

Szymon BANASZAK

ZACHODNIOPOMORSKI UNIwersYTET TECHNOLOGICZNY W SZCZECINIE, KATEDRA ELEKTROTECHNOLOGII I DIAGNOSTYKI,
ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin

Wybrane czynniki wpływające na odpowiedź częstotliwościową autotransformatora energetycznego

Dr inż. Szymon BANASZAK

Adiunkt w Katedrze Elektrotechnologii i Diagnostyki w Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym w Szczecinie. Autor ponad 40 publikacji z dziedziny izolacji wysokonapięciowej i diagnostyki transformatorów. Zajmuje się tematyką analizy odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń w celu oceny ich stanu mechanicznego. Członek grupy roboczej przy IEC przygotowującej normę międzynarodową nt. pomiarów FRA.



e-mail: szymon.banaszak@zut.edu.pl

Streszczenie

Artykuł omawia wyniki badań deformacyjnych przeprowadzonych na autotransformatorze RTdxP 160 MVA. Badania polegały na kontrolowanym wprowadzaniu zmian w strukturę transformatora i rejestrowanie ich wpływu na pomiary odpowiedzi częstotliwościowej (FRA). Zbadano w ten sposób wpływ rodzaju medium izolacyjnego oraz deformacje w uzwojeniach regulacyjnym i wysokiego napięcia (szeregowym). Uzyskane wyniki umożliwiły wyciągnięcie wniosków dotyczących poprawnej interpretacji i analizy krzywych FRA.

Słowa kluczowe: analiza odpowiedzi częstotliwościowej, FRA, autotransformator, diagnostyka, odkształcenie uzwojeń.

Factors influencing the frequency response of power autotransformer

Abstract

Results of deformational tests performed on RTdxP 160 MVA autotransformer are described in the paper. It was based on the infliction of controlled changes in transformer's structure, and changes in measurements of FRA curves (Frequency Response Analysis) were detected. The first issue analyzed in the experiment was change of insulating liquid. It gave clear results – a shift of transformer response along frequency, resulting from permittivity changes of insulating medium. Following tests showed influence of rough deformations of regulation windings, as well as, influence of small deformations in series winding (HV). Part of the HV winding was deformed axially and radially. Also some short-circuits between windings were simulated. On the base of obtained results it was possible to draw conclusions concerning correct interpretation and analysis of FRA results. One of important conclusions is that small changes in winding geometry or local short-circuits can be difficult to detect in case of geometrically large transformers.

Keywords: Frequency Response Analysis, autotransformer, diagnostics, windings deformation.

1. Wprowadzenie

Metoda analizy odpowiedzi częstotliwościowej (FRA – *Frequency Response Analysis*) uzwojeń transformatorów w celu określenia ich stanu mechanicznego weszła w ostatnich latach do grupy podstawowych badań diagnostycznych transformatorów energetycznych. Zebrane do tej pory doświadczenia umożliwiają wykonywanie powtarzalnych pomiarów, powstają także pierwsze standardy dotyczące techniki pomiarowej (np. IEC 60076-18). Problemem jest jednak analiza i interpretacja otrzymanych wyników, zwłaszcza w przypadku podejrzenia problemów związanych ze stanem mechanicznym uzwojenia. Ponadto wiele transformatorów ma odpowiedzi częstotliwościowe różniące się dla różnych uzwojeń fazowych, co nie oznacza deformacji, a jest typowe dla danej konstrukcji. Poprawna analiza wyników wymaga doświadczenia diagnosty i bogatej bazy danych pomiarowych, by móc

odnieść się nie tylko do pomiarów charakterystyk sąsiednich faz, lecz także do jednostek o identycznej lub zbliżonej konstrukcji. Optymalne jest dokonywanie porównywania wyników dla tej samej jednostki w odstępach czasu, jednak dla starszych transformatorów nie istnieją takie przebiegi bazowe. Dodatkowo każda ingerencja w transformator (np. wymiana oleju) może wpłynąć na wyniki FRA czyniąc bezpośrednie porównywanie utrudnionym lub niemożliwym. Także doświadczenia pomiarowe poszczególnych firm diagnostycznych, stosowane przez nie układy połączeń i różne rejestratory, często wpływają na niemożliwość bezpośredniego porównania wyników wykonanych dla danego transformatora w odstępach czasu.

