

## Analiza polowo-obwodowa i badania doświadczalne przetwornika energii do zasilania obrotowego tłumika MR

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki analizy numerycznej elektromagnetycznego przetwornika energii przeznaczonego do zasilania obrotowego tłumika magnetoreologicznego (MR). Opisano budowę i działanie przetwornika. Wyznaczono rozkład indukcji pola magnetycznego w przetworniku i siłę elektromotoryczną indukowaną w jego uzwojeniu. Obliczono przebiegi czasowe napięcia, prądu i mocy chwilowej w obwodzie zakładając, że cewka sterująca tłumika MR jest reprezentowana przez dwójnik RL. Wyznaczono zależności prądu i mocy przetwornika od prędkości obrotowej. Wyniki analiz numerycznych potwierdzono przeprowadzając badania doświadczalne przetwornika.

**Abstract.** The article presents a numerical analysis of an electromagnetic energy converter designed to power a magnetorheological damper (MR). It describes the construction and the operation of the converter. The distribution of the magnetic field in the transducer and the electromotive force induced in its coil were determined. The time patterns of voltage, current and instantaneous power in the circuit were calculated assuming that the control coil of the MR damper was represented by a two-terminal circuit RL. Moreover, the current and the power of the transducer were determined versus the rotary speed. Numerical results were confirmed in the simulations the experimental tests. **A numerical analysis of an electromagnetic energy converter designed to power a magnetorheological damper**

**Słowa kluczowe** przetwornik elektromagnetyczny, tłumik MR, pole magnetyczne, obliczenia numeryczne, badania doświadczalne..

**Keywords:** electromagnetic transducer, MR damper, magnetic field, numerical calculations, experimental testing..

### Wstęp

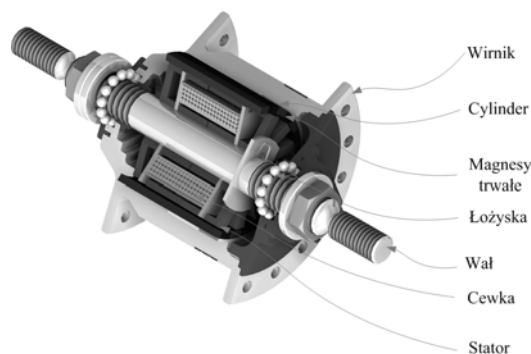
W ostatnim okresie można zaobserwować znaczący postęp w badaniach dotyczących nowych konstrukcji tłumików MR. Szczególnie zainteresowanie budzą takie konstrukcje liniowych tłumików MR, do których zasilania może być wykorzystywana energia odzyskiwana z drgań [1, 2, 3, 5, 6, 8]. W tym celu stosuje się specjalne przetworniki energii, których działanie opiera się na prawie indukcji elektromagnetycznej Faradaya. Zwykle takie przetworniki są osadzone na tłoczysku tłumików MR. Dodatkową zaletą tłumików MR o takiej konstrukcji jest to, że mogą one pełnić rolę czujników prędkości.

Objektem rozważań w tej pracy jest elektromagnetyczny przetwornik energii przewidziany do zasilania obrotowego tłumika MR [7]. Dla tego przetwornika przeprowadzono najpierw numeryczną analizę polowo-obwodową, następnie badania doświadczalne. W obliczeniach polowych wyznaczono rozkład indukcji pola magnetycznego w przetworniku i siłę elektromotoryczną indukowaną w jego uzwojeniu. Te obliczenia przeprowadzono przy użyciu programu Opera-3d [4]. W obliczeniach obwodowych założono, że cewka sterująca tłumika MR jest reprezentowana przez dwójnik RL. W tych obliczeniach wyznaczono przebiegi czasowe napięcia, prądu i mocy chwilowej w obwodzie, który tworzą połączone szeregowo, cewka sterująca tłumika MR i uzwojenie przetwornika. Wyznaczono także zależność prądu i mocy przetwornika od prędkości obrotowej. Obliczenia obwodowe przeprowadzono z wykorzystaniem pakietu MATLAB/Simulink. Wyniki otrzymane na etapie obliczeń numerycznych przetwornika potwierdzono w badaniach eksperymentalnych.

