

dr inż. Szymon Bariaszak
Wydział Elektryczny
Zachodniopomorski Uniwersytet
Technologiczny w Szczecinie
al. Piastów 17, 70-310 Szczecin

Szczecin, 1 marca 2017 r.

**Centralna Komisja
do Spraw Stopni i Tytułów**
pl. Defilad 1 (PKiN)
00-910 Warszawa

WNIOSEK
o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego
w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie elektrotechnika

1. Imię i nazwisko: Szymon Banaszak
2. Stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie Elektrotechnika
3. Tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego
Ocena stanu mechanicznego części aktywnej transformatorów
4. Wskazanie jednostki organizacyjnej do przeprowadzenia postępowanie habilitacyjnego:
Rada Wydziału Elektrycznego
Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie
5. Przyjmuję do wiadomości, że wniosek wraz z autoreferatem zostanie opublikowany na stronie internetowej Centralnej Komisji do Spraw Stopni i Tytułów, zgodnie z obowiązującymi przepisami.


.....
podpis Wnioskodawcy

Załączniki:

- Załącznik 1 - kopia dokumentu potwierdzającego posiadanie stopnia doktora
- Załącznik 2a - autoreferat w języku polskim
- Załącznik 2b - autoreferat w języku angielskim
- Załącznik 3 - wykaz opublikowanych prac naukowych lub twórczych prac zawodowych
- Załącznik 4 - informacja o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki
- Załącznik 5 - monografia habilitacyjna
- Załącznik 6 - kopie publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe
- Załącznik 7 - oświadczenia współautorów publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe
- Załącznik 8 - analiza cytowań publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe
- Załącznik 9 - kopie dokumentów poświadczających inne osiągnięcia autora
- Załącznik 10 - dane kontaktowe wnioskodawcy
- Załącznik 11 - płyta CD zawierająca wersję cyfrową dokumentacji

Szczecin, dnia 1 marca 2017 r.

dr inż. Szymon Banaszak

Katedra Elektrotechnologii i Diagnostyki

Wydział Elektryczny

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

AUTOREFERAT

1. Imię i nazwisko: Szymon Banaszak

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

2001 – magister inżynier, kierunek elektrotechnika – Wydział Elektryczny Politechniki Szczecińskiej.

2006 – doktor nauk technicznych w dyscyplinie elektrotechnika – Wydział Elektryczny Politechniki Szczecińskiej; rozprawa pt. *„Badania starzeniowe trakcyjnych izolatorów kompozytowych”*; promotor: dr hab. inż. Lech Subocz, prof. PS; recenzenci: prof. dr hab. inż. Zbigniew Gacek, Wydział Elektryczny, Politechnika Śląska oraz dr hab. inż. Michał Zeńczak, prof. PS, Wydział Elektryczny, Politechnika Szczecińska.

2007 – studia podyplomowe *„Menedżer w elektrotechnice”* – Wydział Elektryczny Politechniki Szczecińskiej.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych

01.01.2007 – 31.12.2007 asystent w Zakładzie Wysokich Napięć i Elektrotechnologii, Wydział Elektryczny, Politechnika Szczecińska.

01.02.2008 – obecnie adiunkt w Katedrze Elektrotechnologii i Diagnostyki, Wydział Elektryczny, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie.

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65, poz. 595 ze zm.).

A) Tytuł osiągnięcia naukowego

Ocena stanu mechanicznego części aktywnej transformatorów

B) Osiągnięcie naukowe – trzy rozdziały monografii habilitacyjnej i 14 publikacji naukowych.

1. Banaszak S.: *Ocena stanu mechanicznego części aktywnej transformatorów metodą analizy odpowiedzi częstotliwościowej*, Wydawnictwo Uczelniane ZUT, ISBN 978-83-7663-220-9, 2016, **monografia, rozdziały 6, 7 i 8 (20 pkt.)**.
2. Banaszak S.: *Factors influencing the position of the first resonance in the frequency response of transformer winding*, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, przyjęty do druku po recenzjach, DOI: 10.3233/JAE-160057 (**lista A, 15 pkt., IF 0,724**).
3. Banaszak S., Kornatowski E.: *Evaluation of FRA and VM measurements complementarity in the field conditions*, IEEE Transactions on Power Delivery, DOI 10.1109/TPWRD.2015.2497370, Vol.: 31, Issue: 5, p. 2123-2130, 2016 (**lista A, 35 pkt., IF 2,032**).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wspólnym (ze współautorem) wprowadzeniu do tematyki komplementarnych pomiarów FRA+VM (punkt 1), samodzielnym zorganizowaniu pomiarów na obu omawianych transformatorach, wykonaniu pomiarów odpowiedzi częstotliwościowej i analizie otrzymanych wyników (punkty 3-5), a także na wspólnym opracowaniu wniosków końcowych.

Mój udział oceniam na 50%

4. Banaszak S., Gawrylczyk K.M.: *Wave Phenomena in High-Voltage Windings of Transformers*, Acta Physica Polonica A, Vol. 125 (2014), No. 6, p. 1335-1338 (**lista A, 15 pkt., IF 0,531**).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wspólnym (ze współautorem) opracowaniu metod modelowania odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatora oraz wykonaniu modeli polowych i z wykorzystaniem metody TLM (punkty 2 i 3), a także zaplanowaniu i wykonaniu pomiarów oraz części symulacji opisanych w punkcie 4 oraz wspólne wyciągnięcie wniosków. Prace redakcyjne wykonane zostały proporcjonalnie do udziału.

Mój udział oceniam na 60%

5. Kornatowski E., Banaszak S.: *Diagnostics of a Transformer's Active Part With Complementary FRA and VM Measurements*, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 29, Issue: 3, p. 1398 – 1406, 2014 (**lista A, 30 pkt., IF=1,733**).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zorganizowaniu eksperymentalnych komplementarnych pomiarów FRA+VM w warunkach kontrolowanych deformacji na transformatorze zasilanym od strony 15 kV, wykonaniu pomiarów metodą FRA, opis tej metody i opracowanie i przedstawienie wyników pomiarów oraz wspólne sformułowanie wniosków końcowych. Prace redakcyjne wykonane zostały proporcjonalnie do udziału.

Mój udział oceniam na 50%

6. Gawrylczyk K.M., Banaszak S.: *Modeling Of Frequency Response of Transformer Winding with Axial Deformations*, Archives of Electrical Engineering, vol. 63, nr 1, 2014, s. 5-17 (**lista B, 10 pkt.**).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wspólnym (ze współautorem) opracowaniu metod modelowania odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatora, samodzielnym wykonaniu modelu RLC metodą obwodową, wspólnym wykonaniu modeli polowych i metodą TLM (punkty 2 i 3), zaplanowaniu i wykonaniu pomiarów oraz części symulacji opisanych w punkcie 4 oraz wspólne wyciągnięcie wniosków. Prace redakcyjne wykonane zostały proporcjonalnie do udziału.

Mój udział oceniam na 50%

7. Banaszak S., Kornatowski E.: *Transformer Windings Diagnostics with Combined Frequency Response Analysis and Vibroacoustic Methods*, rozdział w zagranicznej monografii *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol 230, *Intelligent Systems in Technical and Medical Diagnostics*, Springer-Verlag, 2014, pp. 463-474 (**indeksowane w bazie WOS, 10 pkt.**).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na omówieniu podstaw metody FRA (zawartego w punkcie 2), zorganizowaniu eksperymentalnych komplementarnych pomiarów FRA+VM w warunkach kontrolowanych deformacji na transformatorze zasilanym od strony 15 kV, wykonanie pomiarów odpowiedzi częstotliwościowej i analiza uzyskanych wyników (punkt 4.1) oraz wspólne ze współautorem omówienie wniosków. Prace redakcyjne wykonane zostały proporcjonalnie do udziału.

Mój udział oceniam na 50%

8. Banaszak S., Gawrylczyk K.M.: *Modelowanie odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatorów z wykorzystaniem metody linii długiej*. Przegląd Elektrotechniczny, 11b'2012, s.106-109 (**lista A, 15 pkt., IF 0,244**).

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wspólnym opracowaniu, wraz ze współautorem, metody modelowania odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatora wykorzystującej elementy linii długiej oraz stworzenie takiego

modelu w środowisku Ansys Maxwell. Wykonałem pomiary doświadczalne, stanowiące odniesienie do wyników modelowania. Wykonałem większość prac redakcyjnych. Mój udział oceniam na 60%.

9. Banaszak S.: *Określenie wpływu geometrii cewki na jej odpowiedź częstotliwościową na podstawie pomiarów deformacyjnych i modeli komputerowych*. Przegląd Elektrotechniczny, 11b'2012, s.206-208 (**lista A, 15 pkt., IF 0,244**).
10. Banaszak S.: *Analiza czynników wpływających na odpowiedź częstotliwościową cewki transformatora*. Przegląd Elektrotechniczny, 11a'2012, s. 90-92 (**lista A, 15 pkt., IF 0,244**).
11. Banaszak S.: *Analiza odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatorów w świetle zaleceń projektu normy IEC 60076-18*, Miesięcznik Naukowo-Techniczny Pomiary Automatyka Kontrola, Nr 4/2011, Vol. 57, str. 413-416 (**lista B, 9 pkt.**).
12. Banaszak S.: *Detekcja deformacji uzwojeń transformatorów metodą analizy odpowiedzi częstotliwościowej FRA*, Przegląd Elektrotechniczny 11b'2010, s. 174-177 (**lista A, 13 pkt., IF 0,242**).
13. Banaszak S.: *Conformity of Models and Measurements of Windings Deformations in Frequency Response Analysis Method*, Przegląd Elektrotechniczny 7'2010, s. 278-280 (**lista A, 13 pkt., IF 0,242**).
14. Banaszak S., Szrot M.: *Pomiary odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatora w warunkach kontrolowanej deformacji*, Przegląd Elektrotechniczny 10'2008, s. 128-131 (**lista A, 10 pkt.**).
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaplanowaniu i przeprowadzeniu pomiarów FRA w warunkach kontrolowanych deformacji na części aktywnej transformatora, jak również na analizie i prezentacji wyników pomiarów. Zaproponowałem podział odpowiedzi częstotliwościowej na cztery zakresy i zweryfikowałem wyciągnięte wnioski pomiarami na innym transformatorze. Wykonałem całość prac redakcyjnych. Mój udział oceniam na 70%.
15. Banaszak S.: *Modelowanie odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatora*, Przegląd Elektrotechniczny 10'2008, s. 124-127 (**lista A, 10 pkt.**).