W celu ułatwienia interpretacji wyników oraz zdobycia doświadczenia autor wykonał pomiary w warunkach kontrolowanej deformacji na przykładzie autotransformatora RTdxP 220/110/15,75 kV, 160 MVA (rys. 1). Stanowił on własność PSE Operator SA, Operatora Sieci Przesyłowej w Polsce. PSE Operator SA eksploatuje ponad 200 transformatorów sieciowych, sprzęgających sieci 400kV, 220kV i 110kV. Autotransformatory typu RTdxP wciąż stanowią istotną część populacji transformatorów w PSE. Typ ten charakteryzuje się przestarzałą konstrukcją, szczególnie narażoną na działanie sił dynamicznych towarzyszących prądom zwarciovym, zwłaszcza gdy miejsce zwarcia zlokalizowane jest po stronie 110 kV autotransformatora, w jego pobliżu. Opisane w artykule badania polegały na odwróceniu zagadnienia, tj. systematycznemu odkształcaniu fragmentów uzwojeń i analizie powstałych zmian w rejestrowanych odpowiedziach FRA [1, 2]. Jednostka wykorzystana do badań przeznaczona była do wymiany i fizycznej likwidacji i docelowo zastąpiona została nowoczesnym transformatorem. Zdaniem autora waga eksperymentu jest bardzo istotna ze względu na rozmiar i moc transformatora wykorzystanego do badań, a także dlatego, iż w praktyce eksploatacyjnej nie zawsze zmiany w krzywych FRA rejestrowanych dla tego typu autotransformatora są identyfikowalne z ich możliwymi przyczynami.



Rys. 1. Transformator RTdxP 230/110/15,75 kV, 160 MVA użyty do badań
Fig. 1. RTdxP 230/110/15,75 kV, 160 MVA transformer used for the experiment

Do badań wykorzystano przemysłowy miernik FRA firmy Omicron, typu FRAnalyzer, wyposażony w standardowy zestaw przewodów pomiarowych (układ trójprzewodowy) oraz specjalne zaciski pomiarowe do montażu na wyprowadzeniach izolatorów przepustowych uziemiane najkrótszą możliwą drogą za pomocą

regulowanych taśm. Jest to metoda zalecana przez powstający standard IEC, gwarantująca powtarzalność pomiarów do 2 MHz.

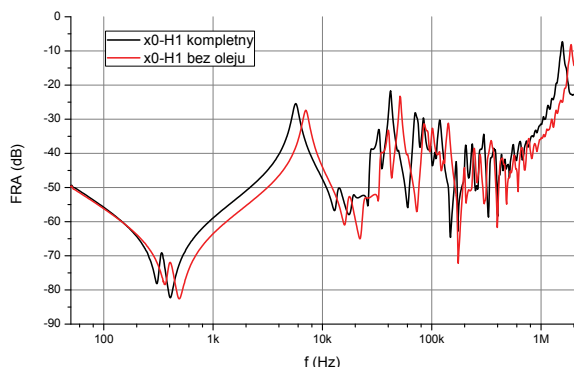
W dalszej części artykułu przedstawiono w kolejnych punktach wpływ zmian w konstrukcji transformatora na różnice w rejestrowanych przebiegach funkcji przejścia. Podkreślić należy, że każdy transformator ma swoją indywidualną odpowiedź częstotliwościową, tym samym nie jest możliwe bezpośrednie odniesienie wyników uzyskanych na jednej jednostce do innych pomiarów. Podobna deformacja w uzwojeniu dwóch różnych transformatorów może mieć inny wpływ na powstałe różnice w przebiegach FRA uzyskanych dla obu jednostek. Wyjątek stanowią tu zmiany parametrów ogólnych dla całego transformatora, takich jak układ połączeń czy typ medium izolacyjnego.

