

Tomasz BŁAŻEJCZYK

ANALIZA PORÓWNAWCZA WYNIKÓW OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH I POMIARÓW POLA MAGNETYCZNEGO WYKONANYCH PRZY UŻYCIU CZUJNIKA ŚWIATŁOWODOWEGO

STRESZCZENIE *Praca stanowi zbiór wyników badań nad zastosowaniem efektu Faraday'a jako sposobu charakteryzowania pola magnetycznego pod względem wartości jego parametrów. Pole pochodziło od magnesu trwałego spełniającego rolę źródła wzbudzenia w maszynie elektrycznej oraz od przepływu prądu w solenoidzie. Pomiarów dokonano przy użyciu układu magnetoptycznego. Uzyskane wyniki obliczeń numerycznych porównano z wynikami uzyskanymi w drodze pomiarów.*

Słowa kluczowe: *pole magnetyczne, efekt magnetoptyczny*

1. WSTĘP

Zastosowanie światłowodu jako czujnika określonej wielkości elektrycznej bądź nieelektrycznej jest znane od dość dawna. Spotykane w literaturze przypadki zastosowań koncentrują się zazwyczaj na pomiarze

mgr inż. Tomasz BŁAŻEJCZYK

e-mail: t.blazejczyk@iel.waw.pl

Samodzielna Pracownia Układów Magnetycznych
Instytut Elektrotechniki

PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, zeszyt 239, 2008

natężenia prądu elektrycznego, temperatury, drgań i ostatnio pola magnetycznego, przy czym źródłem tego pola była cewka.

W artykule przedstawiono wybrane wyniki z pomiarów wielkości charakteryzujących pole magnetyczne układu z magnesem trwałym z wykorzystaniem zjawisk magnetoptycznych w światłowodach.

Zjawiska magnetoptyczne są wynikiem oddziaływania zewnętrznego pola magnetycznego na rozchodzący się w określonym ośrodku strumień świetlny. Przykładem jest tzw. efekt Faraday'a [1, 2]. Polega on na skręceniu płaszczyzny polaryzacji światła (spolaryzowanego liniowo) przechodzącego przez ośrodek umieszczony w polu magnetycznym. Kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji θ jest zależny od długości drogi L , którą światło przebiega w ośrodku, znajdującym się w polu magnetycznym, oraz od natężenia pola magnetycznego H :

$$\theta = k_v \int_L \mathbf{H} d\mathbf{l} = k_v \int_L H dl \cdot \cos(\mathbf{H}, d\mathbf{l}) \quad (1)$$

gdzie:

- θ – kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji,
- k_v – stała Verdet, charakteryzująca zdolność danej substancji do skręcania płaszczyzny polaryzacji w polu magnetycznym,
- H – natężenie pola magnetycznego,
- $d\mathbf{l}$ – elementarna długość drogi fali świetlnej w polu magnetycznym.

Dla stałego pola magnetycznego oraz przy równoległości kierunków H i $d\mathbf{l}$ kąt skręcenia płaszczyzny można opisać równaniem:

$$\theta = k_v L H \quad (2)$$

W solenoidzie o liczbie zwojów N , przez który przepływa prąd o natężeniu I , kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji można opisać równaniem [3]:

$$\theta = k_v INK \quad (3)$$

gdzie:

- K – współczynnik uwzględniający skończone rozmiary solenoidu.

2. OBIEKT BADANY I UKŁAD POMIAROWY

Do badań wybrano silnik elektryczny prądu stałego o magnesach trwałych. W celu ułatwienia pomiarów i związanej z tym dalszej analizy wyników wirnik silnika zastąpiono litym rdzeniem stalowym, wykonanym w postaci grubościennego pierścienia [4]. W układzie magnetycznym całkowite pole magnetyczne jako źródło energii magnetycznej jest sumą poszczególnych źródeł pól. W przypadku maszyny elektrycznej o magnesach trwałych całkowite pole magnetyczne H_c można opisać równaniem:

$$H_c = H_{mt} + H_{uzw} \quad (4)$$

gdzie:

- H_{mt} – pole magnetyczne wytworzone przez magnes trwały,
- H_{uzw} – pole magnetyczne wytworzone przez przepływ prądu w tworniku i/lub innym uzwojeniu.

