

Analiza odpowiedzi częstotliwościowej transformatora metodą indeksów zgrupowanych z wykorzystaniem ruchomego okna danych

Streszczenie. Transformatory są jednym z ważniejszych składników systemu elektroenergetycznego. Dlatego też powinny być poddawane okresowym badaniom diagnostycznym. W celu określenia ich stanu mechanicznego stosuje się metodę FRA – analizę odpowiedzi częstotliwościowej. W artykule przedstawiono wpływ szerokości okna danych na ocenę odpowiedzi częstotliwościowej transformatora z zastosowaniem metody indeksów zgrupowanych. Przeprowadzone analizy umożliwiły poprawę oceny stanu technicznego części aktywnej transformatora metodą FRA.

Abstract. Transformers are one of the most important elements of the power system. Therefore, they should be subjected to periodic diagnostic examinations. For the assessment of their mechanical condition, the FRA method is used (frequency response analysis). The paper presents the influence of the data window width on the assessment of the frequency response of the transformer using the grouped index method. The conducted analyzes made it possible to improve the assessment of the technical condition of the active part of the transformer using the FRA method. (*Analysis of the transformer frequency response using the grouped index method using a moving data window*)

Słowa kluczowe: Transformator, analiza odpowiedzi częstotliwościowej, FRA, uzwojenia, indeksy numeryczne

Keywords: Transformer, Frequency Response Analysis, FRA, windings, numerical indices

Wstęp

Powszechnie stosowaną metodą nieniszczącą w diagnostyce transformatorów jest analiza odpowiedzi częstotliwościowej FRA – (Frequency Response Analysis). Badanie wykonywane w szerokim zakresie częstotliwości umożliwia wykrywanie uszkodzeń mechanicznych lub zwarc w uzwojeniach. Analiza wyników polega na porównaniu odpowiedzi wzorcowej danej jednostki (tzw. fingerprint) z badaniem aktualnie wykonanym. Na podstawie tego porównania identyfikowane i analizowane są różnice w odpowiedziach częstotliwościowych [1]. Przez złożoność sygnału odpowiedzi częstotliwościowej, na którą wpływają wszystkie parametry elektryczne transformatora (rezystancja, pojemność, sprzężenia magnetyczne itp.), interpretacja wyników jest często wspierana przez indeksy numeryczne. Mnogość publikowanych propozycji wsparcia komputerowego do analizy wyników odpowiedzi częstotliwościowej, zdeterminowały autorów do porównania 14 najpopularniejszych indeksów liczbowych, ich podziału na cztery charakterystyczne grupy i opracowania „metody indeksów zgrupowanych” (GIM - grouped indices method) [2]. Zazwyczaj wskaźniki te są stosowane dla całego zakresu częstotliwości rejestrowanych danych, zwracając jako wynik pojedynczą liczbę. Takie podejście jest mało dokładne i może prowadzić do wyciągnięcia niewłaściwych wniosków na temat aktualnego stanu badanej jednostki. To ograniczenie można ominąć obliczając wartość danego wskaźnika, nie dla całego analizowanego zakresu, ale dla określonego okna danych. W artykule przedstawiono zastosowanie metody indeksów zgrupowanych wraz z wykorzystaniem ruchomego okna danych, co ułatwia i przyspiesza analizę porównywanych odpowiedzi częstotliwościowych, w szczególności osobom mniej doświadczonym w tym zakresie.

Metodyka pomiarowa

Głównym elementem transformatora jest jego część aktywna, która składa się z rdzenia oraz uzwojeń. Podczas normalnej pracy transformatora siły działające na uzwojenia są małe i nie zagrażają jego konstrukcji. Jednak wraz z wiekiem integralność mechaniczna jednostki ulega stopniowemu pogorszeniu ze względu na starzenie się izolacji oraz skumulowane skutki niepożądanych zdarzeń

sieciowych (przebiecia, zwarcia) lub mechanicznych (nieprawidłowy transport lub montaż jednostki, zdarzenia sejsmiczne). Gdy integralność mechaniczna transformatora spada, zwiększają się siły dynamiczne oddziałujące na uzwojenia. Przesunięcie lub odkształcenie zwojów nie zawsze powoduje natychmiastowe przebicie elektryczne izolacji, ale znacznie zwiększa ryzyko awarii przy kolejnym przebieciu lub zwarciu. Dlatego, aby niezawodnie zarządzać systemem elektroenergetycznym niezbędna jest wiedza na temat stanu technicznego populacji transformatorów. Metoda analizy odpowiedzi częstotliwościowej jest szeroko stosowana do określenia stanu mechanicznego części aktywnej. Możliwe jest przede wszystkim wykrycie uszkodzeń, takich jak odkształcenia promieniowe, przemieszczenia osiowe oraz zwarcia w uzwojeniach.

