

Zastosowanie sygnałów wieloczęstotliwościowych w analizie stanu powłok ochronnych

Streszczenie: W artykule przedstawiono zastosowanie sygnałów wieloczęstotliwościowych w pomiarach stanu powłok ochronnych elementów maszyn i konstrukcji przemysłowych. Do badań zastosowano powłoki cynkowe na podłożach stalowych. Pomiar wykonano za pomocą czujnika indukcyjnych transformatorowych o zmiennej częstotliwości sygnału pomiarowego. Wyniki badań porównano z rezultatami osiągniętymi za pomocą sygnałów z pojedynczymi częstotliwościami.

Abstract: Article describes the use of multi-frequency signals in the measurement of the state of protective coatings of machines and industrial structures. The study used zinc coatings on steel substrates. The measurements were made using inductive transformer with a variable measurement frequency. The results were compared with results achieved by the signals from the single frequencies. (**Application of multi-frequency signals in the analysis of the state of protective coatings**)

Słowa kluczowe: czujnik indukcyjny, badanie grubości powłok ochronnych

Keywords: inductive sensor, thickness examination of protective coatings

Wstęp

Metalowe elementy konstrukcji lub maszyn ze względu na procesy korozyjne podlegają ochronie poprzez zastosowanie skutecznych powłok ochronnych. Często powłoki te pełnią również rolę dekoracyjną i ozdobną. Powłoki ochronne charakteryzują się odpowiednimi parametrami w zakresie odporności na szkodliwe czynniki zewnętrzne, odnośnie grubości, chropowatości i wyglądu zewnętrznego [1].

Ze względu na oddziaływanie korozyjnych czynników zewnętrznych grubość warstwy ochronnej pokrywającej elementy maszyn i konstrukcji ulega zmniejszeniu. Aby móc zastosować skuteczne zabezpieczenie antykorozyjne należy zbadać, które szkodliwe czynniki środowiskowe w największym stopniu powodują degradację powłok ochronnych [2].

Najlepszą ochronę antykorozyjną zapewniają powłoki cynkowe biorąc pod uwagę właściwości warstwy ochronnej, zastosowaną grubość warstwy i związanymi z tym kosztami jej zastosowania na elementach podlegających zabezpieczeniu. W związku z tym są dużo częściej stosowane niż powłoki żelazne lub stalowe. Grubość wykonywanych cynkowych powłok ochronnych związana jest z grubością i rodzajem zabezpieczanej powierzchni zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 1461:2000. Norma ta określa również sposoby wykonywania cynkowych powłok ochronnych poprzez zastosowanie metody cynkowania ogniowego [3].

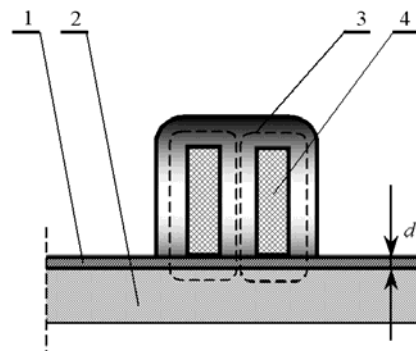
Pomiary czujnikiem indukcyjnym

Do pomiarów wykorzystano elementy z blachy stalowej, pokrytej powłokami cynkowymi o grubościach odpowiednio 14 μm oraz 28 μm . Do kontroli warstwy cynkowej wykorzystano przyrządy pomiarowe firmy Fisher [4,5]. W trakcie badań pomiary wykonano przy pomocy czujnika indukcyjnego transformatorowego.

Działanie przetworników indukcyjnych opiera się na zasadzie zmiany indukcyjności własnej lub wzajemnej pod wpływem wielkości nieelektrycznej. W zależności od sposobu realizacji zmiany reluktancji przetwornika można rozróżnić przetworniki dławikowe, solenoidalne, wiroprądowe czy transformatorowe.

Przetworniki transformatorowe, są wykorzystywane w przypadku badania powłok z materiałów nieferromagnetycznych na podłożach ferromagnetycznych. Przetwornik taki zbudowany jest z dwóch uzwojeń (rys.1)

na wspólnym rdzeniu ferromagnetycznym, stanowiąc transformator prądowy o otwartym obwodzie magnetycznym. Jest on wzbudzany zmiennym polem o częstotliwości od kilkuset do kilkunastu tysięcy Hz, wytwarzanym przez prąd płynący w uzwojeniu pierwotnym zasilanym z regulowanego i stabilizowanego generatora sinusoidalnego. Obwód magnetyczny przetwornika stanowi badana powłoka i podłoże. Powłoka stanowi „szczelinę” w obwodzie magnetycznym.

