

Uniwersalny deskryptor stanu mechanicznego części aktywnej transformatorów

Streszczenie. W artykule przedstawiono definicję wskaźnika jakości do oceny wyników pomiarów metodami FRA oraz wibroakustyczną na potrzeby oceny stanu mechanicznego części aktywnej transformatorów energetycznych. Umożliwia on numeryczne porównanie wyników diagnostycznych (wykresów) uzyskanych z bieżących badań diagnostycznych z wykresami referencyjnymi.

Abstract. The article presents the definition of a quality indicator for the evaluation of the measurements results using FRA and vibroacoustic methods for the purpose of the assessment of the mechanical condition of power transformer's active part. It enables numerical comparison of diagnostic results (graphs) obtained from current diagnostic tests with reference charts. **Universal descriptor of the mechanical state of the active part of transformers**

Słowa kluczowe: transformator, deformacje, analiza odpowiedzi częstotliwościowej (FRA), metoda wibroakustyczna (VM).

Keywords: transformer, deformation, frequency response analysis (FRA), vibroacoustic method (VM)

Wstęp

Niezawodność systemów elektroenergetycznych zależy od stanu technicznego wszystkich urządzeń w nich zainstalowanych, w tym transformatorów energetycznych, których ważna rola oraz stale rosnący średni wiek ich populacji doprowadziły do rozwoju metod diagnostycznych [1]. Jednym z ważniejszych aspektów stanu technicznego transformatora jest jego stan mechaniczny, do którego oceny najczęściej wykorzystywane są dwie metody: analiza odpowiedzi częstotliwościowej (FRA) oraz metoda wibroakustyczna (VM) [2], które umożliwiają wykrycie problemów mechanicznych w uzwojeniach i rdzeniu transformatora, przy czym każda z metod opiera się na innych zjawiskach fizycznych. Celem artykułu jest opracowanie narzędzia oceny adekwatnego do wyników uzyskanych z obu uzupełniających się metod badawczych: FRA i VM. W przedmiotowej literaturze opisano wiele indeksów numerycznych, które można wykorzystać do analizy wyników FRA lub VM oddzielnie dla każdej z tych metod [3]. Żaden z nich nie jest jednak doskonały, dlatego nie ma standardów w zakresie interpretacji wyników diagnostycznych określonych wskaźnikami jakości. Ponadto, nie ma metod przeznaczonych do oceny stanu mechanicznego części aktywnej transformatora, reprezentowanej zarówno przez uzwojenia, jak i rdzeń.

Celem prezentowanych badań jest propozycja uniwersalnego deskryptora QI (wskaźnika jakości) stanu mechanicznego części aktywnej, dedykowanego ocenie wyników pomiarów komplementarnych metod diagnostycznych FRA i VM.

Analiza wyników pomiarów FRA i VM

Metody FRA i VM mogą być wykorzystywane do wspólnej analizy diagnostycznej, ponieważ wyniki diagnozowania obu metodami uzupełniają się wzajemnie [4].

Metoda VM opiera się na analizie drgań generowanych przez rdzeń i uzwojenia, które mogą być rejestrowane zarówno w stanie nieustalonym (wywołanym prądem rozruchowym w uzwojeniach), jak i ustalonym (spowodowanym zjawiskiem magnetostrykcji w rdzeniu). Drgania części aktywnej rejestrowane są za pomocą czujnika akcelerometrycznego przymocowanego do kadzi transformatora [5]. Proces diagnostyki VM jest najbardziej efektywny, gdy transformator pracuje bez obciążenia. W takich warunkach eliminowany jest wpływ prądu obciążenia na drgania części aktywnej, a zarejestrowany sygnał wibroakustyczny (przyspieszenie wibracji kadzi)

odzwierciedla wibracje samego rdzenia. Dominuje wówczas zjawisko magnetostrykcji i źródłem drgań części aktywnej jest głównie rdzeń.

Przy szacowaniu stanu mechanicznego rdzenia analizowany jest sygnał drgań ustalonych podczas pracy bez obciążenia, a dokładnie znormalizowane zmiany widmowej gęstości mocy sygnału przyspieszenia wibracji kadzi $a_r(f)$ [2, 6]. Krzywa $a_r(f)$ diagnozowanego transformatora jest porównywana z krzywą jednostki doskonałej (idealnej) lub z krzywymi zarejestrowanymi w grupie podobnych jednostek.