Metoda FRA opiera się na bezpośrednich pomiarach wykonanych w dziedzinie częstotliwości. Ze względu na konieczność przechowywania wcześniejszych pomiarów i analizowania ich z aktualnie wykonanymi, aby móc zaobserwować jak następuje degradacja części aktywnej transformatora na przestrzeni kolejnych okresów eksploatacyjnych, konieczne jest, aby przeprowadzone pomiary były jak najbardziej powtarzalne i dokładne, nawet podczas wykonywania ich przez różnych diagnostów z zastosowaniem różnej aparatury pomiarowej. Bazową konfiguracją pomiarową proponowaną przez normę [3] jest pomiar między końcami wybranego uzwojenia, przy otwartych uzwojeniach strony przeciwniej (end-to-end open – E2E), gdzie sygnał sinusoidalnie zmienny w szerokim zakresie częstotliwości podany jest na jeden koniec uzwojenia, a jego odpowiedź rejestrowana jest na drugim końcu tego samego uzwojenia. Przeprowadzone badania wykazują, że ten układ charakteryzuje się największą czułością na deformacje części aktywnej transformatora i powinien być stosowany każdorazowo podczas wykonywania diagnostyki [4].

Metoda indeksów zgrupowanych

FRA jest metodą porównawczą, dlatego by poprawnie interpretować aktualne wyniki badań należy posiadać dane referencyjne, nazywane inaczej odciskiem palca. Problemy w interpretacji porównywanych zbiorów danych, wymogły

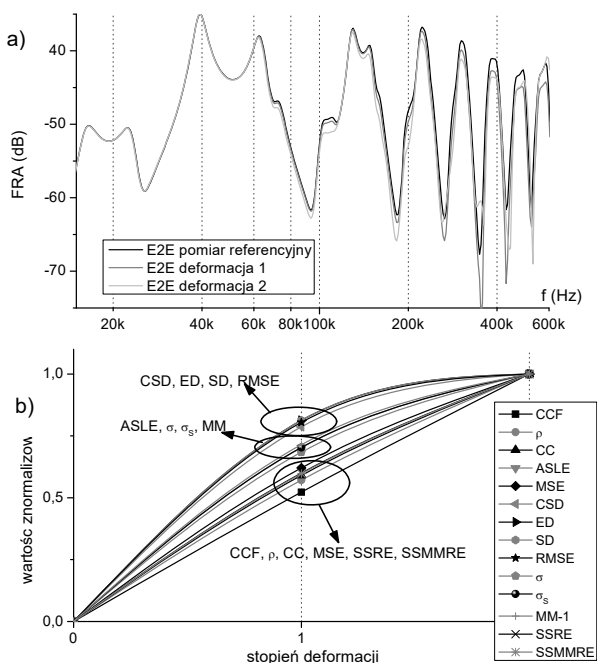
potrzebę zastosowania współczynników obliczeniowych. W tabeli 1 przedstawiono najczęściej spotykane w literaturze współczynniki liczbowe wraz z akronimem, źródłem literaturowym, wartością, którą współczynnik przyjmuje, gdy oba porównywane wykresy są identyczne oraz kierunkiem zmian wartości wraz ze wzrostem deformacji.

Tabela 1. Analizowane współczynniki obliczeniowe FRA

Akronim	Pełna nazwa współczynnika	Stan idealny	Lit.
ASLE	Absolute Sum of Logarithmic Error	0 ↑	[5]
MSE	Mean Square Error	0 ↑	[6]
CSD	Comparative Standard Deviation	0 ↑	[6]
ED	Euclidean Distance	0 ↑	[7]
SD	Standard Deviation	0 ↑	[8]
RMSE	Root Mean Square Error	0 ↑	[9]
σ	Spectrum deviation	0 ↑	[10]
σ_s	Stochastic spectrum deviation	0 ↑	[11]
SSRE	Sum Squared Ratio Error	0 ↑	[7]
SSMMRE	Sum Squared Max-Min Ratio Error	0 ↑	[5]
MM	Minimum-Maximum ratio	1 ↑	[6]
CCF	Cross Correlation Factor	1 ↓	[12]
ρ	Normalized correlation coefficient	1 ↓	[13]
CC	Correlation Coefficient	1 ↓	[11]