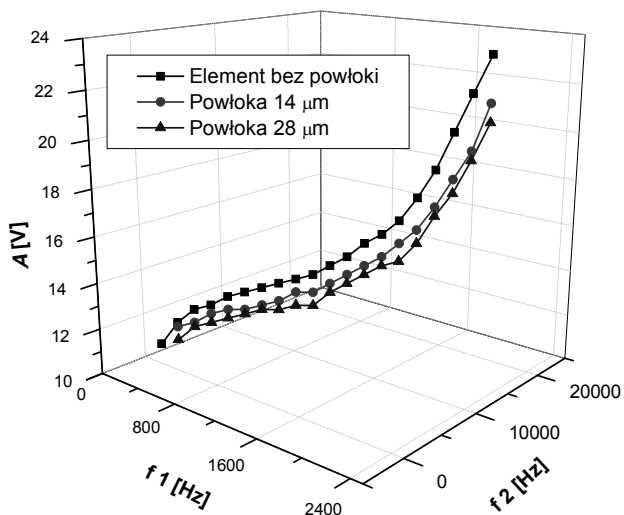


Rys.1. Budowa przetwornika indukcyjnego: 1 - warstwa wierzchnia, 2 - podłoże, 3 - droga strumienia magnetycznego, 4 - uzwojenie cewki

Indukcyjność przetwornika oczywiście zmienia się wraz ze zmianą wymiarów szczeliny. Zmiana ta nie jest liniowa, lecz hiperboliczna.

Przetwornik użyty do badań składa się z dwóch uzwojeń znajdujących się na wspólnym rdzeniu ferromagnetycznym [4,5,6]. Część pomiarową w takim przypadku zasila się przykładowo sygnałem sinusoidalnym o częstotliwości od 50 do 15000 Hz [7,8,9]. Dla tego zakresu częstotliwości bada się wartość amplitudy sygnału pomiarowego, a zastosowany zakres częstotliwości zapewnia odpowiednią czułość przetwornika za zmiany grubości powłoki ochronnej [6,9]. Otrzymane wyniki pomiarów podlegają porównaniu z wartościami uzyskanymi przy pomocy badań przyrządami pomiarowymi firmy Fisher. Pomiary przetwornikami elektromagnetycznymi wykorzystuje się często w różnych dziedzinach nauki i techniki jako wygodną metodę pomiarową gdzie w stosunkowo łatwy sposób można ingerować w sygnał pomiarowy [10,11,12,13].

Na rysunku 2 pokazano wyniki pomiarów powłok cynkowych o grubościach 14 μm , 28 μm oraz powierzchni stalowej o grubości 1 mm bez powłoki ochronnej.

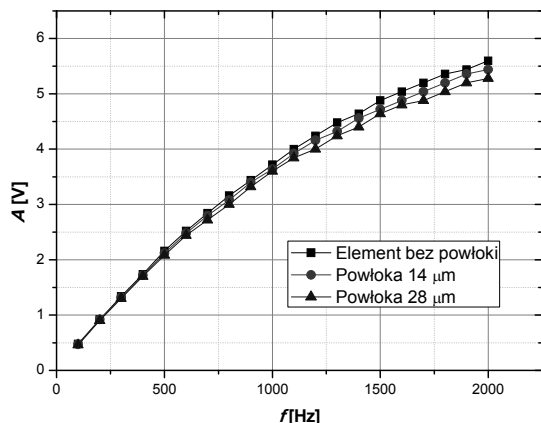


Rys. 2. Wyniki pomiarów amplitudy sygnału pomiarowego złożonego z dwóch częstotliwości sinusoidalnych: pierwszej 100 ÷ 2000 Hz oraz drugiej 1000 ÷ 20000 Hz

Zmiana grubości powłoki ochronnej reprezentuje zmiany wywołane niszczeniem tej powłoki w trakcie eksploatacji w zmiennych szkodliwych warunkach środowiskowych. Proporcjonalnie do zmniejszania się grubości powłoki cynkowej odnotowano wzrost amplitudy sygnału pomiarowego. Jak można odczytać z wykresu początkowo amplituda sygnału pomiarowego zwiększa się dość wolno i dopiero od częstotliwości około 1000 Hz dla pierwszej składowej i 10000 Hz dla drugiej składowej wzrasta dość szybko.