Stosując metodę FRA porównuje się krzywą odniesienia (tzw. odcisk palca) i rzeczywistą odpowiedź części aktywnej na niskonapięciowy sygnał sinusoidalny w szerokim spektrum częstotliwości. Metodologia pomiaru odpowiedzi częstotliwościowej (FR) jest opisana w normie [7]. Kształt rejestrowanych krzywych zależy od złożonego układu RLC reprezentującego konstrukcję transformatora. Zmiany geometrii (np. deformacje) uzwojeń wpływają na kształt rejestrowanej krzywej.

Każda metoda diagnostyczna wymaga odpowiednich narzędzi do analizy wyników badań. W przypadku metod FRA i VM porównywane krzywe mogą być oceniane bezpośrednio przez doświadczony personel, zwłaszcza dysponujący dużą bazą wyników badań z innych jednostek. Łatwiej jest jednak wprowadzić pewne narzędzia matematyczne do interpretacji wyników diagnostycznych, na przykład deskryptory (indeksy jakości) numeryczne. Wiele z nich zostało opisanych w literaturze, jednak pozostają do rozwiązania bardzo istotne problemy, np. ustalenie miejsca lokalizacji czujnika akcelerometrycznego i eliminacja wpływu na pomiar wibracji elementów zewnętrznych transformatora (metoda VM) czy też określenie wartości granicznych wyników będących efektem analizy danych pomiarowych (metody FR i VM) [3].

Wskaźnik jakości do oceny komplementarnych wyników FRA i VM

W celu identyfikacji i klasyfikacji defektów transformatorów często wykorzystywane są numeryczne wskaźniki jakości, których definicje oparto na wielkościach znanych ze statystyki matematycznej. Szczególnie w przypadku diagnostyki FRA coraz częściej stosuje się taki sposób wnioskowania diagnostycznego. Algorytmy dotyczące sposobu obliczania wskaźników jakości były opisywane w wielu pracach naukowych, a przegląd ich właściwości opisano w [8].

Podobny sposób postępowania, tj. obliczanie wskaźnika jakości świadczącego o podobieństwie krzywej (wykresu) uzyskanego z pomiaru z krzywą odniesienia można również wykorzystać w wibroakustycznym diagnozowaniu VM części aktywnej, a rdzenia w szczególności.

Wskaźnik jakości (podobieństwa do krzywej odniesienia) analizowanej krzywej powinien uwzględniać takie cechy jak podobieństwo kształtu, wartość średnia, zakres dynamiczny zmian pomierzonych wartości itd. Czym więcej czynników będzie uwzględnionych, tym wskaźnik jakości będzie bardziej wiarygodny.

Z analizy wniosków zawartych w publikacjach, np. [9], wynika, że podobieństwo kształtów krzywych najlepiej odwzorowuje współczynnik korelacji liniowej Pearsona CC, lecz nie jest czuły (wrażliwy) na zmiany amplitudy analizowanego zbioru danych.

W tej pracy proponuje się wykorzystanie deskryptora QI (FRQI dla diagnostyki FRA oraz VQI dla pomiarów wibroakustycznych), definicja którego uwzględni podobieństwo kształtów, wartości średnich oraz dynamiki zmian porównywanych dwóch zbiorów danych, bazując na ich właściwościach probabilistycznych.

Niech $A_x(f_i) = \{X: x_i | i = 1, 2, \dots, N\}$ oraz $B_y(f_i) = \{Y: y_i | i = 1, 2, \dots, N\}$ są zbiorami punktów reprezentujących dwie krzywe amplitudy FR w funkcji częstotliwości f . W przypadku metody VM $A_x(f)$ i $B_y(f)$ są zbiorami punktów reprezentującymi dwie krzywe $ar(f)$, również w funkcji częstotliwości f . W celu wykrycia różnic między dwoma wykresami proponuje się wskaźniki jakości: odpowiedzi częstotliwościowej FRQI oraz wibroakustyczny VQI, które dla obu metod, FRA i VM, można zdefiniować jako:

$$(1) \quad QI(f_i) = S(f_i) \cdot M(f_i) \cdot G(f_i),$$

gdzie S oznacza podobieństwo kształtów obu krzywych, M podobieństwo wartości średnich, a G podobieństwo gradientów – dynamiki zmian (rozrzutu) analizowanego zbioru danych. Wszystkie czynniki równania (1) wyznacza się dla zestawu częstotliwości $f = \{f_i | i = 1, 2, \dots, N\}$ zawartego w zakresie $f_{min} \leq f_i \leq f_{max}$, gdzie $f_{min} = f_1$ i $f_{max} = f_N$.