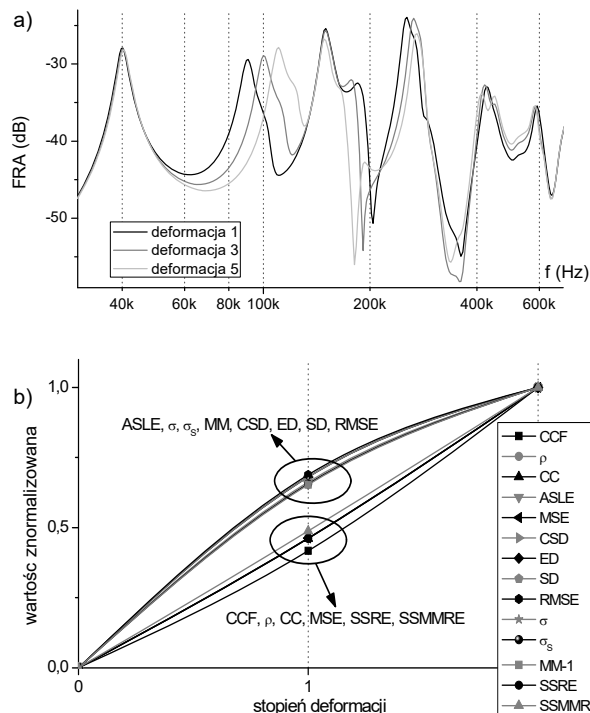
Różne deformacje wykazują inne zmiany odpowiedzi częstotliwościowej (zmiana amplitudy tłumienia, przesunięcia rezonansów), dlatego też wykorzystanie różnych technik matematycznych znacząco wpływa na efektywność wykrycia konkretnego uszkodzenia przez różne współczynniki. Dlatego, aby prawidłowo zidentyfikować uszkodzenia należy wykonać porównanie, co najmniej kilkoma formułami [14].

Podstawowy problemem podczas korzystania z automatycznych metod porównawczych to interpretacja wyników, wskaźniki zwracają pojedynczą liczbę, otrzymane wartości znacząco różnią się od siebie, dlatego, aby móc porównać skuteczność wykrywania deformacji współczynniki obliczeniowe zostały znormalizowane porównane w zakresie od 0 do 1. Poniżej przedstawiono przykłady analizowanych odpowiedzi symulowanych deformacji wraz z wynikami porównywanych danych. Rysunek 1 przedstawia wyniki odpowiedzi częstotliwościowej wykonane w układzie E2E, w których deformacja wpłynęła przede wszystkim na zmiany wartości amplitudy tłumienia.



Rys.1. Wpływ rodzaju deformacji na możliwości pracy współczynników obliczeniowych a) odpowiedź częstotliwościowa między końcami uzwojenia, b) znormalizowane wartości obliczone z 14 wskaźników numerycznych

Rysunek 2 pokazuje odpowiedź częstotliwościową, gdzie wprowadzona deformacja spowodowała nie tylko znaczne zmiany amplitudy, dobrze widoczne w okolicach 200 kHz, ale również przesunięcie rezonansów najlepiej widoczne przy częstotliwości 100 kHz.



Rys.2. Wpływ rodzaju deformacji na możliwości pracy współczynników obliczeniowych a) odpowiedź częstotliwościowa między końcami uzwojenia, b) znormalizowane wartości obliczone z 14 wskaźników numerycznych

Porównanie wyników badań otrzymanych dla rzeczywistych odkształceń wprowadzonych w uzwojenia transformatorów, umożliwiło podział na cztery grupy, tworzących metodę indeksów zgrupowanych - GIM. Grupy te przedstawiono w tabeli 2, każda z nich zawiera formuły stosowane do oceny wyników FRA, które wykazują podobne zachowanie.

Tabela 2. Grupy współczynników obliczeniowych

Grupa	współczynniki numeryczne
I	CC* , CCF, ρ
II	MSE* , SSRE, SSMMRE
III	SD* , CSD, ED, RMSE
IV	ASLE* , σ , σ_s , MM-1

* - sugerowany współczynnik zaznaczono **pogrubieniem**

Pierwsza grupa zawiera trzy wskaźniki, których indeksy maleją od 1 (stan idealny), wraz ze wzrostem deformacji (trzecia kolumna w tabeli 1). W drugiej grupie znajdują się formuły, które zajmowały najniższe punkty na wykresach, zwykle idące razem z grupą 1, ale których wartości rosną od 0 (przypadek nienaruszony) wraz ze skalą deformacji. Podobne zmiany wartości obserwuje się dla wszystkich pozostałych wzorów opisanych poniżej.