Do badań wykorzystano generator arbitralny firmy Rigol. Przy pomocy tego generatora stworzono sygnał pomiarowy składający się z dwóch różnych częstotliwości wykorzystując funkcję sinc. W poszczególnych pomiarach zastosowano odpowiednio zakresy częstotliwości: pierwszej składowej 100 ÷ 2000 Hz i drugiej składowej 1000 ÷ 20000 Hz.

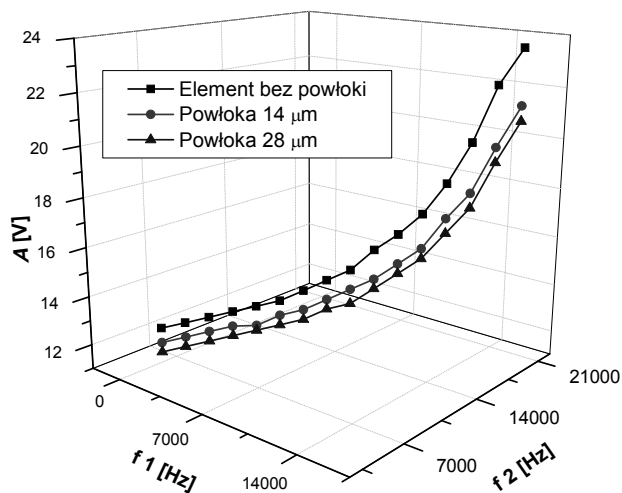
Dla porównania wykonano również badania grubości warstwy ochronnej o tych samych grubościach 14 μm oraz 28 μm oraz powierzchni stalowej o grubości 1 mm bez powłoki ochronnej. Pomiar w tym przypadku wykonano dla pojedynczego sygnału sinusoidalnego o częstotliwościach w zakresie od 100 ÷ 2000 Hz. Wyniki pomiarów pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Wyniki pomiarów amplitudy sygnału pomiarowego sinusoidalnego o częstotliwości w zakresie 100 ÷ 2000 Hz

Dla pojedynczej częstotliwości sygnału pomiarowego dla zakresu częstotliwości 100 ÷ 2000 Hz amplituda wzrasta o mniejszą wartość niż dla sygnału złożonego a także wartości odpowiedzi czujnika na zmianę grubości powłoki ochronnej są dużo mniejsze niż dla sygnału złożonego z dwóch częstotliwości przedstawionych na rysunku 2.

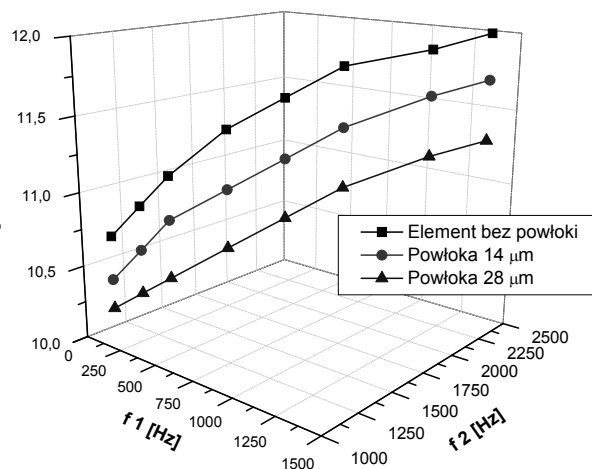
Rysunek 4 przedstawia wyniki pomiarów dla sygnału pomiarowego złożonego z dwóch częstotliwości: pierwszej składowej 1000 ÷ 16000 Hz i drugiej składowej 5000 ÷ 20000 Hz.



Rys. 4. Wyniki pomiarów amplitudy sygnału pomiarowego złożonego z dwóch częstotliwości sinusoidalnych: pierwszej 1000 ÷ 16000 Hz oraz drugiej 5000 ÷ 20000 Hz

Jak można zauważyć na powyższym wykresie amplituda sygnału pomiarowego rośnie wolno do wartości około 7000 Hz dla pierwszej składowej i odpowiednio 11000 Hz dla drugiej składowej. Powyżej tych wartości wzrost amplitudy jest już większy proporcjonalnie do zmniejszającej się grubości powłoki ochronnej. Porównując wyniki z rysunku 4 z wynikami przedstawionymi na rysunku 2 można stwierdzić, że w tym pierwszym przypadku wzrost amplitudy i wrażliwość czujnika na zmiany grubości powłoki ochronnej jest większa przy wyższych wartościach częstotliwości pierwszej składowej dla sygnału złożonego.

