

Modelowanie i symulacja działania czujnika indukcyjnego pola magnetycznego

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań opartych na modelowaniu MES będące kontynuacją badań w zakresie oceny czułości czujnika indukcyjnego w pomiarach grubości warstw ochronnych metalu. Przedstawiono nowe efekty badań naukowych weryfikujące dotychczasowe pomiary techniczne dzięki opracowaniu nowego modelu czujnika indukcyjnego w programie ANSYS Maxwell.

Abstract. The article presents the results of research based on FEM modeling which are continuation of research in the evaluation of the sensitivity of an inductive sensor in measuring the thickness of the protective layer of metal. There were presented new results of verification the existing technical measures through the development of a new model of an inductive sensor in the program ANSYS Maxwell. (**Modeling and simulation of the magnetic field induction sensor**)

Słowa kluczowe: badanie pola magnetycznego, przetworniki pola magnetycznego, symulacja komputerowa, modelowanie
Keywords: magnetic field investigation, magnetic field transducers, computer simulation, modeling

Wstęp

Metoda Elementów Skończonych (MES) jest narzędziem matematycznym coraz powszechniej stosowanym do obliczeń inżynierskich, które pozwala przekształcić zbiór równań różniczkowych opisujących zachowanie, czy właściwości jakiegoś ciągłego medium na układ równań nieliniowych. Taki układ równań może być rozwiązany przy pomocy komputera [1,2,3]. Przedstawione wyniki pomiarów opartych na modelowaniu MES są kontynuacją badań w zakresie oceny czułości czujnika indukcyjnego w pomiarach grubości warstw ochronnych metalu [4,5]. Metoda MES wykorzystana została do weryfikacji badań laboratoryjnych prowadzonych w laboratorium metrologii Politechniki Częstochowskiej [6]. Obliczenia MES wykonano w Instytucie Techniki i Systemów Bezpieczeństwa Akademii im. Jana Długosza w Częstochowie [7,8]. Wykorzystanie metody MES ma za zadanie opracowanie modelu wirtualnego czujnika w celu jego weryfikacji działania oraz jako modelu do dalszych planowanych innowacji technologicznych. Przeprowadzone badania metodą elementów skończonych mają dostarczyć wyniki, których uzyskanie metodą techniczną w pracowni metrologii są niezwykle trudne do ocenienia. Model wirtualny wskaże te elementy konstrukcji urządzenia, które są odpowiedzialne za efektywność działania czujnika [9]. Uzyskane uprzednio wyniki metodą laboratoryjną zostały zweryfikowane poprzez model symulacyjny. Na podstawie uzyskanych wyników wyciągnięto konstruktywne wnioski do dalszych badań i wdrożeniu dalszych rozwiązań mających za zadanie poprawić skuteczność działania urządzenia.

Budowa czujnika dwuzwojowego

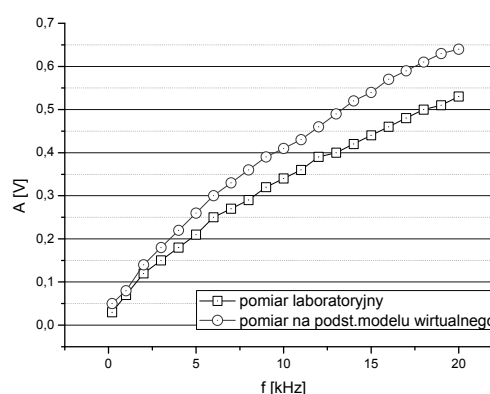
Wykonany model rzeczywisty czujnika oznaczy został w pracy, jako „czujnik 2”. Wprowadzona nazwa ma za zadanie wyróżnienie go w terminologii spośród wcześniej badanych czujników będących częścią długoletnich badań laboratoryjnych prowadzonych w ramach współpracy obu instytutów. Obudowa czujnika posiada wymiary geometryczne odpowiednio: wysokość - 35mm, średnica zewnętrzna 23mm, średnica wewnętrzna - 19mm. Wewnątrz umieszczony został rdzeń ferromagnetyczny (kubkowy). Na rdzeniu ferromagnetycznym nawinięto uzwojenie zasilające oraz uzwojenie pomiarowe (rys.1). Uzwojenie wewnętrzne włączono do generatora funkcyjnego i zasilono sygnałem sinusoidalnym o różnej częstotliwości i amplitudzie a uzwojenie pomiarowe podłączono do karty pomiarowej.

