

*elektromechaniczny przetwornik momentu, silnik i prądnica  
na wspólnym stojanie, wariator, straty w materiałach ferromagnetycznych*

Konrad WALECKI\*

## **ANALIZA ELEKTROMECHANICZNEGO PRZETWORNIKA MOMENTU I PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ**

Idea przedstawionego w artykule przetwornika momentu opiera się na patencie [1] (Schulze, Dittner, 1995), który nie był dotychczas opisywany naukowo. Został on zgłoszony w Wielkiej Brytanii przez koncern Volkswagen i zarejestrowany pod numerem GB 2287585 A. Jest to jeden z możliwych patentów, które dotyczyły przekładni między silnikiem spalinowym a wałem napędowym. W wybranym rozwiązaniu sugerowano zastąpienie tradycyjnej skrzyni biegów wariatorem – przekładnią CVT (ang. Continuously Variable Transmission). Zamiast kilku biegów istnieje nieskończenie wiele położeń, co pozwala dobrać optymalny punkt pracy silnika. W założeniu rolę bezstopniowej przekładni może spełniać prezentowany elektromechaniczny przetwornik momentu. Nie istniały dowody na użyteczność przedstawionego rozwiązania, chociaż idea wydawała się bardzo dobra. Podstawowym problemem jest sprawność urządzenia, co, do której nie było żadnych informacji w literaturze.

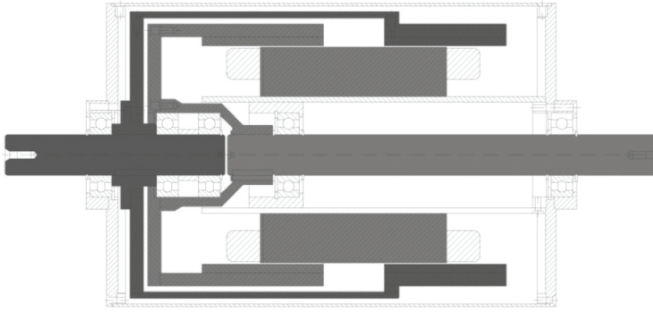
### **1. PROJEKT I ZASADA DZIAŁANIA PRZETWORNIKA MOMENTU**

Wykonanie projektu oraz przeprowadzenie badań elektromechanicznego przetwornika wymagało zastosowania ujęcia połowo-obwodowego oraz zastosowania metod określania strat powodowanych przemagnesowaniem od magnesów trwałych oraz przebiegami przemiennymi w wyniku występowania impulsów prądowych pochodzących od zwartej uzwojenia twornika.

Przetwornik zaprezentowany w patencie składa się z dwóch części. Na rys.1 część ciemniejszą została zaznaczona część prądnicowa, natomiast kolor jasno szary został użyty do zaznaczenia części prądnicowej oraz wspólnego twornika ( $d = 135$  mm).

---

\* Instytut Mechatroniki i Systemów Informatycznych Politechniki Łódzkiej, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, [konrad.walecki@p.lodz.pl](mailto:konrad.walecki@p.lodz.pl)



Rys. 1. Schemat elektromechanicznego przetwornika momentu  
Fig. 1. Electromagnetic torque converter scheme

Symetryczne jarzma ( $\varphi = 160$  mm) są przyległe do siebie. Na obwodzie jarzma zarówno prądnicy jak i silnika rozmieszczone są magnesy trwałe o grubości 3 mm namagnesowane naprzemiennie (6 par). Ten sam prąd zwarcia  $I_z$  płynie w tworniku, którego aktywne części znajdują się pod zespołami prądnicy i silnika. Za pomocą przesuwanego w poziomie twornika długość przewodnika w części prądnicowej i silnikowej może być regulowana. Zatem stosunek przekazywania momentu może być ustalany poprzez przemieszczenie twornika. Jeżeli część prądnicowa podłączona jest do zewnętrznego napędu – na przykład silnika spalinowego, przy jednocześnie zwartym uzwojeniu twornika, pojawia się prąd zwarcia  $I_z$ , który jest elementem przenoszącym moment. Jeżeli magnesy na jarzmach prądnicy i silnika mają przeciwne bieguny, siła działająca na jarzmo silnika będzie miała ten sam kierunek, co ruch obrotowy jarzma prądnicy. Jeśli bieguny jarzma i prądnicy będą jednoimienne siła działająca na jarzmo silnika będzie miała kierunek przeciwny do ruchu prądnicy. Przy stałym zwartym uzwojeniu moment  $M_2$  będzie wciąż zmieniał swój kierunek. Zależnie od tego, jaki kierunek siły chcemy uzyskać położenie magnesów na jarzmach względem kierunku prądu zwarcia możemy określić, jako „odpowiednie” i „nieodpowiednie”.

