

Zastosowanie wibroakustyki w diagnostyce podobciążeniowego przełącznika zacze­pów

Streszczenie. W artykule przedstawiono możliwości zastosowania wibroakustyki w diagnostyce podobciążeniowego przełącznika zacze­pów. Zidentyfikowano korelacje występujące pomiędzy zapisem wibroakustycznym, a charakterystyką czasów własnych, a także zaprezentowano przebiegi wibroakustyczne zarejestrowane podczas pracy różnych typów podobciążeniowych przełączników zacze­pów.

Abstract. This paper shows possibilities of vibroacoustic measurement application for diagnosis of on-load tap charger. Correlations between vibroacoustic characteristics and winding resistance measurements has been identified. Vibroacoustic characteristics recorded during the work of different types of on-load tap changers has been also presented. (**Application vibroacoustic in the diagnosis of on-load tap charger.**)

Słowa kluczowe: diagnostyka, podobciążeniowy przełącznik zacze­pów, wibroakustyka, pomiar czasów własnych

Keywords: diagnosis, on-load tap changer, vibro-acoustics, winding resistance measurement

Wstęp

Przełącznik zacze­pów stanowi nieodzowną część transformatora energetycznego. Przełączniki zacze­pów, współpracując z systemami regulacji rozptywu mocy biernej, zapewniają utrzymywanie odpowiednich wartości napięcia u odbiorców przy jednoczesnym zapewnieniu wysokiej niezawodności systemu elektroenergetycznego i niskich strat przesyłowych.

Zmiany przekładni transformatora można dokonać pod obciążeniem lub w stanie beznapięciowym. Regulację beznapięciową stosuje się w transformatorach SN/nn. Wadą takiego rozwiązania jest konieczność odłączenia transformatora z sieci dystrybucyjnej, dlatego zmiany dokonywane są wyłącznie sezonowo – na wiosnę i na jesieni.

Podobciążeniowe przełączniki zacze­pów (PPZ) znajdują zastosowanie w transformatorach WN/SN. Transformatory te, ze względu na funkcję pełnioną w systemie elektroenergetycznym, muszą pozwalać na regulację napięcia bez odłączania obciążenia.

Obecnie stosowane konstrukcje podobciążeniowych przełączników zacze­pów pozwalają na regulację napięcia w zakresie $\pm 20\% U_N$.

Podział PPZ

Wśród konstrukcji podobciążeniowych przełączników zacze­pów wyróżnia się [1]:

1. Przełączniki olejowe:
 - z osobnym przełącznikiem mocy i kłatką wybierakową,
 - typu wybierakowego,
2. przełączniki próżniowe,
3. przełączniki tyrystorowe.

Przełączniki olejowe są najstarszym, jednak wciąż najpopularniejszym rozwiązaniem w polskim systemie elektroenergetycznym. Konstrukcje z osobnym przełącznikiem mocy i kłatką wybierakową cechuje przede wszystkim zdolność do przenoszenia wysokich prądów znamionowych. Przełączenie zacze­pów odbywa się dwuetapowo. W pierwszym etapie, w klatce wybierakowej, dokonywana jest beznapięciową zmiana zacze­pu. Kolejnym etapem jest wykonanie przełączenia styków, które odbywa się w przełączniku mocy. Wykonanie tego przełączenia wymaga uwolnienia odpowiedniej energii, która wcześniej została zmagazynowana w napędzie sprężynowym przełącznika mocy. Proces zmiany styków w przełączniku mocy trwa około 40-60 ms, zaś czas niezbędny na przełączenie zacze­pów, zawiera się w przedziale od 3 do 10 s [1].