### Budowa i działanie

Wirnik przetwornika wykonany z materiału niemagnetycznego ma kształt cylindryczny. Wewnątrz wirnika jest cienkościenny cylinder wykonany z blachy ferromagnetycznej. Na cylindrze znajduje się 28 magnesów trwałych (rozłożonych obwodowo), tworzących 14 par biegunów. Elementy obwodu magnetycznego przetwornika są umieszczone wewnątrz cylindra. Wirnik jest osadzony za pomocą łożysk kulkowych na wale przetwornika, na którym znajduje się stator. Stator jest utworzony z 14 par prostokątnych ramek (odpowiednio do liczby par biegunów) wykonanych z pakietowanych blach ferromagnetycznych. Ramki są rozmieszczone promieniowo na wale i

przymocowane do karkasu wykonanego z materiału elektroizolacyjnego. Każda ramka składa się dwóch części połączonych wewnątrz uzwojenia i ukształtowanych w taki sposób, aby każda z części odpowiadała jednemu biegunowi. Przesunięcie kątowe między ramkami wynosi  $\sim 13^\circ$ . Wewnątrz ramek jest umieszczone uzwojenie przetwornika posiadające 306 zwojów, nawinięte na karkasie (w kierunku prostopadłym do ramek), drutem o średnicy 0.2 mm. Rdzeń uzwojenia jest utworzony z części ramek znajdujących się w jego wnętrzu, które stykają się bezpośrednio z wałem przetwornika. Przetwornik ma wyprowadzony na zewnątrz jeden przewód uzwojenia, natomiast drugi przewód jest przymocowany do wału. Indukcyjność uzwojenia wynosi 0.031 H, a oporność 2.7  $\Omega$ .



Rys. 1. Budowa przetwornika



Rys. 2. Powstawanie zmiennego strumienia w przetworniku

Działanie przetwornika wyjaśnia rys. 2. Wirnik, obracając się względem statora, wytwarza zmienny w czasie strumień magnetyczny wewnątrz uzwojenia, czego efektem jest indukowanie się siły elektromotorycznej. Jedną z części każdej z ramek odpowiada biegunowi magnetycznemu N

(nabiegownik 2), natomiast jej druga część biegunowi S (nabiegownik 1). Podczas ruchu wirnika następuje cykliczna zmiana strumienia magnetycznego.

### Obliczenia połowe

Zakłada się, że układy magnesów poruszają się z prędkością  $n$  względem współosiowego z nimi uzwojenia, które posiada  $k$  zwojów. Ze względu na zmieniający się jedynie kąt  $\varphi$ , wyniki otrzymane z analiz numerycznych transformowano do walcowego układu współrzędnych  $(r, \varphi, z)$ , gdzie  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ,  $\varphi = \arctan(y/x)$ ,  $z = z$ . Całkową postać prawa Faradaya przedstawia równanie:

$$(1) \quad e = \oint_l \mathbf{E} d\mathbf{l} = - \iint_s \frac{d\mathbf{B}}{dt} \cdot d\mathbf{S}$$

Wielkością reprezentującą rozkład pola magnetycznego w przestrzeni trójwymiarowej jest wektor indukcji magnetycznej:

$$(2) \quad \mathbf{B} = \mathbf{B}(t, r, \varphi, z)$$

którego pochodną względem czasu wyraża równanie:

$$(3) \quad \frac{d\mathbf{B}}{dt} = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial r} \frac{dr}{dt} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial \varphi} \frac{d\varphi}{dt} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial z} \frac{dz}{dt}$$

W przetworniku uzwojenie pozostaje nieruchome, magnesy natomiast obracają się o kąt  $\varphi$  względem osi  $z$ . Składowa promieniowa indukcji związana z tą osią, w szczelinie powietrznej przyjmuje wartość równą zero. Przy założeniu, że pole pochodzące od magnesów trwałych nie zależy od czasu oraz, że rozkład pola jest analizowany dla znanej wartości  $r$ , można przyjąć, iż równanie (1) ma postać:

$$(4) \quad e = - \iint_s \frac{d\mathbf{B}}{dt} \cdot d\mathbf{S} = - \iint_s \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial \varphi} \frac{d\varphi}{dt} \cdot d\mathbf{S} = - \iint_s \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial \varphi} n dS$$

