

doi:10.15199/48.2017.12.38

Wykorzystanie sygnałów złożonych w badaniach zabezpieczenia antykorozyjnego elementów metalowych

Streszczenie: W artykule zaprezentowano wykorzystanie sygnałów wieloczęstotliwościowych w badaniach grubości powłok ochronnych elementów maszyn i konstrukcji przemysłowych. Do badań wykorzystano powłoki cynkowe na podłożach stalowych. Do pomiarów wykorzystano czujniki indukcyjne transformatorowe o zmiennej częstotliwości sygnału pomiarowego. Rezultaty badań zostały porównane z wynikami pomiarów za pomocą sygnałów z pojedynczymi częstotliwościami.

Abstract: The article presents the use of multi-frequency signals in the study of thicknesses of protective coatings of machine elements and industrial structures. Zinc coatings on steel substrates were used for the studies. For measurements, variable frequency inductive sensors were used. The results of the tests were compared with the results of measurements using single frequency signals. (**Application of complex signals in corrosion protection of metal components**)

Słowa kluczowe: czujnik indukcyjny, badanie grubości powłok ochronnych
Keywords: inductive sensor, thickness examination of protective coatings

Wstęp

Powłoki ochronne i warstwy wierzchnie często pokrywają metalowe części maszyn i konstrukcji ze względu na występowanie procesów korozyjnych i ich wpływu na degradację elementów metalowych. Oprócz roli ochronnej i zabezpieczającej powłoki pełnią także rolę dekoracyjną i ozdobną. Aby spełniały one wymagane założenia konstrukcyjne i wytrzymałościowe muszą sprostać odpowiednim wymogom np. w zakresie grubości, wyglądu zewnętrznego, chropowatości czy odporności na szkodliwe czynniki zewnętrzne [1].

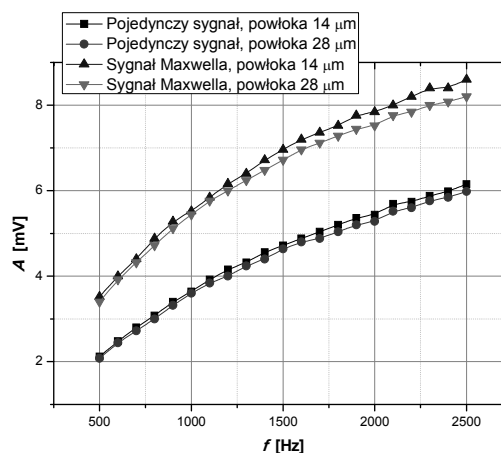
Ponieważ w trakcie eksploatacji grubość warstwy ochronnej znajdującej się na konstrukcjach i częściach maszyn, pod wpływem szkodliwego oddziaływania środowiskowych czynników korozyjnych podlega zmniejszeniu bądź uszkodzeniu, należy wykonywać okresowo ich oględziny i badania. Aby zapewnić jak najskuteczniejszą ochronę elementów metalowych trzeba dokonać analizy ilościowej i jakościowej tych szkodliwych czynników środowiskowych, które w największym stopniu przyczyniają się do niszczenia powłok ochronnych i warstw wierzchnich [2].

Najczęściej stosowanymi powłokami ochronnymi są powłoki cynkowe. Ze względu na grubość i rodzaj chronionej powierzchni elementów metalowych zgodnie z przepisami normy PN-EN ISO 1461:2000 dobierana jest grubość powłoki cynkowej. W normie tej określono także metody nakładania cynkowych powłok ochronnych, najczęściej w postaci procesu cynkowania ogniowego [3]. Analizując koszty zastosowania powłoki cynkowej, zastosowaną grubość warstwy oraz właściwości warstwy ochronnej można założyć, że zastosowanie powłoki cynkowej jako ochrony antykorozyjnej zapewni najlepsze rezultaty.

