



Energia. Transformacja. Jakość. Doświadczenie.

Omówienie kompleksowych pomiarów podobciążeniowych przełączników zaczepów

XIV KONFERENCJA NAUKOWO-TECHNICZNA
TRANSFORMATORY ENERGETYCZNE I SPECJALNE
ZREW

dr inż. Zbigniew Szymański

Zakład Pomiarowo-Badawczy Energetyki **ENERGOPOMIAR-ELEKTRYKA** Spółka z o.o.

www.elektryka.com.pl

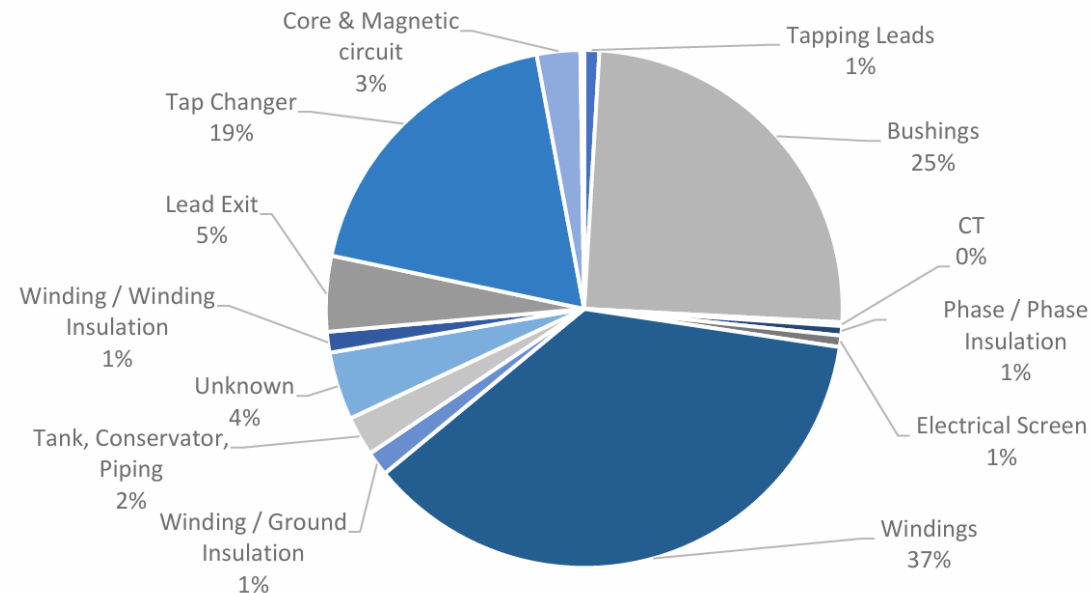


Wstęp

Przełącznik zaczepów składa się z trzech podstawowych elementów (napęd, przełącznik mocy i klatka wybierakowa).

Każdy z tych elementów spełnia swoją rolę w określonym czasie cyklu przełączania a efektem tego wspólnego działania jest dokonanie przełączenia na kolejny zaczepek.

Podobciążeniowe przełączniki zaczepów są jednym z bardziej awaryjnych elementów wyposażenia zamontowanych na transformatorze. Wykres awaryjności opracowany przez grupę roboczą Cigre A2.62 na podstawie 848 przypadków awarii przedstawiono na rysunku 1.



Rysunek 1 Wykres awaryjności elementów transformatora CIGRE 2024 [9]



Wstęp

Z przedstawionego na rysunku 1 wykresu wynika, że przełącznik zaczepów jest jednym z trzech najbardziej awaryjnych elementów transformatora.

Stąd dużą uwagę poświęca się kontroli podobciążeniowych przełączników zaczepów w eksploatacji. W opracowaniu opisano metodę kompleksowego pomiaru podobciążeniowego przełącznika zaczepów, która umożliwia wykonanie oceny stanu technicznego.

Wykonanie pomiarów wymaga sprowadzenia sygnałów akustycznych i elektrycznych z przełącznika zaczepów do analizatora firmy **Zensol typu TAP-X**. Analiza wyników jest wykonywana w oparciu o zamieszczone w opracowaniu kryteria. Zaprezentowano liczne przypadki defektów wykrytych omówioną metodą pomiarową.



Omówienie układu pomiarowego

Wykonanie kompleksowego pomiaru wymaga wcześniejszego **przygotowania układu pomiarowego**. W celu wykonania pomiarów konieczne jest sprowadzenie sygnałów:

- **prądowego** z napędu,
- **akustycznego** z kadzi transformatora,
- sygnału prądowego **z układu pomiarowego** umożliwiającego pomiar czasów własnych PPZ.

