

Zdzisław Życki, Tomasz Błażejczyk  
Instytut Elektrotechniki

## WYZNACZANIE WARTOŚCI STRUMIENIA ROZPROSZONEGO W UOGÓLNIONYM UKŁADZIE MAGNETYCZNYM PRZY ZASTOSOWANIU METODY MAGNETOPTYCZNEJ

### DETERMINATION THE VALUE OF THE MAGNETIC LEAKAGE FLUX IN A MAGNETIC SYSTEM USING THE MAGNETOOPTIC METHOD

**Abstract:** In investigations of magnetic flux distribution in electromagnetic equipment it is possible to apply a method, using magneto-optic effects. The paper presents results of measurements of the value of the leakage flux appearing in air channels of the magnetic cores being modeled, of the investigated electromagnetic equipment (electrical machine, electric apparatus or transformer). The magneto-optic sensor (fiber optical) is placed in the channel of the core. The paper includes results of verifying numerical calculations of the magnetic leakage flux density in the air channel. Examples of design solutions of magnetic systems are given, where it is possible to apply measuring systems fulfilling the role of overcurrent apparatus.

#### 1. Wstęp

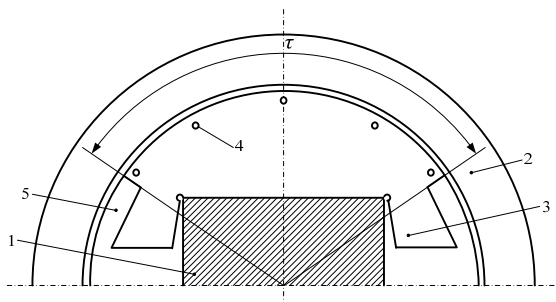
Światłowód wchodzący w skład układu pomiarowego, przeznaczonego do pomiaru wartości wielkości magnetycznych (indukcji, natężenia pola magnetycznego), metodą magnetoptyczną, może spełniać dwie funkcje: elementu transmisyjnego sygnałów, lub też funkcję czujnika pomiarowego. W drugim wariantcie spełnianej funkcji, światłowód – wykonany, jako czujnik pomiarowy – składa się z następujących podzespołów: światłowodu wejściowego, światłowodu wyjściowego oraz z głowicy czujnika. Dla uproszczenia dalszego opisu układu pomiarowego pominięte są pozostałe zespoły układu. Istotnym parametrem czujnika, z punktu widzenia możliwości oceny jego zdolności pomiarowych sygnału, jest długość samej głowicy. Wartość sygnału napięciowego (wyrażanego w mV), odbieranego z czujnika, a powstającego pod wpływem oddziaływania zewnętrznego pola magnetycznego na strumień świetlny, propagujący się w światłowodzie, wynika z zależności – stanowiącej iloczyn długości drogi światła w głowicy ( $L$ ), wartości natężenia pola magnetycznego ( $H$ ) i wartości współczynnika Verdet ( $k_v$ ). Należy w tym miejscu zwrócić uwagę na wpływ współczynnika Verdet (zwanego również stałą Verdet), na wartość mierzonego (z zasady za pomocą oscyloskopu cyfrowego), sygnału napięciowego. Otóż, wartość stałej zależy od rodzaju materiału, z którego są wykonane światłowody oraz głowice. Do wykonania czujników światłowodowych i głowic stosowane są odpowiednio dobierane szkła wieloskładnikowe oraz tworzywa sztuczne. Wartość stałej

