

Mariusz GINTER

POLITECHNIKA ŚWIĘTOKRZYSKA,
Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

Światłowodowy czujnik polarymetryczny do pomiaru prądu

Dr inż. Mariusz GINTER

Ukończył studia na specjalności Komputerowe systemy Pomiarowe Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. W 2009 r. uzyskał stopień doktora, adiunkt w Katedrze Elektrotechniki i Systemów Pomiarowych macierzystego wydziału. Główne zainteresowania naukowe dotyczą pomiaru wielkości elektrycznych i nieelektrycznych z wykorzystaniem czujników światłowodowych,



e-mail: m.ginter@tu.kielce.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono światłowodowy czujnik polarymetryczny wykorzystujący efekt Faradaya zmieniający płaszczyznę polaryzacji światła liniowo spolaryzowanego pod wpływem oddziaływania płynącego prądu w przewodniku. Zaprezentowano wyniki analizy wpływu indukowanej dwójłomności w światłowodzie jednomodowym na podstawowe parametry opisujące polaryzację na wyjściu czujnika prądu. Przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych proponowanego rozwiązania. Podano charakterystykę przetwarzania i czułość czujnika dla prądu elektrycznego o częstotliwości sieciowej, określono niepewność czujnika w zakresie wartości skutecznych prądu, która jest nie większa niż 2%. Czujnik ten zastosowano do pomiaru prądu sinusoidalnie zmiennego o amplitudach od 0 do 700 A i o częstotliwości 50 Hz.

Słowa kluczowe: czujnik prądu, efekt Faradaya, czujnik światłowodowy.

A polarimetric fiber-optic current sensor**Abstract**

In this paper a fiber-optic polarimetric current sensor using the Faraday effect changing the polarization plane of linear polarized light is presented. The analysis results of the impact of linear birefringence induced in a singlemode fiber on the basic parameters describing polarization at the current sensor output are described. For the analysis of the polarization state at the sensor output, the Jones matrices describing all the elements of the optical circuit were used. The sensor consists of an FSM633 He-Ne laser (of 633 nm wavelength) made by Newport. The coil has 25 convolutions and diameter of 5 cm. The fiber optic was spun 15 times per meter (15 turns/m) to reject the linear birefringence which is induced as the result of flexing the fiber. The experimental investigations of the proposed solution were carried out on a measuring position specially constructed for this type of measurements in which alternating currents were generated by a short circuit transformer. The investigation results are given in the paper. The current was measured within the range from 0 to 700A. The characteristics of processing, the sensor sensitivity for the power frequency current and the sensor uncertainty within the range of efficient current values which is not higher than 2% are also presented in the paper.

Keywords: current sensor, Faraday effect, fibre optics sensor.

1. Wprowadzenie

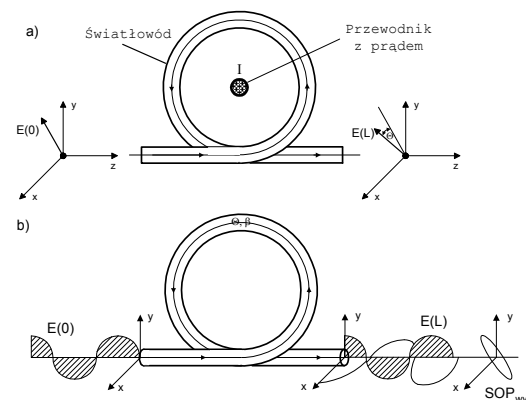
Poszukuje się rozwiązań pomiaru prądu, w których nie występuje wpływ układu pomiarowego na parametry obwodu prądowego. Tego typu metody pomiarowe nie powinny wprowadzać dodatkowej rezystancji i indukcyjności w obwód, układ pomiarowy powinien być odseparowany galwanicznie od obwodu mierzonego. Nie można pominąć faktu, że w miejscach, w których występuje przepływ dużych prądów, sygnał elektryczny może zostać silnie odkształcony na drodze od elementu badanego do układu pomiarowego. Uzasadnione jest zastosowanie wiązki świetlnej, jej parametrów: natężenia światła, polaryzacji, jako nośnika informacji, co powoduje, że wpływ zakłóceń pochodzących od zewnętrznego pola elektrycznego i magnetycznego zostaje wyeliminowany.