2. Wpływ medium izolacyjnego na wyniki FRA

Pierwszym zbadanym zagadnieniem było określenie wpływu czynnika izolacyjnego na wyniki rejestracji FRA. Dane takie są znane w literaturze [3], niemniej jednak wykonano porównanie wyników zmierzonych przed i po spuszczeniu oleju (rys. 2), gdyż mogą być one pomocne przy określeniu wpływu stanu medium izolacyjnego na zmiany w krzywych FRA. Pomiaru dokonano w układzie przepust zerowy – przepust górnego napięcia, czyli dla całego uzwojenia autotransformatora, wraz z kompletnym przełącznikiem zaczeptów. Zauważyć można przesunięcie charakterystyki FRA w całym zakresie częstotliwości. Wynika to ze zmniejszenia się przenikalności elektrycznej ϵ ośrodka, w którym znajduje się część aktywna, co wpływa z kolei na zmniejszenie wartości pojemności i przesunięcie wszystkich częstotliwości rezonansowych w górę, zgodnie z zależnością (1).

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_1}} \bigg/ \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_2}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_1/\epsilon_2}} \quad (1)$$

W prezentowanym przypadku stosunek częstotliwości dla każdego z rezonansów przed i po zmianie medium dielektrycznego wynosi $f_1/f_2=0,8$, co przekłada się na zmianę stosunku przenikalności elektrycznych przed zmianą i po zmianie na poziomie $\epsilon_1/\epsilon_2=1,56$. Współczynnik ten jest mniejszy od spodziewanej wprost wartości około 2,2, co związane jest z obecnością izolacji stałej, której przenikalność elektryczna jest rzędu $\epsilon = 4,7 \dots 5,1$. Dodatkowo zaobserwować można nieznaczny tłumienie, związaną najprawdopodobniej ze zmianą upływności układu izolacyjnego. Efekt ten jest typowy przy porównywaniu przebiegów zmierzonych dla różnych mediów izolacyjnych, przykładowo przy wymianie oleju mineralnego na olej pochodzenia roślinnego.



Rys. 2. Wpływ medium izolacyjnego na odpowiedź częstotliwościową uzwojenia
Fig. 2. The influence of an insulating medium on the winding's frequency response

Na podstawie powyższego przypadku oraz przedstawionej analizy można stwierdzić, kiedy ma się do czynienia z deformacjami uzwojeń, a kiedy ze zmianą właściwości medium izolacyjnego. Deformacja uzwojenia lub zwarcie w konstrukcji wpłynie na zmiany krzywych FRA lokalnie, podczas gdy dla medium izola-

cyjnego zmiana dotyczy w podobny sposób całej charakterystyki. Dodatkowo przy planowanej wymianie oleju lub zmianie rodzaju cieczy izolacyjnej, porównując wartości przenikalności elektrycznych możliwe jest określenie kierunku przesunięcia krzywych i przybliżonego stosunku częstotliwości rezonansowych. W takich przypadkach zasadne jest wykonanie pomiarów FRA przed oraz po wymianie cieczy, by móc dokonać analizy deformacji uzwojeń z uwzględnieniem pomiarów zarówno archiwalnych, jak i przyszłych.