charakteryzuje zdolność materiału do skręcania płaszczyzny polaryzacji w polu magnetycznym. Przedział zmian wartości stałej dla materiałów osiągalnych na rynku (dla długości fali światła 635 nm) może wynosić – od ok 13,8 rad/Tm do 35,7 rad/Tm. Warto również poinformować Czytelnika, że wymiary czynne długości czujników stosowanych w badaniach zawierały się w granicach od 0,5 mm – dla czujników o długości fali świetlnej 1550 nm, do 21 mm – dla czujników o długości fali 635 nm. W prowadzonych na przestrzeni trzech lat badaniach wykorzystywano obie, wymienione długości fali. Publikacje z lat 2007-2009 zawierają wyniki pomiarów uzyskiwanych przy użyciu metody magnetoptycznej, dla której przyjęto długość fali światła 1550 nm. Biorąc pod uwagę czynne długości czujników stosowanych w omawianych badaniach, wartości stałej Verdet i wartości prądu – wywołującego w uzwojeniu wymaganą wartość natężenia pola (przy uwzględnieniu parametrów uzwojenia) – można wyznaczyć wartość sygnału napięciowego uzyskiwanego z czujnika. Wyznaczone wartości napięć wyrażały się liczbami rzędu kilkudziesięciu mV. Bardziej szczegółowe informacje dotyczące układów pomiarowych, stosowanych w opisanych badaniach oraz opisów wykonanych czujników, są omówione m.in. w publikacjach [1; 2; 3].

#### 2. Wprowadzenie

Metody wyznaczania przewodności dróg strumieni magnetycznych nabrały większego znaczenia po wprowadzeniu do produkcji materia-

łów magnetycznie twardych o zwiększonej gęstości energii magnetycznej. Praktycznie były to lata czterdzieste i pięćdziesiąte ubiegłego wieku. Np. Alnico 5 wprowadzono do produkcji w 1940 r. zaś inne odmiany materiałów w połowie lat pięćdziesiątych Alnico 9 (1954), Alnico 8 (1956), ferryty anizotropowe Fxd 300 i Fxd 425 (1954).



Rys. 1. Sposób wpływanie na wartość strumienia rozproszonego wg [4, 5]: 1 – magnes trwały; 2 – jarzmo stojana; 3 – element wpływający na wartość strumienia rozproszonego i mocowania nabiegunnika w odlewie aluminiowym; 4 – pręt klatki tłumiącej; 5 – przestrzeń zalana aluminium

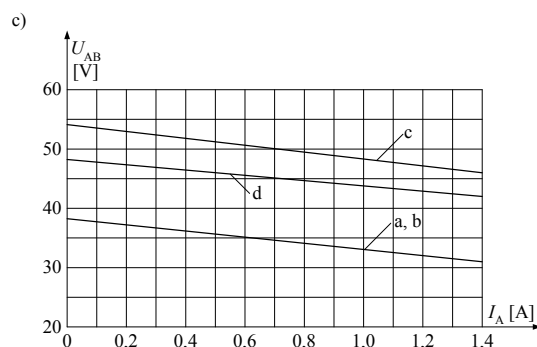
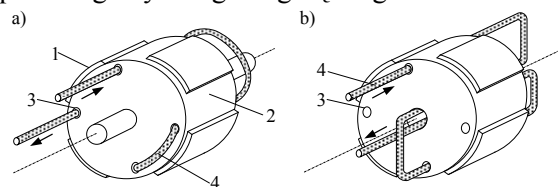
Istotnymi przyczynami zainteresowania się nowymi obszarami obliczeń układów magnetycznych było pojawienie się magnesów trwałych o dużych bryłach. Spowodowało to konieczność stosowania bardziej racjonalnego gospodarowania energią magnetyczną. Doszły również nowe problemy, które trzeba było rozwiązywać przy projektowaniu maszyn elektrycznych. Były to problemy natury mechaniczno-wytrzymałościowej, które komplikowały w wielu przypadkach ograniczenia wartości strumieni rozproszonych. Niżej zamieszczone rysunki 1, 2 i 3 w pewnym uproszczeniu ilustrują te problemy.

Rys. 1 przedstawia fragment wirnika dwubiegunowej maszyny synchronicznej, w której dla ograniczenia wpływu poprzecznego oddziaływania twornika zdecydowano się na zwiększenie wartości strumieni rozproszonych biegunów. Nadanie specyficznego kształtu nabiegunnikom wynika z konieczności wzmocnienia mocowania nabiegunników i jednocześnie z potrzeby zwiększenia przewodności dróg dla strumieni rozproszonych.