Działanie przetwornika momentu opiera się na zasadzie zachowania energii. Przy danej wejściowej mocy  $P_1$  otrzymuje się tę samą wartość mocy  $P_2$  przy założeniu, że wartość strat wynosi zero. Przetwornik składa się z jednakowych jarzm obejmujących część prądnicową oraz silnikową. Zachodzi zatem równość:

$$P_1 = P_2 + M_1 \omega_1 = M_2 \omega_2 \quad (1)$$

Przesuwając wspólny twornik możemy kontrolować „aktywne” długości  $l_1$  oraz  $l_2$  twornika znajdujące się pod jarzmami i tym samym regulować wyjściową prędkość obrotową  $n_2$  oraz moment  $M_2$ . W tab.1 zaprezentowano warunki działania przetwornika przy założeniu braku strat.

Sterowanie momentem odbywa się poprzez umożliwienie i blokowanie przepływu prądu zwarcia  $I_z$  przy odpowiednim położeniu magnesów części silnikowej względem

kierunku prądu. Sterowanie pracą twornika odbywa się poprzez układ sterujący składający się z diody oraz tranzystora – modułu IGBT. Wspólny dla obu części prąd zwarcia pozwala na zmianę wartości momentu oraz prędkości obrotowej na wyjściu przetwornika.

Tabela 1. Położenie twornika oraz zależności momentów i prędkości obrotowych  
Table 1. The armature position influence on the torque and rotational speed

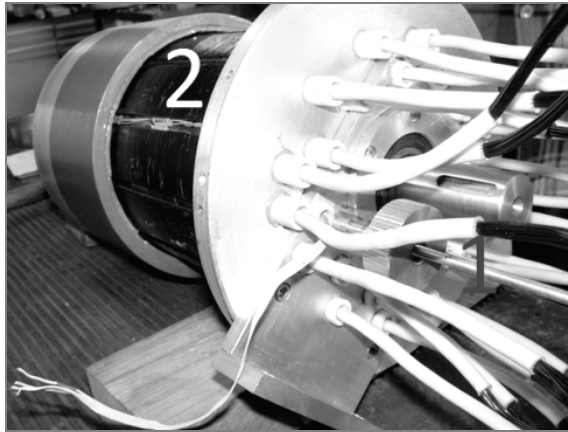
Zależność aktywnych długości $l_1$ i $l_2$ twornika	Wartości $M_1$ i $M_2$	Wartości $n_1$ i $n_2$	Zależność aktywnych długości $l_1$ i $l_2$ twornika
$l_1=l_2$	$M_1 = M_2$	$n_1 = n_2$	$l_1 = l_2$
$l_1>l_2$	$M_1 > M_2$	$n_1 < n_2$	$l_1 > l_2$
$l_1<l_2$	$M_1 < M_2$	$n_1 > n_2$	$l_1 < l_2$

Częstotliwość pulsowania momentu odpowiada częstotliwości zwierania i otwierania obwodu uzwojenia twornika. Część prądnicowa jest, więc prądnicą synchroniczną, natomiast część silnikowa – jednofazowym silnikiem BLDC. Wartość prądu  $I_z$  w uzwojeniu twornika zależy od wartości generowanej przez część prądnicową siły elektromotorycznej  $E_1$ , a ta z kolei zależna jest od długości twornika  $l_1$ , nad którą pracuje część prądnicowa oraz od prędkości obrotowej  $n_1$ .