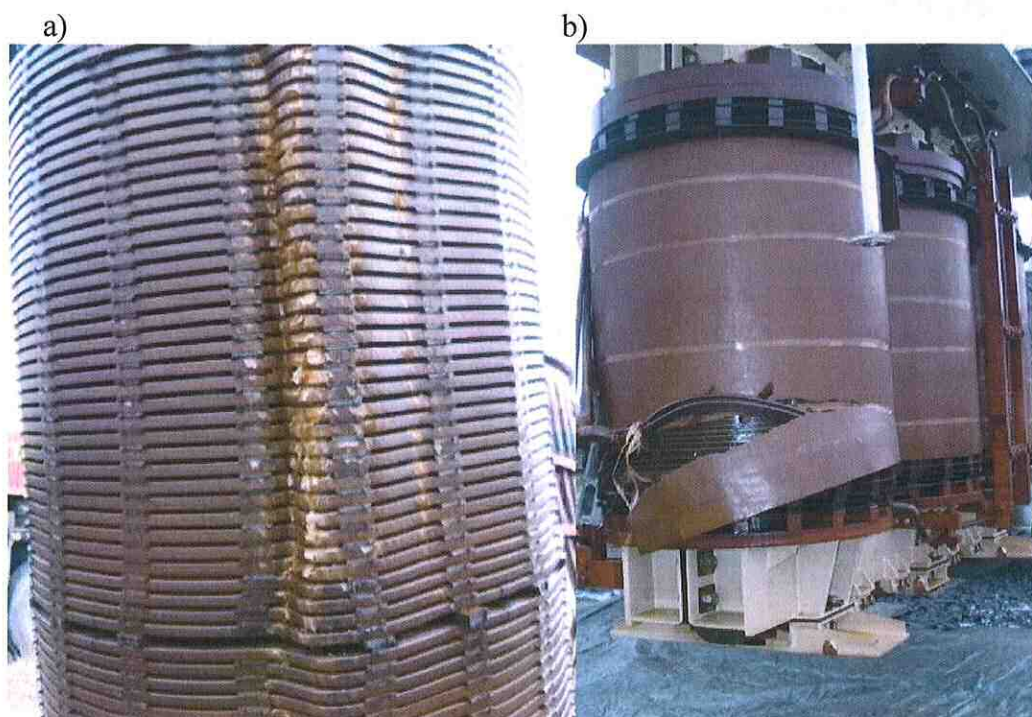
C) Omówienie celu naukowego wyżej wymienionych prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Awaria transformatora, w zależności od jej skali, wiązać może się ze znacznymi kosztami. Wynikają one z dużej wartości transformatora oraz ze strat wynikających z niedostarczenia energii i karami z tym związanymi. Uszkodzony transformator wymaga co najmniej naprawy, a w wielu przypadkach wymiany na nowy. Koszt takiej operacji jest bardzo wysoki, a uwzględniając moce produkcyjne wytwórców transformatorów i zapotrzebowanie na nie na świecie, okres oczekiwania na nową jednostkę wynieść może kilkadziesiąt miesięcy. W przypadku awarii katastrofalnej transformatora dochodzą jeszcze koszty akcji ratunkowej i zniszczenia powstałe w okolicach transformatora. Z tych względów wszechstronna diagnostyka transformatorów, oparta m.in. na określeniu stanu mechanicznego części aktywnej, jest obecnie konieczna do prawidłowego zarządzania majątkiem sieciowym, gdyż pozwala odpowiednio zaplanować remonty i środki z tym związane.

Współczesna diagnostyka transformatorów umożliwia precyzyjne określenie stanu technicznego transformatora i określenie jego dalszej eksploatacji i ewentualnych napraw. Jednym z ważnych problemów technicznych, dotyczących konstrukcji transformatorów, jest stan mechaniczny części aktywnej. Na utratę mechanicznej integralności uzwojeń i rdzenia wpływ mają wszystkie zdarzenia awaryjne pojawiające się w czasie eksploatacji danej jednostki, w szczególności zwarcia. Nie bez znaczenia jest także utrata właściwości mechanicznych przez sprasowaną izolację papierową, na skutek postępujących procesów

starzeniowych. Wczesne wykrycie odkształceń i poluzowań w części aktywnej, a zwłaszcza w uzwojeniach transformatora może zapobiec poważniejszej awarii. Transformator o poluzowanych lub odkształconych uzwojeniach ma obniżoną wytrzymałość zwarciovą, co może doprowadzić do awarii katastrofalnej przy kolejnym zdarzeniu sieciowym.

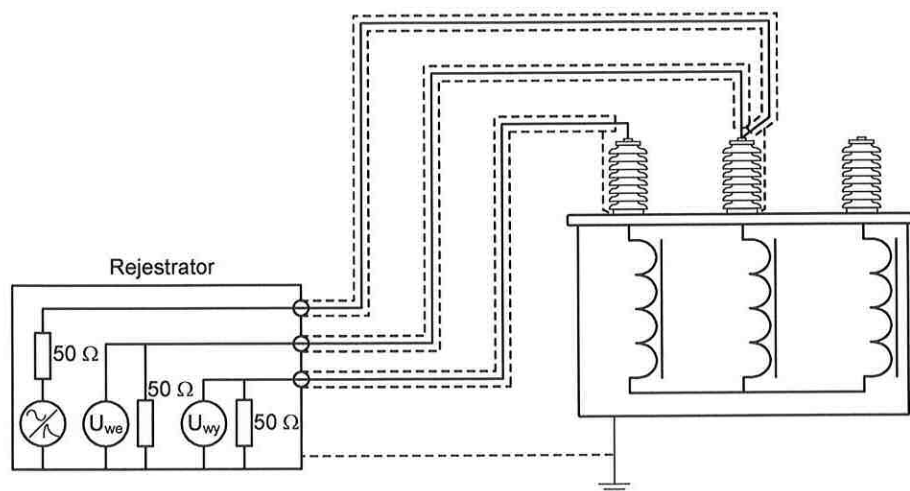
Przykłady deformacji uzwojeń transformatora przedstawiłem na rysunku 1. Defekty mogą polegać na deformacjach promieniowych i poosiowych, przesunięciu fragmentów lub całych uzwojeń względem siebie oraz lokalnych zwarciach międzyzwojowych.



Rys. 1. Zdeformowane uzwojenia transformatorów: a) deformacja promieniowa, b) wysunięcie fragmentu rozprężonego uzwojenia

Do detekcji odkształceń uzwojeń transformatorów przez długi czas stosowano szereg metod diagnostycznych, takich jak: pomiary prądów magnesujących, impedancji uzwojeń czy pojemności uzwojeń. Metody te, mimo pewnych zalet, nie dawały zazwyczaj jednoznacznych i dokładnych wyników. Wprowadzenie do praktyki przemysłowej metody FRA (z ang. *Frequency Response Analysis*) umożliwiło znaczną poprawę jakości stawianych diagnoz. Podstawą tej metody jest związek pomiędzy tzw. funkcją przenoszenia a konstrukcją uzwojenia. Jeśli geometria uzwojenia ulegnie zmianie, np. na skutek przemieszczenia pojedynczego zwoju, cewki bądź większego fragmentu uzwojenia czy też wystąpienia zwarcia, to zmieniają się wartości własne i wzajemne pojemności oraz indukcyjności cewek, a tym samym zmienia się charakterystyka odpowiedzi częstotliwościowej, w tym liczba i położenie rezonansów szeregowych i równoległych. Zmianie uleg może ich amplituda lub częstotliwość. Pomiar odpowiedzi częstotliwościowej realizowany jest na kompletnym transformatorze, bez konieczności inspekcji wewnętrznej lub stosowania innych zabiegów polegających na ingerencji w jego konstrukcję, co umożliwia bezinwazyjną diagnostykę różnymi metodami. Ogólny schemat pomiaru odpowiedzi częstotliwościowej przedstawiłem na rysunku 2.

12

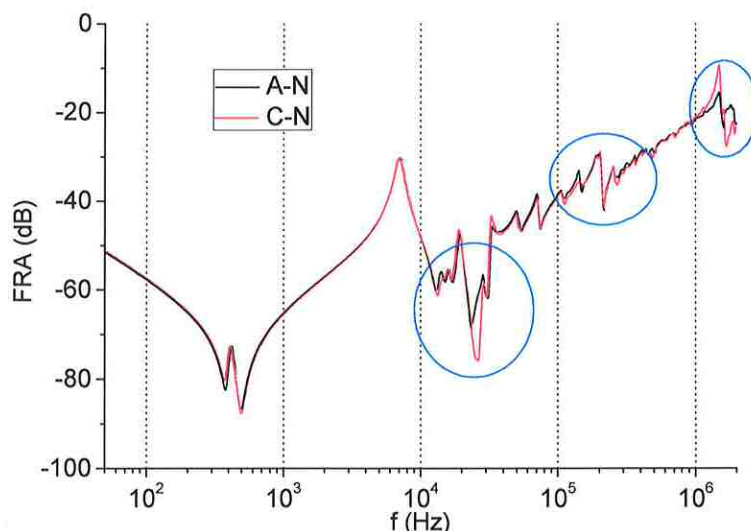


Rys. 2. Schemat układu pomiarowego do rejestracji odpowiedzi częstotliwościowej, z zastosowaniem trzech ekranowanych przewodów pomiarowych

Diagnostyka metodą FRA opiera się na porównaniu wielkości zarejestrowanych na obiekcie badanym do odpowiednich rejestracji uzyskanych na obiekcie wzorcowym. Różnice pomiędzy porównywanymi przebiegami odpowiedzi częstotliwościowej mogą wskazywać na możliwość odkształcenia badanego uzwojenia. Jednak w klasycznym podejściu trudno jest określić jego dokładne miejsce i stopień, a także stwierdzić czy różnice te nie wynikają z niesymetrycznego układu połączeń wewnątrz transformatora bądź specyfiki jego konstrukcji. Konieczne jest posiadanie danych referencyjnych umożliwiających zaobserwowanie zmian w przebiegu FRA. Porównuje się charakterystyki odpowiedzi częstotliwościowej zarejestrowane w kolejnych fazach tej samej jednostki, między jednostkami bliźniaczymi lub między rejestracjami wykonanymi w pewnym odstępie czasu. W ostatnim przypadku wskazane jest wykonanie takich pomiarów już na etapie prób odbiorczych, a następnie – w celu identyfikacji deformacji uzwojeń powstałych podczas transportu – po zainstalowaniu transformatora na miejscu pracy. Dodatkowo po zainstalowaniu nowych transformatorów i napełnieniu olejem powinno wykonać się „odcisk palca”, czyli pomiar referencyjny do analizy kolejnych rejestracji. Porównanie charakterystyk ograniczające się do sąsiednich uzwojeń (faz) bywa mało wiarygodne i zawodne (dotyczy to zwłaszcza uzwojenia umieszczonego w środkowej kolumnie rdzenia). Duży wpływ na prawidłową interpretację różnic w charakterystykach FRA ma układ połączeń transformatora, geometria uzwojeń oraz wykonane remonty i modernizacje części aktywnej. Nie bez znaczenia jest również doświadczenie diagnosty.