Badania laboratoryjne

Na rysunku 2 przedstawiono charakterystykę przenoszenia sygnału pomiarowego czujnika 2. Pomiary wykonano na podłożu stalowym o grubości 1mm bez warstwy wierzchniej.

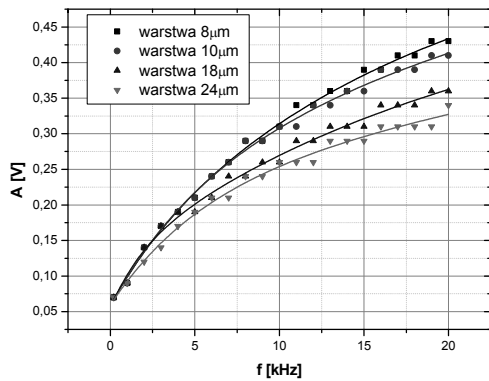


Rys.1. Czujnik indukcyjny



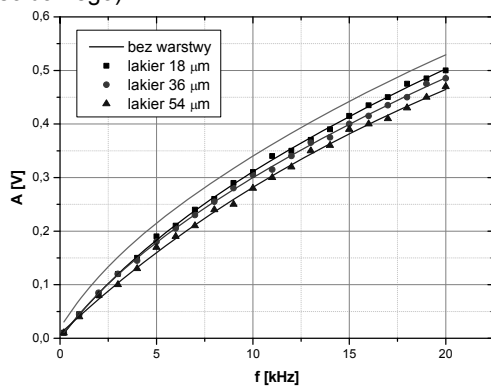
Rys.2. Charakterystyka przenoszenia sygnału pomiarowego badanego przetwornika dla podłoża (bez powłoki) o grubości 1 mm dla pomiarów laboratoryjnych oraz na podstawie modelu wirtualnego.

Następnie dokonano pomiarów w laboratorium metrologicznym dla czterech próbek stalowych o grubości 1mm pokrytych warstwami cynku o różnej grubości (rys.3).

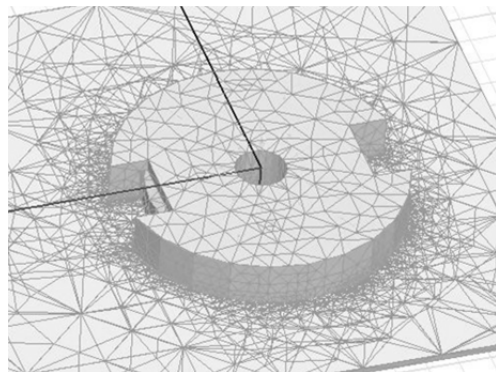


Rys.3. Amplituda sygnału pomiarowego dla różnych grubości warstw wierzchnich

Kolejna seria badań dotyczyła pomiarów warstw lakierniczych o różnej grubości, co zilustrowano na rysunku 4. Pomiary wykonano na podłożu stalowym o grubości 1mm przy różnej częstotliwości sygnału pomiarowego (sinusoidalnego).