W celu oszacowania stanu powłok ochronnych na elementach metalowych wykonuje się często badania przy pomocy czujnika indukcyjnego transformatorowego. Zbudowany jest on z dwóch uzwojeń nałożonych na rdzeń ferromagnetyczny [4,5,6]. Uzwojenie wzbudzające czujnik zasilane jest zazwyczaj sygnałem sinusoidalnym o częstotliwości w zakresie od 50 do 15000 Hz. Dla takich częstotliwości sprawdza się wartość amplitudy sygnału pomiarowego w uzwojeniu odbiorczym [7,8,9]. Częstotliwość dobiera się w taki sposób aby zapewnić wymaganą czułość na zmiany grubości badanej powłoki ochronnej.

W tym przypadku przeprowadzono badania grubości powłok cynkowych o grubościach 14 μm oraz 28 μm znajdujących się na elementach z blachy stalowej o grubości 1 mm. Do pomiarów porównawczych i kontrolnych wykorzystano przyrząd pomiarowy do badania grubości powłok ochronnych i warstw wierzchnich firmy Fisher o dużej dokładności [4]. Czujnik indukcyjny zasilono z generatora arbitralnego firmy Rigol. Za jego pomocą wytworzono sygnał sinusoidalny złożony z dwóch częstotliwości wykorzystując funkcję matematyczną Maxwella, Laplace oraz Gausa. Pierwszą składową sygnału pomiarowego była sinusoida o zmiennej częstotliwości w zakresie od 500 do 2500 Hz i amplitudzie 10 V. Drugą składową była sinusoida o stałej wartości częstotliwości 3000 Hz i amplitudzie również 10 V. Jako sygnał porównawczy wykorzystano sygnał sinusoidalny o pojedynczej częstotliwości zmieniającej się w zakresie od 500 do 2500 Hz i amplitudzie 10 V. Wartości maksymalne dla pomiarów zmierzono przy pomocy cyfrowego oscyloskopu firmy Rigol typu DS1202.

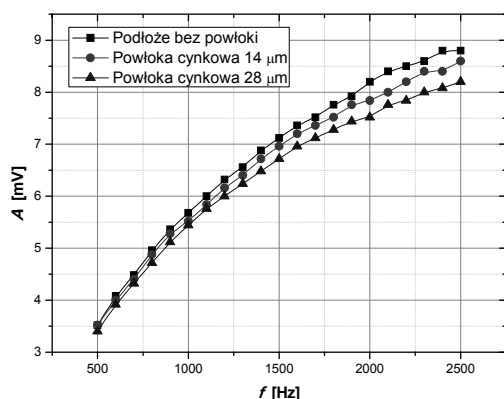
Na rysunku pierwszym zaprezentowano wyniki pomiarów dla cynkowych powłok ochronnych o grubościach 14 μm oraz 28 μm naniesionych na powierzchni stalowej o grubości 1 mm.



Rys. 1. Wyniki pomiarów amplitudy sygnału pomiarowego złożonego z dwóch częstotliwości funkcją Maxwella oraz amplitudy sygnału pomiarowego z pojedynczą częstotliwością

Zastosowano tutaj złożony sygnał pomiarowy wykonany przy pomocy funkcji Maxwella oraz sygnał z pojedynczą częstotliwością. Zmiany amplitudy sygnału pomiarowego odpowiadają zmianom grubości powłoki ochronnej wywołanym niszczeniem tej powłoki w trakcie eksploatacji pod wpływem oddziaływania szkodliwych warunkach środowiskowych. Porównując wyniki otrzymane dla pojedynczego sygnału sinusoidalnego z sygnałem złożonym z dwóch częstotliwości przy pomocy funkcji Maxwella można stwierdzić, że amplituda dla sygnału złożonego jest większa oraz można zaobserwować większe różnice w wartości amplitudy dla obu badanych warstw o grubościach 14 μm oraz 28 μm .