Siła elektromotoryczna indukowana w uzwojeniu jest zatem sumą sił indukowanych w każdym zwoju. Wektor powierzchni  $d\mathbf{S}$  jest reprezentantem pobocznicy walca utworzonego dla promienia  $r=26.75$  mm o zwrocie i kierunku prostopadłym do powierzchni. Ta odległość wyznacza środek szczeliny pomiędzy cewką a wewnętrzną powierzchnią pakietu blach ferromagnetycznych. Decydujący wpływ na wartość siły elektromotorycznej indukowanej ma promieniowy rozkład indukcji magnetycznej  $B_r$ . Z uwagi na zastosowanie pakietu blach ferromagnetycznych o kształcie jak na rys. 5, wartość składowej  $B_z$  indukcji magnetycznej jest zbliżona do składowej promieniowej  $B_r$ , przy założeniu niewielkiego rozproszenia indukcji ( $B_z \approx B_r$ ). Dla  $z \in \langle -z_0, z_0 \rangle$  równanie

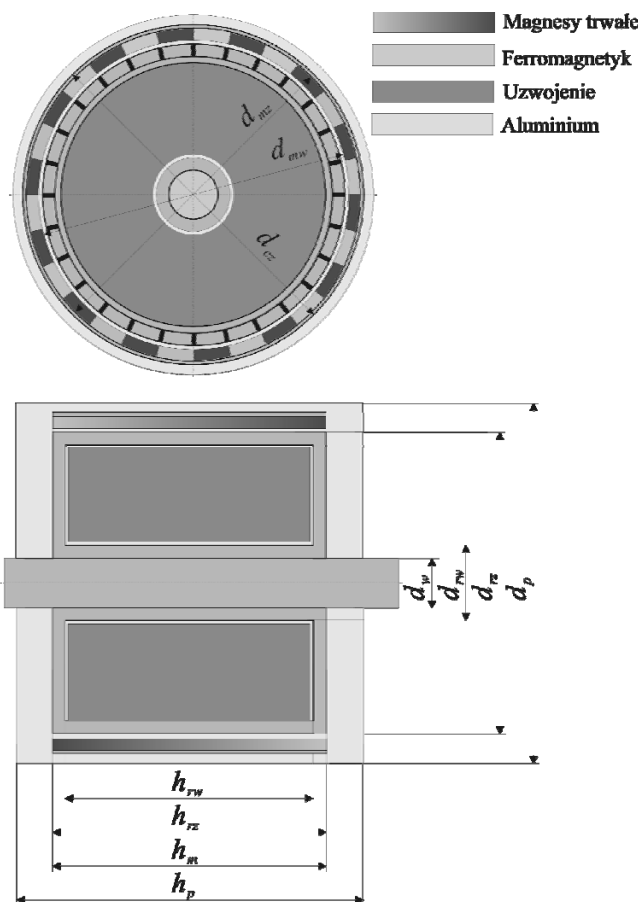
(4) przyjmuje postać:

$$(5) \quad e = -nk \int_{-z_0}^{z_0} dz \frac{\partial}{\partial \varphi} \int B_r(\varphi) r d\varphi$$

gdzie  $n = d\varphi/dt$  oznacza prędkość.

Przekrój poprzeczny i podłużny przetwornika pokazano na rys. 3, a wymiary elementów konstrukcyjnych podano w Tabeli 1. Przyjęte do obliczeń charakterystyki magnesowania  $B(H)$  magnesów trwałych i materiału ferromagnetycznego przedstawiono na rys. 4. Z uwagi na symetrię, model przetwornika ograniczono do 1/14 obszaru w płaszczyźnie XY (oznaczenia jak na rys. 6) oraz 1/2

obszaru w płaszczyźnie YZ. Skutkiem tego analizuje się tylko 1/28 objętości przetwornika. Liczba elementów skończonych modelu obliczeniowego wynosiła 258904, a liczba węzłów 122964.