Czynnik S jest wprost współczynnikiem korelacji liniowej Pearsona CC (współczynnik koherencji) i jest „odpowiedzialny” za detekcję rozbieżności kształtów krzywych obrazujących diagnozowany zbiór danych A_x i zbiór odniesienia B_y :

$$(2) \quad S = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \cdot \sigma_Y}$$

gdzie: σ_{XY} to kowariancja, a σ_X i σ_Y odchylenia standardowe zbiorów danych A_x i A_y (wektorów X i Y).

Obliczanie wartości czynników M i G oparto na definicji średniej harmonicznej [10]. Średnia harmoniczna dwóch liczb a_1 i a_2 wyraża się następującą zależnością:

$$(3) \quad H = \frac{2 \cdot a_1 \cdot a_2}{a_1 + a_2}$$

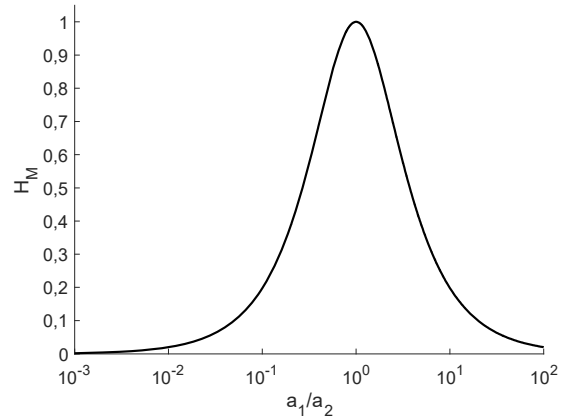
Modyfikując wzór (3) do postaci:

$$(4) \quad H_M = \frac{2 \cdot a_1 \cdot a_2}{a_1^2 + a_2^2}$$

otrzymuje się unormowaną średnią harmoniczną.

Wynik obliczeń otrzymany z (4), będąc wartością bezwymiarową, może być traktowany jako miara podobieństwa między dwiema liczbami. Na rysunku 1 pokazano zależność wartości H_M od a_1/a_2 .

Na rysunku 1 widać, że wartości unormowanej średniej harmonicznej (miary podobieństwa) dwóch liczb zawierają się w przedziale od 0 do 1. W przypadku $a_1 = a_2$ wartość $H_M = 1$, natomiast, gdy porównywane liczby znacznie się od siebie różnią wartość H_M maleje, granicznie osiągając zero.



Rys.1. Miara podobieństwa H_M dwóch liczb a_1 i a_2

Wykorzystując zależność (4) proponuje się następującą definicję czynników M i G – podobieństwo wartości średnich i gradientów (dynamiki zmian) odpowiednio:

$$(5) \quad M = \frac{2 \cdot \mu X \cdot \mu Y}{\mu X^2 + \mu Y^2},$$

$$(6) \quad G = \frac{2 \cdot \sigma_X \cdot \sigma_Y}{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}$$

Ostateczna postać deskryptora, z uwzględnieniem zależności (1), (2) oraz wzorów (5) i (6), jest następująca:

$$(7) \quad QI = 4 \cdot \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2} \cdot \frac{\mu X \cdot \mu Y}{\mu X^2 + \mu Y^2},$$

gdzie μX i μY to średnie wartości wektorów X i Y .

Zależność (7) pozwala określić wartości deskryptora jakości części aktywnej transformatora z wykorzystaniem metody FRA (deskryptor FRQI) oraz wibroakustycznej (deskryptor VQI) niezależnie. Zarówno wartości poszczególnych czynników zależności (1), tzn. S , M i G oraz ostatecznie deskryptor QI można policzyć dwojako:

a) metodą ruchomego okna podobnie, jak to ma miejsce w obliczaniu np. średniej ruchomej. Zatem, biorąc pod uwagę dwa zbiory porównywanych danych $\{X: x_i | i = 1, 2, \dots, N\}$ oraz $\{Y: y_i | i = 1, 2, \dots, N\}$ oraz stosując okno o $2K+1$ elementach otrzymuje się wektory S , M , G oraz QI , z których każdy będzie zbiorem wartości „chwilowych”.

b) wykorzystując wartości „chwilowe” można określić wartość globalną poszczególnych współczynników, obliczoną jako średnia arytmetyczna elementów czynników S , M , G oraz deskryptora QI .