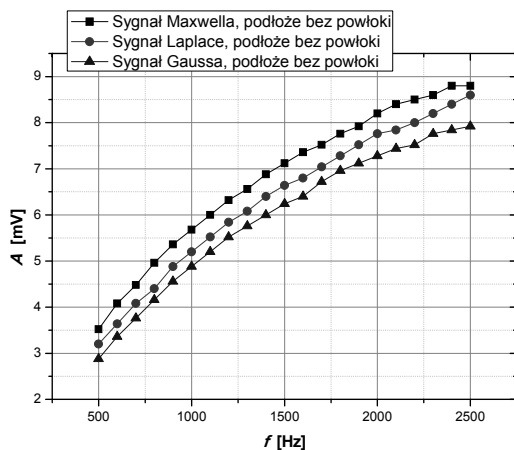
Na rysunku 2 pokazano rezultaty pomiarów wykonane dla sygnału pomiarowego z pojedynczą częstotliwością dla podłoża bez powłoki i dla powłok o grubościach 14 μm oraz 28 μm .



Rys. 2. Wyniki pomiarów amplitudy sygnału pomiarowego z pojedynczą częstotliwością dla podłoża bez powłoki i dla powłok o grubościach 14 μm oraz 28 μm

Można zauważyć, że wraz ze wzrostem częstotliwości sygnału pomiarowego odległości pomiędzy poszczególnymi krzywymi zwiększają się. Oznacza to wzrost czułości pomiarów dla zwiększającej się wartości częstotliwości sygnału pomiarowego.

Rysunek 3 przedstawia wyniki pomiarów amplitudy złożonego sygnału pomiarowego dla trzech funkcji Maxwella, Laplace i Gaussa wykonanych na podłożu bez powłoki.

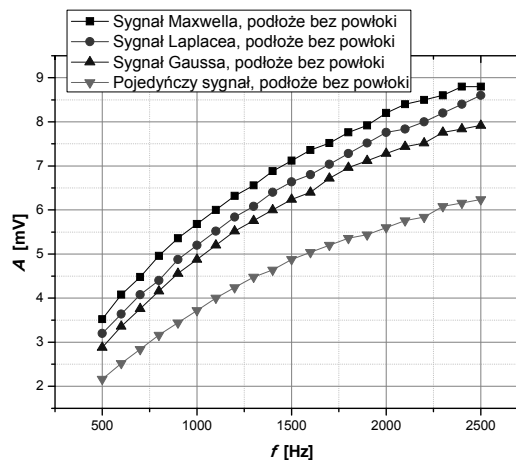


Rys. 3. Wyniki pomiarów amplitudy sygnału pomiarowego złożonego funkcją Maxwella, Laplace i Gaussa dla podłoża bez powłoki

Porównując wyniki pomiaru amplitudy dla sygnałów złożonych można zauważyć w przybliżeniu stałe różnice wartości amplitudy pomiędzy sygnałami stworzonymi za

pomocą trzech różnych funkcji matematycznych: Maxwella, Laplace i Gaussa.

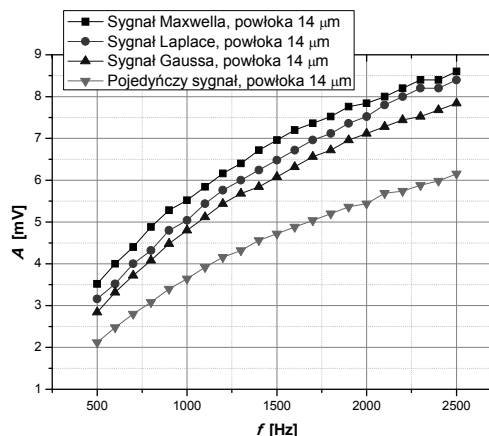
Na kolejnym rysunku 4 pokazano wyniki badania amplitudy sygnału pomiarowego dla pojedynczej częstotliwości pomiarowej oraz sygnału złożonego dla trzech funkcji matematycznych wykonanych na podłożu bez warstwy ochronnej.