Prądnice synchroniczne o magnesach trwałych zawierające przedstawiony sposób rozwiązywania konstrukcji wirników stosowano w USA w latach

pięćdziesiątych i później [4,5]. Budowano wówczas maszyny o mocach do ok. 75 kW.

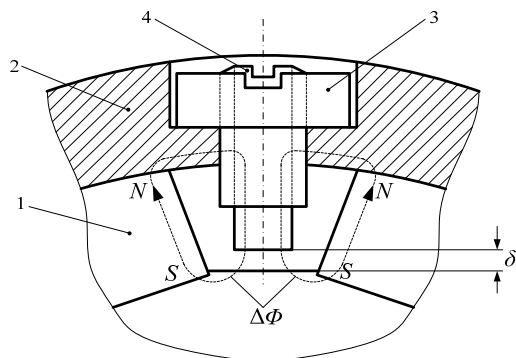
Odmienne sposób wpływania na wzrost wykorzystania energii magnetycznej magnesu trwałego przedstawiono na rys. 2. Zwiększenie strumienia czynnego w tym rozwiązaniu wirnika, uzyskuje się w wyniku zastąpienia uzwojeń magnesujących prętem stalowym o długości równej długości wirnika, po impulsowym namagnesowaniu magnesu. W czasie magnesowania oraz w czasie montażu maszyny, bieguny wirnika były zwarte za pomocą stalowego jarzma. Wprowadzenie prętów do otworów powoduje wzrost wartości strumieni rozproszonych oraz przesunięcie ogniska skupienia linii pola magnetycznego w górę biegunów.



Rys. 2. Sposób zwiększania odporności magnesu na odmagnesowanie wg [6] i charakterystyki obciążenia prądnicy (przetwornicy PDM -100) przed zmianą układu magnetycznego i po zmianie: a) i b) dwa sposoby magnesowania impulsowego; c) charakterystyki obciążenia; charakterystyki a i b przetwornicy – wykonanie fabryczne; charakterystyki c i d – po wprowadzeniu sposobu będącego przedmiotem patentu (po stabilizacji magnesu zwarciami i stabilizacji w powietrzu); 1 – magnes trwały; 2 – odlew aluminiowy; 3 – otwór w odlewie służący do umieszczenia przewodów magnesujących i następnie umieszczenia pręta stalowego; 4 – uzwojenie magnesujące (izolowany drut)

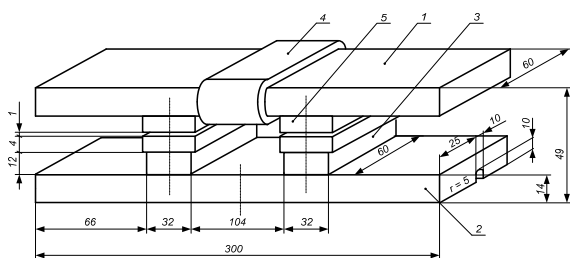
Eksperymenty wykonywane na prądnicach (przetwornicach lotniczych) dwóch typów (cztero- i sześciobiegunowych w liczbie po 2 szt. każdego typu) wykazały znaczny, trwały wzrost mocy maszyn. Charakterystyki obciążenia ma-

szyn (jednego typu) przedstawiono na rys. 2c. Wzrosła również odporność maszyn na odmagnesowania zwarciami oraz na demontaż maszyn. Obliczony metodą numeryczną rozkład pola w wirniku dla różnych stanów energetycznych magnesu przedstawiono w publikacji [7]. Sposób rozwiązania zabezpieczenia przed odmagnesowaniem maszyny został opatentowany [6].