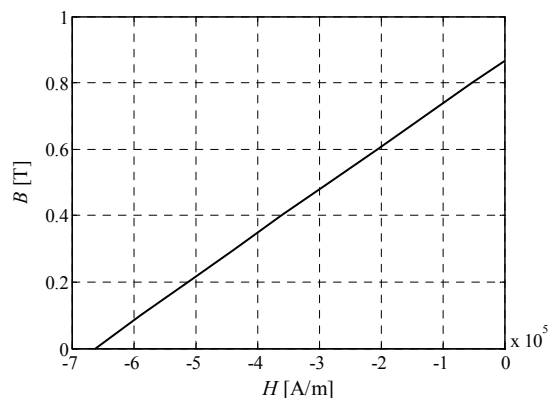


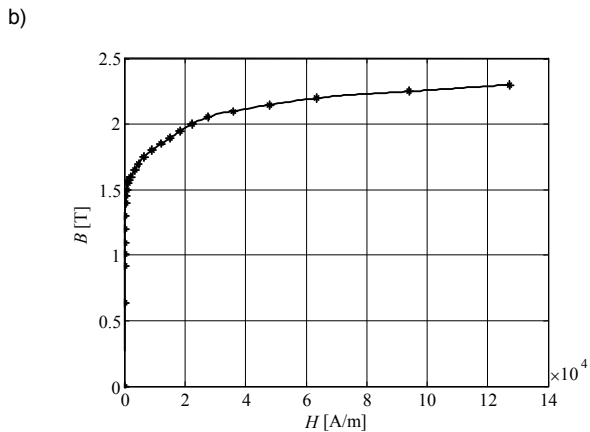
Rys. 3. Przekrój poprzeczny i podłużny przetwornika

Tabela 1. Wymiary elementów przetwornika

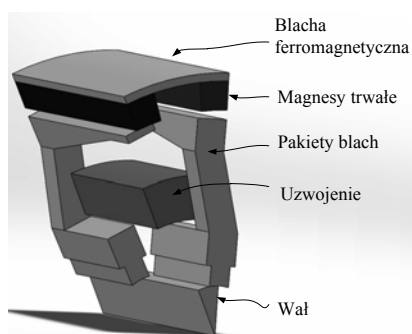
Pakiety blach	Średnica wewnętrzna	$d_{rw}$	24,74 mm
	Średnica zewnętrzna	$d_{rz}$	51,73 mm
	Wysokość wewnętrzna	$h_{rw}$	24 mm
	Wysokość zewnętrzna	$h_{rz}$	31 mm
Magnesy trwałe	Średnica wewnętrzna	$d_{mw}$	54 mm
	Średnica zewnętrzna	$d_{mz}$	61 mm
	Wysokość	$h_m$	31 mm
Pozostałe elementy	Średnica wału	$d_w$	12 mm
	Średnica przetwornika	$d_p$	66 mm
	Wysokość przetwornika	$h_p$	35 mm
	Średnica zewnętrzna cylindra	$d_{cz}$	63 mm

a)

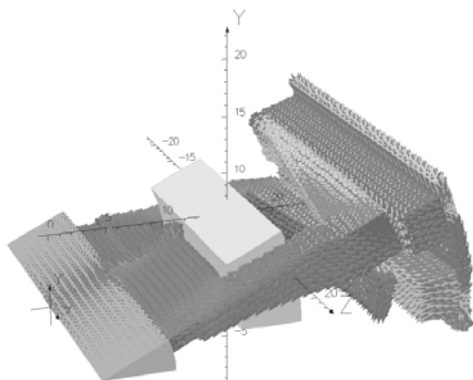




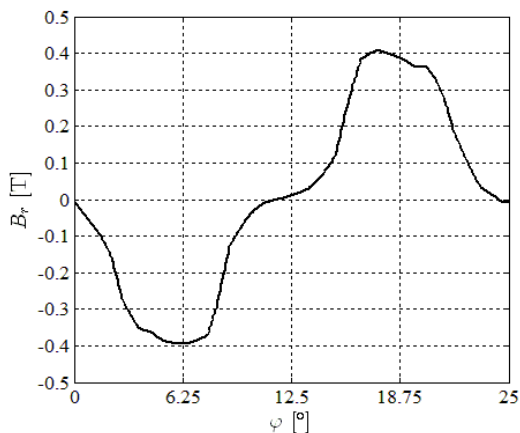
Rys. 4. Charakterystyki magnesowania: a) magnesów, b) ferromagnetyka