Do porównywania między sobą funkcji przenoszenia FRA wykorzystuje się zwykle prostą analizę matematyczną, poczynając od różnicy dwóch przebiegów, poprzez stosowanie obliczeń błędów i odchyłeń standardowych, określanie współczynników korelacji, na analizie częstotliwości rezonansowych kończąc. Produkowane ostatnio systemy pomiarowe posiadają w swoim oprogramowaniu narzędzia służące do takiej analizy, które umożliwia tuż po wykonaniu pomiaru odniesienie do wcześniejszych rejestracji. Jednak metody te nie zawierają jednoznacznych kryteriów ilościowych i jakościowych charakteryzujących rozmiar i miejsce odkształcenia. Na rysunku 3 przedstawiłem przykładowe charakterystyki odpowiedzi częstotliwościowej wskazujące na deformację w uzwojeniach.

h



Rys. 3. Porównanie odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń faz skrajnych (A oraz C) transformatora 110/15 kV, 16 MVA z zaznaczonymi fragmentami krzywych wskazującymi na deformację (pomiar pomiędzy końcami uzwojenia)

Obecnie w praktyce przemysłowej analiza porównawcza umożliwia detekcję głównie przypadków znacznych odkształceń uzwojeń. Mniejsze różnice pomiędzy charakterystykami interpretuje się jako możliwość wystąpienia odkształcenia uzwojenia, bez próby jego lokalizacji lub dokonania oceny jego rozmiarów. Ujednolicenie zasad wykonywania pomiarów i poznanie specyfiki poszczególnych przyrządów i układów pomiarowych ma zasadniczy wpływ na poprawną interpretację wyników.

Metodą FRA zainteresowałem się po obronie doktoratu, w 2007 roku, gdy nie była ona jeszcze rozpowszechniona. Powstawały wówczas pierwsze rejestratory, a firmy diagnostyczne testowały jej przydatność w warunkach przemysłowych. Moje osiągnięcia, realizowane konsekwentnie do dnia dzisiejszego, podzieliłem na pięć części tematycznych, które zostaną omówione poniżej: technika pomiarowa, pomiary w warunkach kontrolowanych deformacji, modelowanie odpowiedzi częstotliwościowej, ocena wyników pomiarowych oraz komplementarne pomiary FRA i wibroakustyczne (FRA+VM). Osiągnięcia te publikowane były sukcesywnie w moich publikacjach i zebrane w monografii habilitacyjnej.

Technika pomiarowa

Na wstępie w swojej pracy badawczej zająłem się problematyką powtarzalności pomiarów, błędami pomiarowymi oraz wpływem metodologii i warunków pomiaru na kształt rejestrowanych charakterystyk. Dokonałem porównania różnych urządzeń, które wypożyczyłem od producentów oraz od współpracujących firm z przemysłu. Zaowocowało to zdefiniowaniem czynników mających zasadniczy wpływ na rejestrację FRA oraz zaproponowaniem pierwsze kryteria oceny wyników pomiarowych. W owym czasie (lata 2007-2008) byłem jedną z pierwszych osób wykonujących pomiary FRA w Polsce i pierwszą wykonującą systematyczne badania eksperymentalne, mające na celu rozpoznanie problemów pomiarowych i interpretacyjnych, a także dalsze rozwijanie metody.

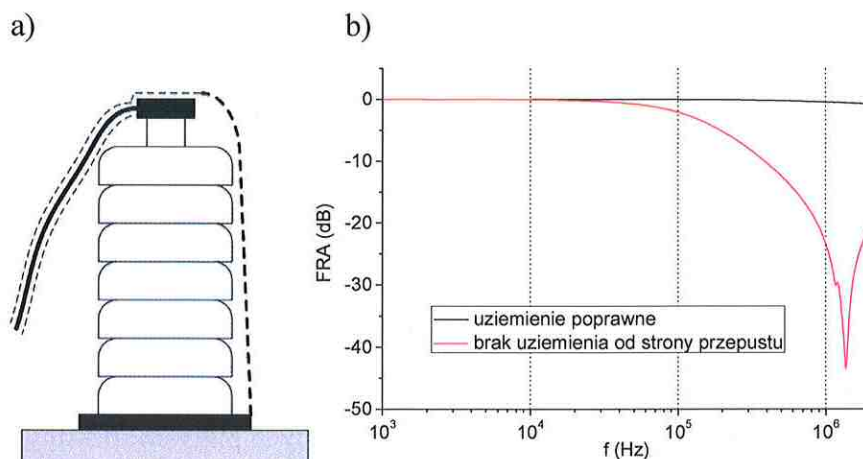
W oparciu o wyniki uzyskane z eksperymentalnych pomiarów przeprowadzonych na transformatorze 110/15 kV w warunkach kontrolowanych deformacji jego części aktywnej określiłem wpływ defektów uzwojeń na poszczególne zakresy zarejestrowanej odpowiedzi częstotliwościowej. Zaproponowałem podział odpowiedzi na cztery zakresy

częstotliwości, odpowiadające kolejno za obwód magnetyczny, deformacje zgrubne, deformacje lokalne oraz układ pomiarowy. Podział ten pozwala na rozróżnienie deformacji zgrubnych (np. obsunięcie się całego uzwojenia lub przerwanie jego ciągłości) od lokalnych (np. odkształcenie jednej cewki uzwojenia). Był to znaczny krok w rozwoju metody, gdyż w światowych publikacjach dotyczących interpretacji wyników FRA proponowano analizę tylko w trzech zakresach częstotliwości. Wyniki te zawarłem w publikacji [14], która została wyróżniona na IX Sympozjum „Inżynieria Wysokich Napięć IW-2016” jako najlepsza prezentacja posterowa. Pomiar charakterystyk FRA wykonany w warunkach kontrolowanych deformacji uzwojenia transformatora 110/15 kV o mocy 16 MVA był pierwszym tego typu eksperymentem w Polsce i jednym z pierwszych na świecie.

We współpracy z przedstawicielami kilku firm produkujących pierwsze przemysłowe rejestratory odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatorów dokonałem porównania różnych systemów pomiarowych. Wyniki tych badań zawarte są w monografii [1]. Okazało się, że rejestracje odpowiedzi uzyskiwane z różnych urządzeń nie są identyczne. Wpływ mają na nie cechy konstrukcyjne (np. stosowanie aktywnych sond pomiarowych) i parametry (np. różne wartości impedancji falowej) poszczególnych urządzeń, co stanowiło problem w przypadku konieczności porównywania i analizy wyników zarejestrowanych dla danego transformatora przez różne firmy, stosujące inne urządzenia. Pomiary realizowane były różnymi rejestratorami na tym samym transformatorze energetycznym 110/15 kV średniej mocy, udostępnionym przez partnera z przemysłu.

Badałem także wpływ szeregu czynników pomiarowych na powtarzalność wyników. Dotyczy to przykładowo wpływu sposobu podłączenia rejestratora do transformatora (układ pomiarowy), stosowanych przewodów i zacisków pomiarowych, czy też sposobu uziemienia ekranu przewodu na przepuście, który wpływa na wyniki w zakresie wysokich częstotliwości. Producenci rejestratorów stosowali tu różne podejścia, np. uziemiając ekran przy podstawie przepustu i doprowadzając nieekranowany przewód pomiarowy do wyprowadzenia przepustu lub na odwrót, ekranując przewód pomiarowy na całej długości, a uziemienie ekranu sprowadzając do podstawy przepustu. Eksperymentalną weryfikację wpływu metod uziemiania ekranów przewodów koncentrycznych opublikowałem w artykule [12]. Wykazałem tam m.in., że sposób poprowadzenia przewodu uziemiającego wpływa na kształt krzywej odpowiedzi częstotliwościowej. Graficzną prezentację tego problemu pomiarowego oraz uzyskane wyniki zawarłem na rysunku 4.

Należy podkreślić, że we wczesnym etapie rozwoju i wdrażania metody FRA w przemyśle wspomniane problemy pomiarowe traktowane były przez personel zajmujący się pomiarami dość dowolnie, co skutkowało niespójnością wyników gromadzonych przez różne firmy. Doświadczenia diagnostyczne wykazały, że dane uzyskiwane w ten sposób okazywały się często nieprzydatne do detekcji defektów. Na szeregu prowadzonych przeze mnie szkoleń dla przemysłu i wystąpień konferencyjnych zwracałem uwagę na tę problematykę oraz na umiejętne wykorzystanie rejestrowanych wyników.

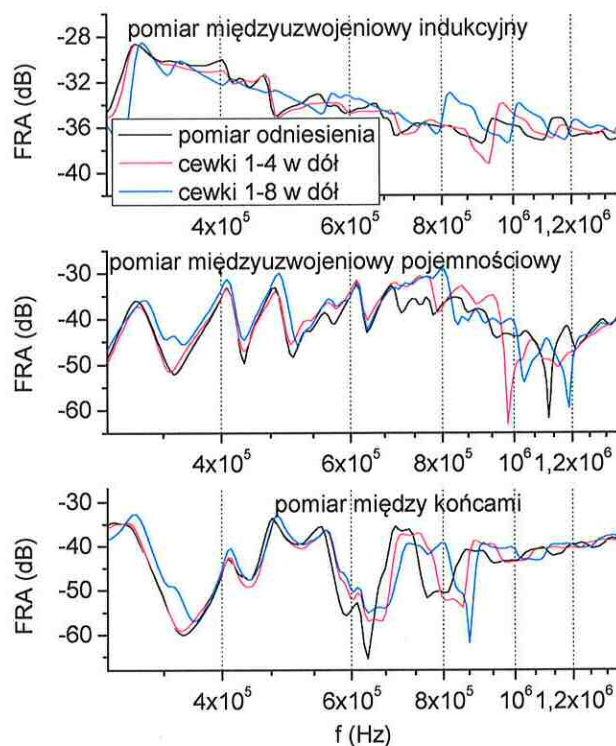


Rys. 4. Wpływ prawidłowego uziemiania ekranów przewodów od strony izolatorów przepustowych na charakterystykę FRA: a) prawidłowe uziemienie najkrótszą drogą, b) wpływ braku takiego uziemienia na rejestrowaną odpowiedź częstotliwościową

Zaangażowanie w rozwój i wdrażanie metody FRA w Polsce sprawiło, że w 2008 roku zostałem zarekomendowany przez Polski Komitet Normalizacyjny do prac w grupie roboczej przy Międzynarodowej Komisji Elektrotechnicznej (IEC – *International Electrotechnical Commission*) mającej na celu opracowanie normy dotyczącej wykonywania pomiarów odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatorów. Brałem udział w posiedzeniach grupy w Feldkirch (Austria), Rzymie (Włochy) i Genewie (Szwajcaria). Na plenum grupy ścierały się stanowiska przedstawicieli firm produkujących sprzęt pomiarowy, m.in. Dobbie, Omicron, Phoenix oraz Tettex. Reprezentując środowisko akademickie przyczyniłem się do osiągnięcia kompromisu dotyczącego ostatecznej wersji standardu i w efekcie w 2012 roku norma została opublikowana jako dokument: IEC 60076-18:2012 *Power transformers - Part 18: Measurement of frequency response*. Porządkuje ona i definiuje zagadnienia związane z techniką pomiarową, określa parametry rejestratorów, jednoznacznie opisuje procedury podłączania rejestratorów do transformatorów i sposób wykonywania rejestracji. Wyciąg najważniejszych informacji wynikających z publikacji tego standardu przedstawiłem dla polskiego czytelnika w artykule [11]. Uczestnicząc w konferencjach i prowadząc szkolenia staram się propagować zapisy normy, uczulam na nią także studentów i dyplomantów.