Rys.3. Sposób regulacji strumienia magnetycznego wg [8]: 1 – magnes trwały; 2 – jarzmo stojana; 3 – niemagnetyczny element regulacyjny (nagwinutowany); 4 – stalowa śruba umożliwiająca regulację strumienia  $\Phi$ ;  $\delta$  – zakres regulacji.

Odmienne sposoby regulacji w stosunku do poprzednich rozwiązań konstrukcyjnych, lecz odnoszący się do strumienia głównego (czynnego) przedstawiono na rys. 3.



Rys.4. Model uogólnionego, magnetycznego układu pomiarowego wg [3]: 1 – jarzmo górne, 2 – jarzmo dolne z kanałem do pomiaru indukcji czujnikiem magnetoopcyjnym, 3 – magnes trwały typu VACODYM 510VR (NdFeB)  $B_r = 1,41$  T;  $H_{CB} = 980$  kA/m, 4 – uzwojenie magnetyczne, 5 – nabiegownik

Układ magnetyczny, który posłużył do badań symulacyjnych, opisanych w dalszej treści, został przedstawiony na rys. 4. Celem badań symulacyjnych było rozpoznanie przybliżonej wartości i rozkładu strumienia rozproszonego.

### 3. Magnetoopcyjny efekt Faradaya (zjawisko Faradaya)

Efekt Faradaya uzyskuje się w wyniku skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła (spolaryzowanego liniowo) propagującego się w ośrodku poddanego działaniu pola magnetycznego (tzw. wymuszona dwójłomność ośrodka) [2; 3; 11]. Fala światła spolaryzowana liniowo może być przedstawiona matematycznie w postaci dwóch składowych fal spolaryzowanych kołowo o przeciwnych skrętnościach – w prawo (przesunięcie w fazie równe  $\pi/2$ ) i w lewo (przesunięcie w fazie równe  $-\pi/2$ ). Ponieważ składowe kołowe biegną w ośrodku materialnym z różnymi prędkościami, na wyjściu z ośrodka pojawia się różnica faz, której wartość zależy od długości drogi  $L$ , którą światło przebiega w ośrodku [11,12].

$$\delta = \frac{2\pi L}{\lambda} (n_l - n_p), \quad (1)$$

gdzie:  $\delta$  – różnica faz,  $L$  – długości drogi, którą światło przebiega w ośrodku,  $n_l$  – współczynnik załamania fali spolaryzowanej kołowo w lewo,  $n_p$  – współczynnik załamania fali spolaryzowanej kołowo w prawo.

Na podstawie równania (1) można wyznaczyć kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji fali spolaryzowanej liniowo  $\theta$  (skręcenie płaszczyzny drgań względem płaszczyzny fali padającej):

$$\theta = 0,5\delta = \frac{L\pi}{\lambda} (n_l - n_p). \quad (2)$$

Kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji  $\theta$  może być opisany równaniem (3):

$$\theta = \frac{L\varepsilon_t \pi}{n\lambda} \cos \alpha, \quad (3)$$

gdzie:  $\varepsilon_t$  – składowa tensora przenikalności elektrycznej w zewnętrznym polu magnetycznym ( $\varepsilon = n^2$ ,  $\varepsilon_t \ll \varepsilon$ ),  $n$  – bezwzględny współczynnik załamania światła,  $\alpha$  – kąt zawarty między kierunkiem propagacji fali świetlnej a kierunkiem linii sił pola magnetycznego.

Składowa tensora przenikalności elektrycznej  $\varepsilon_t$  zależy liniowo od natężenia zewnętrznego pola magnetycznego ( $\varepsilon_t = k_{mat} H$ , gdzie  $k_{mat}$  jest stałą materiałową ośrodka). Wówczas równanie (3) można zapisać w postaci:

$$\theta = \frac{k_{mat} \pi}{n\lambda} LH \cos \alpha = k_v LH \cos \alpha, \quad (4)$$

gdzie:  $k_v$  – stała Verdet, charakteryzująca zdolność danej substancji do skręcania płaszczyzny polaryzacji w polu magnetycznym,

$$k_v = \frac{k_{\text{mat}} \pi}{n \lambda} \quad [\text{A/m}], \quad H - \text{natężenie pola magnetycznego.}$$

Równanie (4) można zapisać również w następującej postaci [12]:

$$\theta = k_v L B \cos \alpha \quad (5)$$

Stała Verdet jest wówczas wyrażona w  $[\text{rad/Tm}]$ .

