

doi:10.15199/48.2016.10.04

Badania eksperymentalne z zastosowaniem magnetoptycznego przekładnika prądowego zainstalowanego w biegunie wyłącznika średniego napięcia

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę możliwości zastosowania czujnika światłowodowego w kontekście dotychczas stosowanych przekładników prądowych w elektroenergetyce. Zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych pola magnetycznego występującego w otoczeniu toru prądowego wyłącznika średniego napięcia. Badania wykonano przy zastosowaniu dwóch czujników światłowodowych przeznaczonych do współpracy z innymi długościami fali świetlnej: 635 nm i 1550 nm. Przedstawiono analizę odpowiedzi czujników światłowodowych.

Abstract. The analysis of the possibility of applying of fiber optic sensors in power engineering are presented in the article. The paper deals with the results of the experimental investigations of magnetic fields existing in the surroundings of the model of bus bar conducting the current. Investigations were executed with use of coil-shaped fiber optic sensors designed to the co-operation with the different wavelengths: 635 nm and 1550 nm. The sensors were installed in the pole of the medium-voltage circuit breaker. The analysis of answer signals from fiber optic sensors is presented. (*Experimental investigation with use the optical fiber current sensor installed in the pole of medium-voltage circuit breaker.*)

Słowa kluczowe: pole magnetyczne, efekt magnetoptyczny, czujnik światłowodowy, pomiar prądu.

Keywords: magnetic field, magneto-optic effect, fibre optic sensor, measurement of current.

Wprowadzenie

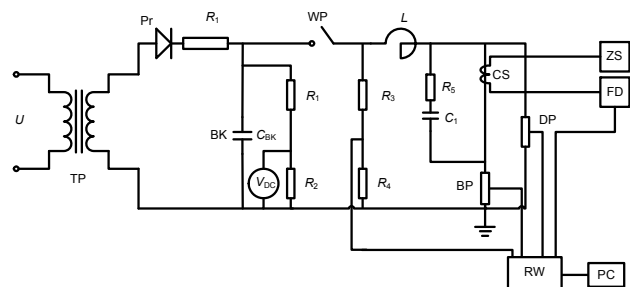
Jednym z przykładów zastosowań czujników optycznych do pomiaru prądu jest przemysł metalurgiczny. Produkcja aluminium, manganu, miedzi, cynku wymaga zasilania w energię elektryczną prądu stałego o natężeniu do 500 kA przy napięciu 1 kV. Przy takich parametrach zasilania zachodzi konieczność pomiaru prądu stałego o natężeniu setek tysięcy amperów. Aby skutecznie były kontrolowane procesy, urządzenia pomiarowe muszą zapewniać pomiar prądu z dokładnością rzędu 0,1 %. Wymóg takiej dokładności pomiaru wynika z faktu, że przy parametrach zasilania 500 kA i 1 kV niedokładność pomiaru na poziomie 0,1 % powoduje różnicę 0,5 MW mocy, która mogłaby zapewnić energię elektryczną dla tysiąca gospodarstw domowych. Tradycyjne przetworniki pomiarowe – do 500 kA – wykorzystujące efekt Halla, charakteryzują się skomplikowaną budową, dużymi gabarytami oraz masą. Te o najwyższych zakresach pomiarowych, mogą ważyć 2000 kg i pobierać do 10 kW mocy. Zastosowanie światłowodowego czujnika prądu umożliwia na znaczne uproszczenie systemu pomiarowego [1, 2].