Rys. 4. Wyniki pomiarów amplitudy sygnału pomiarowego złożonego funkcją Maxwella, Laplace, Gaussa oraz amplitudy sygnału pomiarowego z pojedynczą częstotliwością

Otrzymane wyniki badań pokazują, że amplituda dla sygnałów pomiarowych złożonych rośnie wraz ze zwiększającą się częstotliwością sygnału pomiarowego znacznie szybciej niż dla sygnału z pojedynczą częstotliwością pomiarową. Wartość amplitudy sygnału złożonego dla poszczególnych funkcji matematycznych jest największa dla sygnału Maxwella, potem dla sygnału Laplacea a dla sygnału Gaussa jest najmniejsza.

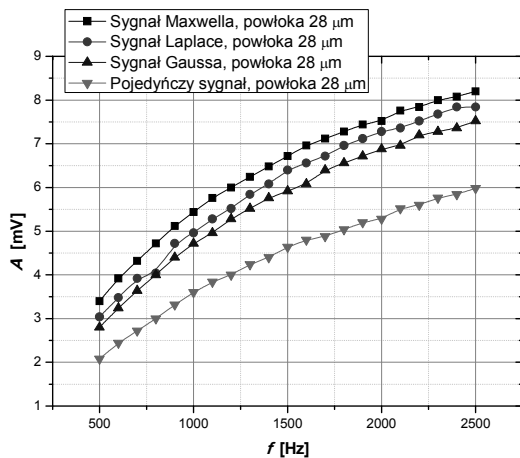
Rysunek 5 przedstawia wyniki pomiarów dla grubości powłoki ochronnej o wartości 14 μm przy zastosowaniu sygnału pomiarowego złożonego funkcją matematyczną Maxwella, Laplace, Gaussa oraz dla pojedynczego sygnału sinusoidalnego.



Rys. 5. Wyniki pomiarów amplitudy sygnału pomiarowego złożonego funkcją Maxwella, Laplace, Gaussa oraz amplitudy sygnału pomiarowego z pojedynczą częstotliwością dla powłoki o grubości 14 μm

Wyniki otrzymane w trakcie badań pokazują podobne różnice otrzymanych wartości amplitudy jak dla wyników pokazanych na rysunku 4. Ze względu na to, że pomiary wykonywane były na powłoce o grubości 14 μm zamiast na podłożu bez powłoki, widoczne są zanotowane niższe wartości amplitudy niż wyniki pokazane na poprzednim rysunku 4.

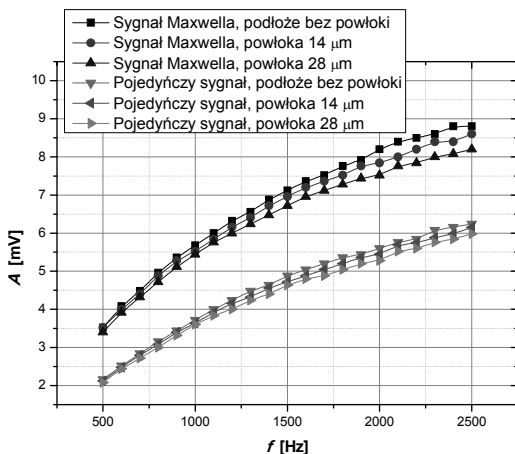
Na rysunku 6 przedstawiono wyniki pomiarów dla grubości powłoki ochronnej o wartości $28 \mu\text{m}$ przy zastosowaniu sygnału pomiarowego złożonego funkcją matematyczną Maxwella, Laplace, Gaussa oraz dla pojedynczego sygnału sinusoidalnego.