Rys.4. Amplituda sygnału pomiarowego dla różnych grubości warstw lakieru

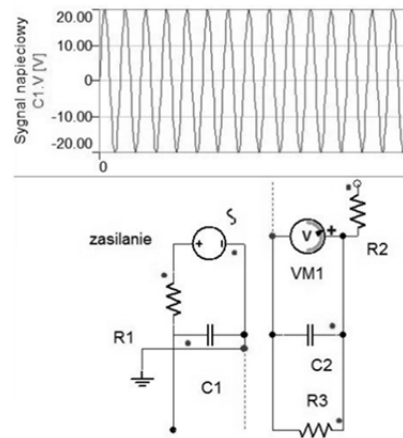


Rys.5. Wirtualny model czujnika z naniesioną siatką

Model wirtualnego czujnika indukcyjnego

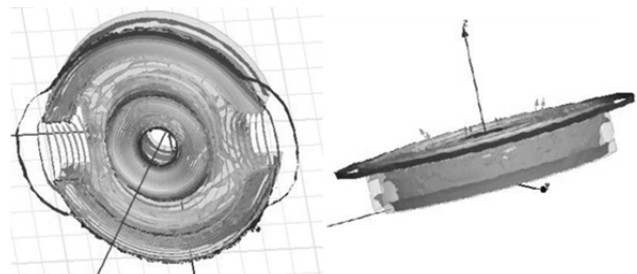
W celu weryfikacji poprawności wykonanych badań metodą laboratoryjną przystąpiono do badań na podstawie opracowanego modelu czujnika indukcyjnego. Wirtualny model wykonano w powszechnie znanym programie Maxwell ANSYS [10,11]. Program ten jest programem do obliczeń dla inżynierów zajmujących się projektowaniem i analizowaniem urządzeń elektromagnetycznych i elektromechanicznych w środowisku 2D/3D. ANSYS obecnie jest szeroko wykorzystywany przez grupy naukowców z innych dziedzin nauki dzięki szerokiej ofercie wyspecjalizowanych narzędzi takich jak chociażby do analiz elektromagnetycznych, układów elektrycznych, sterowania, symulacji pól sprzężonych itp. [12-15].

W przedstawionym modelu pominięto obudowę czujnika albowiem nie stanowi ona ze względu na działanie istotnego elementu czujnika a służy jedynie jako obudowa modelu rzeczywistego (rys.5). W programie SIMPLORER opracowano również wirtualny model układu zasilającego czujnik, niezbędnego dla wyznaczenia charakterystyk amplitud sygnału (rys.6).

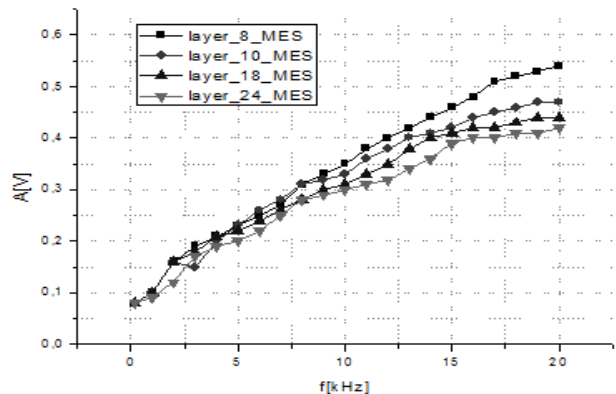


Rys.6. Model układu zasilającego

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych zaobserwowano podstawowe parametry (rys.7) ukazujące efektywność pracy czujnika, m.in. rozkład indukcji magnetycznej, rozkład natężenia pola magnetycznego itp. w obszarze badanego modelu czujnik-próbka. Odczytano wartości amplitudy sygnału na uzwojeniu pomiarowym wykorzystując wskazania voltmierzera VM1, które posłużyły do sporządzenia charakterystyk na podstawie modelu wirtualnego w celu porównania ich z odczytem wielkości metodą techniczną (rys.8 i 9).