Jednym z interesujących zagadnień pomiarowych jest dobór odpowiedniego układu połączeń. Norma IEC zaleca stosowanie układu, w którym sygnał napięciowy podaje się na jeden koniec uzwojenia, a rejestruje na jego drugim końcu (tzw. układ *end-to-end*). Jednak moje doświadczenia pomiarowe wskazują, iż inne układy – w szczególności układ międzyuzwojeniowy pojemnościowy (*interwinding capacitive*) – mogą w przypadku wielu rodzajów deformacji być bardziej czułe, niż standardowo stosowany w przemyśle układ *end-to-end*. Większa czułość układu pomiarowego międzyuzwojeniowego pojemnościowego wynika z dominującego wpływu zmian w pojemnościach w przypadku wystąpienia deformacji w uzwojeniach. Wnioski takie wyciągnąłem na podstawie pomiarów w warunkach kontrolowanych deformacji oraz w wyniku modelowania komputerowego, co dokładniej będzie omówione w dalszej części autoreferatu. Analizę tego problemu zawarłem w monografii habilitacyjnej. Jest to kierunek badań, m.in. którym zamierzam się zajmować w przyszłości. Wydaje się, że przygotowanie odpowiednich narzędzi do analizy wyników pomiarów międzyuzwojeniowych może

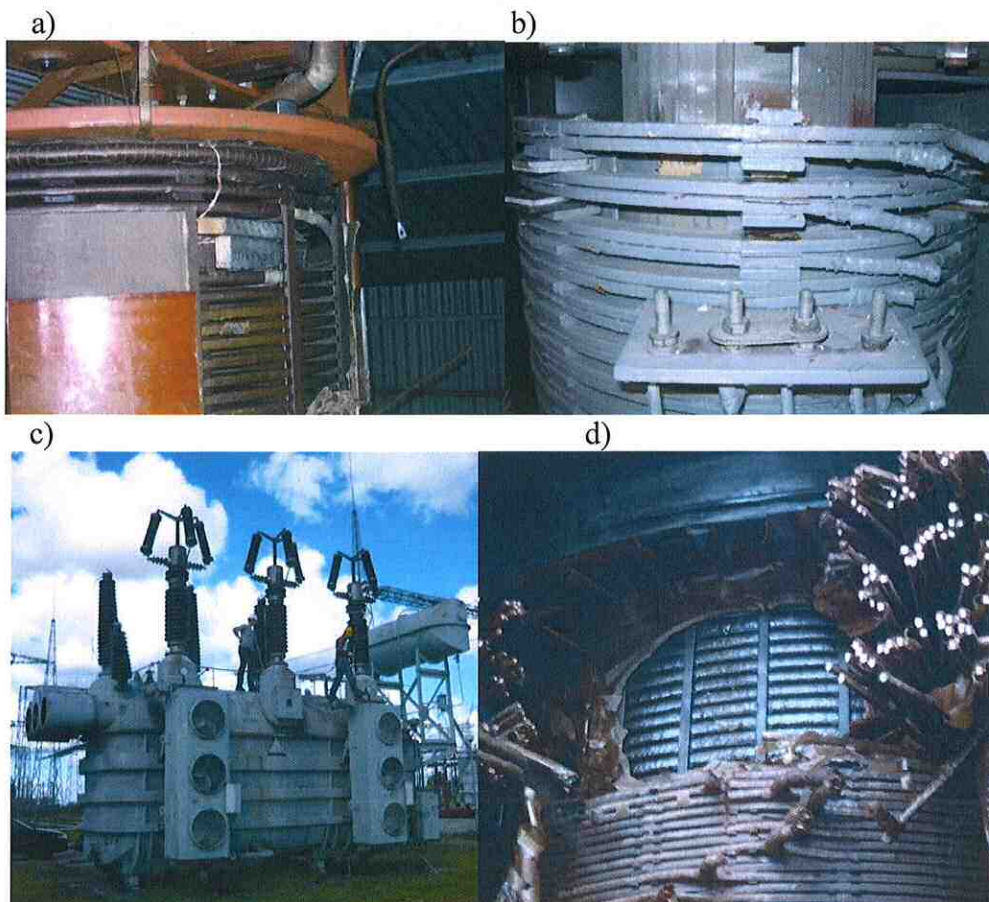
wpłynąć na poprawę jakości diagnoz stawianych na podstawie metody FRA. W chwili obecnej takie narzędzia opracowywane są do analizy wyników pomiarów (np. algorytmy) dla wyników uzyskanych z pomiarów w układzie *end-to-end* i nie jest możliwe ich bezpośrednie wykorzystanie do oceny wyników z innych układów pomiarowych. Przykładowe wyniki pomiarów wykonanych w różnych układach pomiarowych dla tego samego obiektu w warunkach kontrolowanych deformacji przedstawiłem na rysunku 5. Widać na nim, że dla wszystkich układów widoczne są wyraźne różnice pomiędzy krzywymi, a największe zmiany amplitudy i przesunięcia w dziedzinie częstotliwości zaobserwować można dla układu międzyuzwojeniowego pojemnościowego.



Rys. 5. Odpowiedź częstotliwościowa uzwojenia transformatora z wprowadzanymi deformacjami dla trzech układów pomiarowych

Pomiary w warunkach kontrolowanych deformacji

Ważnym kierunkiem moich badań było wykonywanie badań deformacyjnych na rzeczywistych obiektach. Idea takiego eksperymentu polega na odwróceniu zagadnienia, czyli wyznaczaniu charakterystyki FRA po wykonaniu kontrolowanego i systematycznego uszkodzenia w uzwojeniu (np. deformacja lub zwarcie). Uzyskane wyniki pozwoliły określić charakterystyczne zakresy częstotliwości i charakter zmian przypisanych do poszczególnych deformacji. Eksperymenty te zorganizowałem we współpracy z zakładami naprawczym transformatorów oraz spółkami dystrybucyjnymi. W Częstochowie obiektem badań był złomowany transformator 110/15 kV, 16 MVA, w ZREW (Lubliniec) transformator 110/15/15 kV, 20 MVA zaś na GPZ w Morzyczynie k. Szczecina (współpraca z PSE) autotransformator 220/110/15,75 kV, 160 MVA. Natomiast w laboratorium Katedry Elektrotechnologii i Diagnostyki ZUT w Szczecinie analizowałem wpływ deformacji na odpowiedź uzwojenia dla dwóch transformatorów 800 kVA (15/0,4 kV oraz 6,3/0,4 kV). W warunkach laboratoryjnych wykonywałem dodatkowo eksperymenty deformacyjne na pojedynczych uzwojeniach i ich fragmentach o różnej geometrii. Przykłady badanych transformatorów przedstawiłem na rysunku 6.



Rys. 6. Przykłady deformacji uzwojeń w wybranych transformatorach energetycznych: a) 110/15 kV, 16 MVA, b) 6,3/0,4 kV, 800 kVA, c) i d) autotransformator 220/110/15,75 kV, 160 MVA

Wg mojej wiedzy byłem pierwszą osobą w Polsce, która przeprowadziła takie eksperymenty i jedną z pierwszych na świecie. Do tej pory nie spotkałem się z publikacją opisującą jakiegokolwiek pomiary deformacyjne na transformatorach pozyskanych z przemysłu w Polsce, a w pojedynczych publikacjach światowych opisywane są eksperymenty realizowane na niewielkich transformatorach w warunkach laboratoryjnych. Badania te szczegółowo zostały opisane w rozdziale 6 mojej monografii habilitacyjnej [1]. Wprowadzane deformacje polegały na poosiowym przesuwaniu fragmentów cewek, zmianie odstępów pomiędzy nimi, promieniowym odkształcaniu cewek i wprowadzaniu lokalnych zwarć (pomiędzy sąsiadującymi zwojami, warstwami zwojów i cewkami). Wyniki rejestrowane były w kilku różnych układach pomiarowych i porównywane do pomiarów wykonanych w stanie wyjściowym. Wstępne pomiary wykonane były na kompletnych transformatorach z olejem, następnie po spuszczeniu oleju, a w końcu na nienaruszonej części aktywnej wyciągniętej z kadzi. W ten sposób możliwe było określenie wpływu kadzi oraz oleju na odpowiedź częstotliwościową i odnieść się do wpływu wprowadzanych deformacji w część aktywną. W kilku przypadkach część aktywna po wprowadzeniu defektów była ponownie zanurzana w kadzi z olejem, a wieko skręcane śrubami, co w pełni odwzorowywało rzeczywiste warunki eksploatacji transformatora.

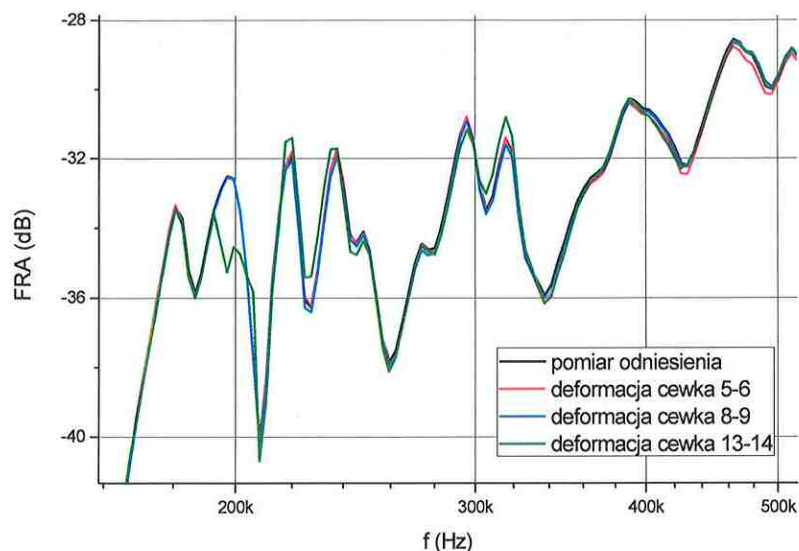
Wyniki eksperymentów przeprowadzanych na transformatorach średnich i dużych mocy przyczyniły się do zdefiniowania – wspomnianych już – czterech zakresów częstotliwości, na które wpływ mają różnego rodzaju deformacje. Już na tym etapie

badan zwróciłem uwagę na fakt, iż najważniejszym zakresem częstotliwości w analizie stanu części aktywnej transformatorów energetycznych średnich i dużych mocy jest zakres średnich częstotliwości, a dokładnie jego górny podzakres (w zależności od geometrycznych gabarytów jednostki jest to zakres 300-500 kHz). Wniosek ten dotyczy oczywiście klasycznego pomiaru pomiędzy końcami uzwojenia, a wykorzystany został przeze mnie do opracowania własnego algorytmu do oceny wyników pomiarów, opartego na tym właśnie podzakresie częstotliwości.