Trzecią grupę tworzą indeksy, które zawsze zajmowały najwyższą wartość. Oznacza to, że wskaźniki te są bardzo wrażliwe nawet na najmniejsze zmiany pomiędzy porównywanymi krzywymi odpowiedzi częstotliwościowych i wraz z rozwojem deformacji ich wartości nie zmieniają się z zachowaniem liniowym. Ostatnia grupa zawiera formuły, które dają podobne wyniki do poprzedniej grupy, ale zwykle wykazują bardziej liniową zależność wraz ze wzrostem odkształcenia. Chociaż niektóre wskaźniki wyglądają

podobnie, gdy porównuje się ich formuły w sensie matematycznym, są one przydzielone do różnych grup, biorąc pod uwagę sposób, w jaki reagują na dane. W celu dokonania dokładnej analizy wyników testu FRA, wystarczy wykorzystać tylko jeden wzór z każdej grupy. Porównując cztery wyniki można szybciej i łatwiej wyciągnąć wnioski, czy analizowane dane wskazują na deformację w transformatorze. Oczywiście nadal pozostaje kwestią otwartą, czy otrzymane wartości mogą być używane jako znaczniki dla określenia jednoznacznej decyzji o uszkodzonej jednostce, ale problem ten prawdopodobnie nigdy nie zostanie rozwiązany, ponieważ wartości oceny różnią się w zależności od rozmiaru geometrycznego transformatora, jego konfiguracji połączenia, a nawet producenta i typu. Jednak wybierając tylko jeden indeks z każdej grupy, liczba wartości do porównania jest znacznie zmniejszona przy uwzględnieniu wszystkich możliwych metod analizy. Zaproponowano po jednym przedstawicielu z każdej grupy: CC, MSE, SD i ASLE. Wybór ten uzasadniono selekcją indeksów, które w swojej grupie są najłatwiejsze do zastosowania, najpopularniejsze lub już zaimplementowane w oprogramowaniu komercyjnym i najbardziej oczywiste z matematycznego punktu widzenia.

Poniżej przedstawiono wzory, które zostały wybrane jako reprezentanci każdej z grup w metodzie indeksów zgrupowanych:

$$(1) \quad CC = \frac{\sum_{i=1}^N Y_{0i} Y_{1i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_{0i})^2 \sum_{i=1}^N (Y_{1i})^2}};$$

$$(2) \quad MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{0i} - Y_{1i})^2}{N};$$

$$(3) \quad SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_{0i} - Y_{1i})^2}{N}};$$

$$(4) \quad ASLE = \frac{\sum_{i=1}^N |20 \log_{10} Y_{1i} - 20 \log_{10} Y_{0i}|}{N};$$

gdzie: Y_0 jest zbiorem danych odniesienia, Y_1 jest serią porównywanych danych, N jest całkowitą liczbą punktów.

Zastosowanie ruchomego okna danych

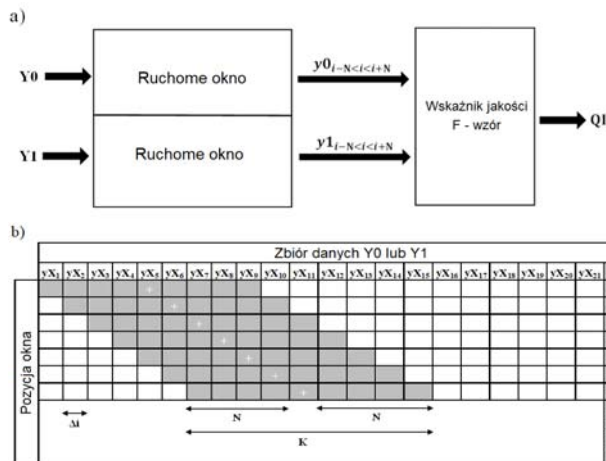
Tradycyjny sposób stosowania współczynników numerycznych w diagnostyce FRA polega na wykorzystaniu lokalnej wartości jakościowej dla obszaru niskich, średnich i wysokich częstotliwości. Jednak ocena oparta tylko na pojedynczej wartości zwracanej przez dowolny indeks liczbowy, nawet w wyznaczonych granicach częstotliwości może wprowadzać w błąd i skutkować błędną interpretacją zmierzonych danych odpowiedzi częstotliwościowej [15]. Zastosowanie techniki ruchomego okna generuje szereg wskaźników jakości $QI(f)$ (gdzie f - częstotliwość) dla kolejnych pozycji okna algorytmu. Obliczenia elementów tego zbioru dokonuje się za pomocą ogólnego wzoru:

$$(5) \quad QI_i = F(y_{0_{i-N < i < i+N}}, y_{1_{i-N < i < i+N}})$$

Wartości $QI(f)$ są obliczane według wybranego kryterium jakościowego F , np. MSE, CC, ASLE lub SD zaproponowane w metodzie GIM.