Rys. 5. Model bryłowy jednej pary biegunów przetwornika



Rys. 6. Rozkład indukcji magnetycznej dla jednej pary biegunów

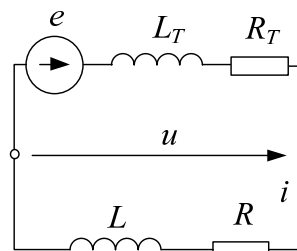


Rys. 7. Zależność składowej promieniowej indukcji magnetycznej od przemieszczenia

Wyznaczony, dla jednej pary magnesów, rozkład pola magnetycznego przedstawiono na rys. 6. Na tej podstawie obliczono zależność składowej promieniowej indukcji magnetycznej od położenia kąowego (rys. 7).

#### Obliczenia obwodowe

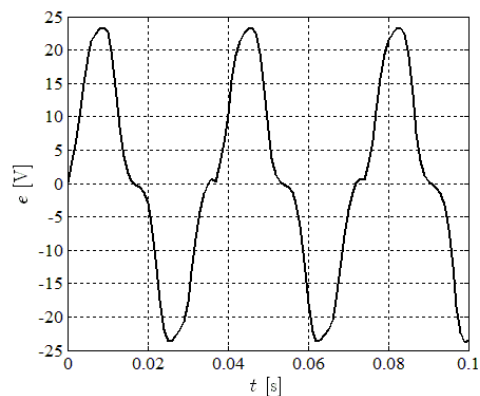
Biorąc pod uwagę parametry elektryczne przetwornika (indukcyjność  $L_T=0.031$  H, oporność  $R_T=2.7$   $\Omega$ ) i zakładając, że jest on obciążony cewką sterującą tłumika MR (dwójnikiem RL,  $R=14.67$   $\Omega$ ,  $L=0.772$  H, rys. 8) przeprowadzono analizę obwodu w założonym zakresie prędkości obrotowej (10, 250) obr/min. Wybrane wyniki obliczeń zamieszczono na rys. 9 i 10. Wykresy z rys. 9 przedstawiają przebiegi czasowe siły elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniu przetwornika oraz napięcia, natężenia prądu i mocy chwilowej w obwodzie.



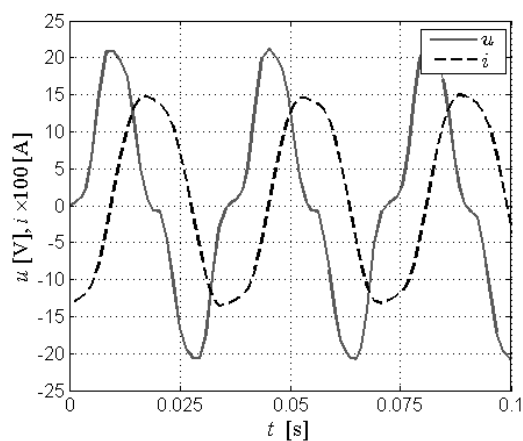
Rys. 8. Schemat elektryczny układu przetwornik-tłumik MR