Z analizy literatury oraz informacji rynkowej wynika, że zastosowań światłowodowych czujników prądu pełniących rolę przekładników prądowych najwięcej jest w elektroenergetyce oraz w tych gałęziach przemysłu, które korzystają z odbiorników dużej mocy [3, 4, 5]. Powszechnie zainteresowanie zastosowaniem światłowodów do pomiaru silnych prądów w środowisku średnich i wysokich napięć wynika z ich własności [6, 7, 8]. Niewielkie wymiary czujnika światłowodowego przekładają się na niższe koszty materiałów i zużycia energii podczas ich produkcji, a także łatwiejszy transport i montaż. Przekładniki do pomiaru prądu i napięcia są kluczowymi elementami w systemie wytwarzania, przesyłu, rozdziálu i dystrybucji energii elektrycznej. Są wykorzystywane do wykrywania zwarć oraz do określenia kosztu zakupu energii elektrycznej. Przewiduje się, że w przyszłości konwencjonalne przekładniki transformatorowe zostaną zastąpione przez przekładniki światłowodowe.

W artykule przedstawiono wyniki porównawcze badań z zastosowaniem czujnika magnetoptycznego do pomiaru prądu roboczego w torach prądowych wyłącznika SN. Taki czujnik umożliwia integrację z wyłącznikiem, co prowadzi do zmniejszenia zajmowanej powierzchni rozdzielni w

porównaniu z układem zawierającym konwencjonalne przekładniki prądowe. Niewielkie wymiary czujników umożliwiają zastosowanie rezerwowego systemu pomiarowego w torze prądowym (redundancja).

W kontekście przewidywanego dostosowania urządzeń i aparatów elektroenergetycznych w sieci dystrybucyjnej i przesyłowej do standardu IEC61850, przedmiot badań pozwala na łatwiejsze dostosowanie się do wymogów poprzez zintegrowanie czujnika optycznego z urządzeniem Merging Unit [9]. Połączenie między czujnikiem, a urządzeniami elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej może być zrealizowane za pomocą sieci ethernet.

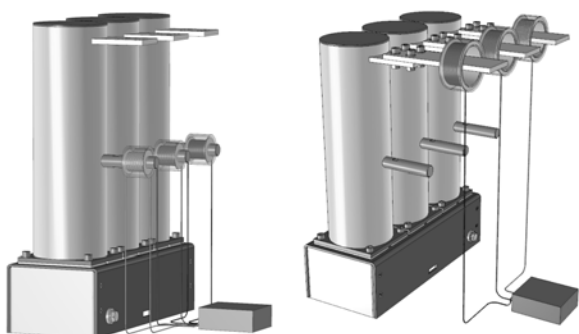


Rys.1. Obwód pobierczy zasilany z baterii kondensatorów ($I_{\max} = 16$ kA): TP – transformator podwyższający, Pr – prostownik, R_1 – rezystor ograniczający prąd ładowania baterii kondensatorów, BK – bateria kondensatorów ($CBK = 4,711$ mF), R_1, R_2, R_3, R_4 – dzielniki do pomiaru napięcia na baterii kondensatorów, WP – pomocniczy wyłącznik próżniowy, L – dławik, R_5 – rezystor w układzie regulacji stromości napięcia powrotnego, C_1 – kondensator w układzie regulacji stromości napięcia powrotnego ($C_1 = 0,23\mu\text{F}$), BP – bocznik pomiarowy 40 kA/ 2 V, CS – czujnik światłowodowy pola magnetycznego, DP – dzielnik pomiarowy, ZS – źródło światła (laser), FD – fotodetektor, RW – rejestrator wielokanałowy, PC – komputer

Stanowisko badawcze

Pomiary prądów roboczych przy zastosowaniu metody magnetoptycznej przeprowadzono w układzie przedstawionym na rys. 1. Badania wykonano z zastosowaniem dwóch źródeł światła o długościach fali $\lambda_1 = 635$ nm (czujnik światłowodowy S635 o średnicy zewnętrznej 0,9 mm (z warstwą zewnętrzną), nawinięty w kształcie cewki o liczbie zwojów $z_1 = 9$) i $\lambda_2 = 1550$ nm (czujnik światłowodowy S1550 z domieszką erbu (Er) i glinu