3. Wpływ geometrii uzwojenia regulacyjnego

Celem badań deformacyjnych było określenie wpływu odkształceń w uzwojeniu wysokiego napięcia (uzwojenie szeregowo) na zmiany rejestrowanych charakterystyk FRA. Dlatego konieczne było usunięcie fragmentu uzwojenia regulacyjnego (rys. 3). Przy okazji zaobserwowano wpływ geometrii tego uzwojenia na odpowiedź FRA. Dodać należy, że przed przecięciem uzwojenia regulacyjnego nie było ono połączone z pozostałymi uzwojeniami, gdyż pomiary wykonano przy zdemontowanym przełączniku zaczeptów (dostęp do części aktywnej). Dlatego widoczne zmiany w odpowiedzi FRA (rys. 4) nie są związane z przerwą w obwodzie uzwojeń, a raczej z wpływem zmienionej geometrii oraz sprzężeń pojemnościowych i indukcyjnych pomiędzy uzwojeniami regulacyjnym i szeregowym.

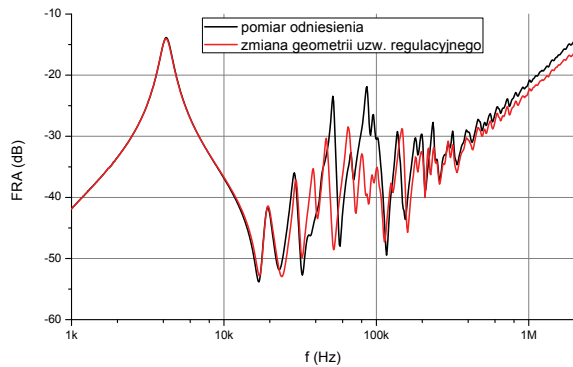


Rys. 3. Wycięty fragment uzwojenia regulacyjnego i widoczne uzwojenie górnego napięcia (szeregowo)

Fig. 3. View of the cut out regulation winding and high voltage winding (series)

Zaobserwowano, że zmiany w charakterystyce FRA widoczne są w zakresie od 30 kHz do około 200 kHz (rys. 4). Ponieważ wycięcie uzwojenia regulacyjnego jest deformacją ewidentną i rozległą, dlatego jej wpływ na odpowiedź uzwojenia jest bardzo duży i zawarty we wspomnianym zakresie częstotliwości. Generalnie na potrzeby analizy wyników częstotliwości pomiarowe FRA można podzielić na cztery obszary. Pierwszy zakres dla niskich częstotliwości odpowiada za stan obwodu magnetycznego, drugi w zakresie wyższych częstotliwości za deformacje zgrubne, takie jak np. omówiony przypadek wycięcia uzwojenia regulacyjnego. Trzeci obszar zawiera informacje o mniej rozległych deformacjach w uzwojeniach, za to najczęściej występujących w praktyce eksploatacyjnej, a czwarty, w zakresie najwyższych częstotliwości, zawiera informacje o stanie wyprowadzeń w transformatorze, izolatorów przepustowych i o sposobie podłączenia przyrządu pomiarowego [1]. Przedziały poszczególnych zakresów w dziedzinie częstotliwości zależne są od gabarytów transformatora, czyli pośrednio od jego mocy. Dla dużych jednostek cała charakterystyka FRA, a co za tym idzie podział na odpowiednie

zakresy przesunięte są w stronę niższych częstotliwości, dla mniejszych transformatorów w stronę przeciwną.



Rys. 4. Wpływ znaczącej zmiany geometrii uzwojenia regulacyjnego na krzywą FRA uzwojenia górnego napięcia

Fig. 4. The influence of significant geometry change of regulation winding on FRA curve of HV winding

4. Wpływ deformacji w uzwojeniu górnego napięcia (szeregowym)

Podstawowym założeniem przeprowadzanego eksperymentu było zaobserwowanie wpływu deformacji w uzwojeniu górnego napięcia na odpowiedź częstotliwościową. Ze względu na ograniczenia czasowe możliwe było wykonanie takich deformacji jedynie na stosunkowo niewielkim fragmencie odsłoniętego uzwojenia (rys. 3 i rys. 5). Dlatego zdecydowano się na wykonanie podstawowych deformacji poosiowych poprzez umieszczanie klina pomiędzy sąsiednimi cewkami na trzech wysokościach uzwojenia – pomiędzy 5. i 6., 8. i 9. oraz 13. i 14. cewką. Dodatkowo zasymulowano zwarcie pomiędzy sąsiadującymi fragmentami uzwojenia (sąsiednie zwoje oraz sąsiednie cewki). Na koniec sprawdzono wpływ deformacji promieniowej, polegającej na odgięciu fragmentu uzwojenia i zaburzeniu jego okrągłej geometrii.