Wyniki badań wykorzystałem także przy opracowywaniu modeli komputerowych symulujących odpowiedź uzwojenia „zdrowego” oraz z deformacją. Wyniki modelowania okazały się zgodne, co do charakteru zmian, z rezultatami pomiarów w warunkach kontrolowanych deformacji, co opisałem w publikacji [13]. Wskazało to na możliwość wykorzystania modeli do analizy wyników FRA, zacząłem więc rozwijać tematykę modelowania komputerowego odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatorów.

Osobno potraktowałem problem wpływu zwarcia w uzwojeniach na odpowiedź częstotliwościową, co opisałem w monografii habilitacyjnej. Przedstawiłem tam wyniki uzyskane z dwóch jednostek oraz modeli komputerowych. Wpływ zwarcia na odpowiedź jest bardzo dobrze widoczny w zakresie niskich częstotliwości odpowiedzi częstotliwościowej i łatwy do określenia, także przez inne metody pomiarowe. Pamiętać jednak należy, że może on „przykryć” wpływ innych defektów uzwojeń lub wprowadzeń.

W 2011 roku zorganizowałem eksperyment badający zależność między geometrią uzwojenia a kształtem charakterystyki FRA dla autotransformatora RTdXP 160 MVA (Rys. 6c i 6d). Badania zrealizowane zostały przed planowanym złomowaniem jednostki, co umożliwiło wprowadzanie deformacji do uzwojeń transformatora. Deformacje wprowadzałem wewnątrz jednostki, na co pozwalały jej duże gabaryty, a więc pomiary realizowane były w oryginalnej kadzi z przepustami. Wcześniej wykonałem także rejestracje na tej jednostce przed spuszczeniem oleju. Pomiary przeprowadzone na tak dużym obiekcie w warunkach kontrolowanych deformacji dały bardzo ważne wyniki do przyszłych analiz. Wskazały m.in., że dla tak dużych geometrycznie jednostek deformacje, które zagrażają bezpiecznej eksploatacji jednostki, ale są procentowo niewielkie w porównaniu do gabarytów całego uzwojenia, mogą pozostać niezauważone przy analizie wyników FRA. Ich wpływ na zmiany w kształcie krzywych odpowiedzi częstotliwościowej może być zbyt mały (lokalna zmiana pojemności niewielka w porównaniu do pojemności całego uzwojenia), aby przyjąć, że mamy do czynienia z deformacją. W warunkach pomiarów eksploatacyjnych takie różnice mogłyby zostać zignorowane lub potraktowane jako błąd pomiarowy. Konieczne jest więc wykorzystanie w takich przypadkach dodatkowych metod pomiarowych weryfikujących pomiary FRA. Przykładowe charakterystyki obrazujące ten problem przedstawiłem na rysunku 7. Wnioski płynące z tego eksperymentu zostały wdrożone przez firmę Energo-Complex do praktyki przemysłowej przy ocenie wyników pomiarów FRA.



Rys. 7. Wpływ deformacji w uzwojeniu GN na zmiany w charakterystyce odpowiedzi częstotliwościowej uzwojenia autotransformatora 160 MVA, widoczne zmiany są bardzo małe

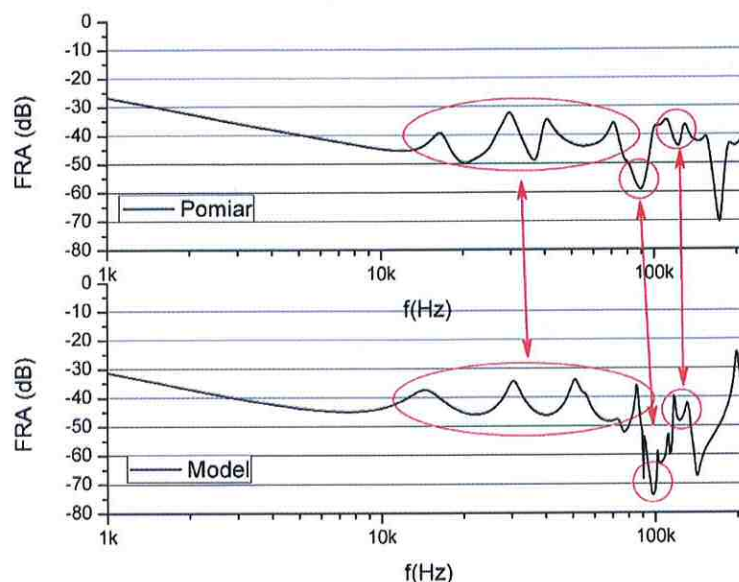
Pomiary dla deformacji wprowadzonych do uzwojeń pozwoliły określić też przydatność i czułość różnych układów pomiarowych stosowanych w metodzie analizy odpowiedzi częstotliwościowej. Na przykładzie kilku różnych jednostek wykazałem, że część defektów powoduje większe zmiany w przebiegach rejestrowanych w układzie międzyuzwojeniowym pojemnościowym, w porównaniu do podstawowego układu *end-to-end*.

Wszystkie wyniki pomiarów deformacyjnych dla szeregu transformatorów zostały zamieszczone w rozdziale 6 mojej monografii [1]. Przyczyniły się one do dokładniejszej oceny wyników pochodzących z badań eksploatacyjnych i przygotowania zaleceń dotyczących ich interpretacji. Ponadto zostały one wykorzystane przy opracowywaniu modeli komputerowych oraz autorskiego algorytmu do oceny wyników pomiarowych.

Modelowanie odpowiedzi częstotliwościowej

Konsekwencją zebranych przeze mnie doświadczeń pomiarowych i eksperymentalnych jest rozpoczęcie badań nad komputerowym modelowaniem odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń. Idea tworzenia modeli polega na uzyskaniu dobrej zgodności z pomiarem na obiekcie rzeczywistym, a następnie zasymulowaniu różnych deformacji i określeniu ich wpływu. Moje pierwsze modele oparte były na zasadzie modelu obwodowego dzielącego uzwojenie na skończoną liczbę elementów RLC. Uzyskane wyniki okazały się zadowalające, opracowałem model odpowiadający rzeczywistemu pomiarowi w zakresie częstotliwości do ok. 200 kHz, zaś zasymulowane defekty dały zmiany w odpowiedzi o takim charakterze jak na rzeczywistych obiektach, o czym pisałem w publikacjach [13, 15] (Rys. 8).

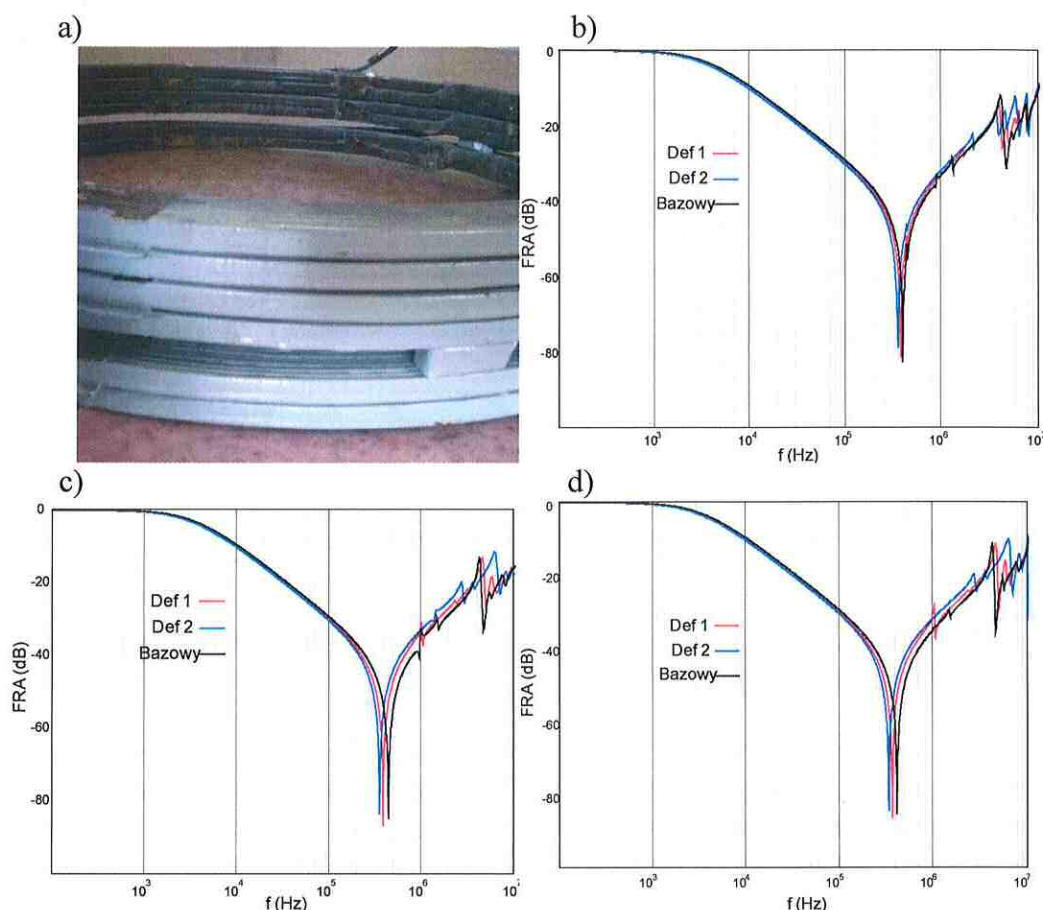
Przedstawiłem tam również porównanie wyników uzyskanych podczas pomiarów w warunkach kontrolowanych deformacji z wynikami odpowiadających rzeczywistym uzwojeniom modelom komputerowym. Wyniki modelowania okazały się zgodne co do charakteru zmian z rezultatami pomiarów w warunkach kontrolowanych deformacji.



Rys. 8. Porównanie pomiaru i odpowiedzi modelu obwodowego dla uzwojenia transformatora 15/0,4 kV

W celu uzyskania większej zgodności odpowiedzi obiektów rzeczywistych i symulacji komputerowych opracowałem modele polowe, których parametry uzyskiwane są z obliczeń metodą elementów skończonych, co opisane zostało w publikacji [9]. W artykule tym wykazałem, że wpływ deformacji poosiowej powoduje zmiany w wartościach pojemności. Identyczne wyniki uzyskane zostały z modelu komputerowego. Szczegółowa metodologia tworzenia modeli RLC w oparciu o obliczenia FEM (metodą elementów skończonych) została omówiona w artykule [6]. Obliczenia FEM realizowałem w środowisku Ansys Maxwell. Wprowadzałem do niego geometrię modelu i jego parametry materiałowe oraz podstawowe założenia. Uzyskane w wyniku obliczeń macierze parametrów modelu wykorzystywane były do obliczeń obwodowych. Stworzone w ten sposób modele odpowiadały pomiarom w szerokim zakresie częstotliwości, jednak wciąż problematyczne okazało się odwzorowanie odpowiedzi dla najwyższych częstotliwości.