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki pomiarów dla sygnału pomiarowego złożonego z dwóch częstotliwości: pierwszej składowej 1000 ÷ 16000 Hz i drugiej składowej 5000 ÷ 20000 Hz.

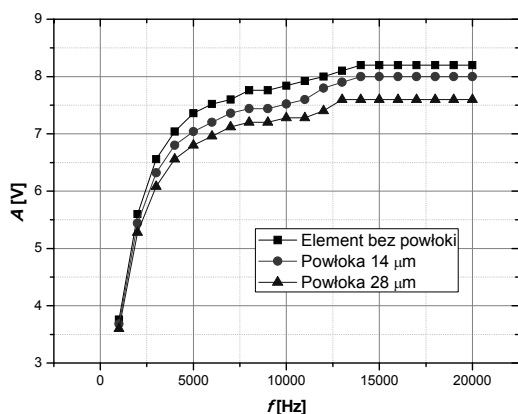


Rys. 5. Wyniki pomiarów amplitudy sygnału pomiarowego złożonego z dwóch częstotliwości sinusoidalnych: pierwszej 100 ÷ 1400 Hz oraz drugiej 1100 ÷ 2400 Hz

Badania wykonano przy wykorzystaniu tych samych próbek powłoki ochronnej o grubościach 14 μm i 28 μm oraz powierzchni stalowej o grubości 1 mm bez powłoki ochronnej podobnie jak dla wyników badań przedstawionych na rysunku 2.

Analizując wyniki badań można zauważyć wzrost amplitudy sygnału pomiarowego proporcjonalnie do zwiększającej się grubości powłoki ochronnej. Wzrost amplitudy odpowiada pod względem wartości w przybliżeniu takiemu samemu wzrostowi jaki można zauważyć w przypadku badań przedstawionych na rysunkach 2 i 4.

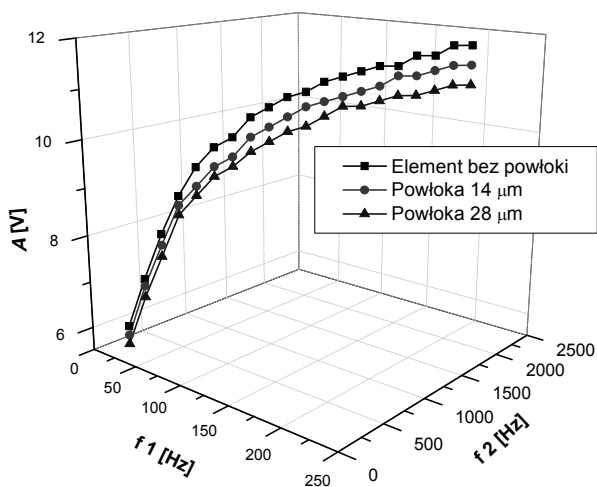
Podobnie jak dla badania przedstawionego na rysunku 2 przeprowadzono również pomiary za pomocą pojedynczego sygnału pomiarowego o kształcie sinusoidalnym i zakresie częstotliwości 1000 ÷ 20000 Hz. Wyniki przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Wyniki pomiarów amplitudy sygnału pomiarowego sinusoidalnego o częstotliwości w zakresie 1000 ÷ 20000 Hz

Do badania wykorzystano te same próbki powłoki ochronnej. Zastosowanie pojedynczej częstotliwości w zakresie 1000 ÷ 20000 Hz w porównaniu do sygnału złożonego z dwóch częstotliwości o zakresach pierwszej składowej 1000 ÷ 16000 Hz oraz drugiej składowej 5000 ÷ 20000 Hz powoduje mniejszy przyrost częstotliwości zmniejszającej się grubości sygnału pomiarowego praktycznie już od częstotliwości 4000 Hz.

Na rysunku 7 przedstawiono rezultaty pomiarów amplitudy sygnału pomiarowego złożonego z dwóch częstotliwości.