Wartości współczynników podobieństwa M i G zawierają się w przedziale od 0 do 1. Wartość zero oznacza, że wartość średnia (współczynnik M) i zakres dynamiczny (współczynnik G) porównywanych zbiorów danych znacznie się od siebie różnią.

Zakres wartości współczynnika S natomiast, to przedział od -1 do 1. Współczynnik ten ma wartość 1 (najlepszy przypadek) dla liniowej zależności między zmiennymi X i Y , a więc gdy $y_i = ax_i + b$ dla wszystkich $i = 1, 2, \dots, N$, gdzie a i b są stałe, zaś $a > 0$. W takim przypadku (identyczny kształt krzywych) względne podobieństwo (różnice) będzie określane przez M i G .

W przypadku, gdy $a < 0$ (zależność między X i Y jest nadal liniowa), wartość współczynnika $S = -1$. Oznacza to, że analizowane krzywe są swoimi lustrzanymi odbiciami (odwrócenie o 180°). Wartość deskryptora QI będzie zatem zawierać się w przedziale od -1 do 1 . Reasumując: porównywane zbiory są identyczne, gdy $QI=1$, $QI=0$ oznacza, że zbiory całkowicie się różnią, natomiast $QI=-1$, to przypadek odbicia lustrzanego porównywanych krzywych (wykresów), przy identycznym zakresie dynamiki zmian (G) oraz identycznej wartości średniej (M).

W następnej części pracy na wykresach będą pokazane wartości „chwilowe” współczynników QI (FRQI i VQI dla diagnostyki FRA i wibroakustycznej odpowiednio). W analizie porównawczej prezentowanych przykładowych badań diagnostycznych posłużono się także wartościami globalnymi, tj. pojedynczą (średnią) wartością danego współczynnika, wyliczoną dla całego zakresu częstotliwości.

Eksperymentalne badania diagnostyczne

Do analizy z wykorzystaniem deskryptorów FRQI oraz VQI wybrano grupę czterech transformatorów T1, T2, T3 oraz T4, będących przedstawicielami tej samej konstrukcji: 110 kV/ 33 kV, 31,5 MVA, YNd11. Dla diagnozowanych jednostek dostępne były dane pomiarowe FRA i VM z lat 2015, 2020 i 2022 oraz ważną informacją jest to, iż w roku 2022 pomiary jednostki T4 wykonano po zdarzeniu sieciowym, prawdopodobnie po zwarcie. Analiza z wykorzystaniem proponowanego deskryptora stanu mechanicznego części aktywnej powinny ten fakt zdiagnozować.