W celu rozwiązania tego zagadnienia zastosowałem w modelowaniu metodę TLM (*Transmission Line Method*). Metoda ta wykorzystuje elementy linii długiej i daje możliwość odwzorowania zachodzących w uzwojeniu zjawisk falowych. Metoda zaprezentowana została w publikacji [8] i rozwinięta w artykule [4]. Przy wyznaczaniu parametrów koniecznych do analizy modelu zaproponowane zostało nowe podejście w wyznaczaniu macierzy impedancji i admitancji polegające na jej dekompozycji do postaci diagonalnej. Uzyskuje się to przez zastosowanie dekompozycji tej macierzy na wartości własne, co umożliwia odsprężenie równań telegrafistów. Zagadnienie to szerzej opisane zostało w monografii [1], w rozdziale 7. Na rysunku 9 zawarłem wyniki uzyskane z modelowania wpływu deformacji na odpowiedź częstotliwościową metodami RLC oraz TLM, a także – dla porównania – odpowiedź pomiarową rzeczywistego uzwojenia.



Rys. 9. Odpowiedzi częstotliwościowe fragmentu uzwojenia transformatora: a) widok badanego uzwojenia, b) zmierzona odpowiedź uzwojenia w stanie wyjściowym oraz z wprowadzonymi deformacjami oraz odpowiadające im odpowiedzi modeli: c) RLC oraz d) TLM

Jak widać, udało się osiągnąć dobrą zgodność modelowanych przebiegów z pomiarami, także po wprowadzeniu w uzwojenie deformacji.

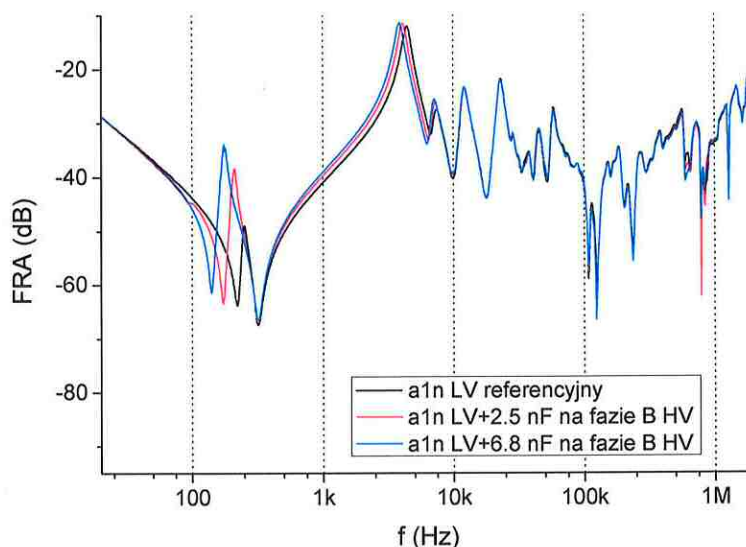
Modelowanie komputerowe wykorzystałem również do określenia czynników wpływających na pozycję pierwszego rezonansu równoległego, który obserwuje się zawsze w przypadku pomiaru w układzie pomiędzy końcami uzwojenia, przy pozostałych uzwojeniach otwartych (widoczny np. na rysunku 3 dla częstotliwości ok. 500 Hz). Wykazałem, że decydujący wpływ na ten rezonans mają pojemności innych uzwojeń, co potwierdziłem na drodze modelowania, a wyniki opublikowałem w artykule [2]. W warunkach pomiarów eksploatacyjnych rezonans ten uwzględnia się przy analizie otrzymanych wyników, co przy braku świadomości jakie czynniki na niego wpływają prowadzić może do błędnych wniosków. Przykładem może być tutaj pomiar odpowiedzi częstotliwościowej na transformatorze przed i po transporcie, gdy zastosowano inne izolatory przepustowe do obu pomiarów. Sytuacja taka może mieć miejsce w przypadku dużych jednostek, gdy niemożliwy jest transport z docelowymi przepustami. Różnice w wynikach FRA mogą wynikać właśnie ze zmiany pojemności takiego izolatora.

Ocena wyników pomiarowych

Mając dostęp do bogatej bazy eksploatacyjnych danych pomiarowych, opracowuję metody interpretacji wyników. Wykonuję także analizy bardziej złożonych przypadków, gdyż dzięki doświadczeniom z pomiarami deformacyjnymi, z testami mierników i modelowaniem jestem w stanie dokonywać poprawnej interpretacji wyników

pomiarowych. Doświadczenia związane z metodologią wykonywania pomiarów i pracami w grupie IEC oraz interpretacją wyników zaowocowały szeregiem publikacji w tej tematyce oraz opracowaniem autorskiego algorytmu do oceny wyników pomiarowych. Zostałem również członkiem założycielem Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Energetyki, zajmującego się wdrażaniem nowych technologii m.in. z dziedziny diagnostyki transformatorów.

Pierwsze analizy wyników uzyskanych z pomiarów, także deformacyjnych, zawarłem w publikacjach [12, 14]. Tematykę oceny wyników pomiarowych rozwijałem dalej, przeprowadzając eksperymenty polegające na dołączaniu pojemności do badanej cewki transformatora. Wyniki tych prób zawarłem w publikacji [9]. Eksperyment został także powtórzony dla większego obiektu, którym było kompletne uzwojenie pochodzące z transformatora 800 kVA. Dominujący okazał się wpływ zmian pojemności towarzyszący pojawianiu się deformacji. Badania potwierdziły wcześniejsze wnioski, co opisane zostało w publikacji [10]. Wyniki pomiarów i płynące z nich wnioski uzyskane w szeregu eksperymentów i analiz przemysłowych wskazały także na czynniki wpływające na pochodzenie pierwszego rezonansu, rejestrowanego w układzie *end-to-end*. Duży wpływ na jego pozycję mają pojemności związane z innymi uzwojeniami, co omówiłem w publikacji [2]. Na rysunku 10 przedstawiłem wynik eksperymentu polegającego na dołączeniu dodatkowej pojemności do uzwojeń innych niż badane (inna faza i strona napięciowa) i rejestracji odpowiedzi częstotliwościowej transformatora.



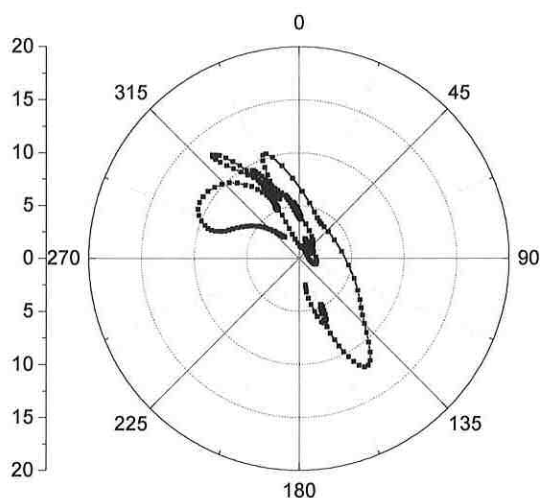
Rys. 10. Wpływ zmian pojemności uzwojenia innego niż badane na odpowiedź częstotliwościową

Wnioski dotyczące powyższych zjawisk wyciągałem na podstawie analizy wyników pomiarów przemysłowych, na podstawie pomiarów eksperymentalnych na dużych transformatorach z dołączonymi pojemnościami do izolatorów przepustowych, a także za pomocą modeli komputerowych. Z badań wynika, że na położenie pierwszego rezonansu wpłynąć może zmiana pojemności w uzwojeniu innej fazy i innej strony napięciowej niż to, dla którego dokonano rejestracji. Dlatego nie należy rezygnować z informacji uzyskiwanych także z innych układów pomiarowych.

Nie bez znaczenia dla oceny wyników przez eksperta jest forma ich prezentacji. Klasycznie stosowane są wykresy Bodego, przedstawiające osobno tłumienie amplitudy oraz kąt fazowy w funkcji częstotliwości. Dla takiej formy prezentacji opracowuje się większość algorytmów oceny wyników. Analizując wyniki zarejestrowane dla różnych

h

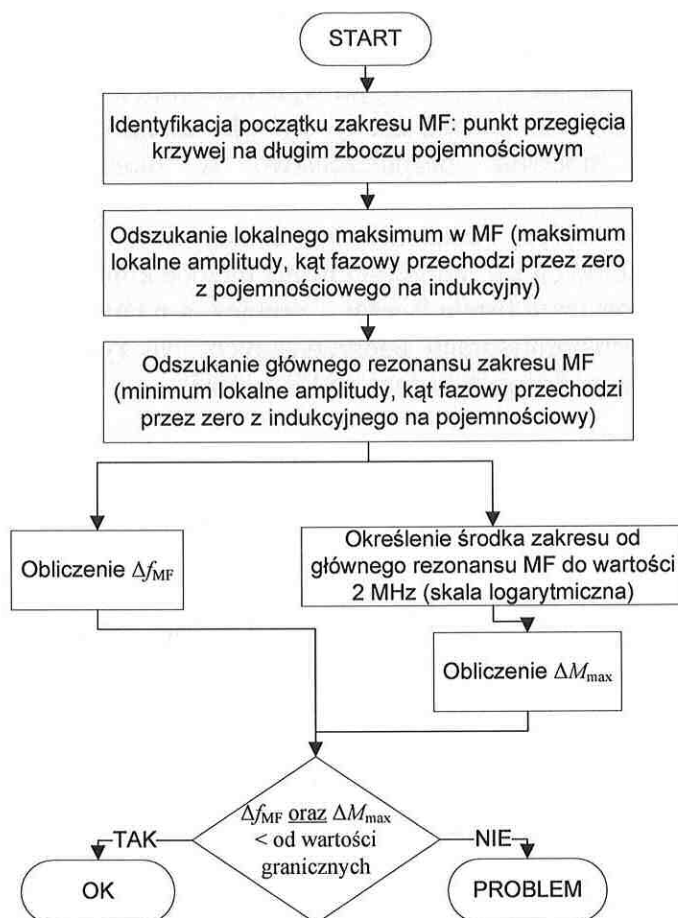
układów pomiarowych podjąłem próbę wykorzystania innych narzędzi prezentacji do oceny wyników. W monografii [1] zawarłem możliwości zastosowania wykresów polarnych. Szczególnie przydatne okazało się zastosowanie takiej formy prezentacji danych uzyskanych z pomiarów międzyuzwojeniowych, gdy analizowany jest ograniczony zakres częstotliwości, np. zakres w którym mogą ujawnić się lokalne deformacje w uzwojeniach. Jeśli dodatkowo na wykresie zaprezentuje się tylko jedną krzywą, będącą wynikiem odejmowania postaci zespolonych dwóch przebiegów (krzywą różnicową), uzyskuje się czytelną charakterystykę wskazującą na skalę różnic. Przykład takiego wykresu przedstawiam poniżej. Zawiera on wyniki uzyskane z pomiarów w układzie międzyuzwojeniowym pojemnościowym, które doskonale nadają się do takiej formy prezentacji.



