

Mariusz GINTER

ŚWIATŁOWODOWY CZUJNIK NATĘŻENIA PRĄDU ELEKTRYCZNEGO WYKORZYSTUJĄCY ŹRÓDŁO ŚWIATŁA O DŁUGOŚCI FALI 1550 NM

Streszczenie

W artykule omówiona została zasada działania światłowodowego czujnika polarymetrycznego wykorzystującego efekt Faradaya, który zmienia płaszczyznę polaryzacji liniowo spolaryzowanego światła w wyniku oddziaływania płynącego w przewodniku prądu elektrycznego. Zaproponowano układ pomiarowy, w którym do otrzymania wiązki jednomodowej o długości fali 1550nm użyto lasera wielomodowego i światłowodowej siatki Bragga.

Zaprezentowano wyniki pomiarów prądu sinusoidalnie zmiennego z wykorzystaniem zaproponowanego rozwiązania układowego. Podano podstawowe parametry metrologiczne światłowodowego czujnika prądu zbudowanego dla długości fali 1550 nm.

Zastosowano zaproponowany układ optyczny do pomiarów prądów o przebiegach sinusoidalnych o częstotliwości sieciowej i amplitudach z zakresu od 50A do 1000A.

WSTĘP

W technice pomiarowej coraz powszechniejsze są stosowane czujniki światłowodowe do pomiaru wielkości elektrycznych i nieelektrycznych. W ostatnich latach dynamicznie rozwijają się konstrukcje oparte na zastosowaniu światłowodowych siatek Bragga [1].

Światłowodowy czujnik prądu wykorzystujący interferometr różnicowy ma wiele cech, które predysponują go do zastosowania przy pomiarze natężenia prądu elektrycznego. Przetwornik ten separuje galwanicznie układ pomiarowy od obwodu mierzonego, nie wprowadza dodatkowej rezystancji i indukcyjności do układu mierzonego.

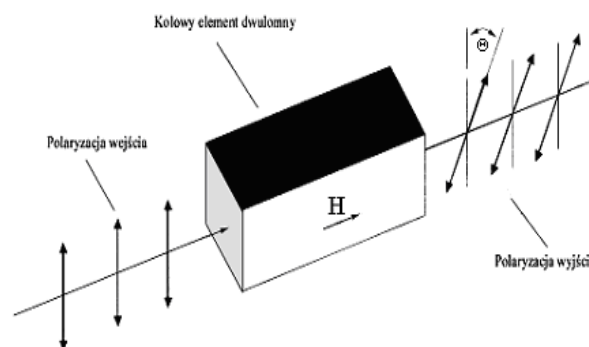
Bezstykowy pomiar prądu elektrycznego płynącego w przewodniku jest w wielu przypadkach jedyną możliwością uzyskania niezniekształconej informacji o wartości natężenia tego prądu. Użycie czujnika światłowodowego jest dodatkowo uzasadnione ze względu na jego właściwości, do których można zaliczyć odporność na zakłócenia elektromagnetyczne o dużych wartościach oraz możliwość zastosowania w środowisku zagrożonym korozją, czynnikami chemicznymi lub wybuchem.

Zastosowanie elementów toru optycznego i źródła światła o długości fali 1550 nm daje możliwość bezpośredniego sprzęgania czujnika prądu bazującego na polarymetrze ze światłowodowymi systemami telekomunikacyjnymi oraz wykorzystania elementów, układów optycznych przeznaczonych dla długości fali 1550 nm. Wykorzystanie standardowych elementów optycznych zwiększa elastyczność tego rozwiązania.

1. ZJAWISKO FARADAYA

Zjawisko Faradaya w substancjach przezroczystych to oddziaływanie pola magnetycznego wytworzonego przez przewodnik, w którym płynie prąd elektryczny na światło propagujące w ośrodku [2].

W pomiarach natężenia prądu elektrycznego w praktyce jest stosowana konstrukcja oparta na wykorzystaniu polarymetru. Interferometr różnicowy to rozwiązanie, które nadaje się do pomiarów prądu w szerokim zakresie, od pojedynczych amperów do setek kiloamperów [3].



Rys. 1. Obrót płaszczyzny polaryzacji światła liniowo spolaryzowanego przez materiał dwójlotny.

Prosta implementacja układowa oraz możliwość zastosowania różnych konfiguracji, które można dostosować do konkretnych wymagań pomiarowych predysponuje polarymetr jako przetwornik prądu elektrycznego. Rozwiązanie to znalazło szereg zastosowań w pomiarach prądu [4].