W obiekcie z magnesem trwałym w zależności od układu magnetycznego pole magnetyczne ma określoną wartość (istnieje ciągle). W celu wygenerowania dodatkowego pola magnetycznego odniesienia umożliwiającego polaryzację fali świetlnej w światłowodzie, instalowano dodatkowe solenoidy (cewki, prąd przepływający przez nie generował pole magnetyczne H_s). Wówczas całkowite pole magnetyczne można opisać równaniem:

$$H_c = H_{mt} + H_{uzw} + H_s \quad (5)$$

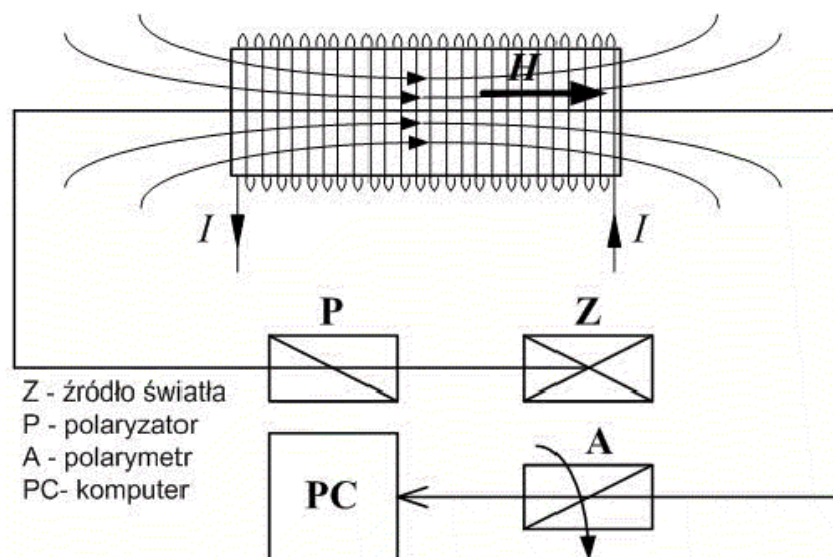
Wstępnie badano stan jałowy (przez twornik nie przepływał prąd). Równanie (5) przyjmuje postać:

$$H_c = H_{mt} + H_s \quad (6)$$

Mierząc przy użyciu czujnika światłowodowego pole całkowite H_c i odejmując wartość pola H_s (znane: natężenie prądu przepływającego przez solenoid, liczba zwojów, długość cewki) można wyznaczyć w określonym punkcie układu magnetycznego średnią wartość pola magnetycznego wytworzonego przez magnes trwały H_{mt} .

Czujnik pomiarowy jak i dodatkowe solenoidy w trakcie badań były umieszczone w kanałach wykonanych na stojanie maszyny i w pierścieniu umiejscowionym zamiast wirnika [4]. Cewki zasilano impulsami prądów przy użyciu generatora impulsów prądu [5, 6].

Wstępne pomiary wykonano przy użyciu układu pomiarowego schematycznie przedstawionego na rysunku 1.



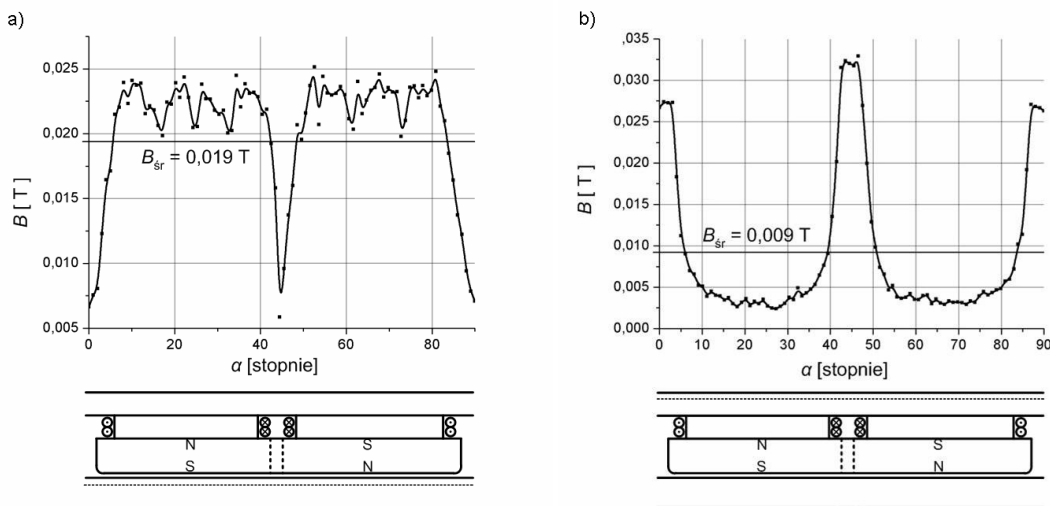
Rys. 1. Pomiar pola magnetycznego w solenoidzie przy użyciu czujnika światłowodowego: Z – źródło światła (laser), P – polaryzator, A – polarymetr, PC – komputer z oprogramowaniem do archiwizacji i wizualizacji wyników pomiarów