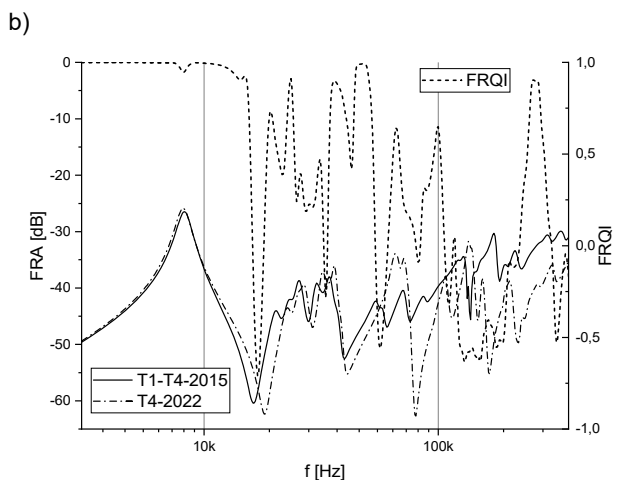
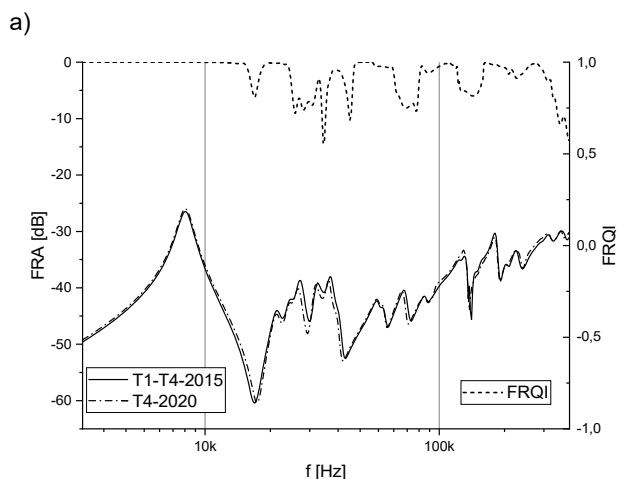
Pomiary odpowiedzi częstotliwościowej zostały wykonane w konfiguracji „end-to-end open” (pomiędzy końcami uzwojenia) i w tym przykładowym badaniu, aby zmniejszyć liczbę przypadków, prezentowane są tylko dane dla fazy A. W praktyce diagnostycznej należy oczywiście przeanalizować wszystkie trzy fazy. Uwzględniony zakres częstotliwości wynosił od ok. 3 kHz do 360 kHz, co odpowiada zakresowi średnich częstotliwości dla tego typu transformatorów.

W przypadku diagnostyki FRA dane referencyjne (odniesienia), to uśredniony przebieg charakterystyki częstotliwościowej transformatorów T1, T2, T3 i T4, pomierzony w roku 2015 (T1-T4-2015). W tabeli 1 pokazano wartości globalnych wartości deskryptora FRQI jednostki T4 uzyskane dla pomiarów w latach 2015, 2020 i 2022.

Tabela 1. Globalne wartości deskryptora FRQI transformatora T4

FRA odniesienia	Rok	FRQI T4
T1-T4-2015	2015	0,9752
	2020	0,9591
	2022	0,4597

Rysunek 2 natomiast ilustruje zmiany FRA i FRQI jednostki T4 zarejestrowane w 2020 i 2022 roku w odniesieniu do krzywej referencyjnej – uśrednionej charakterystyki częstotliwościowej czterech podobnych jednostek, określonej dla danych z 2015 roku (T1-T4-2015). Prezentowane w tabeli 1 i na rysunkach 2a i 2b wyniki diagnozowania FRA pokazują, że stan uzwojeń transformatora T4 praktycznie nie uległ zmianie co najmniej do 2020 r. w stosunku do roku 2015. W 2022 roku globalna wartość deskryptora FRQI zmalała ok. dwukrotnie (tab. 1). Dynamika zmian „chwilowych” wartości deskryptora w analizowanym zakresie częstotliwości zawiera się w przedziale od $-0,6$ do $1,0$ (rys. 2b), co w porównaniu z przedziałem zmian wartości FRQI od $0,6$ do $1,0$ (rys. 2a) może świadczyć o trwałych deformacjach uzwojeń.



Rys. 2 Krzywe FRA dla transformatora T4 w porównaniu z uśrednioną charakterystyką częstotliwościową czterech jednostek T1-T4 z 2015 roku wraz z przebiegami FRQI, w latach: a) 2020, b) 2022

Obserwacje te potwierdzają fakt, że w 2022 roku mogło mieć miejsce zwarcie w sieci energetycznej, a degradacja stanu mechanicznego uzwojeń jest efektem tego zdarzenia sieciowego.

Jak wynika z [11], chcąc wykonać diagnostykę VM samego rdzenia należy zarejestrować wibracje kadzi bez obciążenia jednostki. Można wówczas przyjąć, że źródłem drgań jest rdzeń, dominuje zjawisko magnetostrykcji, a drgania spowodowane oddziaływaniem sił elektrodynamicznych w uzwojeniach są praktycznie pomijalne (prąd obciążenia równy zero).

W celu oszacowania stanu technicznego rdzenia autorzy tej pracy zaproponowali w [6] metodę opartą na analizie znormalizowanych zmian widmowej gęstości mocy $a_r(f)$ sygnału drgań kadzi transformatora bez obciążenia:

$$(8) \quad a_r(f) = \int_f^{f_g} G(f) df / \int_{f_{min}}^{f_{max}} G(f) df,$$

gdzie $G(f)$ to widmowa gęstość mocy drgań kadzi, $f_g = 2,5$ kHz, $f_{min} = 0$ Hz, $f_{max} = 25,6$ kHz.