Przełączniki typu wybierakowego pozwalają na przenoszenie niższych prądów znamionowych. W odróżnieniu od konstrukcji z osobnym wybierakiem, nie posiadają one osobnego przełącznika mocy, dlatego proces przełączania zacze­pów zachodzi jednoetapowo i dokonuje się bezpośrednio na stykach wybieraka. W pierwszej fazie przełączania zacze­pów załączony zostaje pierwszy ruchomy styk rezystancyjny do styku stałego wybieraka, odłączony zaś zostaje styk główny. Kolejno, drugi styk rezystancyjny przemiesza się w stronę docelowego styku stałego wybieraka i zostaje do niego załączony. Wówczas następuje przepływ prądu zwarcia międzyzwojowego, ograniczonego poprzez rezystory. Następnie odłączony zostaje pierwszy styk rezystancyjny i załączony zostaje styk główny. Ostatnią fazą procesu przełączania zacze­pów jest odłączenie drugiego styku rezystancyjnego.

Przełączniki próżniowe są konstrukcjami stosunkowo nowymi. Cechuje je długa żywotność oraz bezobsługowość. Główną ich zaletą jest gaszenie łuku elektrycznego w komorach próżniowych a nie w oleju, który w wypadku wylęgników olejowych z czasem ulegał zanieczyszczeniu i wymagał wymiany.

Podobnie jak w przypadku przełączników olejowych, prąd zwarcia międzyzwojowego jest ograniczany przez rezystory lub cewki. Zasady działania poszczególnych konstrukcji próżniowych PPZ zostały przedstawione w pozycji [2].

Awarie i diagnostyka PPZ

Przyjmuje się, że około 40% awarii transformatorów spowodowanych jest uszkodzeniem PPZ [1]. Tym samym utrzymanie poprawnego stanu technicznego PPZ odgrywa istotną rolę w procesie zapewniania ciągłości dostaw energii elektrycznej.

Wśród przyczyn awarii PPZ można wyróżnić 3 główne grupy związane z [1]:

1. uszkodzeniem napędu przełącznika,
2. uszkodzeniem układu izolacyjnego,
3. uszkodzeniem lub zużyciem styków przełącznika.

Należy przy tym pamiętać, że konsekwencje finansowe awarii nie obejmują tylko kosztów związanych z naprawą lub wymianą samego urządzenia, lecz także z rekompensatą strat powstałych na skutek niedostarczenia energii elektrycznej do odbiorców.

Mając na uwadze powyższe kwestie, istnieje realna potrzeba zapewnienia poprawnej pracy PPZ. Z tego względu wykonuje się przeglądy wewnętrzne, zgodnie z instrukcją fabryczną przełącznika. W pozycji [3] podaje się,

że należy dokonywać przeglądu co 15 tys. przełączeń, jednak nie rzadziej niż 3 lata.

Praktyka eksploatacyjna pokazuje natomiast, że w przypadku nowych konstrukcji, wystarczające jest wykonywanie przeglądów co 70 tys. – 100 tys. przełączeń, nie rzadziej niż 7 lat lub co 150 tys. przełączeń, nie rzadziej niż co 12 lat [4].

Sprawdzenie PPZ po wykonaniu przeglądu wewnętrznego obejmuje [4]:

- pomiar przekładni transformatora,
- pomiar czasów własnych przełącznika mocy,
- pomiar czasów własnych klatki wybierakowej,
- pomiar mocy pobieranej przez napęd PPZ,
- sprawdzenie działania PPZ w stanie jałowym,
- próbę prądową PPZ.

Ponadto, zalecane przez producentów jest również okresowe badanie oleju. Operatorzy jednak nie wykonują tego typu badań. Ze względu na wysoki stopień zanieczyszczenia oleju produktami, powstającymi na skutek palenia się łuku elektrycznego, dokonuje się jego wymiany.

Obecnie diagnostyka podobciążeniowych przełączników zacsepów wymaga wyłączenia transformatora z ruchu. Przy ogólnej tendencji do ograniczania kosztów związanych z obsługą urządzeń nieinwazyjne badania lub monitorowanie PPZ są bardzo atrakcyjne.

Diagnostykę urządzeń należy rozpatrywać poprzez pryzmat trzech głównych zagadnień:

1. diagnoza – ocena obecnego stanu technicznego urządzenia,
2. geneza – przyczyna obecnego stanu technicznego urządzenia,
3. prognoza – perspektywa czasowa zmiany stanu technicznego urządzenia.