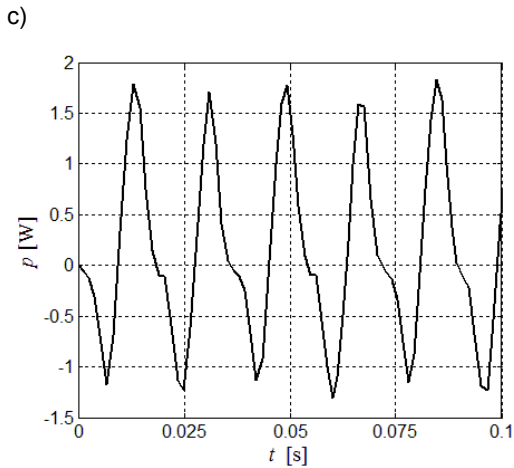
Jak można zauważyć, przesunięcie fazowe między napięciem i natężeniem prądu wzrasta ze wzrostem prędkości obrotowej (wzrost częstotliwości napięcia indukowanego). Wykresy z rys. 10 prezentują zależność wartości skutecznej prądu oraz mocy czynnej od prędkości obrotowej. Jak widać, wartość mocy czynnej rośnie wraz ze wzrostem prędkości obrotowej.

a)



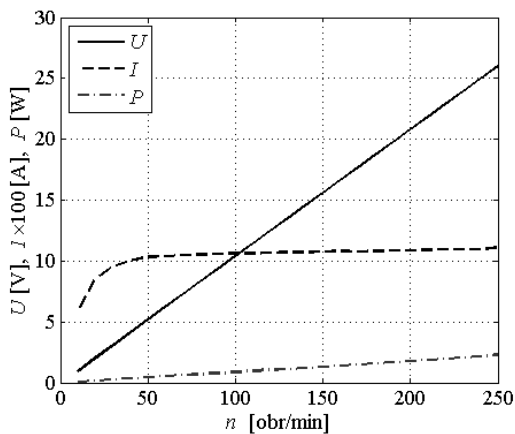
b)





Rys. 9. Przebieg czasowy: a) siły elektromotorycznej, b) napięcia i natężenia prądu, c) mocy chwilowej;  $n=120$  obr/min

Wartości skuteczne indukowanej w przetworniku siły elektromotorycznej oraz napięcia w obwodzie rosną liniowo ze wzrostem prędkości i wynoszą odpowiednio przy 10 obr/min  $E \approx U \approx 2$  V oraz przy 250 obr/min  $E=32.5$  V,  $U=31$  V. Z wykresów na rys. 10 wynika, że pomimo wzrostu napięcia, natężenie prądu, przy prędkości większej niż 100 obr/min wykazuje nieznaczny wzrost.



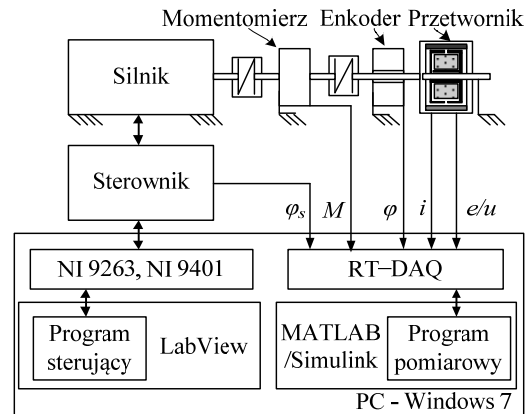
Rys. 10. Zależność natężenia prądu i mocy od prędkości

### Badania doświadczalne

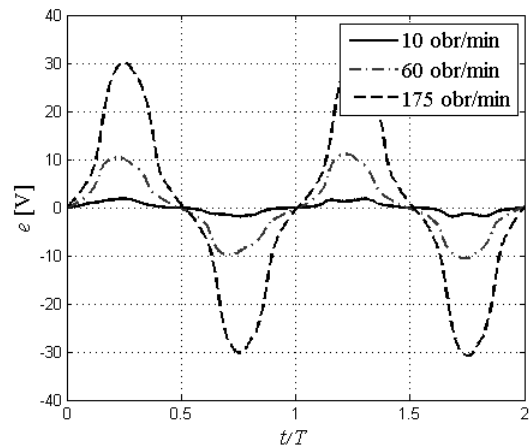
Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys. 11. W skład układu wchodzi: silnik synchroniczny HC-SF 152B, momentomierz TMB 306/411 oraz enkoder RI76TD. Do sterowania silnikiem użyto kart NI 9263 oraz NI 9401 firmy National Instruments oraz oprogramowania LabVIEW. Do rejestracji sygnałów analogowych (momentu  $M$ , siły elektromotorycznej  $e$ , napięcia  $u$ , natężenia prądu  $i$ ) oraz cyfrowych (przemieszczenia kąтового  $\varphi$ ) wykorzystano komputer PC z zainstalowaną kartą RT-DAC i środowisko MATLAB/Simulink. Natężenie prądu w układzie mierzono przy użyciu przetwornika prądowo-napięciowego składającego się z rezystora pomiarowego  $R_s=0,05 \Omega$  oraz wzmacniacza operacyjnego INA286 firmy Texas Instruments (wzmocnienie napięciowe 100V/V). Częstotliwość próbkowania mierzonych wielkości wynosiła 1 kHz.