Rys. 11. Wykres polarny różnicowy dla deformacji poosiowej zmierzony w układzie pomiarowym międzyuzwojeniowym pojemnościowym

Powyższe analizy i wyniki badań i pomiarów przemysłowych, w warunkach kontrolowanych deformacji oraz wyników modelowania komputerowego posłużyły mi do opracowania autorskiego algorytmu do oceny danych pomiarowych, który opisany został w rozdziale 8 monografii habilitacyjnej [1]. Opiera się on na analizie różnic w przesunięciu fazowym charakterystycznego rezonansu występującego zawsze w kształcie odpowiedzi częstotliwościowej (dla klasycznej prezentacji na wykresie Bodego i układu pomiarowego pomiędzy końcami uzwojenia, przy stronie przeciwnej rozwartej) i zmianach w amplitudzie porównywanych przebiegów w określonym zakresie częstotliwości. Dzięki temu możliwa jest ocena niezależna od kształtu analizowanej krzywej, liczby i rodzaju widocznych rezonansów, co jest zazwyczaj problematyczne w przypadku algorytmów opartych na sztywnych matematycznych kryteriach. Algorytm został przetestowany na danych pochodzących z przemysłu i jest wdrażany do oceny takich danych na szerszą skalę. U podstaw jego stworzenia legła obserwacja, że żaden z dotychczas publikowanych algorytmów nie jest w stanie zastąpić analizy dokonywanej przez doświadczonego diagnostę. Schemat działania algorytmu przedstawiłem na rysunku 12.

h



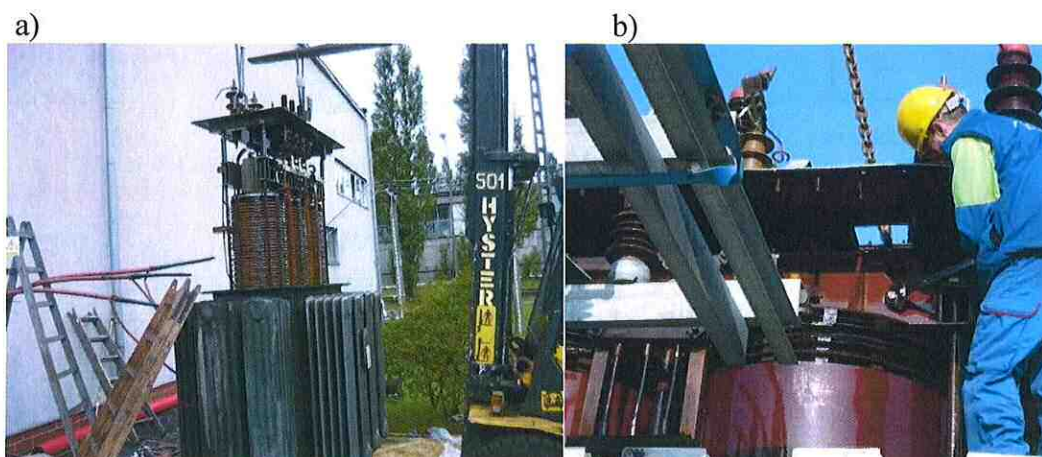
Rys. 12. Schemat blokowy autorskiego algorytmu do oceny danych pomiarowych, gdzie:
 MF – zakres średnich częstotliwości,
 Δf_{MF} i ΔM_{max} – parametry określające zmiany w położeniu i tłumieniu charakterystycznego fragmentu krzywej FRA, porównywane do zadanych wartości granicznych

Komplementarne pomiary FRA i wibroakustyczne

Uwzględniając ograniczenia metody FRA wynikające z braku pomiarów referencyjnych w przemyśle oraz problem niewielkiego wpływu deformacji na zmiany w charakterystykach odpowiedzi częstotliwościowej rejestrowanej dla największych transformatorów zaproponowałem, wraz z dr inż. Eugeniuszem Kornatowskim, metodę komplementarnych pomiarów FRA oraz wibroakustycznych (VM). Nie bez znaczenia jest także fakt, że metoda FRA nie jest w stanie wykryć defektów polegających na poluzowaniu uzwojenia, nawet całkowitym, ale bez wystąpienia przesunięcia jego fragmentu. Nie wykryje także wielu problemów z rdzeniem, np. jego rozprasowania. Dlatego wykorzystanie do oceny stanu mechanicznego części aktywnej transformatora dwóch uzupełniających się metod, opartych na różnych zjawiskach fizycznych, zwiększa dokładność analizy, szczególnie w przypadkach dyskusyjnych.

Założenia i przykłady zastosowania metody przedstawiono w publikacji [5]. Oparto je na wynikach zorganizowanego przeze mnie eksperymentu, przeprowadzonego na transformatorze 15/0,4 kV, 800 kVA, którego część aktywną poddawano deformacjom i defektom i dokonywano pomiarów odpowiedzi częstotliwościowej oraz wibroakustycznych. W przypadku tych ostatnich konieczne było załączenie jednostki od strony 15 kV, co wymagało takiego wprowadzenia deformacji, by zapewnić bezpieczeństwo całej operacji. Dodatkowo w publikacji [7] przedstawiłem dokładną

analizę wyników rejestracji odpowiedzi częstotliwościowej. W toku dalszych badań zorganizowałem kolejne eksperymenty, m.in. na transformatorze 16 MVA, który zasilano na stacji energetycznej od strony 110 kV, po wprowadzeniu szeregu defektów do części aktywnej. Transformator ten przeznaczony był do złomowania, zaś wprowadzane deformacje musiały zapewnić bezpieczeństwo w momencie jego załączenia. Analizowano wpływ na wyniki pomiarów obiema metodami luzowania zarówno rdzenia, jak i uzwojeń, a także wpływ elementów konstrukcyjnych, m.in. radiatorów. Wyniki zaprezentowałem w publikacji [3]. Zaproponowana metoda komplementarnych pomiarów FRA+VM wdrożona została w firmie Energo-Complex, a pomiary takie wykonano do tej pory na ponad stu transformatorach energetycznych. Na rysunku 13 przedstawiłem zdjęcia transformatorów poddanych badaniom FRA+VM.



Rys. 13. Transformatory, na których przeprowadzono pomiary FRA+VM w warunkach kontrolowanych deformacji wprowadzanych do uzwojeń i rdzenia: a) 15/0,4 kV, 800 kVA, b) 115/16,6 kV, 16 MVA

Zdobywane doświadczenie i rozwój metody FRA popularyzowałem w środowisku inżynierów eksploataatorów publikując rozdziały dotyczące praktycznych aspektów wykonywania pomiarów i interpretacji wyników w cyklicznych monografiach dotyczących eksploatacji transformatorów energetycznych.

Podsumowując, do moich najważniejszych osiągnięć naukowych zaliczyć można:

1. Wkład w określenie metodologii wykonywania pomiarów odpowiedzi częstotliwościowej, wskazanie czynników wpływających na rejestrowane wyniki.
2. Prace w grupie roboczej przy IEC, zakończone publikacją normy IEC 60076-18.
3. Zorganizowanie i przeprowadzenie eksperymentów w warunkach kontrolowanych deformacji na pięciu transformatorach i kilku pojedynczych uzwojeniach. Wyniki tych eksperymentów przyczyniły się do opracowania narzędzi ułatwiających interpretację wyników pomiarowych.
4. Opracowanie modeli komputerowych za pomocą szeregu rozwijanych metod, poczynając od modeli obwodowych klasycznych, wspomaganych obliczeniami polowymi i wynikami uzyskiwanymi z oprogramowania FEM, na zmodyfikowanej metodzie TLM kończąc.
5. Analizę przydatności stosowania różnych układów pomiarowych do detekcji defektów w części aktywnej transformatora i wskazanie dużej czułości na niektóre defekty układu międzyuzwojeniowego, który zazwyczaj nie jest stosowany w pomiarach przemysłowych, co zostało wdrożone do praktyki pomiarowej w przemyśle.

6. Określenie czynników wpływających na pozycję charakterystycznego pierwszego rezonansu widocznego na klasycznej charakterystyce odpowiedzi częstotliwościowej rejestrowanej w układzie *end-to-end*, uwzględnianego w analizach wyników eksploatacyjnych.
7. Wskazanie na możliwości stosowania wykresów polarnych do oceny wyników FRA przez ekspertów, obok klasycznych wykresów Bodego.
8. Opracowanie autorskiego algorytmu do oceny danych pomiarowych, opartego na kryteriach, które umożliwiają jego stosowanie niezależnie od kształtu krzywej odpowiedzi częstotliwościowej zarejestrowanej w układzie *end-to-end*.
9. Zaproponowanie i wdrożenie do pomiarów przemysłowych metody komplementarnych pomiarów FRA i wibroakustycznych, co uczyniłem w szeregu eksperymentów i analiz wraz z dr. inż. Eugeniuszem Kornatowskim.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych (artystycznych) oraz dydaktycznych i organizacyjnych.

Część przedstawionych badań realizowana była w ramach projektu badawczego własnego, realizowanego pod moim kierownictwem w latach 2011-2013, pt. „Algorytm identyfikacji odkształceń uzwojeń transformatorów na podstawie pomiarów odpowiedzi częstotliwościowej (FRA)” na kwotę 360 700 zł, o numerze N N510 698240.

Podczas mojej pracy naukowej miałem liczne kontakty z przemysłem, skutkujące popularyzowaniem i wdrażaniem nowych metod diagnostyki transformatorów, prowadziłem szkolenia z tematyki oceny stanu technicznego transformatorów. Zaliczyć można do nich kursy dla pracowników spółek dystrybucyjnych realizowane we współpracy z firmą Energo-Complex, które przeprowadzałem w latach 2013-2015 oraz kursy dotyczące tematyki wysokonapięciowej i materiałoznawczej dla marynarzy realizowane na Wydziale Elektrycznym w latach 2006-2008 (4 edycje).

