{\underline{x} \in X} \left\{ \xi_1(\underline{x}) = w \left( \frac{T_d(\underline{x})}{T_{db}(\underline{x})} \right)^2 + (1-w)(1-\varepsilon(\underline{x}))^2 \right\}$$

$$X \subset R^6$$

gdzie:  $w$  – współczynnik wagowy ( $w \in < 0; 1 >$ ),  $T_{db}$  – gęstość momentu odniesienia równa ( $T_{db} = 100 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ ),  $T_d$  – gęstość momentu dla danego osobnika.

Obliczenia przeprowadzono dla kilku wariantów doboru współczynników wagowych. Dla każdego z przedstawionych poniżej wariantów optymalizacji przeprowadzono 3 serie obliczeń z uwzględnieniem tej samej populacji startowej, oceniając tym samym

efektywność procesu optymalizacji. Ze względu na przynależność algorytmów genetycznych do metod stochastycznych w uzyskanych wynikach mogą występować różnice. W tabeli 1 zestawiono wyniki obliczeń dla współczynnika wagowego  $w=1$  oraz  $w=0$ . Oznacza to, iż w pierwszym wariancie pominięto wpływ tętnień momentu magnetycznego, w drugim zaś składnik decydujący o gęstości przenieszonego momentu magnetycznego. Otrzymane w wyniku optymalizacji konstrukcje dla  $w=1$ , charakteryzują się gęstością momentu na poziomie  $95 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ . Różnice w wartościach parametrów dla poszczególnych uruchomień są jednak niewielkie. Decyzja o wyborze konkretnej struktury musi być podjęta z uwzględnieniem innego kryterium np. technologii wykonania. Zgodnie z oczekiwaniami dla współczynnika wagowego  $w=0$ , prawie całkowicie wyeliminowano tętnienia momentu, jednocześnie znacznie redukując wartość gęstości przenieszonego momentu (ok.  $17 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ ). Autorzy traktują ten wariant jako uzupełnienie analizy doboru wartości współczynników wagowych oraz poprawności działania procedury optymalizacji. Wyraźnie odmienne wartości parametrów konstrukcyjnych otrzymane w tych symulacjach, potwierdzają wysoką odporność algorytmów stochastycznych na możliwość „utknięcia” procedury w ekstremum lokalnym.

Kolejne serie obliczeń przedstawione w tabeli 2, uwzględniają pośrednie wartości współczynnika wagowego ( $w \in \{0,75; 0,5; 0,25\}$ ). Zamieszczone wyniki symulacji nie wykazały istotnego wpływu wartości współczynnika wagowego na gęstość i tętnienia momentu. Uzyskano jednak większe rozbieżności dla końcowych wartości parametrów konstrukcyjnych w stosunku do symulacji dla współczynnika  $w=1$ . W każdym z trzech przypadków wartość gęstości momentu pozostała na wysokim poziomie (ok.  $90 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ ) zaś tętnienia momentu spadły ponad dwukrotnie, do poziomu 3%. We wszystkich przypadkach zaobserwowano jednak znaczny wzrost współczynnika zawartości momentu zaczepowego w użytecznym.

Tabela 1. Zestawienie wyników obliczeń funkcji celu  $\xi_1$  oraz  $w=1$  i  $w=0$

w	1			0		
	1	2	3	1	2	3
seria	1	2	3	1	2	3
$\xi_1$ [-]	0,891	0,898	0,896	0,986	0,981	0,982
$r_1$ [mm]	21,0	20,1	21,2	10,0	10,9	10,2
$g_w$ [mm]	11,6	11,9	11,8	5,3	4,9	5,1
$g_{ph}$ [mm]	6,0	6,1	6,0	3,4	2,3	2,3
$g_z$ [mm]	6,4	6,9	6,0	10,6	8,6	8,6
$\alpha_{pw}$ [°]	20,0	19,5	20,0	24,5	23,0	23,0
$\alpha_{pz}$ [°]	20,5	21,0	20,5	7,5	19,0	18,5
$T_d$ [kNm/m <sup>3</sup> ]	94,4	94,8	94,8	16,8	18,2	17,6
$\varepsilon$ [%]	7,2	7,6	7,6	0,8	1,1	0,9
$\tau$ [%]	3,1	2,2	2,2	0,8	7,0	6,4

Analiza powyższych wyników obliczeń wykazała konieczność rozszerzenia funkcji celu o współczynnik zawartości momentu zaczepowego w użytecznym ( $\tau$ ), który ma istotny wpływ na sprawność przetwornika przy stosunkowo niedużych obciążeniach. Uwzględnienie tego współczynnika wymaga jednak przeprowadzenia serii dodatkowych obliczeń numerycznych.