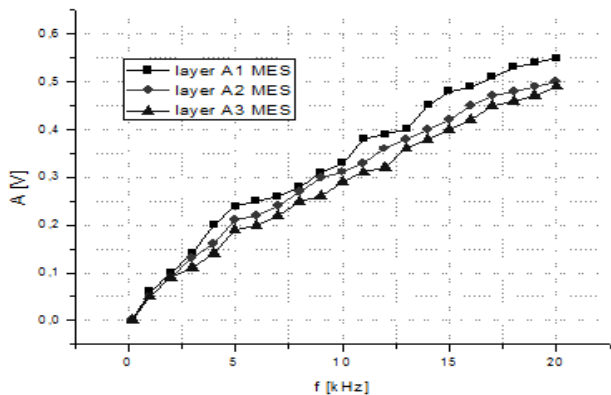


Rys.7. Wizualizacja pracy czujnika indukcyjnego



Rys.8. Wykres amplitudy uzyskany metodą MES dla warstw ocynkowanych o różnych grubościach: 8, 10, 18 i 24 μm

Kolejny zakres badań to badania symulacyjne na podstawie wcześniej opracowanego modelu jednak zmieniono geometrycznie grubość warstw wierzchnich próbek (18, 36 i 54 μ m) oraz ich właściwości materiałowe charakterystyczne dla farb akrylowych. Ich skład opiera się na żywicach akrylowych, dzięki czemu są trwałe i odporne na warunki atmosferyczne (rys.8).



Rys.9. Charakterystyka czułości pracy czujnika uzyskana metodą MES

Podsumowanie

Celem przeprowadzonych badań była analiza oraz porównanie wyników pomiarów dokonanych na stanowisku laboratoryjnym wyposażonym w tradycyjne przyrządy pomiarowe a wynikami otrzymanymi na podstawie MES. Uzyskane wyniki dostarczyły przekonujące dowody, iż programy symulacyjne mogą, jednak nie gwarantują poprawności otrzymanych rzeczywistych wyników, które w tym przykładzie należy uznać za rzeczywiste (oczywiście i one są również obarczone błędem jednak znacznie mniejszym). Metoda MES ogranicza również w znacznym stopniu wpływ czynników stochastycznych oraz zakłócających środowisko zewnętrzne, w którym dokonano pomiarów laboratoryjnych. Przypuszcza się, iż istniejące różnice w pomiarach są efektem dokładności wykonanego modelu mes, wykonanie modelu 3D w formie wirtualnej może być przyczyną znacznych niedoskonałości w konstrukcji czujnika oraz odwzorowaniu wzajemnego położenia na granicy czujnik-próbka. Charakterystyka częstotliwościowa dla sygnału pomiarowego dla podłoża st bez powłoki została dokonana w przedziale częstotliwości do 20kHz. Otrzymane wartości amplitudy wskazują, iż różnica pomiędzy pomiarem rzeczywistym a metodą komputerową wykazują dość znaczne różnice. Do wartości częstotliwości 5kHz są zbliżone, natomiast od wartości około 6kHz różnią się od siebie w przedziale 0,05 do 0,1V (rys.2). Identyczne różnice zaobserwowano w uprzednim modelu czujnika indukcyjnego, którego wyniki przedstawiono we wcześniejszych publikacjach. Identyczną zależność zaobserwowano przy kolejnych pomiarach dla różnych grubości powłok cynkowych oraz z naniesionych powłok lakieru. Pomiary metodą laboratoryjną ukazują, iż charakterystyki dla próbek z powłoką cynku zauważalnie różnią się w zależności od grubości powłoki ochronnej, zgodnie z oczekiwaniami dla próbki o grubości powłoki 8 μ m amplituda sygnału pomiarowego wykazuje największą wartość dla wyższych częstotliwości przebiegu sygnału sinusoidalnego i wyniosła około 0,42V. Podobne zależności zaobserwowano dla pozostałych badanych próbek. Dla metody mes wyniosła ona dla tej samej częstotliwości aż 0,55V. Zauważono, iż amplituda sygnału pomiarowego wzrasta wraz ze wzrostem częstotliwości sygnału i maleje ze wzrostem grubości warstwy nie ferromagnetycznej. Widoczny jest znaczny rozrzut wyników pomiaru dla każdej