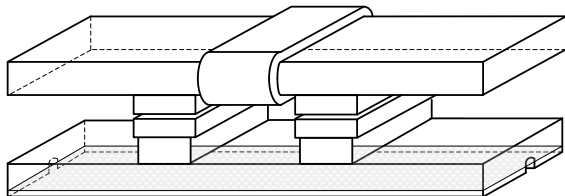
Z równań (4) i (5) wynika, że efekt Faradaya jest najbardziej odczuwalny dla  $\alpha = 0$ , tzn. w przypadku, gdy kierunki propagacji fali świetlnej i linii sił pola magnetycznego są do siebie równoległe. Kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji  $\theta$  jest zależny od długości drogi  $L$ , którą światło przebiega w ośrodku znajdującym się w polu magnetycznym oraz od wartości natężenia pola magnetycznego  $H$ .

Dla  $\alpha = 0$  kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji można opisać równaniem:

$$\theta = k_v L B \quad (6)$$

#### 4. Wyniki badań symulacyjnych

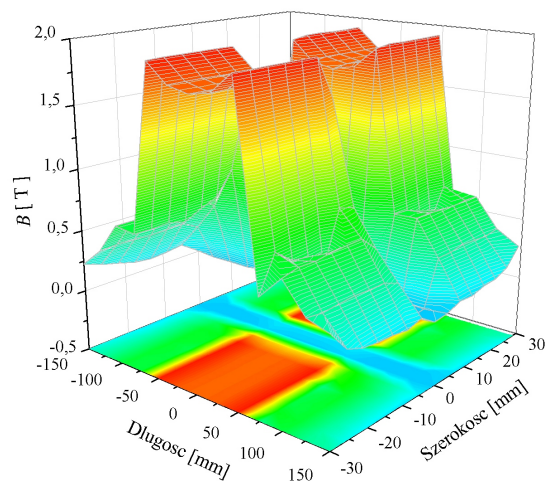
W ramach badań symulacyjnych wykonano obliczenia numeryczne rozkładów gęstości strumienia magnetycznego w poszczególnych fragmentach uogólnionego układu magnetycznego. Celem badań symulacyjnych było rozpoznanie przybliżonej wartości i rozkładu strumienia rozproszonego w kanale znajdującym się w dolnym jarzmie (2 na rys. 4), pod kątem doboru czujnika optycznego z właściwą charakterystyką pracy. Analizowano pole magnetostaticzne. Na rys. 5 zaznaczono powierzchnie obliczeniową, na której wyznaczono rozkłady gęstości strumienia magnetycznego.



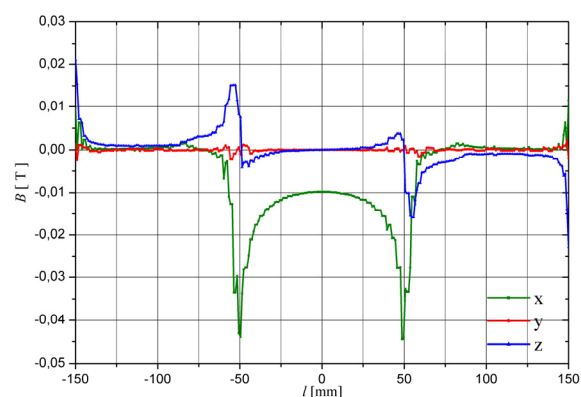
Rys. 5. Płaszczyzna obliczeniowa przecinająca kanał w odległości 1 mm od jego górnej powierzchni (fragment zaciemniony)