3. WYNIKI OBLICZEŃ I POMIARÓW

3.1. Wyniki obliczeń

Obliczeń numerycznych indukcji magnetycznej, przy użyciu programu obliczeniowego opartego na metodzie elementów skończonych, dokonano dla układu magnetycznego w postaci maszyny elektrycznej o magnesach trwałych. W modelu maszyny wirnik zastąpiono litym pierścieniem. Wyznaczono moduł indukcji magnetycznej w tych miejscach, w których w obiekcie badań były zainstalowane solenoidy i czujnik światłowodowy. W obliczeniach numerycznych ze względu na małą wartość indukcji magnetycznej nie uwzględniono wpływu pola generowanego przez przepływ prądu w solenoidach (pole H_s , przez cewki przepływał prąd elektryczny o natężeniu kilku amperów). Wyniki obliczeń modułu indukcji magnetycznej w kanałach na pierścieniu i stojanie maszyny na wysokości 1 mm (na tej wysokości w przybliżeniu

znajdował się środek geometryczny poprzecznego przekroju światłowodu w solenoidzie leżącego na dnie kanału) zostały przedstawione na rysunku 2.



Rys. 2. Moduł indukcji magnetycznej obliczonej dla stanu jałowego maszyny na wysokości 1 mm od dna kanału: a) w pierścieniu zastępującym wirnik maszyny, b) w stojanie maszyny

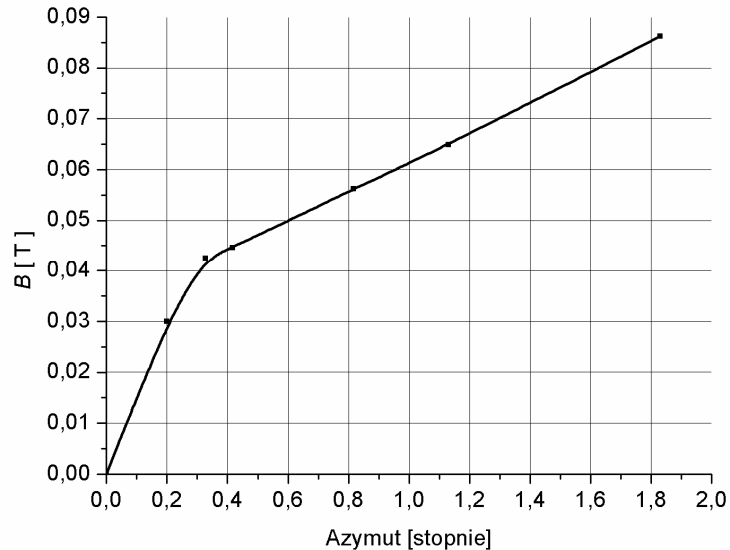
3.2. Wyniki pomiarów

Pomiary zostały wykonane dla dwóch przypadków, różniących się kierunkiem przepływu prądu przez solenoidy generujące pole dodatkowe H_s , zarówno w sytuacji, gdy solenoidy i czujnik światłowodowy były umieszczone w pierścieniu i stojanie. Na podstawie pomiarów obliczono azymut θ (kąąt polaryzacji) dla wszystkich konfiguracji pomiarowych.

Z wyznaczonej eksperymentalnie charakterystyki $B = f(\theta)$ wyznaczono odpowiadające obliczonym wartościom azymutu wartości indukcji magnetycznej. Charakterystykę $B = f(\theta)$ wyznaczoną przy użyciu światłowodu, użytego później do badań jako czujnika, przedstawiono na rysunku 3.

W artykule stan polaryzacji światła w światłowodzie został przedstawiony w postaci trzech składowych wektora Stokesa. Wektor ten jest jednym z wielu przykładów matematycznego opisu wielkości określających stan polaryzacji światła (np. azymut θ). W ogólności składowe wektora Stokesa $\{I_1, I_2, I_3\}$ są związane z azymutem zależnościami: $I_1 = \cos 2\theta$, $I_2 = \sin 2\theta$, $I_3 = 0$. Dla polaryzacji liniowej składowe wektora Stokesa przyjmują wartości: $I_1 = -1$, $I_2 = 0$, $I_3 = 0$. Z poniżej zaprezentowanych, wybranych wyników pomiarów widać, że wartości poszczególnych składowych wektora Stokesa nieco się różnią od