Dobór wartości f_g , f_{min} , f_{max} oraz parametrów związanych z obliczaniem FFT dokładnie opisano w [6].

Przy takiej definicji, można oszacować stan rdzenia zauważając, że przypadek idealnego stanu mechanicznego to $a_r(f) = 1$ dla $0 \leq f \leq 100$ Hz oraz $a_r(f) = 0$ dla $100 \text{ Hz} < f \leq f_g$, przy założeniu, że częstotliwość sieci energetycznej wynosi 50 Hz. Postępująca degradacja rdzenia spowoduje, że

szybkość opadania funkcji $a_r(f)$ dla $f > 100$ Hz będzie coraz mniejsza.

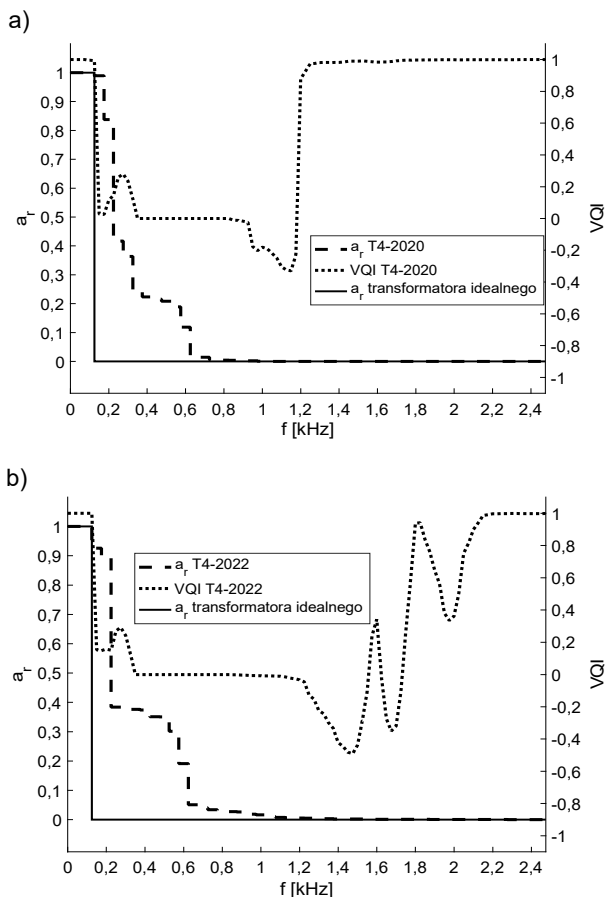
Biorąc pod uwagę powyższe przesłanki wykonano analizę wyników pomiarów wibroakustycznych dla transformatora T4 podobnie, jak w przypadku diagnostyki FRA. Porównaniu podlegały przebiegi znormalizowanej gęstości mocy $a_r(f)$ (8), obliczone dla T4 w latach 2015, 2020 oraz 2022 z przebiegiem odniesienia, który jest w tym przypadku wykresem znormalizowanej widmowej gęstości mocy transformatora idealnego.

W tabeli 2 pokazano wartości globalnych wartości deskryptora VQI, będące wynikiem wibroakustycznych pomiarów diagnostycznych w latach 2015, 2020 i 2022.

Tabela 2. Globalne wartości deskryptora VQI transformatora T4

$a_r(f)$ odniesienia	Rok	VQI T4
Transformator idealny	2015	0,5623
	2020	0,5563
	2022	0,2725

Rysunek 3 ilustruje zmiany $a_r(f)$ i VQI jednostki T4 zarejestrowane w 2020 i 2022 roku w odniesieniu do krzywej referencyjnej $a_r(f)$ transformatora idealnego.