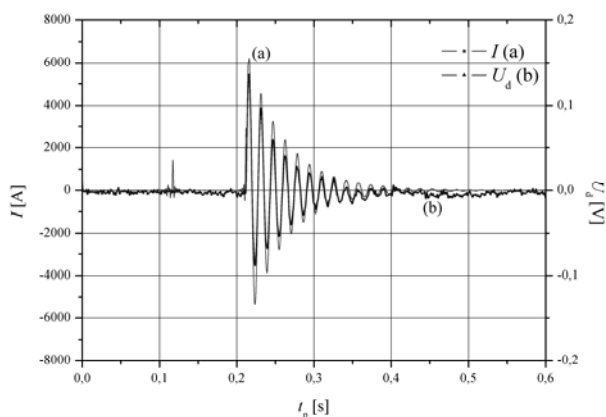
(Al), o średnicy zewnętrznej 0,2 mm, nawinięty w kształcie cewki o liczbie zwojów $z_2 = 34$). Źródłem prądu była bateria kondensatorów energetycznych (energia baterii 0,555 MJ) umożliwiającą uzyskiwanie prądu $I_{max} = 16$ kA przy częstotliwości 60 Hz. Czujniki optyczne zostały zainstalowane w otoczeniu toru prądowego na wyjściu z bieguna modelowego wyłącznika próżniowego.



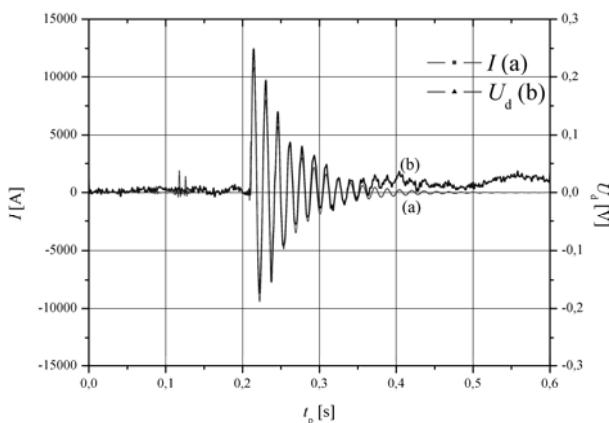
Rys.2. Schemat ideowy pomiaru prądu w torze wyłącznika 7,2 kV/25 kA przy zastosowaniu czujnika światłowodowego

Wyniki

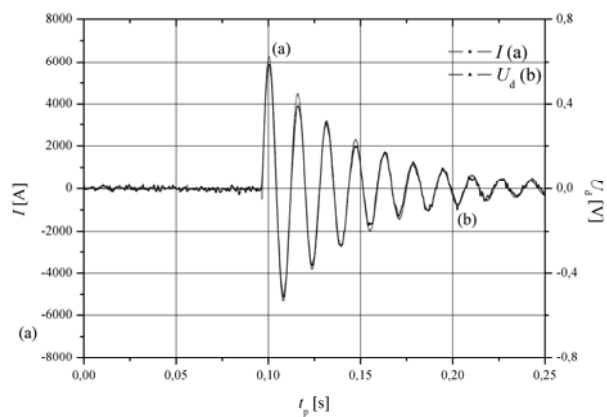
Wyniki badań przedstawiono w formie oscylogramów z rejestracją pomiarów napięć przy zastosowaniu oscyloskopu i boczników pomiarowych. Wielkościami mierzonymi były prąd $i(t)$ w torze prądowym wyłącznika oraz napięcie wyjściowe fotodetektora $U_d(t)$ (sygnał wyjściowy czujnika optycznego). Na rys. 3 do 10 przedstawiono wybrane wyniki pomiarów.