wartości podanych wyżej (przyczyna takiego stanu jest natury złożonej, wpływa

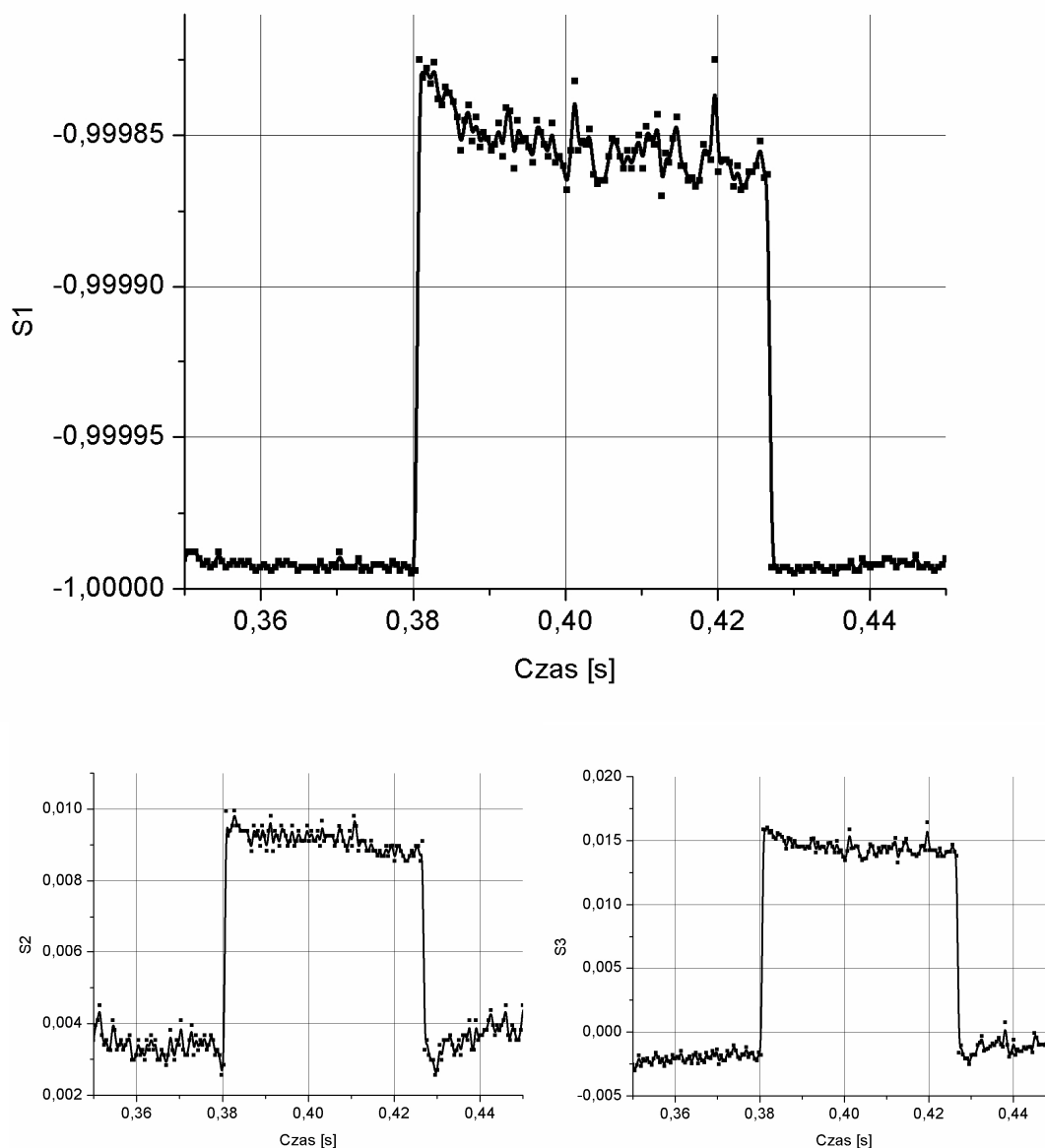


Rys. 3. Charakterystyka $B = f(\theta)$ wyznaczona przy użyciu światłowodu umieszczonego w środku solenoidu w powietrzu