Rys. 6. Wyniki pomiarów amplitudy sygnału pomiarowego złożonego funkcją Maxwella, Laplace, Gaussa oraz amplitudy sygnału pomiarowego z pojedynczą częstotliwością dla powłoki o grubości $28 \mu\text{m}$

Na podstawie otrzymanych wyników można zauważyć, że otrzymane wartości amplitudy sygnału pomiarowego zwiększają się wraz ze wzrostem częstotliwości sygnału pomiarowego. Odległości pomiędzy krzywymi sygnałów złożonych z dwóch częstotliwości wynikają z zastosowanej funkcji matematycznej: Maxwella, Laplace oraz Gaussa. Zarejestrowane wartości amplitudy dla grubości powłoki $28 \mu\text{m}$ są proporcjonalnie mniejsze niż dla wyników otrzymanych dla pomiarów powłoki o grubości $14 \mu\text{m}$ oraz dla podłoża bez powłoki.

Rysunek 7 przedstawia zestawienie wyników pomiarów amplitudy sygnału pomiarowego, złożonego za pomocą funkcji Maxwella oraz z pojedynczą częstotliwością, dla podłoża bez powłoki oraz powłok ochronnych o grubościach $14 \mu\text{m}$ i $28 \mu\text{m}$.



Rys. 7. Wyniki pomiarów amplitudy sygnału pomiarowego złożonego funkcją Maxwella, Laplace, Gaussa oraz amplitudy sygnału pomiarowego z pojedynczą częstotliwością

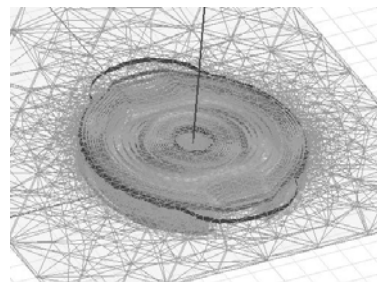
Na podstawie otrzymanych wyników można zauważyć, że dla sygnału złożonego amplituda sygnału pomiarowego ma większą wartość niż dla sygnału z pojedynczą częstotliwością odpowiednio dla wszystkich badanych grubości powłok ochronnych. Także dla sygnału złożonego

odległości pomiędzy wynikami badania poszczególnych grubości powłoki ochronnej są większe niż dla pomiarów wykonanych za pomocą pojedynczej częstotliwości sygnału pomiarowego. Oznacza to, że czułość przetwornika indukcyjnego przy badaniu grubości warstwy ochronnej, jest większa przy zastosowaniu sygnału złożonego za pomocą funkcji Maxwella, Laplace i Gaussa niż przy zastosowaniu sygnału pomiarowego z pojedynczą częstotliwością.

Wyniki pomiarów na podstawie MES w programie symulacyjnym

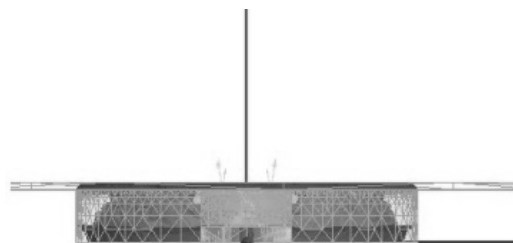
Wyniki badań laboratoryjnych posłużyły do opracowania układu zasilającego oraz analizy uzyskanych danych sygnału pomiarowego w metodą elementów skończonych. Ocenę dokładności pomiarów grubości powłok można realizować również dla pomiarów wykonywanych w ramach zajęć dydaktycznych laboratoryjnych z Metrologii Elektrycznej np. metodą problemową i projektów. Po wykonaniu badań studenci mogą wykorzystać komputerowe metody obliczeniowe do oceny dokładności i wykreślenia charakterystyk pracy układu. Proces pomiarowy można bezpośrednio zmieniać i kontrolować za pomocą narzędzi wbudowanych w pakiet programowy. Pomiaru takie dzięki oprogramowaniu ANSYS Maxwell można wykonywać nie tylko na zajęciach dydaktycznych ale także przeprowadzać ich symulację bez dostępu do fizycznego układu pomiarowego [10,11]. Umożliwia to wcześniejsze sprawdzenie poprawności działania oraz wprowadzenie poprawek konstrukcyjnych już na etapie projektowania takiego układu pomiarowego [12,13,14].