Przetwornik zbadano w stanie jałowym i obciążenia cewką sterującą tłumika MR (rys. 8). Badania w stanie jałowym wykonano przy prędkości obrotowej  $n$  zmieniającej się w przedziale (1, 250) obr/min. Przebiegi siły elektromotorycznej  $e$  w czasie względnym przedstawiono na rys. 12 przy trzech wartościach prędkości  $n$ . Przy prędkości  $n=60$  obr/min, częstotliwość siły elektromotorycznej wynosi 14 Hz, co jest związane z 14

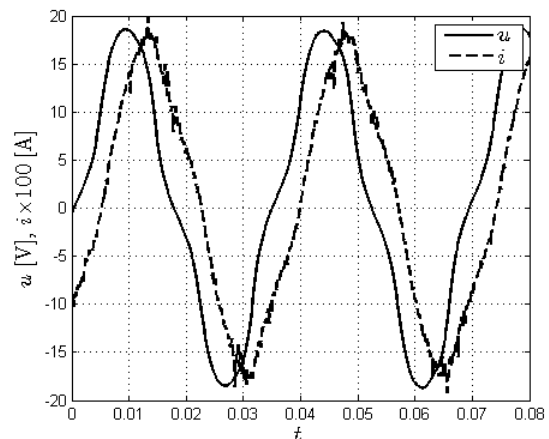
parami biegunów, które tworzą magnesy trwałe w obwodzie magnetycznym przetwornika. Z zamieszczonych przebiegów widać wzrost maksymalnej wartości siły elektromotorycznej  $e$  ze wzrostem prędkości  $n$ . Przy prędkości  $n=10$  obr/min wartość maksymalna siły elektromotorycznej  $e$  wynosiła 1,8 V, natomiast przy  $n=175$  obr/min odpowiednio 30 V. Wyniki eksperymentów potwierdzają poprawność przeprowadzonych obliczeń numerycznych. Występujące rozbieżności dotyczące wartości siły elektromotorycznej wynikają głównie z różnicy w rozkładzie indukcji magnetycznej wyznaczonej z obliczeń numerycznych, a jej rzeczywistym rozkładem w przetworniku oraz z założonych charakterystyk magnesowania.