Na rysunku 3 przedstawiono schematyczny sposób zastosowania metody ruchomego okna danych. Wartości

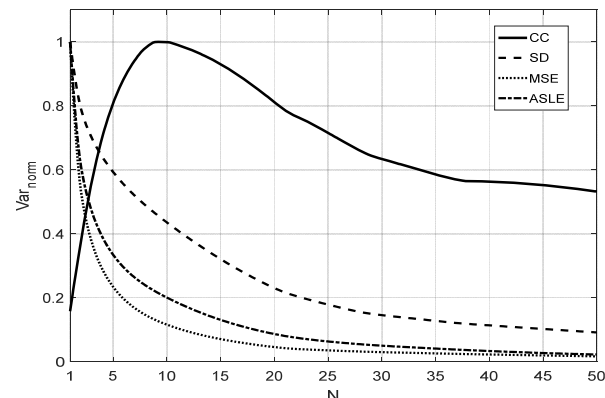
wejściowe to dwie sekwencje danych pomiarowych FRA: Y_0 to zbiór danych referencyjnych, Y_1 jest serią porównywanych danych. Dane wejściowe służą do sukcesywnego obliczania QI , zgodnie z regułą F , z wykorzystaniem okna zawierającego $K = 2N + 1$ kolejnych elementów danych (wartości Y_0 i Y_1). Okno jest przesuwane wzdłuż wektorów wejściowych (rys.3b) o jeden element i w procesie obliczeń tworzony jest wektor danych wyjściowych QI , zawierający o $2 \cdot N$ elementów mniej niż każdy z wektorów wejściowych. Zastosowanie techniki ruchomego okna wymaga określenia dwóch parametrów: wielkości kroku oraz liczby elementów okna. Jeżeli zmiany indeksu i dokonywane są z krokiem $\Delta i = 1$, to rozdzielczość częstotliwości obliczonego indeksu $QI(f)$ jest maksymalna, równa liczbie mierzonych punktów. Jeżeli $\Delta i > 1$, rozdzielczość częstotliwościowa jest mniejsza.



Rys.3. (a) Schemat blokowy obliczania lokalnych wartości wskaźnika jakości, (b) algorytm ruchomego okna. Symbol „+” oznacza środkowy (aktualny) element okna, natomiast całkowita szerokość okna wynosi $K = 9$, ($N=4$)

Wybór rozmiaru okna nie jest łatwym zadaniem. Można przewidywać, że duże wartości K będą prowadzić do wygładzenia wyników i przeciwnie, niskie wartości tego parametru prowadziłyby do bardzo precyzyjnej reprezentacji różnic między $FRAY_0$ i $FRAY_1$. W takim przypadku otrzymany wynik $QI(f)$ może być trudny do interpretacji, podobnie jak bezpośrednie dane wejściowe.

Aby jak najdokładniej przeanalizować wpływ wielkości okna na dane wyjściowe dokonano porównania zależności wariancji wskaźników jakości CC, SD, MSE i ASLE w funkcji parametru N . Znormalizowane do wartości maksymalnej wyniki przedstawiono na rysunku 4.



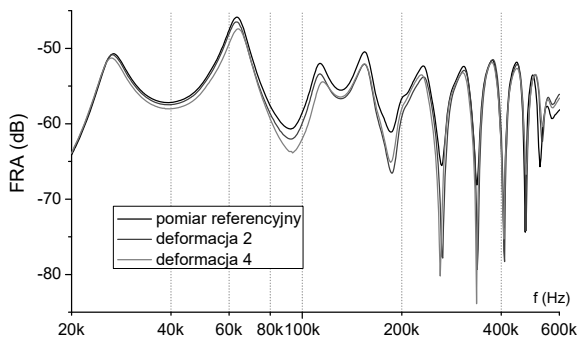
Rys.4. Zależność znormalizowanej wariancji wartości wskaźników jakości od N (liczba elementów okna $K = 2N + 1$)

Oś pionowa przedstawia – znormalizowaną do wartości maksymalnych – wariancję wybranych wskaźników jakości.

Można zauważyć, że w przypadku SD, MSE i ASLE zastosowanie małego okna prowadziło do precyzyjnego odwzorowania przez te wskaźniki zmian między referencyjnymi, a diagnozowanymi zbiorami danych FRA. Dla okien o dużej liczbie elementów (np. $K > 11$ ($N > 5$)) krzywe przedstawiające zmiany wartości tych wskaźników byłyby wygładzone, co w diagnostyce FRA - w niektórych przypadkach - może być korzystne.