W pomiarach natężeń prądu elektrycznego o dużych amplitudach najczęściej stosowane są przetworniki pomiarowe takie jak: boczniki wielkoprądowe, transformator Rogowskiego, przecinki magnetyczne. Metody te mają jednak niezadowalające właściwości metrologiczne. Pomiar prądu poprzez zastosowanie transformatora Rogowskiego poza brakiem galwanicznego połączenia z układem mierzonym jest obarczony wadami w postaci: małego sygnału wyjściowego, podatności na zakłócenia zewnętrzne, konieczności całkowania otrzymanego przebiegu oraz wprowadzania indukcyjności w obwód badany poprzez sprzężenie magnetyczne. Boczniki wprowadzają do układu mierzonego rezystancję i indukcyjność. Równie ważnym elementem mającym duży wpływ na błąd pomiaru z użyciem bocznika jest właściwy sposób uziemiania obwodu badanego i pomiarowego. Niewłaściwe uziemienie powoduje zniekształcenie badanego przebiegu [1].

W związku z tymi niedogodnościami zaprezentowano metodę bezdotykowego pomiaru prądu z zastosowaniem światłowodowego czujnika polarymetrycznego wykorzystującego efekt Faradaya we włóknie jednomodowym.

2. Podstawy teoretyczne

Zjawisko Faradaya polega na skręceniu płaszczyzny polaryzacji światła spolaryzowanego liniowo, propagującego w światłowodzie umieszczonym w polu magnetycznym, przy czym światło biegnie wzdłuż linii sił pola magnetycznego. Fizycznie zjawisko Faradaya jest wywołane oddziaływaniem elektronów w atomach magneto-czułego światłowodu z zewnętrznym polem magnetycznym. Zjawisko to zachodzi prawie bez inercji, ograniczając czas reakcji zjawiska Faradaya na zaburzające pole magnetyczne do rzędu ułamka nanosekundy [2, 3].



Rys. 1. Polarymetryczny czujnik prądu wykorzystujący efekt Faradaya
a) schemat czujnika, b) zasada działania

Fig. 1. The polarimetric current sensor using Faraday effect
a) the sensor scheme b) the principle of operation

Kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji Θ jest zależny od długości drogi, którą światło przebywa w ośrodku, znajdującym się w polu magnetycznym, oraz od natężenia H pola magnetycznego [4, 5]:

$$\Theta = V \int_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = V \int_l H \cdot dl \cdot \cos(\vec{H}, d\vec{l}) \quad (1)$$

W typowym układzie czujnika prądu (rys. 1.), włókno jest owinięte N razy wokół przewodu z prądem o natężeniu I . Stosując prawo Ampera, równanie (1) można zapisać w postaci:

$$\Theta = VNI \quad (2)$$

gdzie: V - stała Verdet, N - ilość zwojów światłowodu nawiniętego wokół przewodnika z prądem, I - natężenie prądu.

Moc optyczną światła przy detektorze można zapisać jako:

$$P = \frac{P_o}{2} (1 \pm \sin 2\Theta) \quad (3)$$

gdzie: P_o - maksymalna moc na wyjściu czujnika prądu.

Dla małych wartości kąta Θ można przyjąć, że natężenie światła jest liniową funkcją mierzonego prądu. Aby uzyskać wymaganą liniowość należy ograniczyć zakres zmian sygnału użytecznego [6].

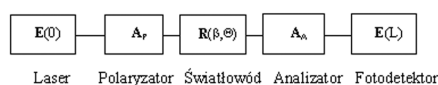
3. Analiza pracy czujnika prądu w obecności czynników wpływowych

Czynnikami, które wpływają na pracę polarymetrycznego czujnika prądu wykorzystującego zjawisko Faradaya są: zmiany temperatury, drgania mechaniczne, zmiany ciśnienia. Wielkości te indukują w światłowodzie dwójłomność liniową zakłócającą zmianę płaszczyzny polaryzacji od efektu Faradaya [7, 8].

Przy opisie pracy czujnika polarymetrycznego zastosowano macierze Jonesa, które opisują zmianę stanu polaryzacji przy przejściu fali świetlnej przez poszczególne elementy układu optycznego. Na podstawie macierzy elementów wchodzących w skład czujnika prądu (rys. 2.) oraz wektora stanu polaryzacji fali wchodzącej do światłowodu $E(0)$ (rys. 2) otrzymano wektor wyjściowy natężenia pola elektrycznego $E(L)$:

$$E(L) = A_p R(\beta, \Theta) A_a E(0) \quad (4)$$

gdzie: A_p - macierz Jonesa polaryzatora, $R(\beta, \Theta)$ - macierz Jonesa światłowodu jednomodowego, na który oddziałuje mierzony prąd i czynniki wpływowe, A_a - macierz Jonesa analizatora.