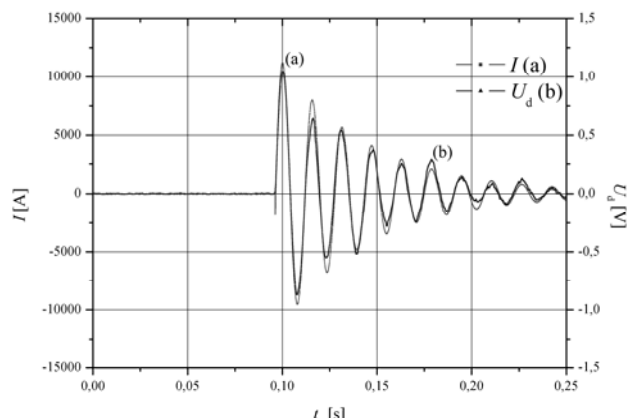
Rys.3. Zarejestrowane przebiegi czasowe prądu I oraz napięcia U_d z zastosowaniem czujnika S635 przy $I_{max} = 6,20$ kA: a) wykres $i(t)$ prądu łączeniowego, b) wykres $u(t)$ napięcia wyjściowego



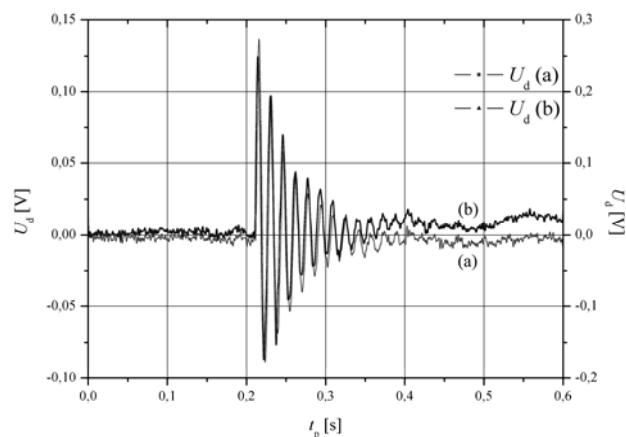
Rys.4. Wynik pomiaru prądu I oraz napięcia U_d z zastosowaniem czujnika S635 przy $I_{max} = 11,00$ kA: a) wykres $i(t)$ prądu łączeniowego, b) wykres $u(t)$ napięcia wyjściowego



Rys.5. Wynik pomiaru prądu I oraz napięcia U_d z zastosowaniem czujnika S1550 przy $I_{max} = 6,26$ kA: a) wykres $i(t)$ prądu łączeniowego, b) wykres $u(t)$ napięcia wyjściowego

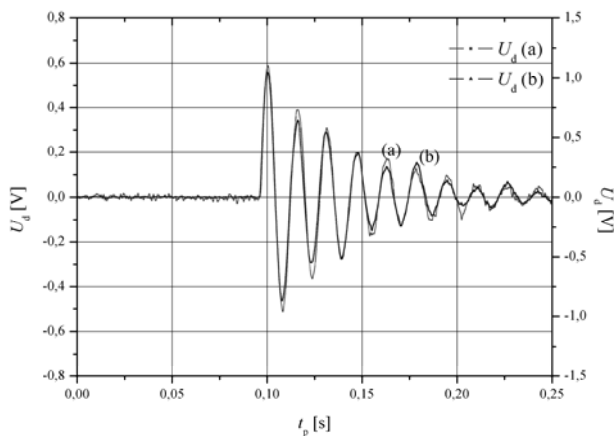


Rys.6. Wynik pomiaru prądu I oraz napięcia U_d z zastosowaniem czujnika S1550 przy $I_{max} = 11,20$ kA: a) wykres $i(t)$ prądu łączeniowego, b) wykres $u(t)$ napięcia wyjściowego



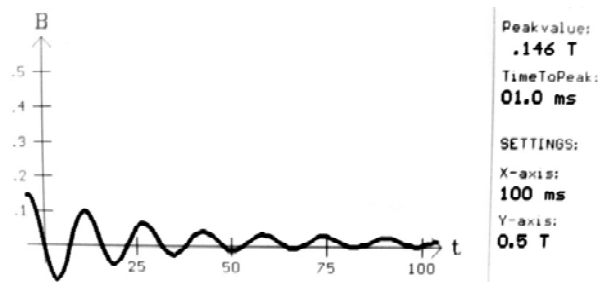
Rys.7. Zestawienie wyników pomiarów napięcia $U_d(t)$ z zastosowaniem czujnika S635 dla prądów: a) $I_{max} = 6,20$ kA, b) $I_{max} = 11,00$ kA