Zjawisko Faradaya w światłowodach

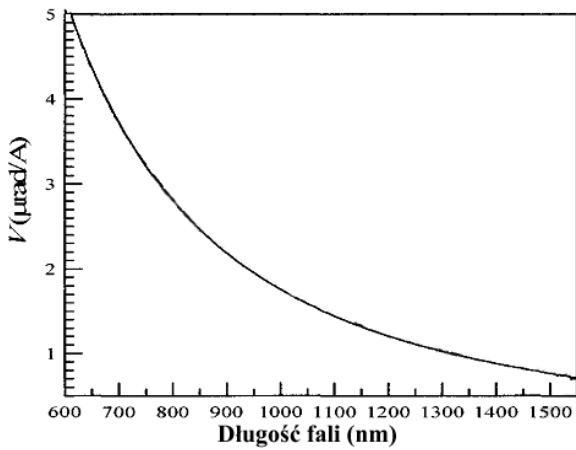
Kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji Θ jest zależny od długości drogi dl , którą światło przebywa w światłowodzie jednomodowym, znajdującym się w polu magnetycznym, oraz od natężenia H pola magnetycznego [2], [4],

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

Dla $\vec{H} = \text{const}$ oraz \vec{H} równoległego do $d\vec{l}$ otrzymuje się

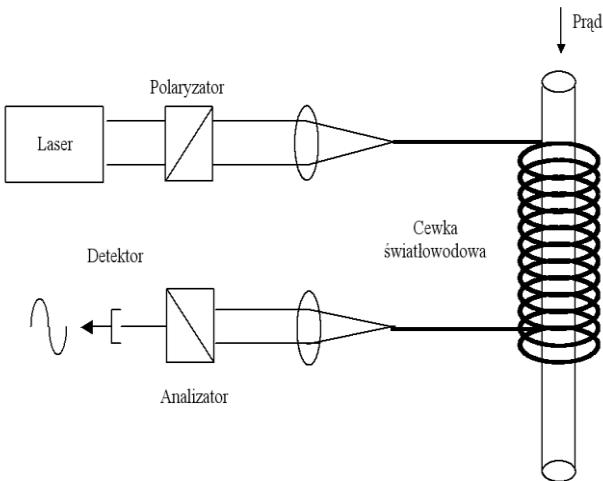
$$\Theta = VLH \quad (2)$$

Współczynnik V oznacza stałą Verdetą, która charakteryzuje zdolność danej substancji do skręcania płaszczyzny polaryzacji w polu magnetycznym [2], [5]. Na rysunku 2. przedstawiono zależność stałej Verdetą od długości fali świetlnej dla szkła kwarcowego.



Rys. 2. Zależność stałej Verdeta od długości fali dla szkła kwarcowego [6].

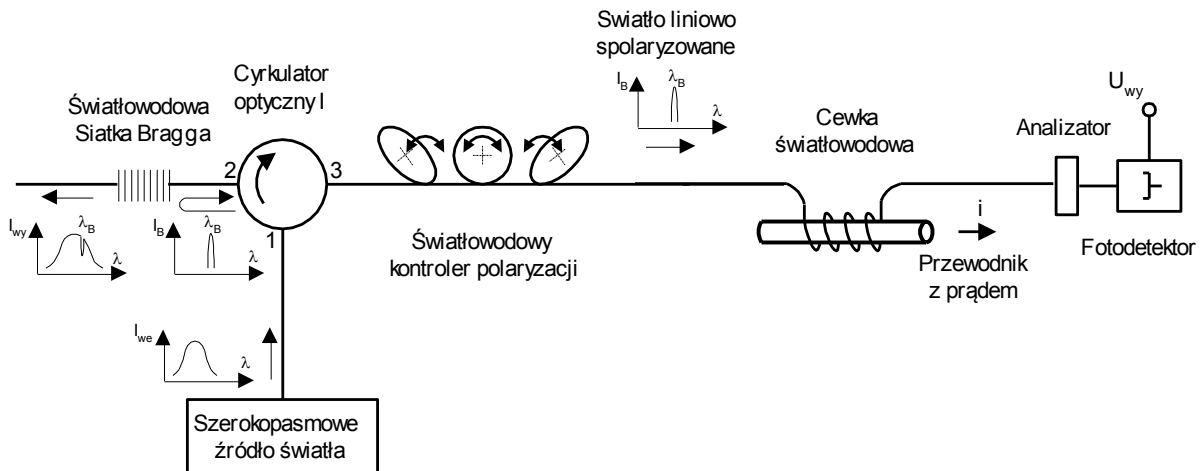
W typowym układzie czujnika prądu (rysunku 3.), włókno jest owijane N razy wokół przewodu z prądem o natężeniu I.