Na rysunkach 6 i 8 przedstawiono rozkłady gęstości strumienia magnetycznego na powierzch-

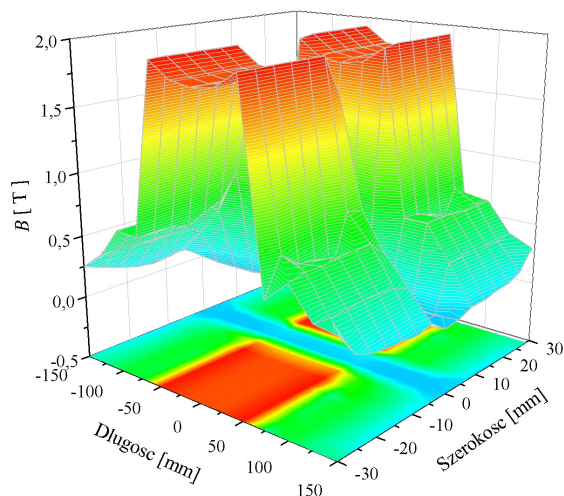
niach przechodzących na wysokości 1 mm od górnej krawędzi kanału. Obliczenia wykonano dla dwóch wariantów: dla wariantu wzbudzenia pochodzącego tylko od magnesów trwałych (3, na rys. 4, zagadnienie 1) oraz dla wariantu – wzbudzenia pochodzącego od magnesów trwałych i od prądu występującego w uzwojeniu magnesującym (4, na rys. 4, zagadnienie 2 i 3). Wyniki są przedstawione na rysunkach 7, 9 i 10. Wyrażają one rozkłady składowych indukcji magnetycznej. Wartości zostały wyznaczone dla punktów leżących na prostej przechodzącej na wysokości 1 mm poniżej górnej krawędzi kanału. W tym położeniu znajdował się czujnik optyczny (ściślej, na tej wysokości – w przybliżeniu – znajdował się środek geometryczny czujnika magnetoptycznego).



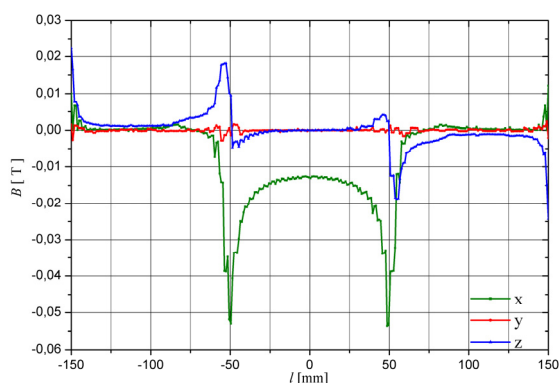
Rys. 6. Rozkład modułu indukcji magnetycznej w układzie magnetycznym przy wzbudzeniu od magnesów trwałych na powierzchni z rys. 5



Rys. 7. Rozkład indukcji magnetycznej w układzie magnetycznym przy wzbudzeniu od magnesów trwałych na prostej przechodzącej w połowie szerokości układu, w odległości 1 mm od górnej krawędzi kanału



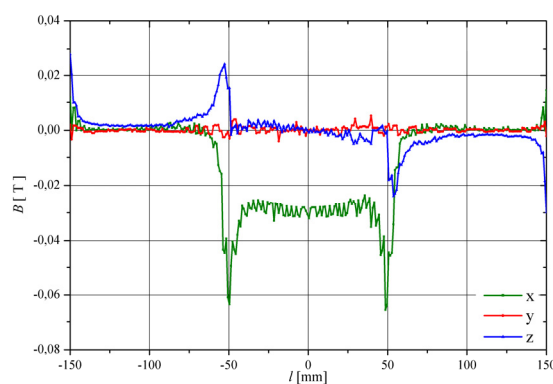
Rys.8. Rozkład modułu indukcji magnetycznej w układzie magnetycznym przy wzbudzeniu od magnesów trwałych i prądu w uzwojeniu magnesującym  $I_c = 100$  A, na powierzchni z rys. 5