Regulację momentu uzyskuje się poprzez możliwość zmiany położenia twornika względem pola magnetycznego jarzma części prądnicowej i silnikowej. Przy położeniu, w którym długość nasunięcia jarzma prądnicowej i twornika jest jednakowa wartości momentów na wejściu i wyjściu są równe – przełożenie 1:1. Regulując położenie twornika względem jarzm części prądnicowej i silnikowej reguluje się wartość prądu zwarcia w uzwojeniu, a tym samym gęstość prądu w obszarze uzwojenia. Skutkuje to zmianą wartości momentu. W chwili, kiedy długość części twornika znajdującej się pod jarzmem silnika jest większa niż części znajdującej się pod jarzmem prądnicowej ( $l_2 > l_1$ ), moment wyjściowy wzrasta a prędkość maleje. W sytuacji, kiedy dłuższa, aktywna część twornika znajduje się pod jarzmem prądnicowej ( $l_1 > l_2$ ), uzyskuje się efekt odwrotny, tj. maleje moment na wyjściu, natomiast wzrasta prędkość.

## 2. BADANIA LABORATORYJNE I ANALIZA PROTOTYPU PRZETWORNIKA

Badania na stanowisku laboratoryjnym (składającym się z przetwornika oraz dwóch maszyn prądu stałego tj. napędu i obciążenia) przeprowadzono w celu weryfikacji przebiegu obliczonych metodami polowymi napięć i prądów, przeanalizowano pulsacje momentu i określono wartości momentu zaczepowego. Wyznaczona została również sprawność urządzenia. Zidentyfikowano także rodzaje strat i do wyznaczenia strat w materiałach ferromagnetycznych wykorzystano obliczenia połowe rozkładu indukcji magnetycznej.



Rys. 2. Przetwornik elektromechaniczny, 1 – mechanizm do poziomego przesuwania twornika – regulacja aktywnych długości  $l_1$  i  $l_2$ , 2 – widoczny czujnik hallotronowy

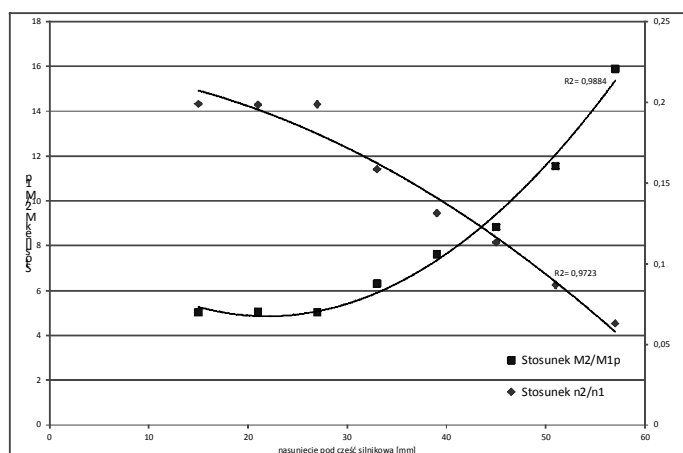
Fig. 2. Electromechanical torque converter 1 – a mechanism for horizontal armature shift – regulation of active lengths  $l_1$  and  $l_2$ , 2 – Hall sensor

Określenie strat w uzwojeniach twornika nie stanowiło trudności, jednak określenie strat w materiałach ferromagnetycznych wymagało szczególnego potraktowania. Zastosowanie modelu eliptycznej pętli histerezy [2] z modyfikacjami [3] (pozwoliło na rozpoznanie i wyznaczenie strat wskutek przemagnesowania materiałów ferromagnetycznych zarówno od magnesów trwałych jak i impulsów prądu zwarcia  $I_z$ ). Modyfikacje dotyczyły wielkości wyjściowej do modelu eliptycznej pętli histerezy na podstawie polowej analizy rozkładu pola elektromagnetycznego.