W celu porównania wyników pomiarów pola magnetycznego mierzonego przy zastosowaniu czujnika optycznego (i następnie przetwarzanego na napięcie $U_d(t)$), wykonano pomiary pola magnetycznego w otoczeniu toru prądowego na wejściu układu stykowego w rozbiornalnej komorze próżniowej. Pomiarów dokonano przy użyciu miernika pola magnetycznego z sondą Halla. Sondę ustawiono w odległości $x = 3$ mm od powierzchni przewodnika.

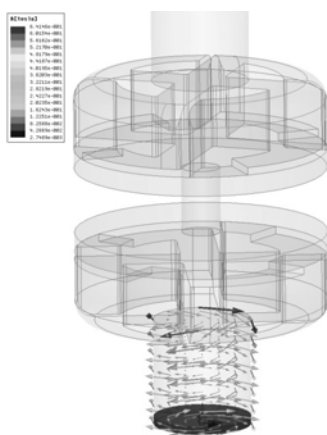


Rys.8. Zestawienie wyników pomiarów napięcia $U_d(t)$ z zastosowaniem czujnika S1550 dla prądów: a) $I_{max} = 6,26$ kA, b) $I_{max} = 11,20$ kA

Na rys. 9 przedstawiono wybrany wynik pomiarów pola magnetycznego przy zastosowaniu miernika pola z sondą Halla, natomiast na rys. 10 przedstawiono wybrany wynik analizy numerycznej rozkładu pola magnetycznego w układzie stykowym unipolarnym. Analizę numeryczną przeprowadzono przy użyciu programu Maxwell 3D.



Rys.9. Wynik pomiaru pola magnetycznego generowanego przy przepływie prądu o wartości maksymalnej $I_{max} = 10,87$ kA [9]



Rys.10. Wynik analizy numerycznej rozkładu pola magnetycznego w układzie stykowym unipolarnym wyłącznika

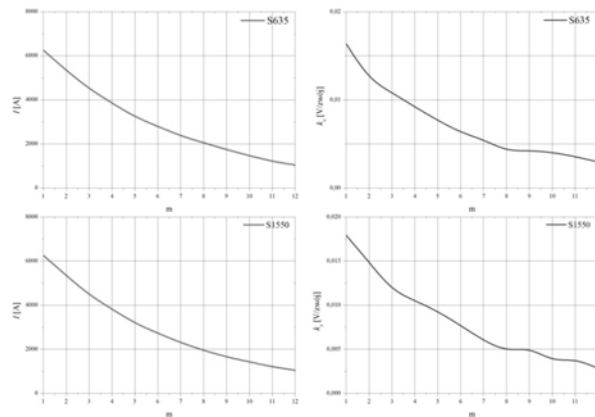
Analiza wyników badań

Na rys.od 2 do 5 przedstawiono wyniki pomiarów prądu I oraz napięcia U_d z zastosowaniem czujników S635 i S1550. W celu porównania odpowiedzi obu czujników, mających różną liczbę zwojów, wprowadzono współczynnik k_z :