Rys.9. Rozkład indukcji magnetycznej w układzie magnetycznym przy wzbudzeniu od magnesów trwałych i prądu w uzwojeniu magnesującym  $I_c = 100$  A, na prostej przechodzącej w połowie szerokości układu, w odległości 1 mm od górnej krawędzi kanału

Głównym zagadnieniem było wyznaczenie rozkładu gęstości strumienia magnetycznego w powietrzu w kanale magnetycznego układu pomiarowego, przeznaczonego do ulokowania czujnika optycznego. Umiejscowiony w tej części układu czujnik optyczny reaguje na wartość składowej równoległej indukcji magnetycznej do kierunku propagacji fali świetlnej (składowa  $x$  na rys.7). Należy zaznaczyć, że wyniki obliczeń dla układu wyłącznie z magnesami trwałymi (zagadnienie 1) i dla układu z magnesami trwałymi i prądem w uzwojeniu (zagadnienie 2)

niewiele różnią się między sobą pod względem wartości gęstości strumienia magnetycznego jak i samych przebiegów. W kanale wartość składowej  $x$  indukcji magnetycznej zmienia się od 0,044 T dla zagadnienia 1 (rys. 7) do 0,053 T, w przypadku zagadnienia 2 (rys. 9, występuje wartość maksymalna, ale na krótkim odcinku). Wniosek jest następujący, przy tej konstrukcji obwodu magnetycznego zasilenie cewki prądem  $I_c = 100$  A, nie powoduje znaczącego wzrostu indukcji magnetycznej w kanale. Wykonano również obliczenia dla wariantu, gdy prąd w uzwojeniu wynosił  $I_c = 1000$  A (zagadnienie 3). Wyniki przedstawiono na rys. 10.



Rys. 10. Rozkład indukcji magnetycznej w układzie magnetycznym przy wzbudzeniu od magnesów trwałych i prądu w uzwojeniu magnesującym  $I_c = 1000$  A, na prostej przechodzącej w połowie szerokości układu, w odległości 1 mm od górnej krawędzi kanału

Pobieżna analiza wyników z rys. 10 dowodzi, że odpowiednie zwiększenie prądu w uzwojeniu magnesującym powoduje wzrost indukcji do 0,031 T na całej długości między biegunami (wartość średnia). Wartość maksymalna (na krótkim odcinku) wynosi natomiast 0,062 T. Uzyskane wyniki stwarzają podstawę do stwierdzenia, że wartości obliczone są zbliżone z wartościami wyznaczonymi przy zastosowaniu czujnika magnetooptycznego w badaniach pól magnetycznych metodą magnetooptyczną.

## 5. Wyniki pomiarów

Stan polaryzacji światła w światłowodzie został przedstawiony w postaci trzech składowych wektora Stokesa. Składowe wektora Stokesa  $I(I_1, I_2, I_3)$  dla polaryzacji liniowej są związane z azymutem zależnościami:  $I_1 = \cos(2\theta)$ ,  $I_2 = \sin(2\theta)$ ,  $I_3 = 0$ . Na podstawie wartości kąta

$\theta$  może być wyznaczona wartość wielkości charakteryzującej pole magnetyczne (indukcja magnetyczna, natężenie pola magnetycznego). Sposób wyznaczania wielkości magnetycznych opisany jest w [12].