Rys. 2. Schemat funkcjonalny światłowodowego czujnika prądu wykorzystujący efekt Faradaya w konfiguracji podstawowej.

Fig. 2. Functional scheme of the polarimetric fiber optics sensor using Faraday effect

Do analizy wpływu dwójłomności od wielkości zakłócających na zmianę płaszczyzny polaryzacji użyto macierzy opisującej światłowód jednomodowy [9], na który działa prąd płynący w przewodniku, w postaci:

$$R(\beta, \Theta) = \begin{bmatrix} \cos \Psi + i \frac{\beta}{2\Psi} \sin \Psi & -\frac{\Theta}{\Psi} \sin \Psi \\ \frac{\Theta}{\Psi} \sin \Psi & \cos \Psi - i \frac{\beta}{2\Psi} \sin \Psi \end{bmatrix} \quad (5)$$

W wyrażeniu (5) parametry występujące w macierzy można zapisać jako:

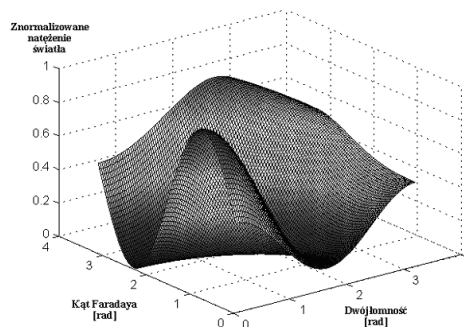
$$\Psi = \sqrt{\Theta^2 + \left(\frac{\beta}{2}\right)^2}, \quad \Theta = VNI \quad (6)$$

gdzie: β - dwójłomność liniowa.

Znajomość zależności wartości natężenia pola elektrycznego dla poszczególnych zmian dwójłomności oraz kąta rotacji Faradaya pozwoliła wykreślić charakterystyki pokazane na rysunkach 3 i 4.

Na rysunku 3. przedstawiono charakterystykę znormalizowanego natężenia światła na wyjściu światłowodowego czujnika polarymetrycznego w funkcji kąta Faradaya oraz wpływu szkodliwej dwójłomności indukującej się we włóknie na amplitudę zmiany sygnału wyjściowego tego czujnika. Na podstawie charakterystyki otrzymanej z obliczeń można zaobserwować, że wraz ze wzrostem wartości indukującej się szkodliwej dwójłomności włókna, przy takiej samej

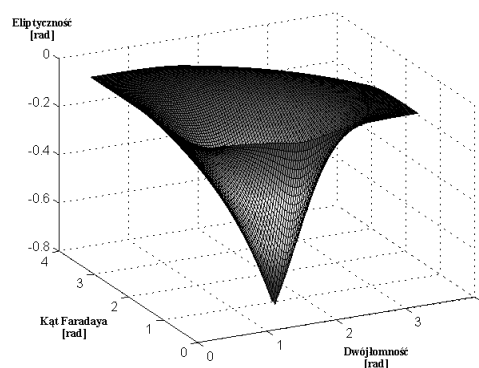
zmianie wartości kąta rotacji Faradaya, maleje sygnał na wyjściu czujnika polarymetrycznego, a jego czułość na zjawisko Faradaya dla dużej wartości dwójłomności liniowej jest bliska zeru [10].



Rys. 3. Wykres zależności znormalizowanego natężenia światła na wyjściu czujnika prądu od kąta Faradaya oraz dwójłomności

Fig. 3. Dependence of the standardized light intensity at the current sensor output on the Faraday angle and birefringence

Na podstawie charakterystyki pokazanej na rysunku 4. można stwierdzić, że maksymalna eliptyczność wiązki światła wychodzącej z czujnika występuje dla dwójłomności $\pi/2$ radiana.

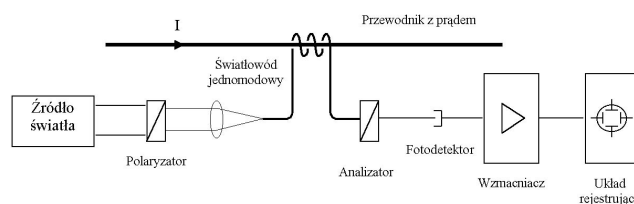


Rys. 4. Wykres zależności eliptyczności wiązki wyjściowej od dwójłomności wewnętrznej włókna i od kąta Faradaya

Fig. 4. Dependence of the output beam ellipticity on the fiber internal birefringence and Faraday angle