Na rysunku 8 zaprezentowano widok wygenerowanej siatki MES dla czujnika indukcyjnego umieszczonego na badanej próbce z materiału ferromagnetycznego (widok od strony próbki).

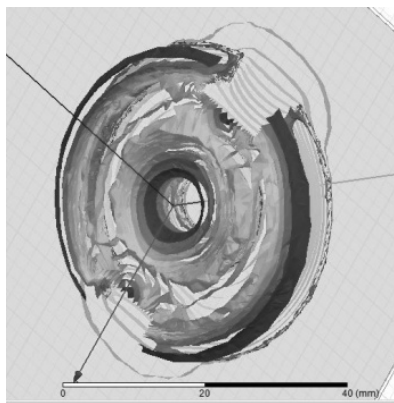


Rys. 8. Widok wygenerowanej siatki MES dla czujnika oraz dla próbki badanej (widok od strony próbki)

Następny rysunek 9 przedstawia widok poprzeczny zamodelowanego czujnika, a na rysunku 10 zaprezentowano obraz linii sił pola magnetycznego w zaprojektowanym czujniku indukcyjnym transformatorowym.



Rys. 9. Obraz poprzeczny zamodelowanego czujnika zaprojektowanego za pomocą oprogramowania ANSYS Maxwell



Rys. 10. Widok linii sił pola magnetycznego w czujniku zaprojektowanym za pomocą oprogramowania ANSYS Maxwell

Zaletą oprogramowania ANSYS Maxwell jest prosty interfejs oraz w pełni zautomatyzowany proces obliczeniowy wymagający od użytkownika jedynie stworzenia lub wczytania geometrii, przypisania własności materiałowych oraz określenia interesujących użytkownika wyników analizy np. obliczenia indukcyjności. Wykorzystując technologię adaptacyjnego tworzenia siatki program sam generuje odpowiednią siatkę elementów skończonych, dzięki czemu symulacja przestaje być skomplikowanym zagadnieniem.

Wykonane w trakcie badań pomiary często poddaje się weryfikacji przy pomocy symulacji, którą zazwyczaj stosuje się do oceny i weryfikacji skuteczności danej metody badawczej [15,16]. Symulacja bardzo często wykorzystuje się jako metodą poznawczą modelowanych procesów oraz układów w badaniach naukowych [17,18]. Stworzona symulacja może być także potem weryfikowana w trakcie rzeczywistych pomiarów [19,20].

Deterministyczne symulacje komputerowe mające charakter oprogramowania interakcyjnego (dialogowego i specjalistycznego) znajdują swoje miejsce również w procesie dydaktycznym, albowiem są praktyczną odpowiedzią na powszechnie głoszone postulaty kognitywizmu oraz konstruktywizmu w nowoczesnym kształceniu technicznym oparte na technologii informatycznej [21].

Podsumowanie

Na podstawie otrzymanych w trakcie badań wyników można zauważyć, że zastosowanie sygnałów złożonych z dwóch częstotliwości funkcją matematyczną umożliwia zwiększenie czułości badanego przetwornika w stosunku do pomiarów przewodzących przy użyciu pojedynczej częstotliwości sygnału pomiarowego sinusoidalnego.

Złożony sygnał pomiarowy posiada większą amplitudę co pozwala ograniczyć zniekształcenia sygnału o małej amplitudzie.

W wyniku zastosowania odmiennych funkcji matematycznych do łączenia sygnałów sinusoidalnych otrzymuje się różne krzywe pracy czujnika dla badanej grubości warstwy wierzchniej. Sygnał utworzony za pomocą funkcji Gaussa charakteryzuje się najlepszą liniowością pomimo nieznacznie mniejszej wartości amplitudy i czułości na zmiany grubości badanej warstwy.