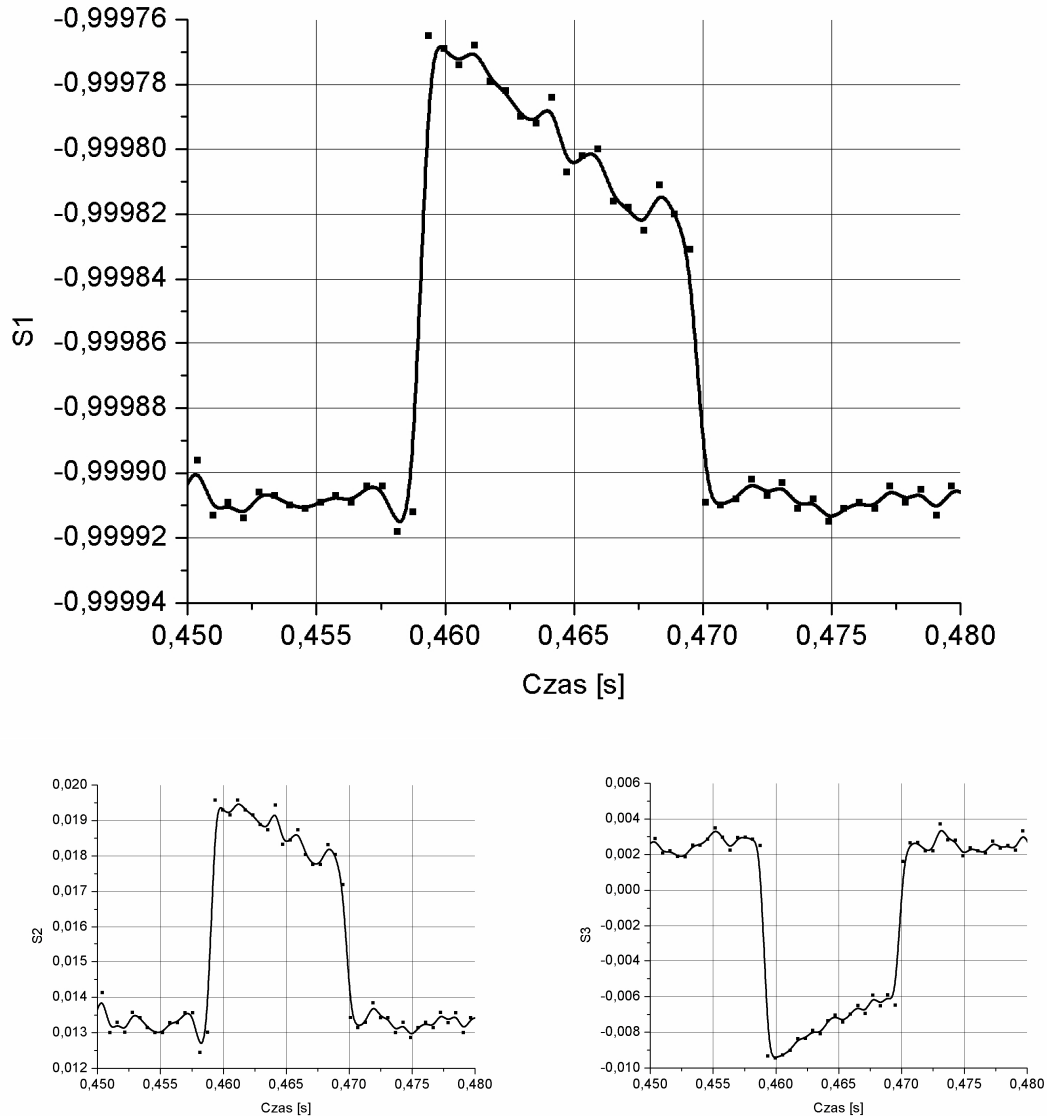
to na błąd pomiaru). Przedstawione na rysunkach 4, 5, 6 i 7 dane umożliwiają wyznaczenie azymutu θ , (równanie 2), na podstawie którego jest wyznaczana wartość wielkości charakteryzującej pole magnetyczne (indukcja magnetyczna, natężenie pola magnetycznego).

3.2. 1. Pomiar w konfiguracji współdziałania strumieni magnetycznych

Poniżej przedstawiono przebiegi składowych wektora Stokesa dla układu magnetycznego, w którym strumień magnetyczny wytworzony przez solenoidy jest zgodny z strumieniem magnetycznym wytworzonym przez magnesy trwałe. Na rysunku 4 pokazano wyniki pomiarów dla przypadku, gdy solenoidy i czujnik światłowodowy były umieszczone w kanale wykonanym w pierścieniu, zaś na rysunku 5 przedstawiono wyniki pomiarów dla przypadku, gdy solenoidy i czujnik światłowodowy były umieszczone w kanale na stojanie.



Rys. 4. Przebiegi składowych wektora Stokesa (S_1 , S_2 , S_3) wyrażających strumień świetlny w światłowodzie zainstalowanym wraz z dodatkowymi solenoidami w kanale w pierścieniu w konfiguracji współdziałania strumieni magnetycznych