4. Układ pomiarowy

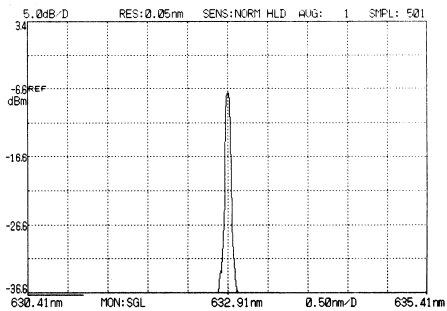
Czujnik zbudowany jest ze: źródła światła, którym jest laser helowo-neonowy (He-Ne) Newport 815 o liniowej polaryzacji światła i o mocy 2 mW, mający długość fali centralnej 632,9 nm i paśmie 3 dB - 0,05 nm (rys. 6.), włókna jednomodowego o symbolu FSM 633, analizatora optycznego oraz fotodetektora wraz ze wzmacniaczem. Światło z lasera wprowadzane jest do światłowodu przy wykorzystaniu soczewki skupiającej i precyzyjnych manipulatorów. Analizator optyczny umieszczony jest w układzie manipulatorów w taki sposób, aby zapewnić jego obrót dookoła własnej osi.



Rys. 5. Schemat układu pomiarowego i światłowodowego czujnika polarymetrycznego.

Fig. 5. Scheme of the measurement system and the polarimetric fiber optics sensor

Spolaryzowane liniowo światło z lasera He-Ne jest wprowadzane do światłowodu w taki sposób, aby zapewnić największą widzialność oraz liniowość zmian polaryzacji pod wpływem zmian mierzonego prądu [11].

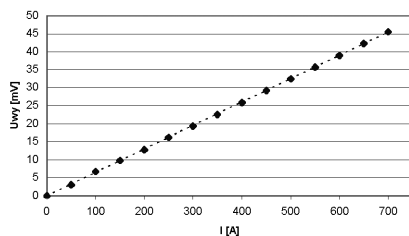


Rys. 6. Widmo mocy wiązki lasera jednomodowego Newport 815
Fig. 6. Power spectrum of the singlemode Newport 815 laser beam

Światłowód został skręcony dookoła swojej osi 15 razy na 1 metr długości (obroty/m.). Skręcenie światłowodu eliminuje indukowanie się dwójłomności liniowej powstałej na skutek zjawisk magnetostrykcyjnych i elastoptycznych. Ze skręconego włókna wykonano cewkę światłowodową o $N=25$ zwojach, średnica cewki wynosi 5 cm. W cewce światłowodowej o zadanych parametrach, wykonanej ze światłowodu z dwutlenku krzemu o stałej Verdet $V=4,6 \cdot 10^{-6}$ rad/A i wykorzystanej długości fali świetlnej 633 nm można uzyskać czułość zmiany kąta polaryzacji w zależności od natężenia prądu mniejszą niż $\frac{\Theta}{I} = 115 \frac{\mu\text{rad}}{\text{A}}$ [12].

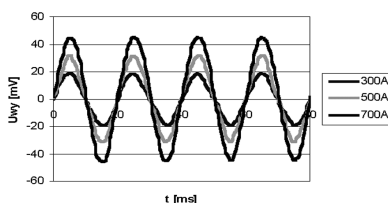
5. Wyniki pomiarów

Charakterystyka statyczna układu została wykreślona na podstawie pomiarów prądu przemiennego o częstotliwości 50 Hz (rys. 7). Prądy o znanych wartościach amplitudy zostały wytworzone za pomocą transformatora TW-1a.



Rys. 7. Charakterystyka statyczna czujnika
Fig. 7. Static characteristic of the sensor

Na rysunku 8. zaprezentowano przykładowe wyniki pomiaru napięcia na wyjściu czujnika dla przebiegów prądu o amplitudzie 300A, 500A i 700A. Mierzone przebiegi charakteryzują się współczynnikami wypełnienia w przedziale 48÷52%. Czułość układu pomiarowego dla cewki 25-zwojowej wynosi 65mV/kA. Obliczony błąd nieliniowości wyznaczonej charakterystyki statycznej czujnika nie przekracza 1%.



Rys. 8. Przebieg napięcia wyjściowego z czujnika polarymetrycznego dla prądu o wartości skutecznej 300, 500, 700A i częstotliwości 50Hz.
Fig. 8. Output voltage of the polarimetric sensor for current of 300, 500, 700 A and 50 Hz.