Obecnie do diagnostyki PPZ wykorzystuje się przede wszystkim [7]:

1. analizę termowizyjną,
2. metodę DGA,
3. wyznaczanie charakterystyki zmian prądu określającej czasy własne PPZ,
4. analizę amplitudy prądu silnika.

Wykorzystanie analizy termowizyjnej pozwala na wykrycie problemów z przegrzewaniem się przełącznika.

Z kolei metoda DGA, poza możliwością ujawnienia problemów na tle temperaturowym, pozwala dodatkowo na wykrycie produktów spalania powstałych w wyniku palenia się łuku elektrycznego. Nie mniej jednak metoda DGA nie posiada zastosowania we wszystkich typach przełączników olejowych i wymaga najczęściej wyłączenia transformatora, w celu pobrania próbki z głowicy przełącznika mocy. Wyjątek, w którym wyłączenie transformatora z ruchu nie jest wymagane, stanowią konstrukcje, w których kurek został wyprowadzony do poziomu obsługi [7].

Pomiar czasów własnych pozwala na uzyskanie informacji dotyczącej czasu przełączania i co za tym idzie informacji na temat styków i ich ewentualnych defektów.

Zaletą analizy amplitudy prądu silnika jest możliwość znalezienia uszkodzeń natury mechanicznej związanej z procesem przełączania.

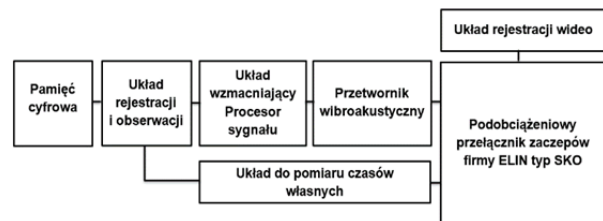
Wyróżnikiem metody wibroakustycznej na tle pozostałych metod stosowanych w diagnostyce PPZ jest możliwość oceny stanu zarówno przełącznika mocy, jak i klatki wybierakowej bez konieczności wyłączenia urządzenia z ruchu.

Przykładem systemu do diagnostyki podobciążeniowych przełączników zacsepów wykorzystującego metodę wibroakustyczną jest analizator TAP-4 kanadyjskiej firmy Zensol. Posiada on 4 wejścia sygnałowe, pozwalając tym samym na podłączenie 3 niezależnych przetworników wibroakustycznych i jednej sondy do pomiaru prądu silnika.

Pozwala on na diagnozę defektów takich jak: zużycie styków, palenie się łuku w przełączniku mocy i klatce wybierakowej, uszkodzenia napędu. Urządzenie wyposażone jest w bazę sygnałów wibroakustycznych przełączników producentów MR Reinhausen, ABB, Ferranti, Federal Pioneer i innych – łącznie ponad 70 modeli PPZ [8]. Rejestracja sygnału odbywa się z częstotliwością 100 kHz.

Układ pomiarowy

Rejestrowanie charakterystyk wibroakustycznych realizowano w układzie przedstawionym schematycznie na rysunku 1. Wyodrębnienie z zarejestrowanego sygnału charakterystycznych fragmentów odpowiadających kolejnym fazom pracy przełącznika mocy wymagało rozbudowania układu o człon odpowiedzialny za pomiar czasów własnych przełącznika oraz rejestrację wideo. Filmowanie ruchu mechanizmu przełącznika mocy było możliwe tylko w laboratorium. Autorzy dysponowali bowiem wymontowanym z transformatora podobciążeniowym przełącznikiem zacsepów. W przypadku przełączników zainstalowanych w transformatorach rejestracja wideo realizowanej przez przełącznik mocy sekwencji przełączania nie była możliwa.



Rys.1. Schemat układu pomiarowego

W skład omawianego układu badawczego wchodzi:

- system pomiarowy SIRUSm-4xACC firmy Dewesoft,
 - analizator czasów własnych TWA40D, firmy DV-Power,
 - jednoosiowy przetwornik wibroakustyczny firmy Meggitt Sensing Systems, o czułości 1000 mV/g,
 - przetwornik wibroakustyczny firmy Handsford Sensors, pozwalający na rejestrację sygnału we wszystkich trzech osiach, o czułości 500 mV/g,
 - kamera do zdjęć szybkich Nikon 1, umożliwiająca rejestrację obrazu z prędkością 300 klatek na sekundę.
- Tak skonstruowany układ pozwolił na rejestrację i powiązanie ze sobą:
- charakterystyki wibroakustycznej,
 - czasów własnych,
 - zapisu wideo z pracy przełącznika mocy.

Obiekty badań

Obiektami badań były cztery podobciążeniowe przełączniki zacsepów:

- przełącznik olejowy, model SKO firmy ELIN, który dostępny był w laboratorium po wymontowaniu go z transformatora,
- przełącznik próżniowy, model VACUTAP VM IIIY firmy Reinhausen,
- przełącznik olejowy typu wybierakowego, model UBB firmy ABB,
- przełącznik olejowy firmy ELTA, model EyE27.

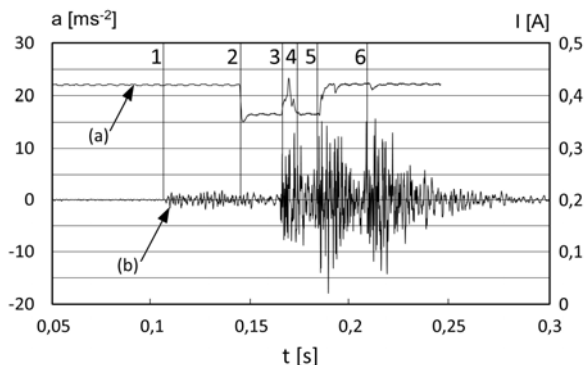
Wyniki badań

Pierwsza część badań została poświęcona ustaleniu charakterystycznych zjawisk, jakie zachodzą podczas działania przełącznika mocy oraz identyfikacji charakterystycznych obszarów rejestrowanych sygnałów, które tym zjawiskom odpowiadają. Autorzy dysponowali wymontowanym z transformatora przełącznikiem zacsepów, co umożliwiło uchylenie górnej pokrywy i

rejestrację wideo ruchu styków kamerą do zdjęć szybkich. Jednoczesna rejestracja prądu płynącego przez uzwojenia (pomiar czasów własnych metodą oscylograficzną) oraz pomiar amplitudy drgań wywołanych pracą przełącznika umożliwiły ustalenie charakterystycznych stref w rejestrowanych sygnałach. Należy jednak zaznaczyć, że nie każde zjawisko, jakie zachodzi w przełączniku mocy znajduje odwzorowanie na wszystkich charakterystykach.

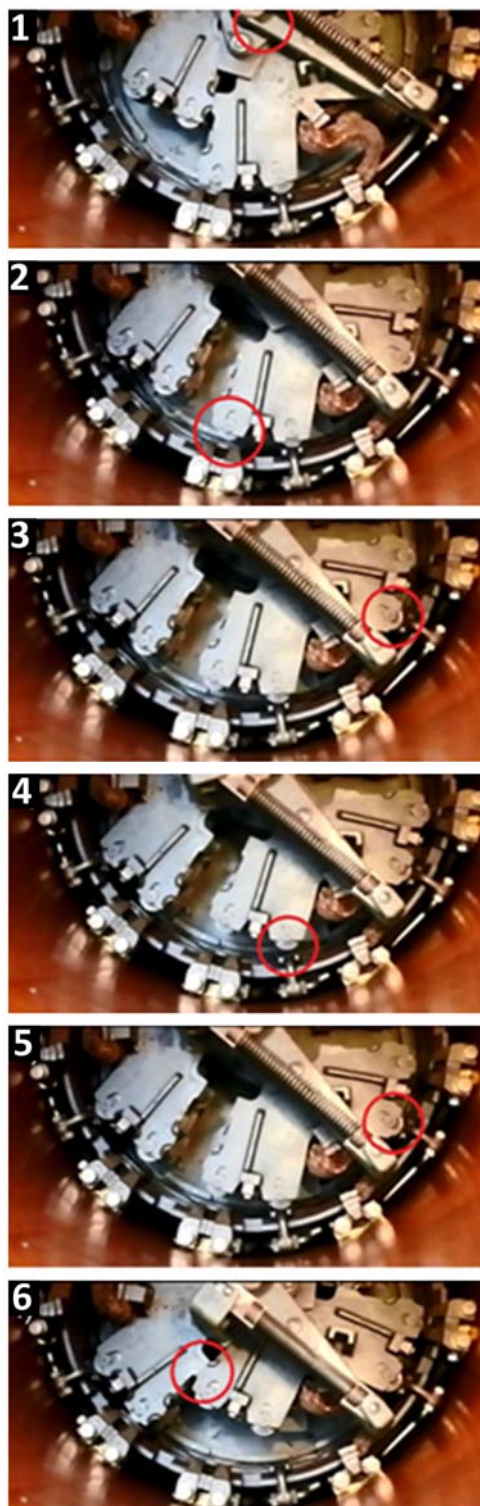
Na rysunku 2 przedstawiono zestawienie charakterystyki wibroakustycznej z charakterystyką pomiaru czasów własnych przełącznika zarejestrowanych podczas przełączenia pomiędzy zaczepek 5 a 6. Ponadto, zaznaczono chwile czasowe (od 1 do 6), które odpowiadają następującym fazom pracy przełącznika mocy:

1. zwolnienie mechanizmu i uwolnienie energii zgromadzonej w sprężynie napinacza – przebieg czasowy przyspieszenia drgań jest charakterystyczny dla wibrującej sprężyny,
2. odłączenie pierwszego styku głównego – to zdarzenie powoduje spadek wartości prądu, jednak nie ma odzwierciedlenia na charakterystyce wibroakustycznej,
3. załączenie drugiego styku oporowego – to zdarzenie powoduje wzrost prądu oraz wyraźną zmianę na charakterystyce wibroakustycznej w postaci tłumionego impulsu,
4. odłączenie pierwszego styku oporowego – charakteryzuje je spadek prądu, jednak odłączanie styku nie powoduje wyraźnych zmian w charakterystyce wibroakustycznej,
5. załączenie drugiego styku głównego – wyraźny impuls wibroakustyczny oraz wzrost prądu,
6. zderzenie segmentów, na których zamontowane są styki ruchome – wyraźny impuls wibroakustyczny, brak zmian wartości prądu (proces przełączania zaczepek zakończył się już w punkcie 5, zderzenie segmentów to ustawienie się przełącznika w pozycji wyjściowej do następnego przełączania).



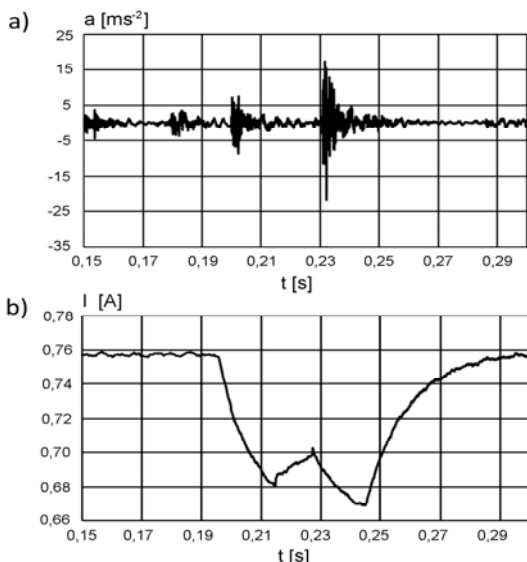
Rys.2. Prąd rejestrowany podczas badań czasów własnych (a) oraz przyspieszenie drgań (b) mierzone akcelerometrem w zależności od czasu, dla przełącznika typu SKO – przełączenie z zaczepek 5 na 6 (fotografie obrazujące zdarzenia od 1 do 6 przedstawia rysunek 3)

Powiązanie powyższych charakterystyk było możliwe dzięki zastosowaniu rejestracji pracy przełącznika za pomocą kamery wideo pozwalającej na zapis z prędkością 300 klatek na sekundę. Uzyskano w ten sposób nagranie umożliwiające identyfikację kolejnych faz pracy przełącznika mocy. Kolejne etapy przełączania zaczepek przedstawiono na rysunku 3. Analizując informacje zobrazowane na rysunkach 2 i 3 można dojść do wniosku, że widoczne w sygnale wibroakustycznym impulsy są powodowane zawsze zderzeniami elementów (np. załączenie styku oporowego, załączenie styku głównego, zderzenie segmentów przełącznika), natomiast rozwieranie styków nie powoduje pojawiania się wyraźnych impulsów w sygnale wibroakustycznym.

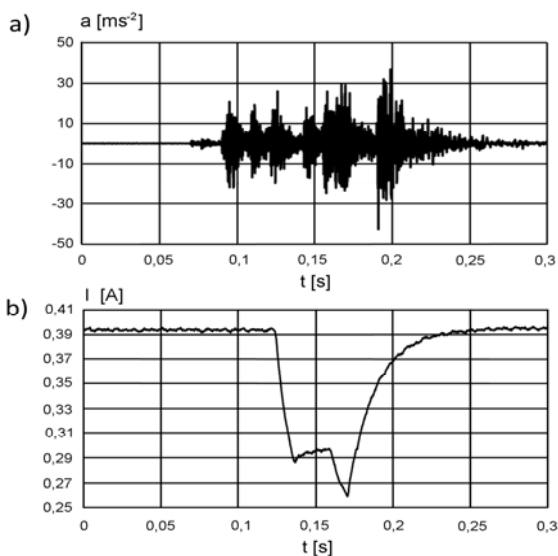


Rys.3. Kolejne fazy pracy przełącznika mocy: 1) zwolnienie mechanizmu, 2) odłączenie pierwszego styku głównego, 3) załączenie drugiego styku rezystancyjnego, 4) odłączenie pierwszego styku rezystancyjnego, 5) załączenie drugiego styku głównego, 6) zderzenie się segmentów przełącznika mocy

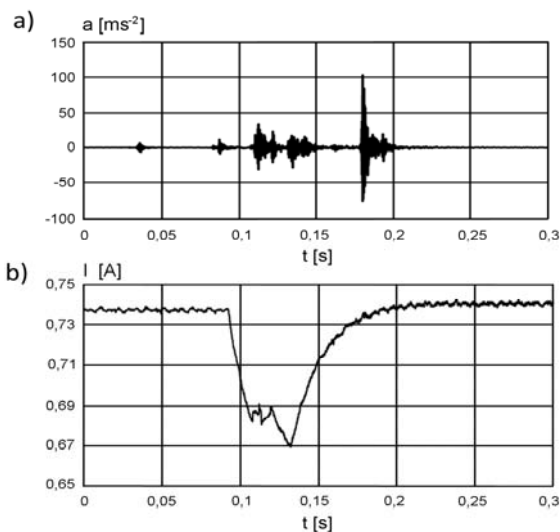
W drugiej części pracy przedstawiono charakterystyki czasowe zmian prądu oraz drgań zarejestrowane dla przełączników zaczepek różnych typów, zainstalowanych w transformatorach pracujących na biegu jałowym. W tym wypadku, ze względu na brak możliwości sfilmowania pracy przełącznika mocy, zsynchronizowanie czasowe rejestrowanych przebiegów jest bardzo utrudnione. Zarejestrowane charakterystyki zostały przedstawione na rysunkach od 4 do 6.