Rys. 3. Światłowodowy czujnik prądu.

Stosując prawo Ampera, liniowa całka pola magnetycznego z równania (1) redukuje się do wyrażenia:

$$\Theta = VNI \quad (3)$$



Rys. 4. Układy światłowodowego czujnika prądu do pomiaru wartości natężenia prądu dla długości fali 1545 nm.

Moc optyczną światła przy detektorze można zapisać jako:

$$P = \frac{P_o}{2} (1 \pm \sin 2\Theta) \quad (4)$$

gdzie:

P_o – maksymalna moc na wyjściu czujnika prądu, $\frac{P_o}{2}$ - średnia moc na wyjściu czujnika prądu.

Dla małych wartości kąta Θ zależność (4) przyjmuje postać:

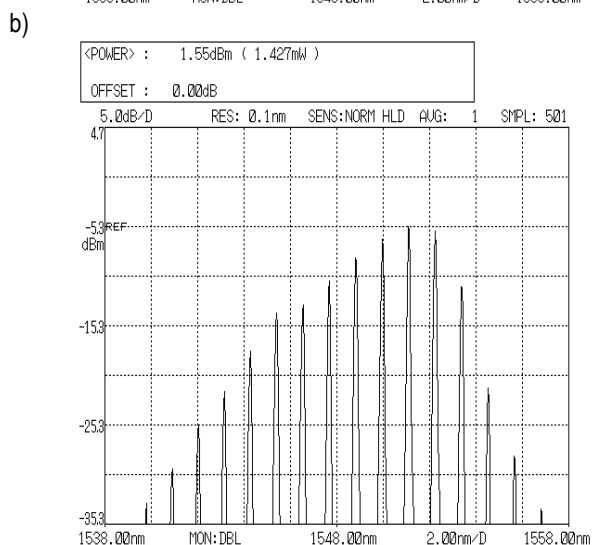
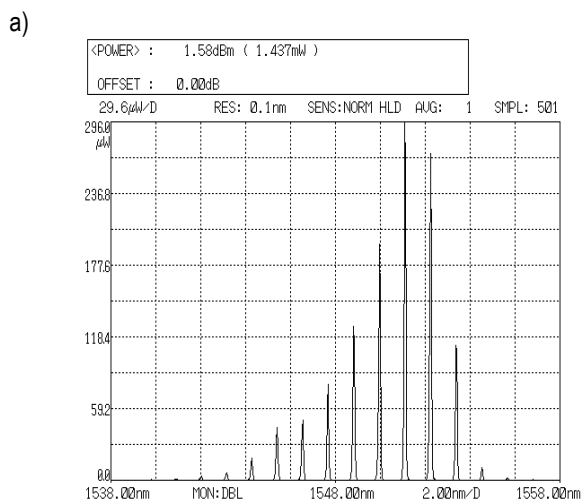
$$P = \frac{P_o}{2} (1 \pm 2VNI) \quad (5)$$

Natężenie światła jest liniową funkcją mierzonego prądu. Uzywanie wymaganej liniowości wiąże się z ograniczeniem zakresu zmian sygnału użytecznego na wyjściu światłowodowego czujnika prądu [7], [8].

2. UKŁAD POMIAROWY

Schemat rozwiązana światłowodowego czujnika prądu wraz z układem pomiarowym wykonany dla długości fali 1545 nm przedstawiono na rysunku 4. W tym rozwiązaniu na uwagę zasługuje fakt, że tor optyczny czujnika zawiera przerwę tylko przy analizatorze. Zwiększa to niezawodność oraz łatwość implementacji do różnych warunków przedstawionego układu.