### 3. STRATY I SPRAWNOŚĆ URZĄDZENIA

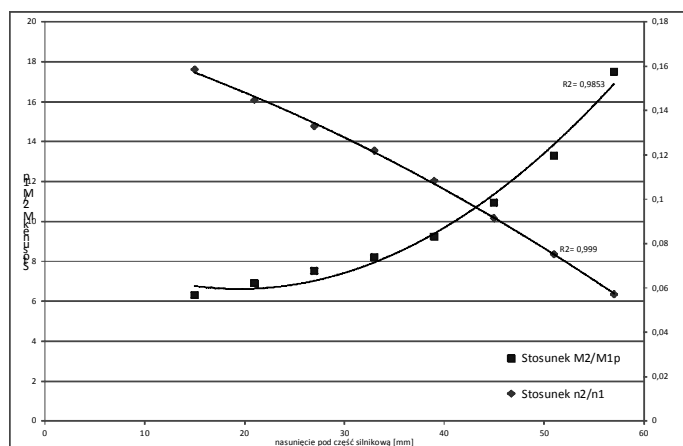
Idea działania przetwornika (1) została potwierdzona poprzez badania laboratoryjne, które wykazały, iż przełożenie prędkości obrotowych oraz momentów uzyskuje się wraz ze zmianą położenia twornika (rys. 3 i 4) po odjęciu wszystkich składników strat poszczególnych. Kiedy twornik przesuwany jest w stronę części silnikowej maleje prędkość natomiast wzrasta wartość momentu użytecznego zgodnie z tab.1. W przetworniku znajdują się dwie maszyny i to daje z natury mniejszą sprawność, która osiąga maksymalną wartość 7%. Zastosowanie praktyczne przetwornika staje się więc niemożliwe. Głównym celem prac badawczych stała się zatem identyfikacja i oszacowanie strat występujących w maszynie o tak nietypowej konstrukcji. Przy zastosowaniu modeli polowych oraz modelu pętli histerezy z modyfikacjami udało się rozpoznać i oszacować straty występujące w materiałach ferromagnetycznych przetwornika. Podsumowanie wyników dla analizowanych przypadków przedstawiono na rys. 5.

Straty wynikające z błędów pomiarowych, błędów w zastosowanych metodach oraz dodatkowe straty nieokreślone przedstawiono, jako dodatkowe straty obciążeniowe. Ich udział waha się od 2% do 30% strat całkowitych dla analizowanych przypadków. Straty nieokreślone mogą być powodowane przez strumień rozproszenia i złożoną budowę przetwornika. Końcówki uzwojeń są wyprowadzone na zewnątrz analizowanej maszyny i znajdują się w sąsiedztwie aluminiowej obudowy.



Rys. 3. Stosunek prędkości obrotowych ( $n_2/n_1$ ) oraz momentów ( $M_2/M_{1p}$ ) przy stałej wartości  $n_1 = 500$  obr/min.

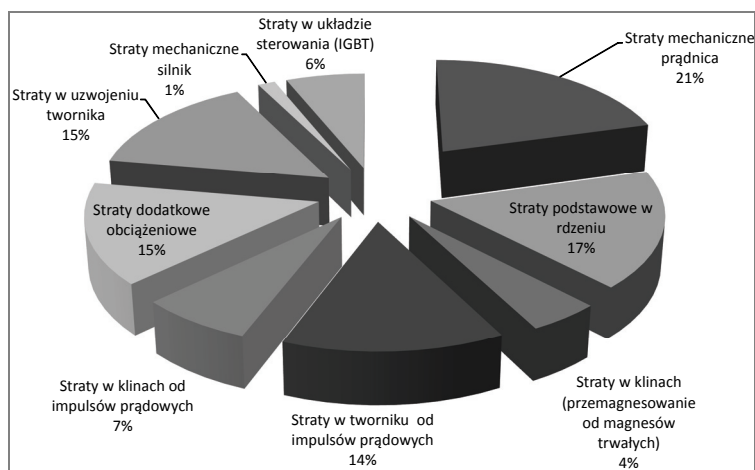
Fig. 3. Speed ( $n_2/n_1$ ) and torque ratio ( $M_2/M_{1p}$ ) at a constant value of input speed  $n_1 = 500$  r.p.m.