Tabela 2. Zestawienie wyników obliczeń funkcji celu  $\xi_1$

w	0,75			0,50			0,25		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
seria	1	2	3	1	2	3	1	2	3
$\xi_1$ [-]	0,906	0,888	0,902	0,912	0,910	0,900	0,897	0,907	0,873
$r_1$ [mm]	21,3	22,0	20,7	20,5	21,8	22,2	22,5	22,1	24,4
$g_w$ [mm]	12,0	12,0	11,6	12,0	11,6	11,5	10,3	11,6	10,2
$g_{ph}$ [mm]	5,9	5,8	6,1	6,9	5,7	5,5	5,9	5,7	5,7
$g_z$ [mm]	5,8	5,2	6,6	5,6	5,9	5,9	6,3	5,5	4,7
$\alpha_{pw}$ [°]	22,5	22,5	22,0	22,0	22,5	22,5	24,0	24,0	24,5
$\alpha_{pz}$ [°]	18,5	18,5	20,0	20,5	18,0	18,0	13,0	13,5	12,5
$T_d$ [kNm/m <sup>3</sup> ]	94,5	93,3	94,2	94,1	93,4	92,7	86,4	89,4	83,1
$\varepsilon$ [%]	2,9	3,0	2,8	3,2	2,7	3,0	2,8	3,0	3,5
$\tau$ [%]	10,5	11,2	8,3	6,8	10,7	11,3	10,8	12,1	13,0

Z uwagi na zbliżoną wartość współczynników ( $\varepsilon$ ) i ( $\tau$ ) zaproponowano zmodyfikowaną postać funkcji celu (4), z widocznym członem odpowiedzialnym za maksymalizację momentu i członem decydującym o jego charakterze.

$$(4) \max_{x \in X} \left\{ \xi_2(x) = w \left( \frac{T_d(x)}{T_{db}(x)} \right)^2 + (1-w) \left( (1-\varepsilon(x))^2 + (1-\tau(x))^2 \right) \right\}$$

$$X \subset R^6$$

Przedstawiona poniżej tabela 3 zawiera serie obliczeń z uwzględnieniem trzech wariantów doboru współczynnika wagowego, dla zmodyfikowanej funkcji celu  $\xi_2$ . Analiza otrzymanych wyników znacznie lepiej niż w poprzedniej serii obliczeń (tab. 2), obrazuje związek pomiędzy wartością współczynnika wagowego a parametrami całkowitymi przetwornika.

Tabela 3. Zestawienie wyników obliczeń funkcji celu  $\xi_2$

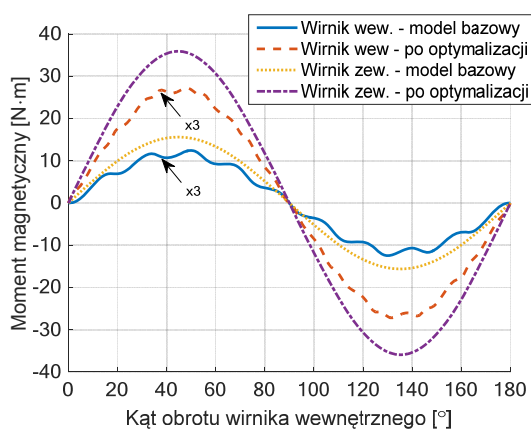
w	0,75			0,50			0,25		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
seria	1	2	3	1	2	3	1	2	3
$\xi_2$ [-]	1,127	1,068	1,108	1,334	1,356	1,330	1,615	1,597	1,607
$r_1$ [mm]	20,5	22,1	21,8	20,8	19,5	22,1	16,5	15,9	16,5
$g_w$ [mm]	11,9	10,0	11,8	10,4	11,5	10,4	12,0	12,0	11,5
$g_{ph}$ [mm]	6,8	6,3	5,8	7,3	6,7	6,7	8,1	9,3	8,4
$g_z$ [mm]	5,8	6,6	5,8	6,5	7,3	5,8	8,4	7,8	8,6
$\alpha_{pw}$ [°]	20,5	20,5	20,5	21,0	20,5	20,5	22,5	23,0	22,5
$\alpha_{pz}$ [°]	20,5	21,0	20,5	20,5	21,0	21,5	16,5	16,0	18,5
$T_d$ [kNm/m <sup>3</sup> ]	94,4	90,4	93,9	89,9	92,8	91,1	84,6	81,3	82,6
$\varepsilon$ [%]	6,6	6,2	6,2	5,4	5,6	6,3	2,9	2,9	2,8
$\tau$ [%]	2,0	3,3	4,9	1,8	2,2	2,5	1,6	1,9	1,5

### Podsumowanie

W pracy zaprezentowano proces optymalizacyjny parametrów konstrukcyjnych przekładni magnetycznej. Zaproponowane podejście wykorzystuje klasyczny algorytm ewolucyjny, wsparty biblioteką obliczeń równoległych i bazą danych. Tak opracowany proces optymalizacyjny pozwala na kilkukrotne przyspieszenie wyznaczania optymalnych parametrów konstrukcyjnych danego przetwornika. Autorzy

uważają jednak, iż we wstępie do optymalizacji konieczne jest przeprowadzenie analizy wrażliwości i selekcji parametrów decyzyjnych.