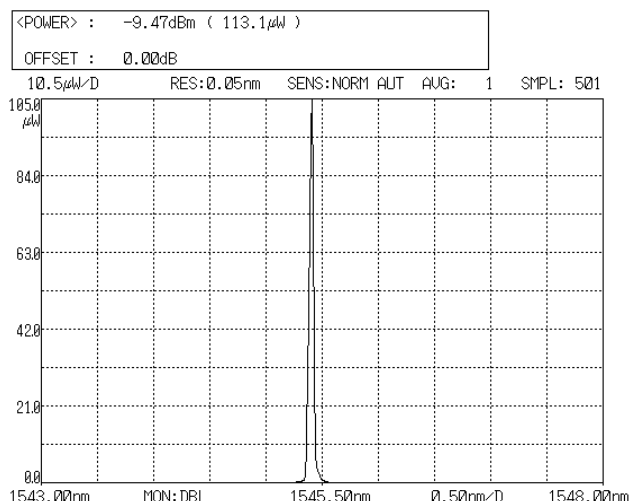
Źródłem światła zasilającego wejście 1 cyrkulatora jest laser wielomodowy S1FC1550 firmy Thorlabs, którego widmo wiązki pokazane jest na rysunku 5. Zmierzona moc optyczna lasera wynosi ~1,4 mW. W układzie użyto cyrkulator firmy AOS o symbolu CIR-3-2-2-10-FC działający na długość fali 1520-1570 nm.



Rys. 5. Widmo mocy wiązki lasera wielomodowego a) liniowe, b) logarytmiczne.

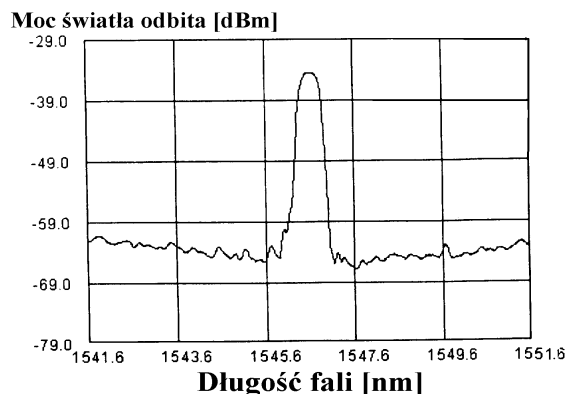
Z widma lasera wielomodowego został odbity od światłowodowej siatki Bragga mod o długości fali ~1545,3 nm (rysunek 6.). Pasmo 3-decybelowe tego modu wynosi 0,04 nm, a moc optyczna wynosi ~140 μW. Moc optyczna tego modu jest wartością dostateczną aby na wyjściu zastosowanego fotodetektora sygnał po wzmocnieniu był zadawalający.

Siatka Bragga ma parametry: długość fali centralnej 1545,66 nm, co obrazują rysunki 7. i 8., a pasma: 1 dB – 0,357 nm, 3 dB – 0,471 nm, 20 dB – 0,785 nm. Zastosowana światłowodowa siatka Bragga jest siatką równomierną.

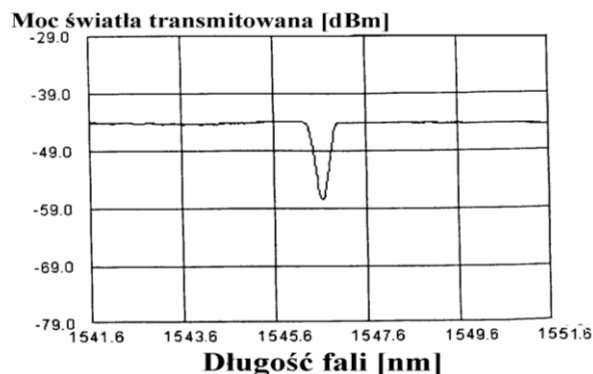


Rys. 6. Widmo mocy wiązki lasera jednomodowego powstałego z lasera wielomodowego i światłowodowej siatki Bragga.

W eksperymencie użyto światłowodowego kontrolera polaryzacji o symbolu FPC560. Jest on tak ustawiony, aby mod propagujący we włóknie był liniowo spolaryzowany. Za jego pomocą można dowolnie obracać płaszczyznę polaryzacji światła by uzyskać największą widzialność i liniową zmianę wyjściowej polaryzacji światła od mierzonego prądu [8].



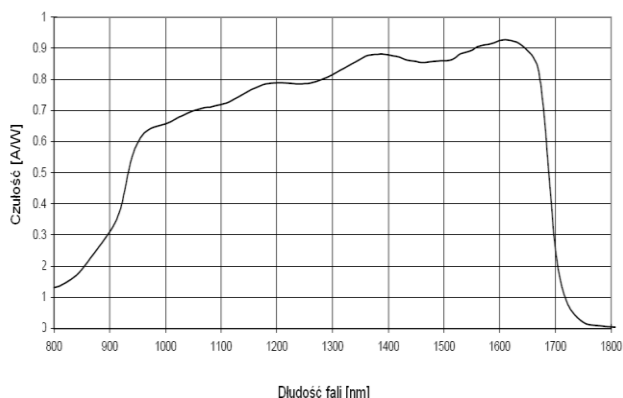
Rys. 7. Odbite widmo mocy wiązki światła światłowodowej siatki Bragga.