Rys. 4. Stosunek prędkości obrotowych ( $n_2/n_1$ ) oraz momentów ( $M_2/M_{1p}$ ) przy stałej wartości  $n_1 = 1000$  obr/min

Fig. 4. Speed ( $n_2/n_1$ ) and torque ratio ( $M_2/M_{1p}$ ) at a constant value of input speed  $n_1 = 1000$  r.p.m.

Dodatkowo twornik ma krótszą długość niż jarzma silnika i prądnicy (inaczej niż w ujęciu wirnik–stojan w maszynie konwencjonalnej) zatem możliwa jest interakcja strumieni magnetycznych z połączeń czołowych z jarzmi. Wartość strat dodatkowych obciążeniowych zmniejsza się wraz z malejącą wartością prądu zwarcia. Analiza oszacowanych strat pozwala na sformułowanie wniosku, iż przyszłe prace optymalizacyjne konstrukcji przetwornika powinny być skierowana na znaczne zmniejszenie strat mechanicznych, strat podstawowych w blachach przetwornika oraz w klinach. Wysoki udział strat mechanicznych związany jest z nietypową konstrukcją części prądniczej przetwornika (rys. 1), której wydłużone jarzmo obejmuje również część silnikową. Zdecydowany wzrost sprawności [4] przyniosłaby również zmiana konstrukcji magnetowodu przetwornika eliminująca kliny magnetyczne i zastępująca ten rodzaj redukcji momentu zaczepowego odpowiednim skosem twornika. Istotnym elementem optymalizacji powinna być również zmiana sposobu sterowania pracą przetwornika opierająca się na wykorzystaniu dwóch hallotronów i sondowania wzajemnego położenia jarzm prądnicy i silnika oraz wykorzystania tym samym dwóch połówek prądu zwarcia.



Rys. 5. Wykres ilustrujący procentowy udział strat w przetworniku dla wybranego pomiaru ( $n_1 = 500$  obr./min,  $n_2 = 100$  obr./min,  $M_{1p} = 0,24$  Nm,  $M_2 = 1,21$  Nm,  $P_1 = 227,71$  W,  $P_2 = 12,74$  W)  
 Fig. 5. The graph illustrating the percentage of losses in the transducer for the selected measurement ( $n_1 = 500$  r.p.m,  $n_2 = 1000$  r.p.m,  $M_{1p} = 0,24$  Nm,  $M_2 = 1,21$  Nm,  $P_1 = 227,71$  W,  $P_2 = 12,74$  W)

#### LITERATURA

- [1] SCHULZE B., DITTNER A., *Numer patentu GB2287585*, Volkswagenwerk AG (DE), 1995.
- [2] ZAKRZEWSKI K., *Berechnung der Wirk- und Blindleistung in einem ferromagnetischen Blech mit Berücksichtigung der komplexen magnetischen Permeabilität*, Wissenschaftlicher Zeitschrift der TH Ilmenau.

- [3] WALECKI K., ZAKRZEWSKI K., *The iron losses calculation in the armature of the electromagnetic torque converter*, ICEM 2010, XIX International Conference on Electrical Machines, 2010.
- [4] ŁUKANISZYN M., MŁOT A., *Torque characteristics of a BLDC motor with multipolar excitation*, The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2009, Vol. 28, No. 1.

#### ANALYSIS OF THE ELECTROMECHANICAL TORQUE AND ROTATIONAL SPEED CONVERTER

The electromagnetic torque converter consists of the symmetric generator and motor parts, as well as the common armature. It is a subject of patent which was issued in 1995. The laboratory tests of prototype validated the principle of work. Yet the losses preclude the practical application of the converter. The paper presents the tests results and indicates the possibilities to minimize losses.