## 6. Wnioski końcowe

Usytuowanie światłowodu z czujnikiem magnetoptycznym, jak to wynika z opisu rysunków 4 i 6 umożliwia pomiar składowej strumienia magnetycznego układu magnetycznego zawierającego, jako źródło wzbudzenia, namagnesowany magnes trwały oraz uzwojenie z prądem. W omawianych badaniach strumieniem mierzonym był strumień rozproszony. Układ magnetyczny był traktowany, jako układ uogólniony, gdyż mógł być uznany, jako fragment układu urządzenia elektromagnetycznego. Mógłby to być np. przyrząd przeznaczony do namagnesowania magnesów trwałych, lub też fragment transformatora – po usunięciu magnesów trwałych z układu magnetycznego. Analiza wyników badań (w tym badań własnych, ujętych w pozycjach literatury [1, 2, 3, 6, 12]) oraz poszukiwanie możliwości zainstalowania czujników światłowodowych w konstrukcjach maszyn, np. przedstawionych na rysunkach 1; 2 i 3 wskazują na konieczność dostosowania konstrukcji badanego układu magnetycznego urządzenia do wymogów wynikających z zasad budowy magnetoptycznych układów pomiarowych. Dostosowanie magnetoptycznego układu pomiarowego do pomiaru strumienia roboczego (głównego) jest zadaniem bardzo trudnym, z uwagi na krótką, na ogół, drogę strumienia roboczego w szczelinie powietrznej.

## 7. Literatura

- [1] Barczak K., Pustelny T., Życki Z., Błażejczyk T.: *Optical Fibre Magnetic Field Sensors for Monitoring of the State of Work of Electric Motors*. Acta Physica Polonica A, Vol. 116, (2009), No 3, pp.250-253
- [2] Życki Z., Błażejczyk T.: *Wykorzystanie efektów magnetoptycznych w pomiarach pola magnetycznego w układach magnetycznych*, Przegląd Elektrotechniczny, Nr 12, 2008, str. 126-129
- [3] Życki Z., Błażejczyk T.: *Pomiary pola magnetycznego w układzie magnetycznym z nabiegunnikami przy*

*użyciu światłowodu*, Przegląd Elektrotechniczny, Nr 4, 2010, str.36-40

- [4] Brainard Maurice W.: *Synchronous Machines with Rotating Permanent-Magnet Fields*. Part I Characteristics and Mechanical Construction. Transactions AIEE 1952, Vol. 71, pp. 670-676
- [5] Strauss F.: *Synchronous Machines with Rotating Permanent-Magnet Fields, Part II Magnetic and Electrical Design Considerations*, Transactions AIEE 1952, Vol.71, pp.887-893
- [6] Życki Z., Krawczyk T., Perzanowski W.: *Patent P 256173 Sposób i układ zwiększania odporności magnesu trwałego na od magnesowanie zwłaszcza w przetwornikach elektromechanicznych*.
- [7] Życki Z.: *Zwiększenie odporności na wpływy od magnesowujące złożonego układu magnetycznego o magnesach trwałych*. Машиностроительские процессы в электротехнических устройствах, Naukova Dumka, Kijev, 1988, s.131-150
- [8] Sixtus K., Zehler V.: *Die Steuerung in Dauermagnetenkreisen*. AEG Mitteilungen 52 (1962) 5/6, S. 205-210
- [9] Mustiel E., Parygin W.: *Metody modulacji światła*, 1974, Wydawnictwa Naukowe PWN
- [10] Ripka P.: *Magnetic Sensors and Magnetometers*, Artech House Inc., 2001, London
- [11] Pustelny T.: *Physical and Technical Aspects of Optoelectronic Sensors*. Ed. SUT, Gliwice, 2005, p. 86
- [12] Błażejczyk T.: *Sposób wpływania na stan energetyczny magnesu wzbudzającego maszyny elektrycznej przy użyciu układu magnetoptycznego*. Rozprawa Doktorska. Instytut Elektrotechniki, Warszawa, 2009

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008–2011 jako projekt badawczy NN510 387 735*

## Autorzy

dr hab. inż. Zdzisław Życki – prof. IEI, z.zycki@iel.waw.pl  
dr inż. Tomasz Błażejczyk, t.blazejczyk@iel.waw.pl

Instytut Elektrotechniki, Zakład Maszyn Elektrycznych,  
ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa

## Recenzent

*Prof. dr hab. inż. Piotr Drozdowski*