Rys. 8. Odbite widmo mocy wyjściowej wiązki światła światłowodowej siatki Bragga.

Światłowód użyty w doświadczeniu to jednomodowe włókno DFS-D-11-5-11/23 firmy Sicores. Został on skręcony dookoła osi 15 razy na 1 m długości i wykonano z niego cewkę o N=50 zwojach

i średnicy 5 cm. Skręcenie światłowodu powoduje eliminację szkodliwej dwójłomności liniowej powstającej na skutek zginania światłowodu. Stała Verdetta tego włókna wynosi $0,6 \mu\text{rad/A}$.

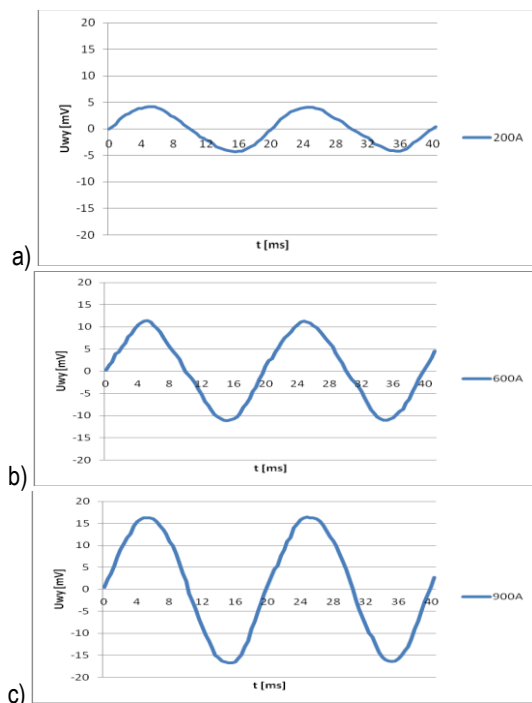


Rys. 9. Zależności czułości detektora PDA 400 od długości fali.

W doświadczeniu użyto fotodetektora o symbolu PDA 400. Zależność czułości od długości fali światła pokazano na rysunku 9.

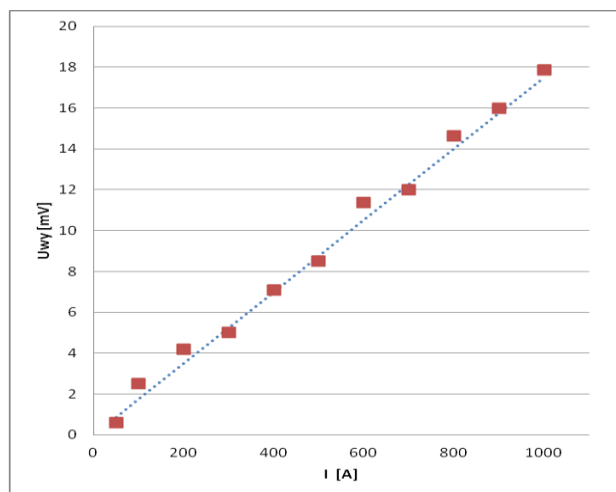
3. WYNIKI BADAN EKSPERYMENTALNYCH

Za pomocą światłowodowego czujnika polarymetrycznego zmierzono prądy sinusoidalnie zmienne o częstotliwości sieciowej 50 Hz. Sygnał wyjściowy z fotodetektora był zarejestrowany przez oscyloskop cyfrowy RIGOLDS 1104B. Przebiegi o znanych wartościach amplitud zostały wygenerowane z użyciem transformatora zwarcowego TW-1a. Zaprezentowano na rysunku 10. przykładowe wyniki pomiaru napięcia z wyjścia czujnika polarymetrycznego dla prądów o amplitudach: 200A, 600A, 900A.



Rys. 10. Przebieg napięcia wyjściowego z czujnika polarymetrycznego dla prądu o częstotliwości 50Hz i amplitudzie a) 200 A, b) 600 A, c) 900 A.

Charakterystykę statyczną przedstawiono na rysunku 11. Czułość układu pomiarowego dla wykonanej cewki 50-zwojowej wynosi $17,9 \text{ mV/kA}$, przy błędzie nieliniowości nie przekraczającego 2%.