Wyniki otrzymane dla deformacji poosiowych oraz sposób odkształcania uzwojenia przedstawiono na rys. 5 – 7.

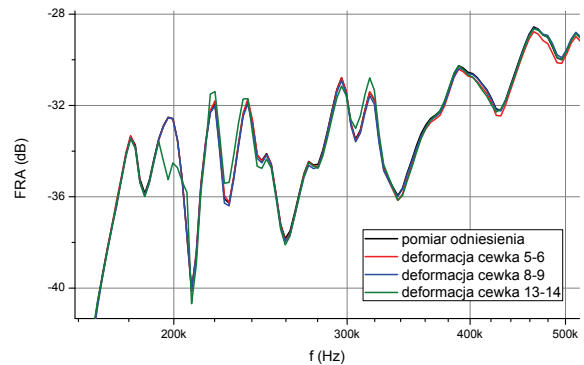


Rys. 5. Deformacja poosiowa fragmentu uzwojenia badanego transformatora

Fig. 5. Axial deformation of winding's section of tested transformer

Jak można zaobserwować na rysunku 6, zmiany charakterystyki FRA wynikające z deformacji uzwojenia wysokiego napięcia ujawniają się w zakresie częstotliwości od około 180 kHz do 330 kHz. Jest to zakres częstotliwości wyższych niż dla deformacji opisanej w punkcie 3. Stwierdzono, że wpływ lokalizacji odkształceń uzwojenia nie jest jednoznaczny. Najbardziej widoczna jest deformacja dla cewek 13. i 14., z kolei odkształcenie dla cewek 5 – 6 ujawnia się w wyższych zakresach częstotliwości (od 300 kHz). Takie niejednoznaczne wyniki oraz stosunkowo niewielka skala zmian (nawet poniżej 1 dB) wynikają z niewielkiej

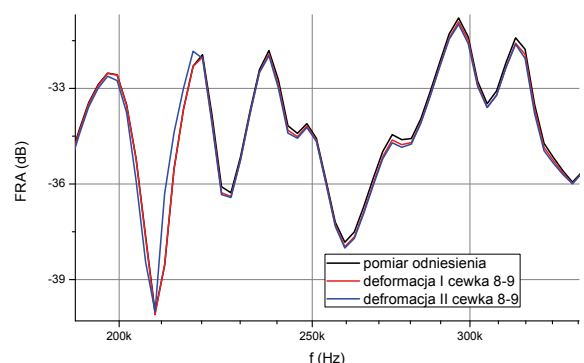
procentowej zmiany geometrii całego uzwojenia. Deformacje wykonywane były na niewielkim wycinku kołowym uzwojenia (<math><30^\circ</math>) oraz dla niewielkich różnic w wysokości uzwojenia (maks. 15%). Niemniej, biorąc pod uwagę niewielki wymiar „okna” dostępu do uzwojenia górnego, uzyskane wyniki ukazują charakterystyczne zakresy częstotliwości odpowiedzialne za tego typu deformacje.