Brałem udział w pracach grupy IEC PT 60076-18, powołanej przez Międzynarodową Komisję Elektrotechniczną, o czym wspominałem już wcześniej. Spotkania z członkami grupy z całego świata, pracującymi głównie w firmach produkujących aparaturę FRA, wykonującymi pomiary FRA lub będącymi operatorami energetycznymi pozwoliły mi być na bieżąco z problematyką FRA oraz oczywiście mieć swój wkład w powstającą normę. Zaowocowało to rozpoczętą współpracą z firmą Omicron, która wypożyczyła mi swój rejestrator FRA (wartość ok. 80.000 zł), w zamian za wykonanie pomiarów i analiz, a następnie odsprzedała na korzystnych warunkach.

Moja praca naukowa przyczyniła się do zaproszenia mnie do udziału w grupie eksperckiej przy Ośrodku Badawczo-Rozwojowym Energetyki w Piekarach Śląskich. Współpracuję z przemysłem dokonując oceny wyników pomiarów odpowiedzi częstotliwościowej rejestrowanych w warunkach przemysłowych. Moje doświadczenia i wyniki badań przyczyniły się do opracowania procedur pomiarowych dla metod FRA wdrożonych do praktyki we współpracującej firmie. Metoda komplementarnych pomiarów FRA+VM wdrożona została do praktyki pomiarowej w firmie Energo-Complex, wykonano już pomiary FRA+VM na ponad 100 transformatorach.

Współpraca międzynarodowa i nawiązane kontakty przyczyniły się do zaproszenia mojej osoby do pełnienia funkcji przewodniczącego komisji podczas obrony pracy doktorskiej na uniwersytecie katalońskim UPC w Barcelonie, która odbyła się w lipcu 2011 roku. Doktorat z wyróżnieniem obronił Juan L. Velasquez Contreras z Wenezueli. Tematyka pracy dotyczyła nowoczesnej diagnostyki transformatorów, między innymi z wykorzystaniem metody FRA.

Wyniki badań przedstawiałem m.in. na konferencjach międzynarodowych z cyklu ISH: International Symposium on High Voltage Engineering. Publikacje w materiałach tej konferencji nie są punktowane, lecz na ich wagę wskazuje udział wielu znaczących postaci światowego środowiska wysokonapięciowego. Moje prace prezentowałem na konferencjach w Pekinie (Chiny 2005), Ljubljanie (Słowenia 2007), Hanowerze (Niemcy 2011) oraz Seulu (Korea 2013).

W 2008 brałem udział w Zespole Ekspertów Zewnętrznych ds. Analiz Delphi Narodowego Programu Foresight Polska 2020.

W latach 2010-2011 pełniłem funkcję wiceprzewodniczącego szczecińskiego oddziału Stowarzyszenia Elektryków Polskich (SEP), byłem przewodniczącym komitetu organizacyjnego jubileuszowych 40. Szczecińskich Dni Techniki. Jestem rzeczoznawcą SEP w dziedzinie Inżynieria Materiałowa.

Recenzuję artykuły naukowe w IEEE Transactions on Power Delivery, IEEE Power Engineering Letters i European Transactions on Electrical Power. Za wykonane recenzje w roku 2015 zostałem uhonorowany przez IEEE dyplomem uznania (*Certificate of Appreciation*).

Zajmując się tematyką pomiarów i analiz FRA prowadzę z tego zakresu prace dyplomowe, umożliwiając studentom zapoznanie się z najnowszym stanem wiedzy w tej dziedzinie i przećwiczenie praktycznych pomiarów na rzeczywistych obiektach. Do tej pory wypromowałem 34 inżynierów i 29 magistrów, kolejne prace są obecnie realizowane. Dwa dyplomy dotyczące tematyki FRA wyróżnione zostały nagrodą Dziekana WE ZUT (2011 oraz 2016). Pozyskałem do współpracy doktoranta, który będzie rozwijał tematykę którą się zajmuję.

Na Wydziale Elektrycznym ZUT prowadzę zajęcia z Inżynierii wysokich napięć (wykład i laboratoria) oraz Eksploatacji i diagnostyki wysokonapięciowej (laboratoria), na których przedstawiam m.in. doświadczenia pochodzące z moich badań. Prowadzę także zajęcia w języku angielskim ze studentami zagranicznymi (program Erasmus) w ramach przedmiotu High Voltage Engineering (wykład i laboratoria).

Wielokrotnie prowadziłem zajęcia popularyzujące naukę w ramach Nocy Naukowców, Szczecińskich Dni Techniki oraz Festiwalu Nauki w formie wykładów popularnonaukowych oraz pokazów laboratoryjnych.

Łącznie po obronie pracy doktorskiej opublikowałem **48** prac (w tym **27** prac z listy czasopism punktowanych MNiSW, **13** posiadających Impact Factor, jedną monografię habilitacyjną i **4** rozdziały w innych monografiach. **17** pozycji to publikacje samodzielne).

W bazie **Thomson Reuters Web Of Science** indeksowanych jest **13** moich prac, cytowanych **9** razy, a **indeks Hirscha** wynosi **2**.

W bazie **Scopus** indeksowanych jest **24** moich prac, cytowanych **30** razy (**h-index=3**), w tym **9** bez autocytowań (**h-index=2**).

W bazie **Google Scholar** indeksowanych jest **49** moich prac, cytowanych **66** razy, zaś **h-index** wynosi **4**.

Sumaryczny Impact Factor moich publikacji wyznaczony według roku publikowania wynosi aktualnie **6,478**.

Mój **Impact Factor** podzielony przez liczbę autorów publikacji, z uwzględnieniem udziału potwierdzonego w oświadczeniach współautorów, wynosi aktualnie: **4,189**.

Suma punktów MNiSW dla moich publikacji, które ukazały się po doktoracie wynosi **319**, zaś po uwzględnieniu udziału współautorów wg oświadczeń: **248,5**.

Harmonogram przebiegu postępowania habilitacyjnego dr. inż. Szymona Banaszaka w dziedzinie nauk technicznych, dyscyplina elektrotechnika prowadzonego przez Radę Wydziału Elektrycznego Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie

Data	Opis czynności	Realizator/Odpowiedzialny
28.03.2017	Wszczęcie postępowania habilitacyjnego	Centralna Komisja ds. Stopni i Tytułów
20.04.2017	Wyrażenie zgody na przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego	Rada Wydziału Elektrycznego ZUT w Szczecinie
20.04.2017	Wyznaczenie trzech członków komisji habilitacyjnej	Rada Wydziału Elektrycznego ZUT w Szczecinie
12.05.2017	Powołanie komisji habilitacyjnej w celu przeprowadzenia postępowania habilitacyjnego	Centralna Komisja ds. Stopni i Tytułów
31.05.2017	Powiadomienie członków komisji habilitacyjnej o powołaniu ich w skład przedmiotowej komisji oraz przekazanie dokumentacji Kandydata	Dziekan WE – z upoważnienia Centralnej Komisji ds. Stopni i Tytułów
19.09.2017	Podjęcie uchwały zawierającej opinię w sprawie nadania lub odmowy nadania stopnia doktora habilitowanego	Komisja habilitacyjna
21.09.2017	Podjęcie uchwały o nadaniu lub odmowie nadania stopnia doktora habilitowanego	Rada Wydziału Elektrycznego ZUT w Szczecinie



**CENTRALNA KOMISJA
DO SPRAW STOPNI I TYTUŁÓW**

Pałac Kultury i Nauki
00-901 Warszawa

Nr BCK – VI – L – 6448/17

Warszawa, dnia 12 maja 2017r.
tel. 022 826-82-38
tel./ fax. 022 656-63-22
e-mail: kancelaria@ck.gov.pl

**Dziekan
Wydziału Elektrycznego
Zachodniopomorskiego Uniwersytetu
Technologicznego
w Szczecinie**

Centralna Komisja do Spraw Stopni i Tytułów na podstawie art. 18 a ust. 5 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2016 r, poz. 882 i 1311), zwana dalej ustawą, informuje, iż w dniu 12 maja 2017r. powołała komisję habilitacyjną, w skład której wchodzi:

1. przewodniczący komisji – prof. Andrzej Demenko – Politechnika Poznańska
2. sekretarz komisji – prof. Ryszard Pałka – Zachodniopomorski Uniwersytet Techniczny w Szczecinie
3. recenzent – prof. Jacek Wańkowicz – Instytut Energetyki – Instytut Badawczy w Warszawie
4. recenzent – dr hab. Marek Florkowski – Centrum Badawcze ABB w Krakowie
5. recenzent – prof. Jerzy Skubis – Politechnika Opolska
6. członek komisji – dr hab. Andrzej Wilk – Politechnika Gdańska
7. członek komisji – dr hab. Tomasz Piotrowski – Politechnika Łódzka

w celu przeprowadzenia postępowania habilitacyjnego dr. Szymona BANASZAKA wszczętego w dniu 9 marca 2017r., w dziedzinie *nauk technicznych*, w dyscyplinie elektrotechnika.

Jednocześnie zwracamy się do Rady Wydziału z uprzejmą prośbą o powiadomienie, w imieniu Centralnej Komisji, ww. osób o powołaniu ich w skład przedmiotowej komisji oraz o przekazanie dokumentacji kandydata.

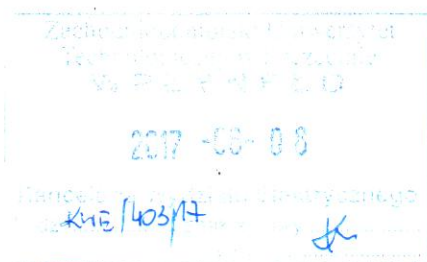
W załączeniu Centralna Komisja przekazuje dokumentację, o której mowa w art. 18a ust. 1 ustawy, w formie papierowej

Do wiadomości:

- dr Szymon Banaszak

SEKRETARZ KOMISJI

Prof. dr hab. Bronisław Sitek



Uchwała
Rady Wydziału Elektrycznego
Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie
z dnia 21 września 2017 r.
w sprawie nadania dr. inż. Szymonowi Banaszakowi
stopnia doktora habilitowanego, w obszarze nauk technicznych,
w dziedzinie nauk technicznych, w dyscyplinie elektrotechnika

Działając na podstawie art. 18a pkt 11 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.) Rada Wydziału Elektrycznego Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie uchwaliła co następuje:

§ 1.

Po zapoznaniu się z uchwałą komisji habilitacyjnej powołanej w dniu 12 maja 2017 r. przez Centralną Komisję do Spraw Stopni i Tytułów w celu przeprowadzenia postępowania habilitacyjnego zawierającą opinię w sprawie nadania dr. inż. Szymonowi Banaszakowi stopnia doktora habilitowanego, wraz z uzasadnieniem i pełną dokumentacją postępowania habilitacyjnego, w tym recenzjami osiągnięć naukowych nadała

dr. inż. Szymonowi Banaszakowi stopień doktora habilitowanego
w obszarze nauk technicznych, w dziedzinie nauk technicznych,
w dyscyplinie elektrotechnika.

§ 2.

Uchwała wchodzi w życie z dniem jej podjęcia.

Przewodniczący Rady Wydziału

dr hab. inż. Krzysztof Okarma, prof. nadzw. ZUT