Analiza wyników obliczeń, dla funkcji celu  $\xi_1$ , zestawionych w tabeli 2, wykazała stosunkowo niską wrażliwość współczynnika tężni momentu na zmianę wagi. Wykazała też znaczny wzrost wartości współczynnika  $\tau$  w odniesieniu do modelu bazowego. Jego największy wpływ widoczny jest podczas pracy przetwornika na biegu jałowym, gdzie powstają dodatkowe straty mocy, wynikające z oddziaływania momentu zaczepowego. Zaproponowana zmodyfikowana funkcja celu  $\xi_2$  uwzględniła również współczynnik  $\tau$ . Przeprowadzone symulacje wykazały znacznie większą czułość przebiegu procesu optymalizacji na współczynnik wagowy, a w konsekwencji na parametry całkowite przekładni. Na rysunku 9 zilustrowano porównanie zmienności momentu magnetycznego działającego na wirnik wewnętrzny i zewnętrzny dla modelu bazowego oraz dla modelu po optymalizacji wyróżnionego w tabeli 3.



Rys. 9. Kątowa zmienność momentu magnetycznego działającego na wirnik wewnętrzny i zewnętrzny

Opracowany przez autorów algorytm optymalizacyjny pozwolił nie tylko na wykonanie optymalizacji, ale również na ocenę wyboru funkcji celu i ich wrażliwości na dobór wartości współczynnika wagowego. Dzięki zrównolegleniu procesu obliczeniowego a w szczególności obliczeń MES i zaimplementowanej w MySQL bazie danych, uzyskano bardzo dobre narzędzie optymalizacyjne. W obliczeniach zastosowano algorytm ewolucyjny o liczbie osobników

każdej populacji równej 50 i liczbie generacji równej 100, przyjętej za warunek zatrzymania algorytmu. Proces optymalizacyjny dla trzech uruchomień algorytmu z funkcją celu  $\xi_1$ , z zastosowaniem komputera PC wyposażonego w procesor Intel Core i7-5930K, 16GB RAM DDR4, trwał ok. 24 godzin.

*Autorzy serdecznie dziękują prof. Mariuszowi Jagiele za konsultacje oraz udostępnienie autorskiego programu do obliczeń polowych.*

**Autorzy:** prof. dr hab. inż. Marian Łukaniszyn, dr inż. Marcin Kowol, dr inż. Janusz Kołodziej, Politechnika Opolska, Instytut Układów Elektromechanicznych i Elektroniki Przemysłowej, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, E-mail: m.lukaniszyn@po.opole.pl, m.kowol@po.opole.pl, ja.kolodziej@po.opole.pl.

#### LITERATURA

- [1] Atallah K., Howe D., A novel high-performance magnetic gear, IEEE Trans. Magn., 37 (2001), Issue.4 Part. 1, 2844-2846
- [2] Evans J. D., Zhu Z., Optimal torque matching of a magnetic gear within a permanent magnet machine, in IEEE Int. Electric Machines Drives Conference (IEMDC 2011), 995-1000
- [3] Gerber S., Wang R.-J., Design and Evaluation of a Magnetically Geared PM Machine, IEEE Trans. Magn., 51 (2015), Issue 8, 8107010
- [4] Fukuoka M., Nakamura K., and Ichinokura O., A method for optimizing the design of SPM type magnetic gear based on reluctance network analysis, in 2012 XXth International Conference on Electrical Machines, 30-35
- [5] Kowol M., Kołodziej J., Łukaniszyn M., Analiza pola magnetycznego w przekładni magnetycznej, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 100/3/2013, Komel, 163-168
- [6] Kowol M., Kołodziej J., Łukaniszyn M., Analiza pracy przekładni magnetycznej, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 104/4/2014, Komel, 125-130
- [7] Kowol M., Kołodziej J., Łukaniszyn M., Badania symulacyjne przekładni magnetycznej, Przegląd Elektrotechniczny, 1'2016, 96-101
- [8] Kowol M., Kołodziej J., Łukaniszyn M., Wpływ wybranych parametrów konstrukcyjnych na pracę przekładni magnetycznej, Wybrane Zagadnienia Elektrotechniki i Elektroniki, WZEE, Kielce, 17-19 września 2015, 89-94
- [9] Niguchi N., Hirata K., Cogging Torque Analysis of Magnetic Gear, IEEE Trans. Ind. Electron., 59 2012, 2189-2197
- [10] Niu, S., Chen, N., Ho, S., Fu, W., Design optimization of magnetic gears using mesh adjustable finite-element algorithm for improved torque, IEEE Trans. Magn., 48 (2002), 4156-4159