Rys. 6. Wpływ deformacji poosiowych na odpowiedź częstotliwościową uzwojenia szeregowego (pomiar pomiędzy przepustami As-A)

Fig. 6. The influence of axial deformations on frequency response of series winding (measurement taken between As-A bushings)

Dodatkowo z przeprowadzonego eksperymentu można wyciągnąć bardzo ważny wniosek dla praktyki pomiarowej, iż dla jednostek o dużych gabarytach niewielkie deformacje – będące zagrożeniem dla prawidłowej pracy transformatora – mogą pozostać niewykryte w wyniku diagnostyki FRA. W praktyce pomiarów przemysłowych różnice na poziomie 1...2 dB pozostałyby niezauważone lub pominięte, tym bardziej, że błędy wynikające z pomiarów w odstępach czasu, przy wykorzystaniu różnych przyrządów pomiarowych, czy wręcz przy różnych temperaturach otoczenia, mogą dać większe zmiany niż opisane deformacje [4, 5]. W toku badań sprawdzono także wpływ skali deformacji na rejestrowane krzywe FRA (rys. 7), poprzez wykonanie pomiarów dla tego samego miejsca w uzwojeniu (cewki 8 i 9) przy dwóch stopniach odkształcenia. Pomimo otrzymania niewielkich różnic pomiędzy przebiegami, można zaobserwować, że układają się one kolejno wraz z rosnącą intensywnością deformacji. Potwierdza to, że zmiany w przebiegach odpowiedzi częstotliwościowej pochodzą od powstałych deformacji.



Rys. 7. Wpływ stopnia deformacji na zmiany krzywych FRA

Fig. 7. The influence of deformation level on FRA curve changes

W ramach eksperymentu sprawdzono także wpływ deformacji promieniowych oraz zwarcie międzyzwojowych i między cewkami. Otrzymane wyniki różnią się od pomiarów odniesienia w podobnych zakresach częstotliwości, jak te omówione powyżej, dlatego zrezygnowano z ich prezentacji graficznej. Prawie niezauważalny okazał się wpływ zwarć, co z jednej strony biorąc pod uwagę rozmiar uzwojenia i skalę wykonanych zwarć może wydawać się

uzasadnione. Z drugiej strony zwarcie w uzwojeniu wpływa na obwód magnetyczny, co powinno być jednoznacznie widocznie w rejestrowanym zakresie niskich częstotliwości. Dla mniejszych jednostek wpływ zwarcie jest bardzo dobrze widoczny w zarejestrowanych charakterystykach FRA, zazwyczaj jego wpływ jest bardziej znaczący niż deformacje mechaniczne [2]. Dlatego na podstawie wykonanych pomiarów zaleca się uważną analizę wyników dla tego typu transformatorów, aby nie przeoczyć znaczących symptomów wynikających z awarii mechanicznych lub elektrycznych w uzwojeniach.

5. Podsumowanie

W artykule opisano badania przeprowadzone na autotransformatorze typu RTdxP, którego właścicielem był PSE Operator SA. Polityka Operatora Systemu opiera się na utrzymaniu stanu technicznego transformatorów na wysokim poziomie, zaś pomiary FRA stanowią ważną część diagnostyki transformatorów wykorzystywaną do oceny ich stanu technicznego. Rozwój tej technologii leży w interesie eksploatatorów transformatorów, w tym PSE.

Czas przeznaczony na wykonanie badań oraz możliwości technologiczne w miejscu badania nie pozwoliły na przeprowadzenie ich w sposób szczegółowy i dogłębny, jednakże uzyskane podstawowe wyniki umożliwiają wyciągnięcie kilku istotnych wniosków dotyczących analizy wyników pomiarów odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatorów. Po pierwsze potwierdzono wpływ zmiany parametrów cieczy izolacyjnej na przebiegi FRA. W dalszej kolejności zaobserwowano charakterystyczny wpływ deformacji zgrubnych (uzwojenie regulacyjne) oraz szczegółowych. Te ostatnie udało się zauważyć w rejestrowanych charakterystykach pomimo niewielkiego stopnia deformacji w stosunku do geometrii całego uzwojenia. Ważnym wnioskiem jest znikomy wpływ nierozległych zwarć na odpowiedź uzwojenia. Z badań wynika, że niewielkie w swojej skali i rozległości deformacje uzwojeń oraz zwarcia międzyzwojowe w transformatorach o dużych gabarytach mogą, w praktyce pomiarowej, pozostać niezauważone. Stąd bardzo ważne jest odpowiednie podejście do

jakości wykonywania pomiarów. Konieczne jest stosowanie wysokiej jakości sprzętu pomiarowego oraz poprawne i staranne podłączanie go do transformatora, a także wysokie kwalifikacje personelu przeprowadzającego pomiary oraz interpretującego wyniki.