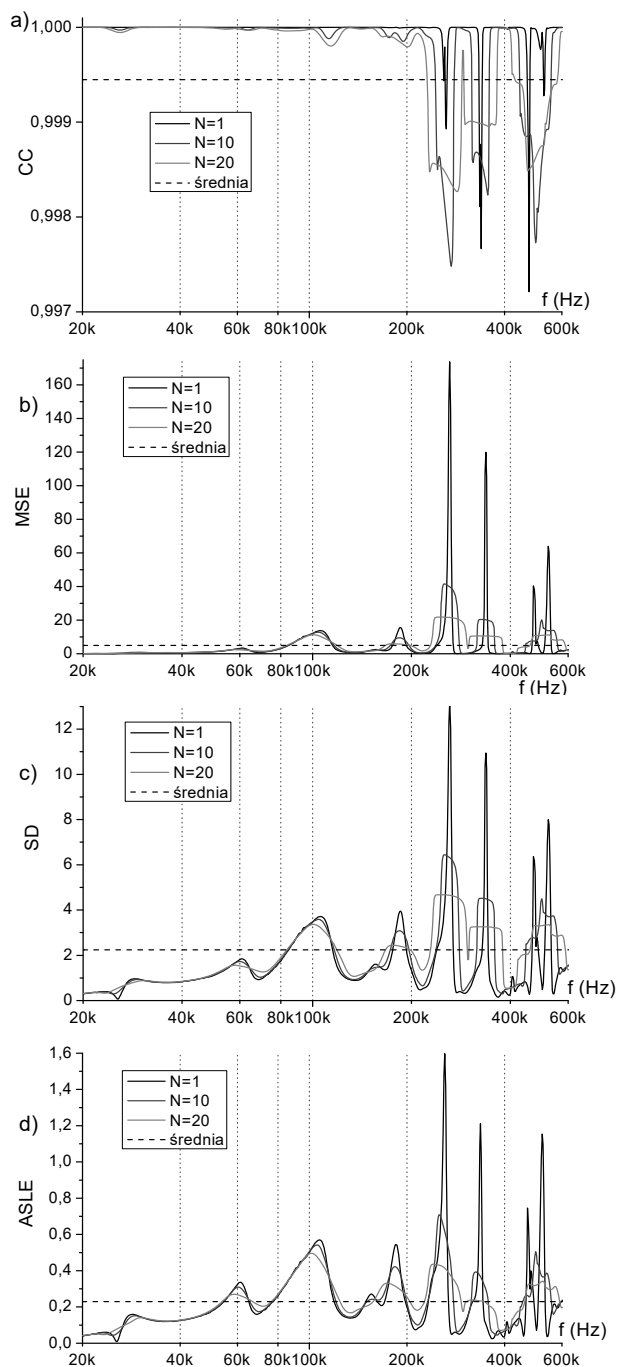
Odmiennej charakter wpływu rozmiaru okna na wariancję można zaobserwować dla wskaźnika CC. Maksimum wariancji wyraźnie widać dla N równego w przybliżeniu 10, co daje najdokładniejsze odwzorowanie jego zmian w funkcji częstotliwości. Wyniki wariancji przedstawione na rysunku 4 obliczone są dla standardowej rozdzielczości pomiarowej używanej domyślnie przez Omicron, FRAnalyzer, jeżeli zastosujemy większą rozdzielczość pomiaru wzrośnie również wartość N przy, której występuje maksimum wskaźnika CC.

Na rysunku 5 zaprezentowano charakterystyki wykorzystane do analizy zastosowania metody ruchomego okna danych przy współpracy ze współczynnikami numerycznymi zaproponowanymi w metodzie GIM. Wprowadzane kolejne stopnie symulowanych deformacji w uzwojenia transformatora powodują widoczne w szerokim zakresie częstotliwości zmiany wartości amplitudy tłumienia.



Rys.5. Charakterystyki FRA w przedziale średnich częstotliwości transformatora z wprowadzonymi deformacjami osiowymi

Na rysunku 6 przedstawiono wartości czterech wskaźników liczbowych dla różnych wartości N ($K = 2N + 1$). Każdy przypadek zawiera również wartość średnią, która jest pojedynczą wartością wyliczoną z danego wskaźnika dla całego analizowanego przedziału. Innymi słowy, reprezentuje typowe przemysłowe podejście do analizy za pomocą wskaźników numerycznych i jest przedstawione na wykresach linią przerywaną. Na wykresach b, c, d przedstawionych na rysunku 6 zobaczyć można spodziewane wygładzenie charakterystyk wraz ze wzrostem wartości N , dla dużych wartości N wariancja wartości wskaźników maleje, a więc stopień wygładzenia rośnie. Wszystkie trzy współczynniki (MSE, SD, ASLE) wykazują podobny wpływ zmiany okna danych na otrzymane wyniki, ale w przypadku SD stopień wygładzenia nie jest tak radykalny jak w pozostałych przypadkach. Mniej spodziewane wyniki zobaczyć możemy na rysunku 6a. Wartości wielkości okna N w różnym stopniu wpływają, w zależności od częstotliwości na wartości współczynnika CC. Na przykład rezonans danych FR przy 270 kHz daje największą zmianę wyniku CC, jeśli wartość $N = 10$, podczas gdy dwa pozostałe rezonanse (340 kHz, 470 kHz) dają największą zmianę CC dla $N = 1$. Z całą pewnością można stwierdzić, że rozmiar okna zależy od potrzeb, czy konieczne jest wygładzenie, czy wyostrenie krzywej wyjściowej.