Niepewność pomiaru amplitudy prądu zależy od dokładności pomiaru napięcia na wyjściu światłowodowego czujnika polarymetrycznego wykorzystującego efekt Faradaya. Źródłami niepewności typu B pomiaru amplitudy prądu udarowego są: niepewność świa-

tłowodowego czujnika polarymetrycznego, niepewność wnoszona przez analizator, niepewność wnoszona przez układ fotodetektora, niepewność wnoszona przez wzmacniacz INA106, niepewności zastosowanego oscyloskopu HP54645D oraz niepewność nieliniowości światłowodowego czujnika polarymetrycznego. Złożoną niepewność standardową względną amplitudy prądu elektrycznego oszacowano na podstawie błędów względnych poszczególnych elementów toru pomiarowego i jest w przybliżeniu równa $u(I) \approx 2\%$.

6. Wnioski

Rezultaty przeprowadzonych pomiarów wskazują, że proponowany czujnik prądu może być stosowany w pomiarach wartości skutecznych prądów o częstotliwościach sieciowych. Podstawową zaletą tego czujnika jest bezdotykowy pomiar prądów oraz brak wpływu zakłóceń elektromagnetycznych na jego funkcjonowanie.

Badania czujnika wykazały jego dużą wrażliwość na drgania mechaniczne. Dla jego poprawnego funkcjonowania niezbędnym jest stosowanie środków redukujących poziom drgań przenoszonych na układ optyczny. Drgania wywołane działaniem transformatora zwarciowego TW-1a, zwłaszcza dla wytwarzanych prądów powyżej 300A wywoływały odkształcenia przebiegu sygnału na wyjściu czujnika. Zastosowanie amortyzacji całego układu optycznego przy pomocy amortyzatorów powietrznych pod płytą optyczną i pod układem wymuszania prądowego zapewniło tłumienie drgań mechanicznych do poziomu, przy którym wpływ drgań na wynik pomiaru był do zanedbania.

Dalsze badania obejmują eliminację wpływu wielkości zakłócających na pracę światłowodowego czujnika prądu wykorzystującego efekt Faradaya, w konfiguracji podstawowej opisanej w artykule oraz dla polaryzatora, w którym wykorzystano lustro na końcu światłowodu. W układzie ze zwierciadłem poprzez zwiększenie drogi optycznej, na którą działa mierzony prąd dwukrotnie zwiększa się czułość układu pomiarowego.

7. Literatura

- [1] Wodziński J.: Wysokonapięciowa technika prób i pomiarów, PWN, Warszawa, 1999.
- [2] Opilski A., Błahut M., Gut K., Karasiński P., Pustelny T., Opilski Z., Rogoziński R.: Wybrane zjawiska fizyczne wykorzystywane w czujnikach światłowodowych, COE 2000, Szkoła, Gliwice 2000.
- [3] Barczak K., Pustelny T., Zycki Z., Blazejczyk T.: Optical Fibre Magnetic Field Sensor for Monitoring of the State of Work of Electric Motors, Acta Physica Polonica A, Vol. 116, 2009, pp. 250-252.
- [4] Ferrari J. A., Perciante C.D., Lagos A., Frins E.M.: Improved method for Faraday current sensor data processing, Optics Communications 199, 2001, pp. 77-81.
- [5] Villaverde A.B., Munin E., Pedroso C.B.: Linear displacement sensor based on the magneto-optical Faraday effect., Sensors and Actuators A Physical 70, 1998, pp. 211-218.
- [6] Tan C.Z., Arndt J.: Faraday effect in silica glasses, Physica B 233, 1997, pp. 1-7.
- [7] Bohnert K., Gabus P., Nehring J., Brändle H.: Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor, Journal Of Lightwave Technology 20 (2), 2002, pp. 267-276.
- [8] Barczak K., Pustelny T., Dorosz D., Dorosz J.: Optical Fibre Current Sensor for Electric Power Industry, Acta Physica Polonica A, Vol. 118, 2010, pp. 1087-1089.
- [9] Jaroszewicz L.R.: Rola polaryzacji i spójności w interferometrii światłowodowej, WAT, Warszawa, 1995.
- [10] Ginter M.: Pomiar prądu wyładowania iskrowego, Aktualne problemy w elektrotechnice i informatyce, Kielce, 2005, str. 45-50.
- [11] Ginter M.: Pomiar prądów udarowych z wykorzystaniem polarymetrycznego czujnika światłowodowego, XXXVII Międzynarodowa konferencja metrologów i konferencja grantowa, Zielona Góra, 2005, str. 139-144.
- [12] Ginter M.: The measurement of the current during electric discharge, Engineering for the Future, Kielce, 2005, pp. 43-49.