Autorzy: dr Paweł Ptak Politechnika Częstochowska, Instytut Optoelektroniki i Systemów Pomiarowych, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, e-mail: p.ptak@o2.pl; dr Tomasz Prauzner, Akademia im. Jana Długosza w Częstochowie, Instytut Techniki i Systemów Bezpieczeństwa, Al. Armii Krajowej 13/15, 42-218 Częstochowa, e-mail: matompra@poczta.onet.pl

LITERATURA

- [1] Lewińska-Romicka 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, 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), 31-37
- [5] May P., Morton D., Zhou E., *The design of a ferrite-cored probe*. Sensors and Actuators, A 136, 221-228
- [6] Ptak, P., Borowik, L., *Dobór częstotliwości i rodzaju sygnału czujnika indukcyjnego na potrzeby pomiaru grubości wielowarstwowych powłok ochronnych*, Przegląd Elektrotechniczny, (2012), nr 12b, 245-247
- [7] Borowik, L., Ptak, P., *Wzorcowanie przyrządów do pomiarów grubości warstw wierzchnich*, Przegląd Elektrotechniczny, (2010), nr 04, 97-100
- [8] Prauzner T., Ptak P., *Analiza parametrów pracy wybranych czujników pola magnetycznego*. Przegląd Elektrotechniczny, (2014), nr 12, 273-276
- [9] Ptak P., Prauzner T., *Badanie czujników detekcji zagrożeń w systemach alarmowych*. Przegląd Elektrotechniczny, (2013), nr 10, 274-276
- [10] 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
- [11] Prauzner T., *Interactive computer simulation as a response to contemporary problems of technical education*, Society, Integration, Education. Proceedings of the International Scientific Conference, (2016), Vol. II, 579-588
- [12] Migo, P., Noga, H., *Start-up of SSTC semiconductor tesla coil - an example of an educational project*. Przegląd Elektrotechniczny, (2015), Volume 1, Issue 12, 167-169
- [13] Zagirnyak M., Prus V., Kolotylo I., Milyavec D., *Taking stator cores properties into account when induction motors vibration parameters are calculated*, Przegląd Elektrotechniczny, (2013), nr 12, 192-195
- [14] Jakubiec B., *Computer model of electric vehicle drive system fed from hybrid energy storage system*, Przegląd Elektrotechniczny, 92 (2016), nr 12, 57-60
- [15] Zagirnyak M., Prus V., Nikitina A., Miljavec D., *Research of energy processes in circuits containing iron in saturation condition*, Przegląd Elektrotechniczny, (2011), nr 3, 149-152
- [16] Zagirnyak M., Prus V., Kolotylo I., Miljavec D., *Determination of power indices for a three-phase induction motor with a phase-wound rotor through particular losses components*, Przegląd Elektrotechniczny, (2012), nr 12b, 80-82
- [17] Jakubiec B., *Napęd pojazdu elektrycznego z wielofazowym silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi*, Przegląd Elektrotechniczny, 91 (2015), nr.12, 125-128
- [18] Olesiak K., *Application of the fuzzy controller in the speed control system of an induction motor*, Przegląd Elektrotechniczny, 89 (2013), nr.12, 336-339
- [19] Olesiak K., *An algorithm for tuning a fuzzy controller in a drive control system of a permanent magnet synchronous motor*, Przegląd Elektrotechniczny, 90 (2014), nr 12, 250-252
- [20] Mazurek P., Wdowiak A., *Wykrywacz metalu - identyfikacja poziomu natężenia pola elektrycznego i magnetycznego*, Przegląd Elektrotechniczny, (2015), nr 12, 163-166
- [21] Noga H., *Sociometric methods in the technological and information technology education*. Trends in Education, (2009), Information Technologies and Technical Education, Vols. 1 and 2, 165-169