Rys. 11. Charakterystyka statyczna czujnika prądu.

Niepewność pomiaru amplitudy prądu zależna od dokładności poszczególnych elementów toru pomiarowego została oszacowana na 2,5%.

PODSUMOWANIE

Rozwiązanie przedstawianego światłowodowego prądu elektrycznego można zastosować tam, gdzie występują silne zakłócenia elektromagnetyczne. Może być zastosowany w środowisku zagrożonym: korozją, czynnikami chemicznymi.

Zastosowanie światła o długości fali 1550 nm daje możliwość łatwej rekonfiguracji układu pomiarowego. Możliwe jest też sprzęgnięcie światłowodowego czujnika prądu z systemami telekomunikacyjnymi.

Wejściowy sygnał optyczny, który jest wprowadzany do interferometru różnicowego to jednomodowa wiązka światła uzyskana z lasera wielomodowego przez zastosowanie światłowodowej siatki Bragga, która z widma wiązki wielomodowej odbija mod o pożądanej długości fali i mocy optycznej.

Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych wskazują, że zastosowanie przetwornika polarymetrycznego prądu elektrycznego jest uzasadnione. Dokonano pomiarów prądów sinusoidalnie zmiennych o częstotliwości 50 Hz w zakresie amplitud od 50 A do 1000 A. Uzyskana nieliniowość tej konstrukcji nie przekracza 2%, a oszacowana niepewność typu B pomiaru prądu wynosi 2,5%.

Z przeprowadzonych badań wynika, że największy wpływ na poprawność działania polarymetrycznego czujnika prądu mają drgania mechaniczne. Tego typu zakłócenia oddziałujące na wzrost wartości liniowej dwójłomności toru optycznego można eliminować poprzez zastosowanie: skręcenia włókna, skręcenia włókna i wyżarzenia go w temperaturze 800°C , użycia kołowo dwójłomnych włókien oraz użycia konfiguracji polarymetru z lustrem Faradaya. Dalsze prace będą skupiały się na eliminacji indukowania się dwójłomności liniowej w wyniku oddziaływania wielkości wpływowych i prowadzone pod kątem użycia światłowodów o kołowej dwójłomności typu spun w polarymetrycznym czujniku prądu elektrycznego i zastosowaniu układu optycznego z lustrem Faradaya. Zastosowanie konfiguracji interferometru różnicowego z użyciem lustra Faradaya zwiększa dwukrotnie czułości.

BIBLIOGRAFIA

1. Sikora A., *Apodyzowane siatki Bragga o stałym okresie jako przetworniki odkształceń impulsowych. Analiza numeryczna.*

- Pomiary Automatyka Kontrola, Vol. 56, 2010/12, str. 1436-1438.
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. M Belal, Z Song, Y Jung, G Brambilla, *Optical fiber microwire current sensor*, Optics letters, Vol. 35, 2010, pp. 3045-3047.
 4. 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.
 5. Ginter M., *Analiza pracy różnych konfiguracji polarymetrycznego czujnika natężenia prądu elektrycznego.*, Logistyka, Zeszyt 6, Str. 3913-3922.
 6. Lopez-Higuera J. M., *Handbook of Optical Fibre Sensing Technology*, John Wiley & Sons, Knovel, 2002.
 7. Tan C.Z., Arndt J., *Faraday effect in silica glasses.*, Physica B 233, 1997, pp. 1-7.
 8. Ginter M., *Światłowodowy czujnik polarymetryczny do pomiaru prądu.*, Pomiary Automatyka Kontrola, Vol. 57, 2011/3, str. 274-276.

FIBER OPTIC SENSOR OF ELECTRICAL CURRENT USING A LIGHT SOURCE WITH A WAVELENGTH OF 1550 NM

Abstract

In this article the fiber optics polarimetric current sensor using Faraday effect, which changes the polarization plane of linear polarized light is presented. The measuring system in which to obtain a single-mode beam having a wavelength of 1550 nm multimode laser and fiber Bragg gratings was used is proposed.

The results of sinusoidal current measurements using the proposed solution of electric current sensor are presented. The basic metrological parameters of fiber optic current sensor built on wavelength 1550nm are provided.

Which was built was the optical system used to measure currents with sinusoidal waveforms network frequency and amplitude range from 50A to 1000A.

Autorzy:

dr inż. **Mariusz Ginter** – Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki.