



Tomasz BOCZAR, Sebastian BORUCKI, Andrzej CICHONÓ, Marcin LORENC

Politechnika Opolska, Instytut Elektroenergetyki

## Ocena stanu technicznego rdzenia transformatora na podstawie badań wibroakustycznych

**Streszczenie.** Tematyka artykułu związana jest z diagnostyką stanu technicznego rdzenia transformatorowego przeprowadzoną w oparciu o wyniki badań wibroakustycznych. Badania wykonano w sposób eksperymentalny przy wykorzystaniu modelu transformatora niskiego napięcia. Do pomiarów drgań wykorzystano akcelerometr typu 752-10 firmy Endevco współpracujący z niskoszumnym wzmacniaczem z rodziny Nexus 2693, firmy Brüel & Kjær. Badania obejmowały rejestrację drgań akcelerometrem umieszczonym w czterech punktach pomiarowych, bezpośrednio na rdzeniu transformatora, przy zmieniającym się obciążeniu. W trakcie badań podjęto próbę określenia wpływu obciążenia transformatora na uzyskane wartości przyspieszeń oraz ich analizę w dziedzinie częstotliwości.

**Abstract.** (The assessment of the technical condition of the transformer core based on vibroacoustic investigations). The subject matter of this paper refers to the diagnostics of the technical condition of the transformer core based on the vibroacoustic research results. The investigations were done in an experimental way on low voltage transformer model. The experiments included registration of the vibrations with an accelerometer placed in four measurement points directly on the transformer core, at a changing transformer load. During the research experiments an attempt to determine the influence of the transformer load on the acceleration values obtained and the analysis in the frequency domain was made.

**Słowa kluczowe:** diagnostyka rdzenia transformatorów elektroenergetycznych, metoda wibroakustyczna

**Keywords:** the diagnostics of the power transformer core, vibroacoustic method

### Wstęp

Szeroko pojęta diagnostyka transformatorów elektroenergetycznych jest bardzo ważnym i dynamicznie rozwijającym się w ostatnich latach obszarem działalności przedsiębiorstw energetycznych, a także ośrodków naukowo-badawczych. Utrzymanie właściwego stanu technicznego transformatorów elektroenergetycznych ma ogromne znaczenie w procesie dochowania odpowiednich standardów jakości obsługi klienta, wśród których najistotniejszymi są ciągłość i niezawodność dostaw energii elektrycznej.

Transformatory elektroenergetyczne pod względem statystycznym są urządzeniami o dużym stopniu niezawodności, jednakże ich awarie niosą ze sobą bardzo poważne konsekwencje zarówno w wymiarze technicznym jak i ekonomicznym. Z tych powodów uzasadnione jest prowadzenie prac naukowo-badawczych nad doskonaleniem technik diagnostycznych, aby możliwa była jak najdłuższa i bezawaryjna eksploatacja, szczególnie jednostek transformatorowych dużej mocy [3, 4, 6].

Jednym z elementów kompleksowej analizy stanu technicznego transformatora elektroenergetycznego jest ocena stanu rdzenia. Powszechnie stosowaną metodą w tym zakresie jest metoda wibroakustyczna, która polega na pomiarze i analizie drgań mechanicznych badanego obiektu. Zaletą metody wibroakustycznej jest możliwość wykonywania pomiarów podczas normalnej pracy transformatora, co stanowi znaczne uproszczenie procedury pomiarowej.

Na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat konstrukcje rdzeni transformatorowych ulegały znaczącym zmianom, co spowodowało konieczność przeprowadzenia badań nad uszczegółowieniem kryteriów służących do interpretacji wyników pomiarowych [5, 6].

W artykule przedstawiono wyniki prac badawczych mających na celu określenie parametrów wibroakustycznych modelu transformatora niskiego napięcia. Analizę wyników przeprowadzono w oparciu o wyznaczenie skutecznej wartości przyspieszenia  $a_{sk}$  oraz analizę częstotliwościową drgań w paśmie  $0 \div 3000$  Hz.

### Kryteria stosowane do oceny stanu technicznego transformatorów elektroenergetycznych badanych metodą wibroakustyczną

W literaturze [1, 2, 7, 8] dostępne są kryteria oceny wyników pomiarowych wyznaczone zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak również na rzeczywistych obiektach energetyki zawodowej. Określono w nich graniczne wartości parametrów wibroakustycznych, jakimi są: skuteczna wartość przyspieszenia  $a_{sk}$  oraz analiza częstotliwościowa drgań w paśmie  $0 \div 3000$  Hz. Wyznaczone w ten sposób wartości progowe mają charakter ogólny, gdyż odnoszą się do szerokiej grupy transformatorów i nie należy ich stosować automatycznie dla każdego przypadku. Analizując wyniki pomiarowe konieczne jest uwzględnienie indywidualnych własności konstrukcyjnych badanej jednostki, a także porównanie otrzymanych rezultatów z wynikami uzyskanymi innymi metodami. W szczególności dotyczy to przypadków, w których należy podjąć decyzję o wyłączeniu transformatora z ruchu energetycznego.

Pierwszym kryterium oceny stanu technicznego transformatorów elektroenergetycznych jest skuteczna wartość przyspieszenia  $a_{sk}$ , która dla sprawnie eksploatowanej jednostki nie powinna przekroczyć wartości progowej  $400 \text{ cm/s}^2$ . Występowanie drgań o wartości skutecznej przyspieszenia powyżej dopuszczalnej może wskazywać na uszkodzenie rdzenia badanego transformatora oraz konieczność jego szczegółowego przeglądu lub remontu.

Drugim kryterium oceny stanu rdzenia transformatorów dużej mocy jest analiza częstotliwościowa drgań w paśmie  $0 \div 3000$  Hz. Z przeprowadzonych prac badawczych wynika, że udziały częstotliwościowe poszczególnych drgań można podzielić na następujące trzy grupy:

- drgania o składowych z zakresu częstotliwości do 500 Hz, które są traktowane jako składowe charakteryzujące drgania magnetostrykcyjne rdzenia;
- drgania o składowych z przedziału  $600 \div 1500$  Hz, które są traktowane jako składowe charakteryzujące pracę urządzeń chłodzących;
- drgania o składowych z zakresu częstotliwości powyżej 1500 Hz, które są traktowane jako składowe charakteryzujące pracę rdzenia – ich występowanie może świadczyć o uszkodzeniu rdzenia.

Przekroczenie wartości przyspieszeń drgań przez dowolną składową z przedziału częstotliwościowego 1500 ÷ 3000 Hz powyżej wartości dopuszczalnych, które przedstawiono w tabeli 1, może świadczyć o możliwości uszkodzenia rdzenia transformatora.

Tabela 1. Graniczne wartości przyspieszeń  $a$  składowych widma drgań w zakresie częstotliwości 1500 ÷ 3000 Hz

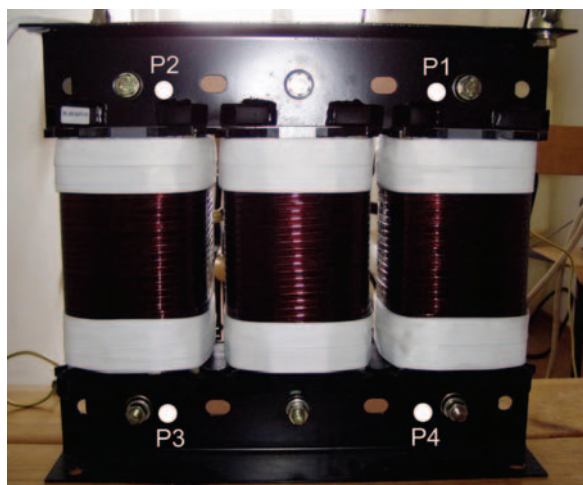
Ocena	Graniczne wartości przyspieszeń $a$ [cm/s <sup>2</sup> ]	
	Transformatory ≤200 MVA	Transformatory > 200 MVA
Transformatory bez uszkodzeń rdzenia	$a \leq 3$	$a \leq 10$
Możliwe rozwijające się uszkodzenie rdzenia	$3 < a \leq 30$	$10 < a \leq 30$
Możliwe uszkodzenia rdzenia	$a > 30$	$a > 30$

Porównanie zmierzonych drgań kadzi transformatora z przyjętymi kryteriami powinno umożliwić wczesne wykrywanie uszkodzeń rdzenia lub innych elementów stanowiących osprzęt badanej jednostki. Poprawnie przeprowadzony pomiar, jak również analiza i interpretacja zarejestrowanych sygnałów wibroakustycznych może pozwolić na określenie stanu technicznego badanego urządzenia oraz prognozowanie jego bezawaryjnego czasu pracy.

#### Metodyka wykonywania pomiarów oraz zastosowana aparatura pomiarowa

Badania przeprowadzono na modelu transformatora, którego widok przedstawiono na rys. 1. Badany transformator charakteryzował się następującymi danymi znamionowymi:

- typ: ET3S-20,
- moc: 20 kVA,
- napięcie znamionowe GN: 3 x 400 V,
- napięcie znamionowe DN: 3 x 20 V,
- prąd znamionowy GN: 17,1 A,
- prąd znamionowy DN: 333 A.
- chodzenie: AN,
- rodzaj pracy: S1.

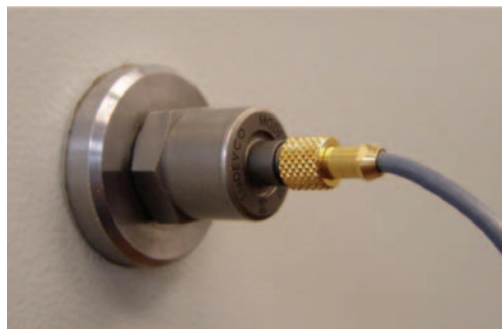


Rys. 1. Badany model transformatora niskiego napięcia z zaznaczonymi punktami pomiarowymi.

Podczas pomiarów obciążenie transformatora zmieniano w zakresie od 0 do 95% jego mocy

znamionowej. Badany model transformatora obciążano za pomocą opornicy wodnej umożliwiającej przepływ prądu w zakresie od 0 do 320 A. Badania przeprowadzono dwuetapowo: pierwszy etap obejmował analizę drgań transformatora przy fabrycznie zmontowanych blachach rdzenia, natomiast drugi etap dotyczył pomiarów przy blachach poluzowanych poprzez rozkręcenie śrub ściskających jarzmo. Przy każdej wartości obciążenia drgania mechaniczne rejestrowano przetwornikiem umieszczonym na rdzeniu transformatora w 4 punktach pomiarowych zaprezentowanych na rysunku 1.

Drgania mechaniczne modelu transformatora mierzono akcelerometrem typu 752-10 firmy Endevco (rys. 2), przymocowanym do rdzenia za pomocą magnesu. Czulość przetwornika pomiarowego wynosiła 1,021 mV/m/s<sup>2</sup> dla 100 Hz.



Rys.2. Widok przetwornika pomiarowego typu 752-10 firmy Endevco

Odbierany przez przetwornik sygnał podawano na wejście niskoszumnego wzmacniacza pomiarowego rodziny Nexus 2693, firmy Brüel & Kjær. W celu odseparowania się od zakłóceń przenoszonych przez sieć niskiego napięcia 230 V, podczas pomiarów układ wzmacniający zasilano z wewnętrznego źródła akumulatorowego. Do obserwacji i rejestracji mierzonych sygnałów drgań wykorzystano komputer wyposażony w kartę pomiarową typu CH 3160 firmy Acquiretek oraz specjalistyczne oprogramowanie AcquiFlex.



Rys. 3. Widok wzmacniacza pomiarowego Nexus 2693 firmy Brüel & Kjær

#### Wyniki pomiarowe

Wyniki uzyskane na podstawie badań wibroakustycznych przedstawiono w tabelach 2 oraz 3. Tabela 2 zawiera wartości skuteczne przyspieszeń drgań  $a_{sk}$  przy rdzeniu fabrycznym, natomiast tabela 3 przedstawia wartości przyspieszeń opowiadające sygnałom zarejestrowanym dla poluzowanych blach rdzenia.

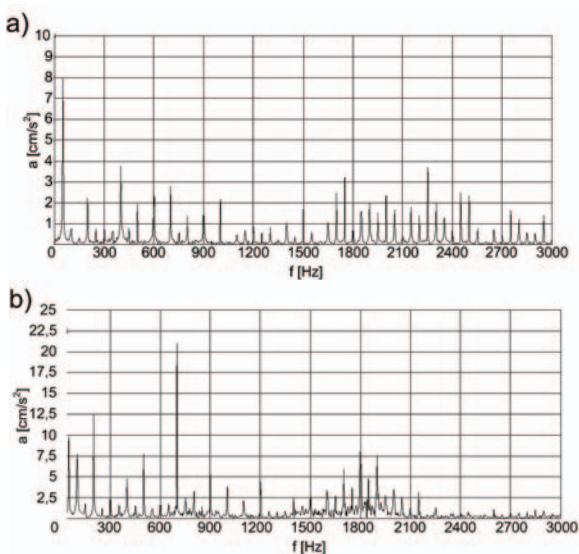
Tabela 2. Wartości skuteczne przyspieszenia drgań  $a_{sk}$  [ $\text{cm/s}^2$ ] dla transformatora z rdzeniem fabrycznym

Lp	Prąd obciążenia [A]	Numer punktu pomiarowego			
		P1	P2	P3	P4
1	0	38,15	68,26	27,18	22,28
2	40	34,47	68,75	26,56	22,19
3	80	32,03	73,15	25,42	21,43
4	120	29,34	65,07	25,41	22,30
5	160	28,89	61,28	26,08	21,12
6	200	30,04	69,01	24,68	20,93
7	240	30,37	63,86	24,15	21,24
8	280	28,50	60,28	26,10	21,66

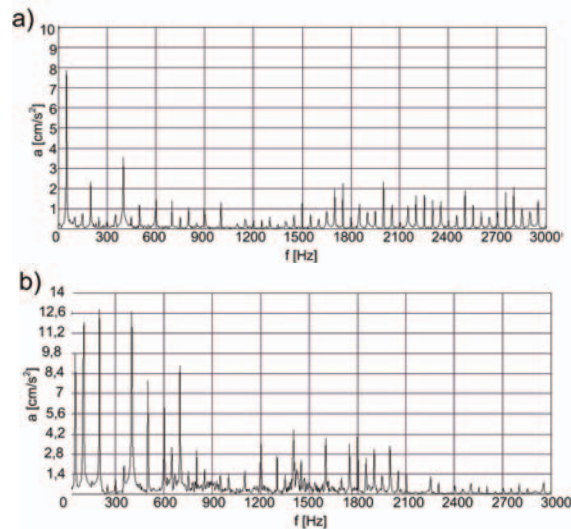
Tabela 3. Skuteczna wartość przyspieszenia drgań  $a_{sk}$  [ $\text{cm/s}^2$ ] dla transformatora z poluzowanymi blachami rdzenia

Lp	Prąd obciążenia [A]	Numer punktu pomiarowego			
		P1	P2	P3	P4
1	0	62,76	54,70	50,46	57,06
2	40	65,61	60,24	49,84	48,90
3	80	58,71	59,34	42,94	55,37
4	120	54,07	61,77	45,50	49,95
5	160	74,72	54,89	48,51	42,57
6	200	68,61	58,85	43,78	44,37
7	240	72,30	59,92	43,89	41,32
8	280	85,73	89,44	58,15	59,13

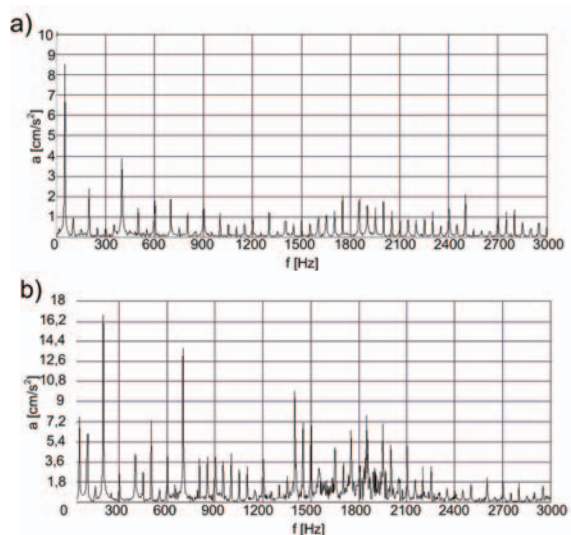
Wyniki analizy częstotliwościowej przedstawiono na rysunkach od 4 do 7.



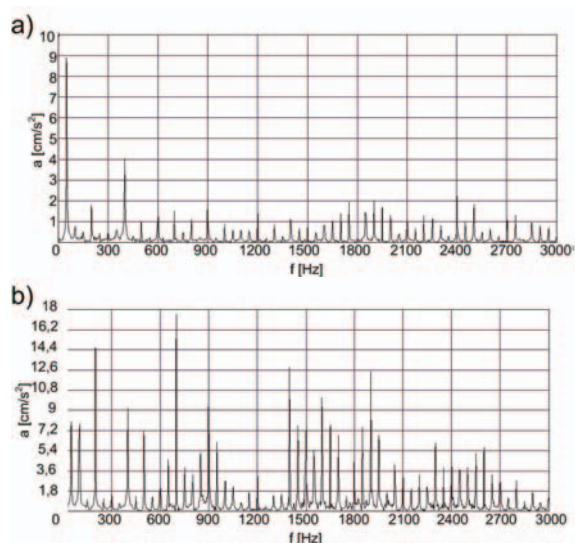
Rys. 4. Widma częstotliwościowe drgań transformatora obciążonego prądem 40 A: a) rdzeń fabryczny, b) poluzowane blachy rdzenia



Rys. 5. Widma częstotliwościowe drgań transformatora obciążonego prądem 120 A: a) rdzeń fabryczny, b) poluzowane blachy rdzenia



Rys. 6. Widma częstotliwościowe drgań transformatora obciążonego prądem 160 A: a) rdzeń fabryczny, b) poluzowane blachy rdzenia



Rys. 7. Widma częstotliwościowe drgań transformatora obciążonego prądem 280 A: a) rdzeń fabryczny, b) poluzowane blachy rdzenia

Analizując wartości skuteczne przyspieszeń wyznaczone w obu badanych przypadkach można zaobserwować, że wraz ze wzrostem obciążenia wartości te zmieniają się nieznacznie. Największe wartości  $a_{sk}$  wyznaczono dla punktu P2, który umieszczony był w górnej części transformatora. W przypadku badania rdzenia z poluzowanymi blachami wyznaczone skuteczne wartości przyspieszeń we wszystkich punktach pomiarowych przyjmują znacznie większe wartości niż w przypadku rdzenia fabrycznego. Wraz ze zmieniającym się obciążeniem różnice pomiędzy wyznaczonymi wartościami są jednak większe niż podczas analizy transformatora z rdzeniem oryginalnie zmontowanym. Pomimo zamodelowania uszkodzenia rdzenia w badanym modelu transformatora żadna wyznaczona wartość przyspieszenia nie przekroczyła ustalonej wartości kryterialnej –  $400 \text{ cm/s}^2$ . Można więc uznać, że przyjęte wartości kryterialne dotyczą zbyt szerokiej grupy transformatorów i konieczne jest przeprowadzenie badań zmierzających do uściślenia tego kryterium.

Wyniki analizy częstotliwościowej przedstawiono na przykładzie widm wyznaczonych dla punktu P1 przy czterech wybranych wartościach obciążenia, dla transformatora z rdzeniem fabrycznym i poluzowanym. Analiza wykazała znaczne różnice pomiędzy widmami wyznaczonymi dla transformatora w obu analizowanych przypadkach. Różnice te widoczne są w całym paśmie częstotliwości. W przypadku rdzenia poluzowanego widoczny jest znaczny udział składowych z pasma powyżej 1500 Hz, co zgodnie z przyjętymi kryteriami świadczy o uszkodzeniu rdzenia.

#### Podsumowanie

Przeprowadzone prace naukowo-badawcze wykazały potrzebę przeprowadzenia dodatkowych badań mających na celu uściślenie obecnie wykorzystywanych kryteriów pomiarowych. Czynnikiem określającym dużą skuteczność metody wibroakustycznej w ocenie stanu technicznego rdzenia jest częstość (okresowość) badań diagnostycznych transformatorów dużych mocy. Pozwala to na zobrazowanie dynamiki zmian wstępowania poszczególnych składowych częstotliwościowych, a nie wyłącznie bezwzględnych wartości amplitud w widmie. Przyjęcie takiej metodyki może umożliwić efektywną diagnostykę i obserwację ewentualnych zmian parametrów

wibroakustycznych rdzeni badanych jednostek transformatorowych.

Praca finansowana ze środków na naukę jako projekt badawczy nr R01 006 01 oraz nr N511 019 31/3638

#### LITERATURA

- [1] Borucki S., Boczar T., Cichoń A., Pomiary drgań wibroakustycznych transformatorów dużej mocy, *Energetyka*, Zeszyt tematyczny nr XI, str.39-43
- [2] Boczar T., Borucki S., Cichoń A., Lorenc M., Diagnostics of the technical condition of power transformers based on the analysis of vibroacoustic oscillation, *36<sup>th</sup> Int. Conference and Exhibition, Defektoskopie*, 2006, Nov. 7-9, pp. 37-43
- [3] Grossman E., Feser K., Online Pd-Monitoring on Transformers Using AE Techniques, *Int. Conf. APTADM2001*, Wrocław, 2001, pp. 264-268
- [4] Lipowczasn A., *Wibroakustyczna diagnostyka maszyn i urządzeń górniczych*, GIG, Katowice 1986
- [5] Mościska-Grzesiak H. (red.), *Inżynieria wysokich napięć w elektroenergetyce*, tom 1, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 1996
- [6] Praca zbiorowa. *Transformatory w eksploatacji* wyd. Energo-Complex, kwiecień 2007
- [7] Skubis J., *Badania wibroakustyczne i ocena wyładowań niepełnych w transformatorach blokowych I i II bloku w Elektrowni „Opole” S.A.*, Praca naukowo-badawcza, Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Opole 1998.
- [8] Skubis J., Jezierski G., Dwojak J., Rzepiela M., Pomiary drgań transformatora dużej mocy, *Wiadomości Elektrotechniczne*, nr 4, 2000

---

#### Autorzy:

dr hab. inż. Tomasz Boczar – prof. nadz. PO, Politechnika Opolska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Sosnkowskiego 31, 45-272 Opole, E-mail: [t.boczar@po.opole.pl](mailto:t.boczar@po.opole.pl)

mgr inż. Sebastian Borucki, Politechnika Opolska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Sosnkowskiego 31, 45-272 Opole, E-mail: [s.borucki@po.opole.pl](mailto:s.borucki@po.opole.pl)

mgr inż. Andrzej Cichoń, Politechnika Opolska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Sosnkowskiego 31, 45-272 Opole, E-mail: [a.cichon@po.opole.pl](mailto:a.cichon@po.opole.pl)

dr inż. Marcin Lorenc, Politechnika Opolska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Sosnkowskiego 31, 45-272 Opole, e-mail: [lem@op.home.pl](mailto:lem@op.home.pl)