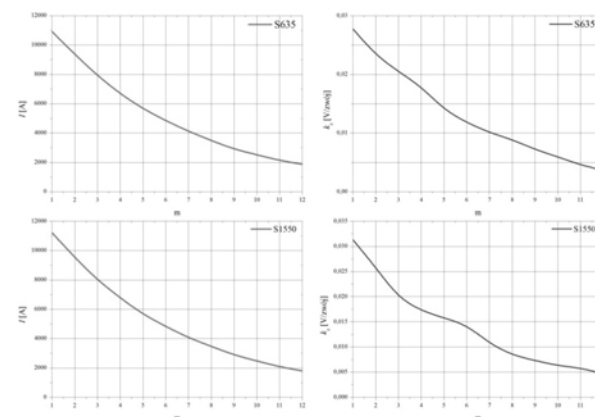
$$(1) \quad k_z = \frac{U_{dm}}{N_i}$$

gdzie: U_{dm} – wartość szczytowa napięcia wyjściowego fotodetektora dla m -tego półokresu przebiegu prądu, N_i – liczba zwojów światłowodu czujnika ($i = 1$ dla czujnika S635, $i = 2$ dla czujnika S1550).

Na rys.11 i 12 przedstawiono wartości współczynnika k_z dla $m = 1...12$ półokresu przebiegu prądu dla badanych czujników.



Rys.11. Przebiegi prądu I oraz zmiany wartości współczynnika k_z dla m -tego półokresu wyznaczone dla czujników S635 (góra) i S1550 (dół) przy $I_{max} = 6,20$ kA



Rys.12. Przebiegi prądu I oraz zmiany wartości współczynnika k_z dla m -tego półokresu wyznaczone dla czujników S635 (góra) i S1550 (dół) przy $I_{max} = 11,20$ kA

W tabeli 1 przedstawiono wartości współczynnika k_z dla $m = 1$ półokresu przebiegu prądu.

Tabela 1. Wartości współczynnika k_z dla $m = 1$ półokresu przebiegu prądu

Czujnik/ współczynnik k_z	k_1 [V/zwój]	k_2 [V/turm]
S635 ($N_1 = 9$)	0,0164 ($I = 6,20$ kA)	0,0277 ($I = 11,00$ kA)
S1550 ($N_2 = 34$)	0,0179 ($I = 6,26$ kA)	0,0313 ($I = 11,20$ kA)

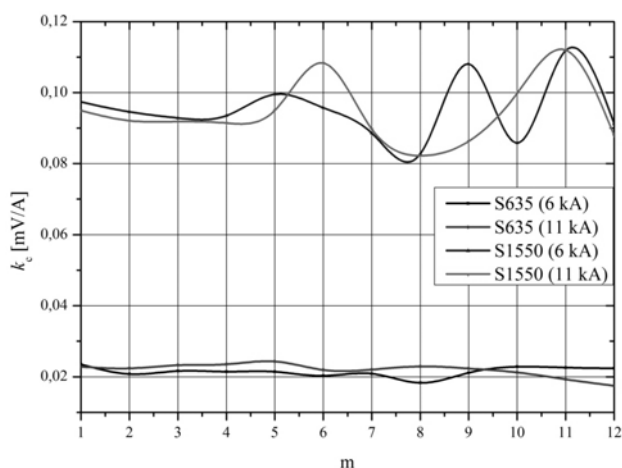
Z przeprowadzonej analizy wynika, że czujnik S635 ($z_1 = 9$, $\lambda_1 = 635$ nm) charakteryzuje się bardzo zbliżonymi wartościami współczynnika k_z jak dla czujnika S1550 ($z_2 = 34$, $\lambda_2 = 1550$ nm). Należy zaznaczyć, że czujnik S1550 w swojej strukturze zawierał domieszki erbu (Er) i glinu (Al). Poprzez domieszkowanie pierwiastkami, np. granatem gadolinem, kadmem, terbem, erbem istnieje możliwość wpływania na właściwości metrologiczne światłowodów [10, 11].

W celu porównania odpowiedzi czujników S635 i S1550, mających różną liczbę zwojów, uwzględniono czułość czujnika k_c :

$$(2) \quad k_c = \frac{U_{dm}}{I_m}$$

gdzie: U_{dm} – wartość szczytowa napięcia wyjściowego fotodetektora dla m -tego półokresu przebiegu prądu, I_m – wartość szczytowa prądu łączeniowego dla m -tego półokresu przebiegu.