Rys.6. Zależność znormalizowanej wariancji wartości wskaźników jakości od N a) CC, b) MSE, c) SD, d) ASLE

Jednak optymalną wartością dla podejścia średniego jest $N = 10$ — szczególnie w przypadku indeksu CC. Dla tego współczynnika wartość $N = 10$ gwarantuje optymalną precyzję odwzorowania zmian lokalnych, co korzystnie wpływa na czytelność krzywej $CC(f)$ i trafność wniosków diagnostycznych.

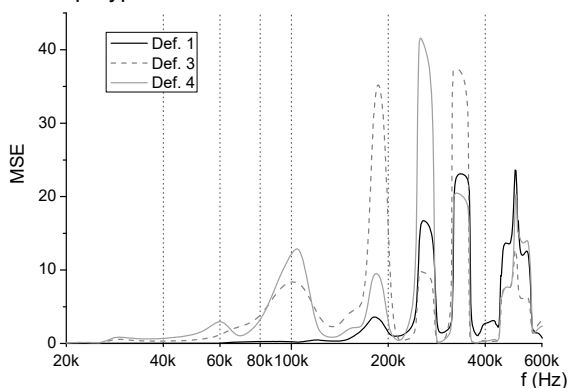
Wnioski

W artykule przedstawiono badania szerokości okna danych do analizy wyników odpowiedzi częstotliwościowej uzwojeń transformatora wykonane za pomocą wskaźników numerycznych. Najpierw przetestowano czternaście współczynników numerycznych na danych pochodzących z transformatora, w którego uzwojenia zostały wprowadzone kontrolowane deformacje. Relacja między

znaną skalą deformacji, a uzyskanymi wynikami pozwoliła podzielić je na cztery grupy, co umożliwiło wprowadzenie metody indeksów zgrupowanych – GIM. Do praktycznej oceny wyników można wybrać tylko jeden wzór z każdej grupy. Zaproponowano zastosowanie: CC – z grupy I, MSE – z grupy II, SD – z grupy III oraz ASLE – z grupy IV. Taki dobór przedstawicieli z każdej grupy polegał na wybraniu najprostszego i najbardziej oczywistego wskaźnika, który można najłatwiej zastosować. Dokonując oceny czterema wybranymi wskaźnikami, wyniki obejmują wszystkie możliwe zachowania z badanej grupy 14 formuł.

Następnie wyniki analizowano dla różnych szerokości okien ($K = 2N + 1$). W pierwszym etapie zbadano wariancję czterech wskaźników w zależności od wartości N , co pozwoliło na zbadanie ich wrażliwości na ten parametr. W przypadku wskaźnika współczynnika korelacji (CC) wyniki nie były jednoznaczne.

Analiza danych dla różnych stopni wprowadzonych deformacji do laboratoryjnie badanego transformatora wykazała, że podejście polegające na przesuwaniu okna jest dokładniejsze i pozwala na wykrycie zmian geometrii uzwojenia, które są niewykrywalne przy standardowym podejściu z pojedynczą (globalną) wartością. Na rysunku 7 przedstawiono porównanie wyników za pomocą indeksu MSE, gdzie każda kolejna deformacja wprowadzona w uzwojenia była większa. Jeśli jednak porównamy kształty wykresów z wartościami globalnymi (dla całego zakresu), które wynoszą: def.1 -2,92; def.3 -5.11; def.4 -5,04 widać, że deformacja 3 i 4 nie odwzorowuje złożoności wyników. Deformacja 3 ma swoje maksimum przy 180 i 330 kHz, natomiast dla deformacji 4 jest przy 240 kHz. Ich wartości globalne są prawie takie same, więc analiza na ich podstawie nie wykazałaby żadnych różnic między tymi dwoma przypadkami.



Rys.7. Wyniki oceny za pomocą MSE dla różnych deformacji.

Wybór wartości N zależy od potrzeb analizy, jednak zaproponowana wartość $N = 10$ wydaje się być najbardziej uniwersalna i użyteczna dla większości analiz praktycznych, jednak w niektórych przypadkach użytkownicy metody FRA mogą potrzebować innych efektów (wygładzenie lub wzmocnienie). Wartość $N = 10$ pozwoliła uzyskać najlepszy efekt wykrywania różnic pomiędzy porównywanymi krzywymi odpowiedzi częstotliwościowej. Dla takiej wartości krzywa wyjściowa każdego indeksu liczbowego wyraźnie pokazywała lokalną różnicę wartości, silnie odbiegającą od wartości średniej, dla każdego rodzaju możliwych zmian danych wyjściowych: przesunięcia częstotliwości, zmiany tłumienia czy zmiany kształtu (nowy rezonans).