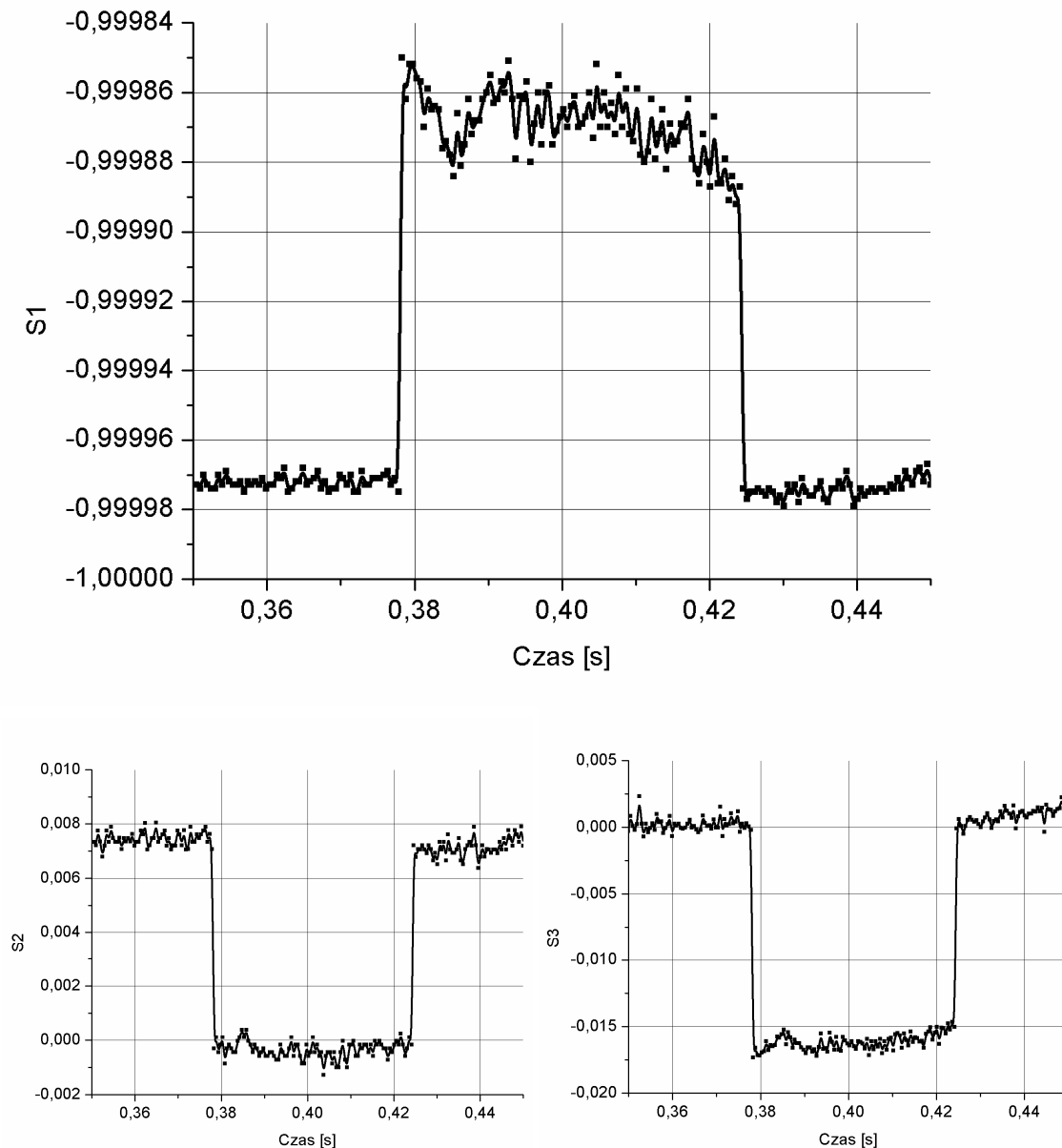


Rys. 5. Przebiegi składowych wektora Stokesa (S_1 , S_2 , S_3) wyrażających strumień świetlny w światłowodzie zainstalowanym wraz z dodatkowymi solenoidami w kanale na stojanie w konfiguracji współdziałania strumieni magnetycznych

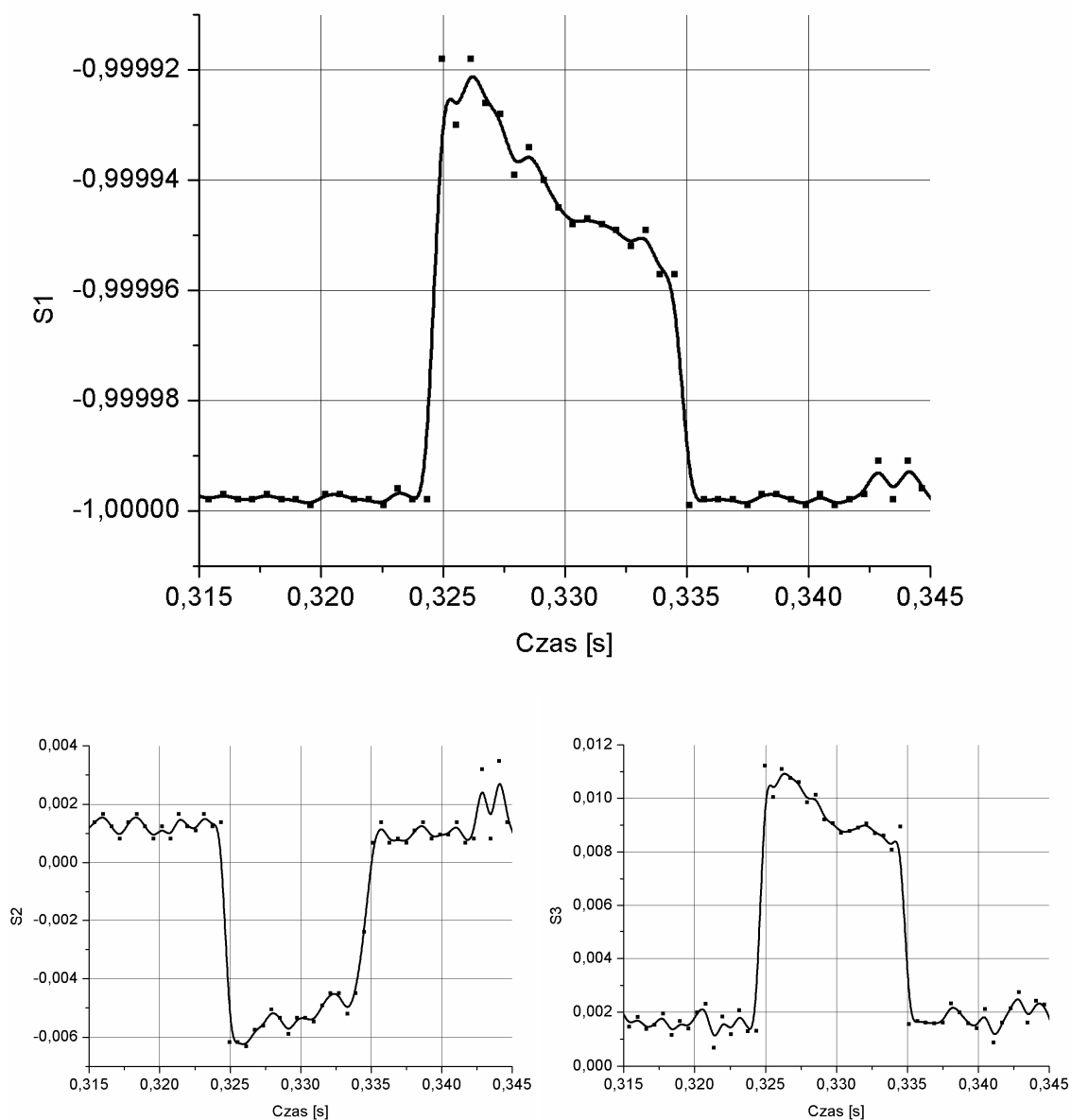
3.2. 2. Pomiar w konfiguracji przeciwdziałania strumieni magnetycznych

Poniżej przedstawiono przebiegi składowych wektora Stokesa dla układu magnetycznego, w którym strumień magnetyczny wytworzony przez solenoidy ma zwrot przeciwny do strumienia magnetycznego wytworzonego przez magnesy trwałe. Na rysunku 6 pokazano wyniki pomiarów dla przypadku, gdy

solenoidy i czujnik światłowodowy były umieszczone w kanale wykonanym w pierścieniu, zaś na rysunku 7 przedstawiono wyniki pomiarów dla przypadku, gdy solenoidy i czujnik światłowodowy były umieszczone w kanale na stojanie.



Rys. 6. Przebiegi składowych wektora Stokesa (S_1 , S_2 , S_3) wyrażających strumień świetlny w światłowodzie zainstalowanym wraz z dodatkowymi solenoidami w kanale w pierścieniu w konfiguracji przeciwdziałania strumieni magnetycznych



Rys. 7. Przebiegi składowych wektora Stokesa (S_1 , S_2 , S_3) wyrażających strumień świetlny w światłowodzie zainstalowanym wraz z dodatkowymi solenoidami w kanale na stojanie w konfiguracji przeciwdziałania strumieni magnetycznych

4. ANALIZA WYNIKÓW OBLICZEŃ I POMIARÓW

Zgodnie z równaniem (1) wyznaczona na podstawie pomiarów, przy użyciu czujnika światłowodowego, wartość indukcji magnetycznej jest wartością

średnią. W związku z powyższym otrzymane w drodze obliczeń numerycznych wyniki przedstawiono jako wartość średnią (tab. 1).

TABELA 1

Wartości średnie modułu indukcji wyznaczonej numerycznie.