Na rys. 13 przedstawiono przebiegi zmian wartości czułości czujników S635 i S1550 dla wartości prądu szczytowego $I_{max} = 6,20$ kA i $I_{max} = 11,20$ kA. Analizując dane zawarte na rys. 13 można stwierdzić, że czujnik S635 ($z_1 = 9$, $\lambda_1 = 635$ nm) charakteryzuje się znacznie większą stabilnością wartości czułości w porównaniu do czujnika S1550 ($z_2 = 34$, $\lambda_2 = 1550$ nm).



Rys.13. Przebiegi zmian wartości czułości k_c czujników S635 i S1550 dla wartości prądów $I_{max} = 6,20$ kA i $I_{max} = 11,20$ kA

Podsumowanie

Czujnik światłowodowy S635 charakteryzuje się większą stabilnością czułości i może być zastosowany do pomiaru prądu w torach prądowych wyłącznika SN.

W oparciu o przeprowadzone badania planowane jest opracowanie i wykonanie magnetoptycznego systemu pomiaru prądu w trzech fazach wyłącznika próżniowego.

Autorzy: dr inż. Tomasz Błażejczyk, Instytut Elektrotechniki, Zakład Wielkich Mocy, ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa, E-mail: t.blazejczyk@iel.waw.pl; mgr inż. Krzysztof Krasuski, Instytut Elektrotechniki, Zakład Wielkich Mocy, ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa, E-mail: k.krasuski@iel.waw.pl

LITERATURA

- [1] Bohnert K., Gabus P., Brändle H., et. al., Fiber-Optic Current Sensor for the Electro-Chemical Industry, *Sensoren und Messsysteme*, (2006), [Technical Digest 103-106]
- [2] Bohnert K., Brändle H., Brunzel M. G., Gabus P., Guggenbach P., *Highly Accurate Fiber-Optic DC Current Sensor for the Electrowinning Industry*, IEEE Trans. Industry Applic., Vol. 43, No 1, (2007), 180-187
- [3] Błażejczyk T., Sibilski H., Krasuski K.: Measurements of Current in Bus Bar Using Fiber Optic Sensors, *International Conference on High Voltage Engineering and Application*, 2014, <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7035495>
- [4] Rogers A. J., Optical-fibre current measurement, *Int. J. Optoelectronics*, 3 (1988), 391-407
- [5] Bosselmann T., Magneto- and electro-optic transformers meet expectations of power industry, *Proc. OFS'12*, (1997), 111-114
- [6] Błażejczyk T., Using The Faraday Effect in Investigations of Magnetic Fields, *Proceedings of Electrotechnical Institute*, Issue 246 (2010), 13-33
- [7] Barczak K., Pustelny T., Życki Z., Błażejczyk T., Dorosz D., Optical Sensor of the Magnetic Field in Electrical Power Engineering, *Acta Physica Polonica A*, (2010), Vol. 118, No. 6, 1090-1092
- [8] Błażejczyk T., Sibilski H., Krasuski K., Application of magneto-optic effects to measurements of currents in the environment of medium and high voltages, *Przeгляд Elektrotechniczny*, (2012), Vol. 2012, No 11b, 237-239
- [9] Gontarz K., Kowalik R., Rasolomampionona D.D., Januszewski M.: Konstrukcja i działanie przykładowego urządzenia Merging Unit, *Acta Energetica*, 1/18, 2014, 51-58
- [10] Mihailovic P., Petricevic S., Stojkovic Z., Radunovic J. B., Development of a Portable Fiber-Optic Current Sensor for Power System Monitoring, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 53, No. 1, (2004), 24-30
- [11] Ni X., Huang M., Faraday effect optical Current/magnetic field sensors based on cerium-substituted yttrium iron garnet single crystal, *Power & Energy Engineering Conference APPEEC 2010, Asia-Pacific*, (2010), 1-4