Jednak problem, który pozostaje do rozwiązania to kryteria interpretacyjne, które zależą przede wszystkim od wymiarów geometrycznych urządzenia (mocy znamionowej) czy jego budowy. W celu praktycznego zastosowania uzyskanych wyników autorzy proponują porównanie danych wyjściowych każdego wskaźnika

w zakresie częstotliwości dla $N = 10$ do wartości średniej (lokalny stosunek wartości maksymalnej do wartości średniej). Ustalając kryteria wykrywania uszkodzeń, np. na poziomie 30-50%, będzie można zidentyfikować zakresy częstotliwości, w których występują „podejrzane” wartości różnic. Należy jednak wyraźnie podkreślić, że proponowane „optymalne” wielkości okna mogą różnić się w zależności od rozdzielczości częstotliwościowej pomiaru.

Autorzy: mgr inż. Wojciech Szoka, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Wysokich Napięć i Elektroenergetyki, ul. Sikorskiego 37, 70-310 Szczecin, E-mail: wojciech.szoka@zut.edu.pl,
dr hab. inż. Szymon Banaszak, prof. ZUT, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Wysokich Napięć i Elektroenergetyki, ul. Sikorskiego 37, 70-310 Szczecin, E-mail: szymon.banaszak@zut.edu.pl;

LITERATURA

- [1] IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil-Immersed Transformers, IEEE Std C57.149-2012, 2013, pp. 1-72.
- [2] Banaszak, S.; Szoka, W. Transformer frequency response analysis with the grouped indices method in end-to-end and capacitive inter-winding measurement configurations. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2019, 35, 571–579.
- [3] IEC 60076-18: Power transformers - Part 18: Measurement of frequency response, *IEC standard*, 2012.
- [4] Szoka, W., Banaszak, S., Gawrylczyk, K. M. Advantages of interwinding capacitive test setup in FRA diagnostics of transformer windings, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 94 NR 7/2018, 42-45.
- [5] Jong-Wook K, et al. Fault diagnosis of a power transformer using an improved frequency-response analysis, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 1, No.1, 2005, 169-178.
- [6] Badgujar K. P., Maoyafikuddin M., Kulkarni SV., Alternative statistical techniques for aiding SFRA diagnostics in transformers, *IET Gener Transm Distrib.* 6(3), 2012, 189-198.
- [7] Pourhossein K., Gharehpetian G., Rahimpour E., Araabi B., A probabilistic feature to determine type and extent of winding mechanical defects in Power transformers. *Electr. Power. Syst. Res.*, 82(1), 2012, 1-10.
- [8] Nirgude P., Ashokraju D., Rajkumar A., Singh B., Application of numerical evaluation techniques for interpreting frequency response measurements in power transformers. *IET Sci. Meas. Technol.*, 2(5), 2008, 275-285.
- [9] Heindl M., Tenbohlen S., Kraetge A., Krüger M., Velásquez J., Algorithmic determination of pole zero representations of power transformers transfer functions for interpretation of FRA data, Paper D-26, 16th int. symp. on high voltage engineering, Johannesburg, 2009.
- [10] Ji T., Tang W., Wu Q., Detection of power transformer winding deformation and variation of measurement connections using a hybrid winding model, *Electr. Power. Syst. Res.*, 87, 2012, 39-46.
- [11] Bak-Jensen J., Bak-Jensen B., Mikkelsen S. D., Detection of faults and ageing phenomena in transformers by transfer functions. *IEEE Trans. Power Delivery*, 10(1), 1995, 308-314.
- [12] Kennedy G. M., McGrail A. J., Lapworth J. A., Using Cross-Correlation Coefficients to Analyze Transformer Sweep Frequency Response Analysis (SFRA) Traces, *IEEE PES PowerAfrica (2007) Conference and Exposition*. Johannesburg, South Africa, 16-20 July 2007.
- [13] Rahimpour E., Jabbari M., Tenbohlen S., Mathematical comparison methods to assess transfer functions of transformers to detect different types of mechanical faults, *IEEE Trans. Power. Deliv.*, 25(4), 2010, 2544–2555.
- [14] Szoka, W. Zastosowanie algorytmów do interpretacji wyników FRA, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 94 NR 10/2018, 134-137.
- [15] Banaszak, S.; Kornatowski, E.; Szoka, W. The Influence of the Window Width on FRA Assessment with Numerical Indices. *Energies* 2021, 14, 362.