Rys. 3. Krzywe $a_r(f)$ dla transformatora T4 i transformatora idealnego oraz wykres VQI, w latach: a) 2020, b) 2022

Analizując dane z tabeli 2 oraz wyniki pomiarów i obliczeń pokazane na rysunku 3 można stwierdzić, że stan mechaniczny rdzenia w latach od 2015 do 2020 praktycznie nie uległ zmianie. Pomiary w roku 2022 natomiast wskazują na możliwość wystąpienia rozwijających się defektów rdzenia (rozpakietowanie). Szczególnie widoczne są różnice w przebiegu „chwilowych” wartości VQI w zakresie częstotliwości od 1,2 kHz do 2,2 kHz (rys. 3). Zakładając, że na pomiar wibroakustyczny nie miały wpływu drgania zewnętrznych elementów konstrukcyjnych transformatora,

można stwierdzić, że zdarzenie sieciowe (zwarcie) mogło również mieć wpływ na degradację stanu mechanicznego rdzenia.

Wnioski

W artykule zaproponowano definicję deskryptora stanu mechanicznego części aktywnej transformatora energetycznego. Obliczenia wskaźnika jakości opierają się na wykorzystaniu probabilistycznych parametrów porównywanych zbiorów danych, a definicja deskryptora QI ma charakter uniwersalny: jest identyczna w przypadku diagnostyki wibroakustycznej i FRA.

Opisany w artykule przykład badań diagnostycznych potwierdził możliwość skutecznego wykorzystania proponowanego deskryptora we wnioskowaniu diagnostycznym.

Bardzo istotnym problemem jest dobór zbiorów odniesienia (referencyjnych). O ile w przypadku metody VM stosowanie jako referencji znormalizowanych zmian widmowej gęstości mocy sygnału przyspieszenia drgań transformatora idealnego wydaje się odpowiednie, to w przypadku metody FRA warto rozważyć możliwość wykorzystania numerycznego modelu FRA [12], obliczonego z uwzględnieniem parametrów RLC typowych dla danej grupy transformatorów.

Autorzy: dr hab. inż. Eugeniusz Kornatowski, prof. ZUT, Wydział Elektryczny, Katedra Przetwarzania Sygnałów i Inżynierii Multimedialnej, E-mail: korn@zut.edu.pl; dr hab. inż. Szymon Banaszak, prof. ZUT, Wydział Elektryczny, Katedra Wysokich Napięć i Energetyki, E-mail: szymon.banaszak@zut.edu.pl, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, al. Piastów 17, 70-310 Szczecin.

LITERATURA

- [1] Cvijic S., Gupta N., Lux S., Need for AI in Transformer Diagnostics and Prognostics. *2023 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, Orlando, FL, USA, (2023)
- [2] Borucki S., Diagnostyka rdzeni transformatorów metodami wibroakustycznymi, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej*, Opole, 2012
- [3] Tahir M., Tenbholen S., Miyazaki S., Analysis of Statistical Methods for Assessment of Power Transformer Frequency Response Measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2 (2021), 36, 618-626
- [4] Banaszak S., Kornatowski E., Evaluation of FRA and VM Measurements Complementarity in the Field Conditions, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 5 (2016), 31, 2123-2130
- [5] Secic A., Krpan M. and Kuzle I., Vibro-Acoustic Methods in the Condition Assessment of Power Transformers: A Survey. *IEEE Access*, 7 (2019), 83915-83931
- [6] Kornatowski E., Banaszak S., Diagnostics of a Transformer's Active Part With Complementary FRA and VM Measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3 (2014), 29, 1398-1406
- [7] IEC 60076-18:2012 Power transformers - Part 18: Measurement of frequency response, IEC Standard, (2012)
- [8] Senobari R.K., Sadeh J., Borsi H., Frequency response analysis (FRA) of transformers as a tool for fault detection and location, A review. *Electr. Power Syst. Res.*, 155 (2018), 155, 172-183
- [9] Al-Ameri S.M., Kamarudin M.S., Yousof M.F.M., Salem A.A., Siada A.A., Mosaad M.I., Interpretation of Frequency Response Analysis for Fault Detection in Power Transformers. *Appl. Sci.* 11 (2021), 348-362
- [10] Bendat J.S., Piersol A.G. Random Data: Analysis and Measurement Procedures. *John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA*, 2011
- [11] Borucki S., Cichoń A., Wpływ zmiany obciążenia transformatora energetycznego na wyniki analizy sygnałów wibroakustycznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 7 (2010), 45-47
- [12] Treła K., Gawrylczyk K., Verification of transformers windings models for FRA, *Przegląd Elektrotechniczny*, 10 (2018), 49-52