Rys. 7. Wyniki pomiarów amplitudy sygnału pomiarowego złożonego z dwóch częstotliwości sinusoidalnych: pierwszej 20 ÷ 300 Hz oraz drugiej 200 ÷ 3000 Hz

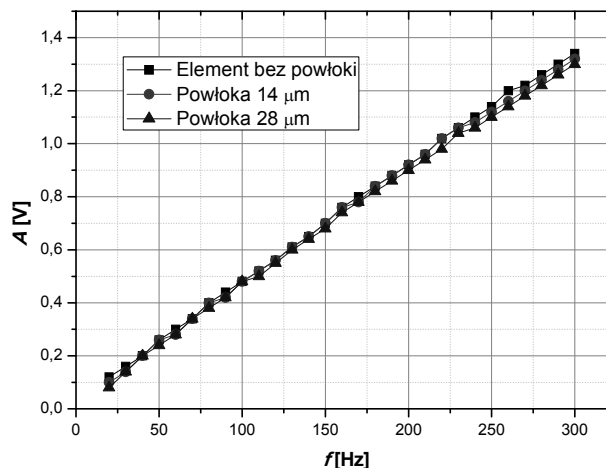
Pierwszą składową jest sygnał sinusoidalny o częstotliwości od 20 do 300 Hz, a drugą składową jest również sygnał sinusoidalny o częstotliwości od 200 do 3000 Hz.

W przypadku sygnału pomiarowego złożonego, który został wykorzystany do pomiarów przedstawionych na rysunku 7 można zauważyć odwrotną zależność wzrostu amplitudy niż dla wyników badań przedstawionych na rysunkach 2 i 4. W poprzednich badaniach odnotowano początkowy powolny wzrost amplitudy i potem stopniowy wzrost wraz ze zwiększaniem się częstotliwości składowych sygnału pomiarowego złożonego. W przypadku wyników przedstawionych na rysunku 6 wzrost amplitudy sygnału pomiarowego jest bardzo duży i wraz ze zmniejszaniem się grubości warstwy ochronnej przy wzroście częstotliwości amplituda sygnału maleje.

We wszystkich pomiarach wykorzystano identyczne próbki warstw cynkowych o grubościach 14 μm oraz 28 μm oraz powierzchni stalowej o grubości 1 mm bez powłoki ochronnej. Wartości maksymalne dla obydwu pomiarów zmierzono przy pomocy cyfrowego oscyloskopu firmy Rigol typ DS1202.

Rysunek 8 obrazuje wyniki porównawcze amplitudy sinusoidalnego sygnału pomiarowego o pojedynczej częstotliwości zmieniającej się w zakresie 20 ÷ 300 Hz. Pomiary wykonano podobnie jak poprzednio dla tych samych próbek powłoki ochronnej.

Jak można zauważyć charakterystyka amplitudy sygnału pomiarowego dla pojedynczej wartości częstotliwości w zakresie 20 ÷ 300 Hz ma prawie liniowy charakter.



Rys. 8. Wyniki pomiarów amplitudy sygnału pomiarowego sinusoidalnego o częstotliwości w zakresie 20 ÷ 300 Hz

Zmniejszanie się grubości warstwy ochronnej dla tego zakresu częstotliwości nie powoduje wzrostu amplitudy sygnału pomiarowego i w związku z tym czułość czujnika indukcyjnego jest mała a dla mniejszych częstotliwości w granicach błędów pomiarowego.

Przeprowadzone pomiary powinny być w trakcie późniejszych badań poddane weryfikacji przy pomocy symulacji, którą zazwyczaj stosuje się do oceny i weryfikacji skuteczności danej metody badawczej [14]. W badaniach naukowych symulacja jest bardzo często wykorzystywaną metodą poznawczą modelowanych procesów oraz układów [15,16,17]. Może być także odwrotnie, gdzie stworzona symulacja jest potem weryfikowana w trakcie rzeczywistych pomiarów [18].

Podsumowanie

Analizując otrzymane w trakcie pomiarów wyniki zauważono że:

- Zastosowany czujnik indukcyjny transformatorowy może być zastosowany do oceny stanu warstw cynkowych tworzących powłoki ochronne na elementach ferromagnetycznych. Zmniejszenie grubości powłoki cynkowej ma swoje odbicie we wzroście amplitudy badanego sygnału pomiarowego.
- Zastosowanie sygnałów złożonych z dwóch częstotliwości pozwala na poprawę czułości badanego przetwornika w stosunku do pomiarów przeprowadzonych przy użyciu pojedynczej częstotliwości sygnału pomiarowego sinusoidalnego. Złożony sygnał pomiarowy posiada większą amplitudę co pozwala ograniczyć zniekształcenia sygnału o małej amplitudzie. Przyczynia się także do wzrostu jednorodności badanej wartości amplitudy sygnału pomiarowego.