Rys.4. Przyspieszenie drgań (a) oraz prąd rejestrowany podczas badań czasów własnych (b) w zależności od czasu, dla przełącznika typu MR Vacutap VM III 300Y



Rys.5. Przyspieszenie drgań (a) oraz prąd rejestrowany podczas badań czasów własnych (b) w zależności od czasu, dla przełącznika ABB typu UBB



Rys.6. Przyspieszenie drgań (a) oraz prąd rejestrowany podczas badań czasów własnych (b) w zależności od czasu, dla przełącznika ABB typu UBB EyE27

Można zauważyć, że dla konstrukcji różnych typów mimo podobieństw w charakterystykach prądowych sygnały wibroakustyczne mogą się od siebie zdecydowanie różnić. Różnice te powodują, że bazując na wnioskach płynących z pierwszej części pracy nie można zsynchronizować tych przebiegów.

Wnioski

W wypadku przełącznika typu SKO na podstawie synchronizacji danych pochodzących z trzech niezależnych badań (zapisu wibroakustycznego, charakterystyki czasów własnych, wideo rejestracji z dużą prędkością zapisu) określono chwile czasowe, w których na obrazie wibroakustycznym odzwierciedlone są poszczególne fazy pracy przełącznika mocy.

Na zarejestrowanych zależnościach przyspieszenia drgań od czasu, powstających w trakcie pracy przełącznika mocy, występują trzy charakterystyczne impulsy generowane w trakcie uderzania styków ruchomych w nieruchome oraz podczas zderzania się segmentów, na których umieszczone są styki ruchome.

W wypadku konstrukcji innych badanych typów przełączników istnieje duże zróżnicowanie kształtów rejestrowanych impulsów wibroakustycznych. Zatem istotną kwestią dla dalszego rozwoju przedstawionej metody będzie opracowanie algorytmu, na bazie którego będzie realizowana ocena stanu przełącznika. Jednak już w chwili obecnej możliwa jest ocena porównawcza (w tym wypadku konieczna jest znajomość zależności przyspieszenia drgań od czasu dla nowych przełączników, którą można wykorzystać jako materiał do porównań).

Artykuł jest finansowany z Dotacji na utrzymanie potencjału badawczego oraz na badania naukowe nr 04/41/DSPB/4345 pt.: „Rozwój zaawansowanych metod diagnostycznych i oceny stanu układu izolacyjnego transformatorów energetycznych”.

Autorzy: mgr inż. Marcin Raclaw Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, marcin.raclaw@doctorate.put.poznan.pl; dr hab. inż. Jarosław Gielniak, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: jaroslaw.gielniak@put.poznan.pl

LITERATURA

- [1] Cichoń A., Nowa metoda diagnostyki stanu technicznego podobciążeniowego przełącznika zaczepów, *Oficina Wydawnicza Politechniki Opolskiej*, Opole 2011
- [2] Dohnal D., On-load tap-changers for power transformers, Maschinenfabrik Reinhausen GmbH, Regensburg, Germany 2013
- [3] Ramowa Instrukcja Eksploatacji Transformatorów, *Energopomiar-Elektryka*, Gliwice 2012
- [4] Rachaus-Lewandowska W., Jakubowski J., Doświadczenia w eksploatacji podobciążeniowych przełączników zaczepów w RWE Stoen Operator, *Międzynarodowa Konferencja Transformator'15*, Gdańsk, 12-14 maja 2015, 173-178
- [5] Cichoń A., Mański P., Borucki S., Doświadczenia eksploatacyjne z diagnostyki podobciążeniowych przełączników zaczepów metodą emisji akustycznej, *Międzynarodowa Konferencja Transformator'15*, Gdańsk, 12-14 maja 2015, 179-186
- [6] Brikci F., Vibro-Acoustic Testing Applied on Tap Changers and Circuit Breakers, www.zensol.com/pdf/Article-TechCon-2010_PDF, dostęp: czerwiec 2018
- [7] Szymańska-Świątek M., Zastosowanie analizy DGA do oceny stanu technicznego PPZ, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015) nr 2, 5-9
- [8] Strona producenta analizatora TAP-4 <http://www.zensol.com/en/product/on-load-tap-changer-analyzer-tap-4/>, dostęp: czerwiec 2018