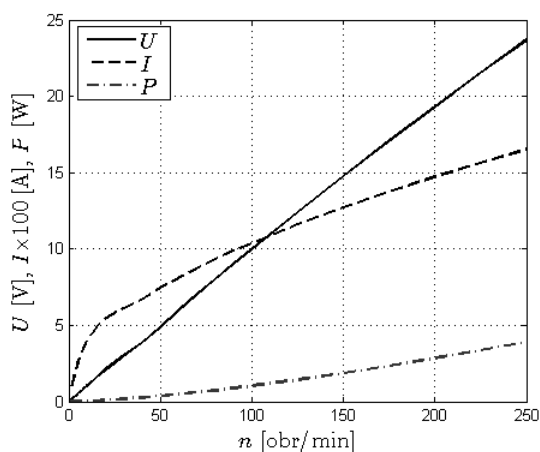
Rys. 11. Schemat układu pomiarowego



Rys. 12. Przebiegi czasowe siły elektromotorycznej



Rys. 13. Przebiegi czasowe napięcia i natężenia prądu



Rys. 14. Zależność *rms* napięcia, natężenia prądu i mocy od prędkości

Wyniki badań przetwornika w stanie obciążenia przedstawiono na rys. 13 i 14. Na rys. 13 pokazano przebiegi czasowe napięcia  $u$  oraz natężenia prądu  $i$  przy prędkości  $n=125$  obr/min. Przy tej prędkości maksymalne wartości napięcia i natężenia prądu wynoszą odpowiednio 18.4 V i 0.17 A. Z wykresów widać przesunięcie fazowe między wielkościami  $u$  oraz  $i$ , które wynosi 51°. Na rys. 14 przedstawiono zależności *rms* napięcia  $U$ , natężenia prądu  $I$  oraz mocy czynnej  $P$ . Jak widać wartości tych wielkości rosną ze wzrostem prędkości. Przy prędkości  $n=250$  obr/min wartości napięcia  $U$  i natężenia prądu  $I$  wynoszą odpowiednio 24 V i 0.16 A. Rozbieżności między wynikami obliczeń i eksperymentów dotyczące wartości napięcia  $u$ , natężenia prądu  $i$  oraz mocy  $p$  w obwodzie wynikają z przyjętego modelu cewki przetwornika i tłumika MR.

#### Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki analizy polowo-obwodowej oraz badań doświadczalnych przetwornika elektromagnetycznego do zasilania obrotowego tłumika MR.

Na ich podstawie można sformułować następujące wnioski:

- indukcja magnetyczna zmienia się okresowo wraz ze zmianą położenia magnesów trwałych,
- wartość skuteczna siły elektromotorycznej oraz napięcia w obwodzie zmienia się liniowo z prędkością obrotową,
- powolny wzrost wartości natężenia prądu wraz z prędkością obrotową wynika ze wzrastającą częstotliwością

indukowanego napięcia, co przekłada się na wzrost wartości zastępczej reaktancji obwodu elektrycznego,

- wyniki obliczeń numerycznych wykazały zgodność z wynikami badań laboratoryjnych,
- uzyskane wartości natężenia prądu w badanym zakresie zmian prędkości obrotowej dają możliwość zastosowania przetwornika jako źródła zasilania dla tłumika MR.

Uzyskane wyniki będą wykorzystane do zaprojektowania i wykonania układu pozycjonowania z odzyskiem energii, w którym elementem wykonawczym będzie obrotowy tłumik MR.

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego o numerze 15.11.130.184.

**Autorzy:** dr inż. Andrzej Matras, AGH, Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii, E-mail: matras@agh.edu.pl, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; prof. dr hab. inż. Bogdan Sapiński, Katedra Automatykacji Procesów, Akademia Górniczo-Hutnicza, E-mail: deep@agh.edu.pl, mgr inż. Marcin Węgrzynowski, Katedra Automatykacji Procesów, Akademia Górniczo-Hutnicza, E-mail: mweg@agh.edu.pl,

#### LITERATURA

- [1] Choi Y. T., Werely N. M., Self-powered magnetorheological dampers, Journal of Vibration and Acoustics, 131 (2009), 44–50.
- [2] Jung H. J., Jang D. D., Koo J. H., Cho S. W., Experimental Evaluation of a 'Self-Sensing Capability of an Electromagnetic Induction System Designed for MR Dampers, Journal of Intelligent Material Systems and Structures. Vol. 21 (2010), 837–836.
- [3] Liao W. H., Chen C., Self-powered, self-sensing magnetorheological dampers, (2012) US Patent Application No: 2012/0031,719.
- [4] Opera-3d version 12, User Guide, Vector Fields Ltd., (2007).
- [5] Sapiński B., Experimental study of a self-powered and sensing MR damper-based vibration control system, Smart Materials and Structures, 20 (2011), 105007.
- [6] Sapiński B., Energy harvesting MR linear damper: prototyping and testing, Smart Materials and Structures, 23 (2014), 035021.
- [7] Sapiński B., Experimental investigation of an energy harvesting rotary generator-MR damper system. Journal of Theoretical and Applied Mechanics. ISSN 1429-295 (2016)
- [8] Wang D. H., Wang T., An integrated relative displacement self-sensing magnetorheological damper, Smart Materials and Structures, 19 (2010), 105008.