warstwy, choć wypadkowe krzywe dość dokładnie ilustrują zmiany grubości warstw. Odległości od poszczególnych krzywych są na tyle duże, że umożliwiają rozróżnienie badanej warstwy (metoda laboratoryjna). Ocena czułości czujnika dla warstw pokrytych lakierem wykazuje podobne tendencje. Czujnik dobrze reaguje na zmiany grubości warstwy lakierniczej i pozwala na precyzyjny pomiar jej grubości. Przy pomiarze metodą laboratoryjną, już przy częstotliwości sygnału o wartości około 8kHz poszczególne sygnały są dobrze rozróżnialne. Metoda MES ukazuje wyższe wartości pomiaru sygnału pomiarowego do 0,55V. Rozróżnialność grubości (a więc wskazująca na czułość czujnika) jest zauważalna już przy częstotliwości 5kHz, jednak w przeciwieństwie do pomiarów laboratoryjnych nie wykazują tak liniowej charakterystyki a dla wybranych częstotliwości różnice wartości sygnału pomiarowego wydają się mniejsze. Porównanie wyników można dokonać do częstotliwości nie większej niż 20kHz, albowiem zaobserwowano, iż podczas badań laboratoryjnych powyżej tej częstotliwości indukcyjność ma praktycznie stałą wartość, identyczną granicę przyjęto dla pomiarów MES. Badania MES ukazały również, iż powyżej częstotliwości 20kHz można zauważyć dalszy wzrost indukcyjności. Na podstawie obserwacji oraz porównania wyników należy stwierdzić, iż pomimo staranności wykonania modelu symulacyjnego, metoda elementów skończonych wprowadza szereg możliwych błędów rozwiązania, do których zaliczyć można: błąd modelowania (zastosowany model matematyczny nie odzwierciedla dokładnie rzeczywistości), błąd wartości współczynników (przyjęte wartości współczynników równań różniczkowych cząstkowych i warunków brzegowych, czyli np. dane materiałowe, dane o interakcji obiektu ze światem zewnętrznym obarczone są błędem), błąd odwzorowania obszaru (obszar obliczeniowy nie odpowiada dokładnie rzeczywistemu obszarowi zajmowanemu przez analizowany obiekt), błąd numeryczny (błąd dyskretyzacji, zastosowana metoda aproksymacji wprowadza błąd w stosunku do rozwiązania dokładnego problemu wyjściowego), błąd zaokrągleń (ze względu na zastosowanie ograniczonej dokładności reprezentacji liczb w komputerze, rozwiązanie uzyskane programem komputerowym nie odpowiada rozwiązaniu przybliżonemu, które zostałoby otrzymane przy dokładnej reprezentacji liczb). Powyższe uwagi są na tyle istotne, iż mogą generować znaczne różnice w uzyskanych pomiarach oraz prowadzić do błędnych założeń, również istotnych w projektach o innej tematyce [16-21]. 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. Pomiary takie dzięki oprogramowaniu można wykonywać nie tylko na zajęciach dydaktycznych, ale także przeprowadzać ich symulację bez dostępu do fizycznego układu pomiarowego. Umożliwia to wcześniejsze sprawdzenie poprawności działania oraz wprowadzenie poprawek konstrukcyjnych już na etapie projektowania takiego układu pomiarowego. Zaletą oprogramowania symulacyjnego 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. wyznaczenia indukcyjności. Wykorzystując technologię adaptacyjnego tworzenia siatki program sam generuje

odpowiednią siatkę elementów skończonych, dzięki czemu symulacja przestaje być skomplikowanym zagadnieniem. 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 konstruktywizmu w nowoczesnym kształceniu technicznym [22-24].