L.p.	Konfiguracja obliczeniowa	$B_{\text{śrobl}} [T]$	$B_{\text{śrpm}} [T]$
1	1 mm nad dnem kanału w pierścieniu (stan jałowy)	0,019	0,012
2	1 mm nad dnem kanału na stojanie (stan jałowy)	0,009	0,008

Otrzymane wyniki obliczeń i pomiarów wykonanych w dwóch fragmentach układu magnetycznego przedstawiono w tabeli 1. Wartości indukcji magnetycznej uzyskane na podstawie pomiarów osiągnięto poprzez odjęcie od siebie wartości indukcji podanych w tabeli 2, a otrzymanych dla jednego wariantu pomiaru (np. solenoidy i czujnik światłowodowy w kanale wykonanym w pierścieniu) i różnych konfiguracji pomiaru (współdziałanie i przeciwdziałanie pól). Tym sposobem uzyskano średnią wartość indukcji magnetycznej w kanale w pierścieniu i na stojanie na wysokości ok. 1 mm od dna kanału (na tej wysokości w przybliżeniu znajdował się środek geometryczny poprzecznego przekroju światłowodu w solenoidzie leżącym na dnie kanału).

TABELA 2

Wyniki pomiarów azymutu fali świetlnej dla dwóch konfiguracji pomiarowych.

L.p.	Konfiguracja pomiarowa	$\theta [^\circ]$	$B [T]$
1	źródło pola H_S na pierścieniu: współdziałanie pola	0,368	0,042
2	źródło pola H_S na stojanie: współdziałanie pola	0,386	0,043
3	źródło pola H_S na pierścieniu: przeciwdziałanie pola	0,258	0,030
4	źródło pola H_S na stojanie: przeciwdziałanie pola	0,282	0,035

Indukcja magnetyczna, wyznaczana na podstawie pomiarów, osiągała małą wartość (rdzeń nienasycony, wybór miejsca lokalizacji czujnika podyktowany zachowaniem równoległości kierunków pola magnetycznego i propagacji fali świetlnej w światłowodzie, pomiar w powietrzu, przy niskich wartościach pola bardziej widoczny wpływ zakłóceń). W obliczeniach numerycznych ze względu na małą wartość indukcji magnetycznej nie uwzględniono wpływu pola generowanego przez przepływ prądu w solenoidach (pole H_S). Mniejsza różnica w wartościach indukcji jest dla wariantu obliczeń i pomiarów w kanale na stojanie (odpowiednio: 0,009 T i 0,008 T). W tym miejscu dno kanału znajdowało się w tuż nad magnesem trwałym (większa gęstość strumienia magnetycznego, większy strumień rozproszenia w kanale). Dla wariantu obliczeń i pomiarów w kanale w pierścieniu różnica między

obliczeniami a pomiarami jest dużo większa (odpowiednio: 0,019 T i 0,012 T). Przyczyną jest fakt, że kanał w pierścieniu zwiększał szczelinę powietrzną do 4 mm (przy takich szczelinach zmniejsza się składowa radialna pola magnetycznego).

Na podstawie dotychczas uzyskanych wyników należy stwierdzić, że celowe jest dalsze prowadzenie badań mających na celu zwiększenie dokładności pomiaru.

LITERATURA

1. Pustelny T.: Physical and Technical Aspects of Optoelectronic Sensors. Under Auspices of Committee of Electronics and Telecommunications of Polish Academy of Sciences, Gliwice, 2005.
2. Ripka P.: Magnetic Sensors and Magnetometers. Artech House Inc., London, 2001.
3. Błażejczyk T., Życki Z.: Domagnesowywanie magnesów trwałych w złożonych układach magnetycznych. Przegląd Elektrotechniczny, Nr 1, str. 91-96, 2007.
4. Życki Z., Błażejczyk T.: Efekty magnetoptyczne w analizie pola magnetycznego magnesu trwałego. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, Nr 62, 2008.
5. Życki Z.: Udoskonalony Układ RLC do magnesowania magnesów trwałych. Przegląd Elektrotechniczny, Nr 1, str. 97-1003, 2007.
6. Życki Z., Pawluk K.: Pulse Magnetizing Process and Evaluation of the Final State of Permanent Magnets. Electromagnetic Fields in Electrical Engineering ISEF'01, Amsterdam, Vol. 22, pp. 555-558, 2002.

Rękopis dostarczono dnia 3.12.2008 r.

Opiniował: prof. dr hab. inż. Stanisław WINCENIAK

ANALYSIS OF COMPARISON BETWEEN RESULTS OF
NUMERICAL CALCULATIONS AND MEASUREMENTS OF
MAGNETIC FIELD MADE USING A FIBER OPTIC SENSOR

Tomasz BŁAŻEJCZYK

ABSTRACT *Research results of the magnetic fields investigated by a fiber optic sensor are presented. The research goal consist in determining a way to characterise the magnetic field with respect to values of its parameters. The source of the field are permanent magnets that form the field system of an electric machine and current flowing through solenoids. The measurements wave made using the magneto-optical system. For comparison obtained results of measurements the numerical calculation were made.*