Autor: dr Paweł Ptak Politechnika Częstochowska, Instytut Telekomunikacji i Kompatybilności Elektromagnetycznej, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, e-mail: p.ptak@o2.pl

LITERATURA

- [1] Lewińska-Romiccka A., *Pomiary grubości powłok*. Biuro Gamma, Warszawa 2001
- [2] Głowacka M., *Inżynieria powierzchni. Powłoki i warstwy wierzchnie – wybrane zagadnienia*. Skrypt Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2007
- [3] Ptak P., Borowik L., *Diagnostyka zabezpieczeń antykorozyjnych na potrzeby elektroenergetyki*. Przegląd Elektrotechniczny, 2012 nr 9a, s. 142-145
- [4] Złoto, T., Ptak, P., Prauzner, T., *Analysis of signals from inductive sensors by means of the DasyLab software*. Annales UMCS Informatica, 2012, s. 31-37
- [5] May P., Morton D., Zhou E., *The design of a ferrite-cored probe*. Sensors and Actuators, A 136 s. 221-228.
- [6] Ptak P., Janiczek R., *Przetworniki indukcyjnościowe w pomiarach grubości warstw wierzchnich*. Przegląd Elektrotechniczny, 2007 nr 1. 86- 90
- [7] Prauzner T., *Effectiveness of magnetic detectors in alarm systems*. Przegląd Elektrotechniczny, R. 90, Nr 12/2014, s. 269-272. ISSN 0033-2097
- [8] Ptak P., Prauzner T., *Badanie czujników detekcji zagrożeń w systemach alarmowych*. Przegląd Elektrotechniczny, Nr 10/ 2013, s. 274-276. ISSN 0033-2097
- [9] Prauzner T., Ptak P., *Analiza parametrów pracy wybranych czujników pola magnetycznego*. Przegląd Elektrotechniczny, Nr 12/2014, pp.273-276. ISSN 0033-2097
- [10] Jakubiec B., *Model elektrycznego układu napędowego małego systemu mobilnego*. Przegląd Elektrotechniczny, R.89, Nr 12/2013, s.173-176. ISSN 0033-2097
- [11] Migo, P., Noga, H., *Start-up of SSTC semiconductor tesla coil - an example of an educational project*. Przegląd Elektrotechniczny, Volume 1, Issue 12, 2015, s.167-169. ISSN 0033-2097
- [12] Olesiak K., *An algorithm for tuning a fuzzy controller in a drive control system of a permanent magnet synchronous motor*. Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), 90 (2014), No. 12, pp. 250-252.
- [13] Mazurek P., Wdowiak A., *Wykrywacze metalu - identyfikacja poziomu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego*. Przegląd Elektrotechniczny, Nr 12/ 2015, s. 163-166. ISSN 0033-2097
- [14] Prauzner T., *Finite Element Method in an analysis of selected parameters of an inductive sensor for protective coatings measurements*, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015), nr.12, 205-208 ISSN 0033-2097
- [15] Noga H., *Sociometric methods in thechnological and information technology education. Trends in Education 2009, Information Technologies and Technical Education*, Vols. 1 and 2, s. 165-169. ISBN 978-80-7220-316-1
- [16] Prauzner T., *Analysis of the Results of the Pedagogical Research and EEG in the Aspect of Effective Modern Teaching Aids in the Technical Education, Society, Integration, Education. Proceedings of the International Scientific Conference*, (2015), 480-490 ISSN 1691-5887 ISBN 978-9984-44-164-1
- [17] Prauzner T., *Interactive computer simulation as a response to contemporary problems of technical education, Society, Integration, Education. Proceedings of the International Scientific Conference*, Vol.II, (2016), 579-588 ISSN 1691-5887 ISBN 978-9984-44-164-1
- [18] Miaskowki A., Krawczyk A., Łada-Tondyra E., *Electromagnetic field in transcranial magnetic stimulation*. Przegląd Elektrotechniczny., Vol 2014, Nr 12, s.244-246. ISSN 0033-2097