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

LITERATURA

- [1] Bianchi N., *Electrical Machine Analysis Using Finite Elements*. Taylor & Francis Group, (2005)
- [2] Jin J.M., *The Finite Element Method in Electromagnetics*, Wiley, IEEE Press, (2002)
- [3] Xiaolin Ch., Yijun L., *Finite element modeling and simulation with ANSYS Workbench*, CRC Press, (2014)
- [4] Janiczek R., Ptak P., *Przetworniki indukcyjnościowe w pomiarach grubości warstw wierzchnich*, Przegląd Elektrotechniczny, (2007), nr.1, 86-90
- [5] Ptak P., Borowik L., *Badanie wielowarstwowych powłok ochronnych*, Przegląd Elektrotechniczny, 91 (2015), nr.12, 209-211
- [6] Ptak P., Borowik L., *Dokładność czujników indukcyjnych w defektoskopii warstw ochronnych urządzeń elektrycznych*, Przegląd Elektrotechniczny, 90 (2014), nr.12, 277-280
- [7] Prauzner T., Ptak P., *Analiza parametrów pracy wybranych czujników pola magnetycznego*, Przegląd Elektrotechniczny, 90 (2014), nr.12, 273-276
- [8] Ptak P., Prauzner T., *Badania czujników detekcji zagrożeń w systemach alarmowych*, Przegląd Elektrotechniczny, Nr.10, (2013), 274-276
- [9] 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
- [10] Bolkowski S., Sikora J., Skoczylas J., Sroka J., Stabrowski M., Wincenciak S., *Komputerowe metody analizy pola elektromagnetycznego*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, (1993)
- [11] Kuczmann M., Iványi A., *The finite element method in magnetics*, Academic Press, Budapest, (2008)
- [12] Krawczyk A., Łada-Tondyry E., *The Evolution of Electromagnetic Field Limitation in ICNIRP's Standards*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 87 Nr.12b, (2011), 89-91
- [13] Miaskowki A., Krawczyk A., Olchowik G., Łada-Tondyry E., Bartosiński A., *A numerical evaluation of electric field and SAR distribution around a titanium implant in the trunk of a boy*, Przegląd Elektrotechniczny, (2012), nr.12b, 77-79
- [14] Mazurek P., *Modelowanie rdzeniowego ogranicznika zakłóceń przewodzonych w instalacji reaktora nietermicznej plazmy*, Przegląd Elektrotechniczny, 2013, nr.12, 185-187
- [15] Jakubiec B., *Computer model of electric vehicle drive system fed from hybrid energy storage system*, Przegląd Elektrotechniczny, 92 (2016), nr 12, 57-60
- [16] Jakubiec B., *Napęd pojazdu elektrycznego z wielofazowym silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi*, Przegląd Elektrotechniczny, 91 (2015), nr.12, 125-128
- [17] Gumuła S., Pytel K., Piaskowska-Silarska M., *Environmental and economic benefits of using the kinetic energy of wind to generate electricity*. Polish Journal of Environmental Studies, vol.6, (2014), 2315-2320
- [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] Miaskowki A., Krawczyk A., Łada-Tondyry E., *Electromagnetic field in transcranial magnetic stimulation*, Przegląd Elektrotechniczny, (2014), Nr.12, 244-246
- [21] Kozik T., Noga H., Depešová J., *The symptoms of postmodernism in media and multimedia*, European Journal of Science and Theology, Volume 11, Issue 6, (2015), 119-125
- [22] Migo P., Noga H., *Start-up of SSTC semiconductor tesla coil - an example of an educational project*, Przegląd Elektrotechniczny, Vol.1, (2015), nr.12, 167-169
- [23] Noga H., Piaskowska-Silarska M., Depešová J., Pytel K., Migo P., *Examination of the theta index during solving IT issues*, Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA), IEEE 12th International Conference, (2014), 361-366
- [24] Noga H., Piaskowska-Silarska M., Depešová J., Pytel K., Migo P., *Neuro - didactic perspective of creative attitude towards education in the third millennium - examination of individual cases*, Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA) IEEE 12th International Conference, (2014), 355-360