Podziękowanie. Autor dziękuje PSE Operator SA za umożliwienie przeprowadzenia badań deformacyjnych na złomowanym autotransformatorze RTdxP.

6. Literatura

- [1] Banaszak Sz., Szrot M.: Pomiary odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatora w warunkach kontrolowanej deformacji. IX Sympozjum Inżynieria Wysokich Napięć IW-2008, Będlewo, czerwiec 2008. Przegląd Elektrotechniczny 10/2008, s. 128-131.
- [2] Banaszak Sz., Gawrylczyk K.M., Klistala T.: Wpływ zwarcie międzyzwojowych na odpowiedź częstotliwościową uzwojenia transformatora. X Sympozjum Inżynieria Wysokich Napięć IW-2010, Będlewo, czerwiec 2010. Przegląd Elektrotechniczny 11b'2010, ISSN 0033-2097, s. 138-141.
- [3] Mechanical-Condition Assessment of Transformer Windings Using Frequency Response Analysis (FRA). Report of CIGRE Working Group A2.26, 2008.
- [4] Wang M., Vandermaar A.J., Srivastava K.D.: Transformer Winding Movement Monitoring in Service - Key Factors Affecting FRA Measurements. IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 20, No. 5, 2004, pp. 5-12.
- [5] Banaszak Sz.: Detekcja deformacji uzwojeń transformatorów metodą analizy odpowiedzi częstotliwościowej FRA. X Sympozjum Inżynieria Wysokich Napięć IW-2010, Będlewo, czerwiec 2010. Przegląd Elektrotechniczny 11b'2010, ISSN 0033-2097, s. 174-177.

otrzymano / received: 09.01.2011

przyjęto do druku / accepted: 01.03.2011

artykuł recenzowany

INFORMACJE

Nominacja profesorska dr. hab. inż. Wiesława Winieckiego

Z przyjemnością informujemy, że Prezydent Rzeczypospolitej Polskiej postanowieniem z dnia 19 stycznia 2011 r. nadał dr. hab. inż. Wiesławowi Winieckiemu tytuł naukowy profesora nauk technicznych. Uroczystość wręczenia nominacji odbyła się w Pałacu Prezydenckim w dniu 24 lutego 2011 r.



Wiesław Winiecki ukończył studia na Wydziale Elektroniki Politechniki Warszawskiej w roku 1975. Stopień doktora nauk technicznych uzyskał w roku 1986, stopień doktora habilitowanego nauk technicznych w roku 2003 w dyscyplinie Elektronika. Specjalizuje się w metodach projektowania przyrządów wirtualnych oraz skupionych i rozproszonych systemów pomiarowo-sterujących. Był kierownikiem kilkunastu projektów badawczych i wdrożeniowych. Jest autorem/współautorem ponad 170 publikacji w czasopismach międzynarodowych i krajowych, w materiałach konferencji międzynarodowych i krajowych oraz dwóch monografiach, jednej książki i jednego podręcznika akademickiego, a także ponad 100 raportów z prac naukowo-badawczych i wdrożeniowych. W latach 1994-2001 i 2004-2005 był dyrektorem ds. nauki w Instytucie Radioelektroniki Politechniki Warszawskiej, w latach 2005-2008 prodziekanem ds. nauki na Wydziale Elektroniki i Techniki Informatycznych PW, a od roku 2008 jest ponownie dyrektorem ds. nauki w Instytucie Radioelektroniki PW. Jest członkiem Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN oraz prezesem Polskiego Stowarzyszenia Pomiarów, Automatyki i Robotyki POLSPAR.