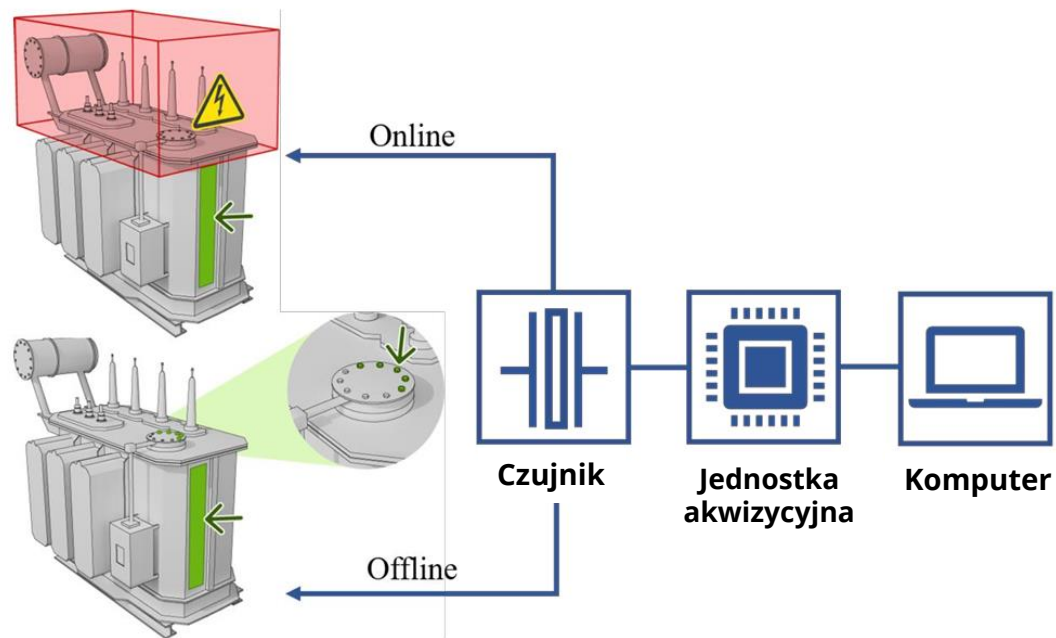
Sygnał prądowy z napędu otrzymywany jest z przekładnika prądowego zamontowanego na czas prób w jednej z faz silnika napędu.

Sygnał wibroakustyczny jest dostarczony z czujnika zamontowanego na płaszczu kadzi lub na głowicy przełącznika mocy. Wybór miejsca montażu czujnika jest zależny od tego czy transformator jest pod napięciem czy jest wyłączony.



Omówienie układu pomiarowego

Konfiguracje układów pomiarowych dla obu przypadków przedstawiono na Rysunku 2.

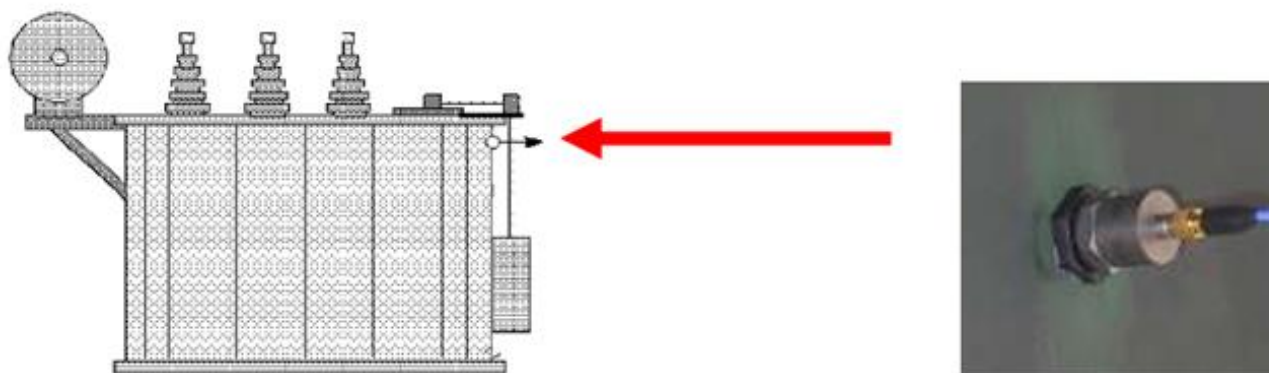


Rysunek 2 Rozmieszczenie czujników w trakcie pomiarów wibroakustycznych VAM i jednostki akwizycyjnej. [1]



Omówienie układu pomiarowego

Miejsce i widok zamontowanego czujnika przedstawiono na Rysunku 3.

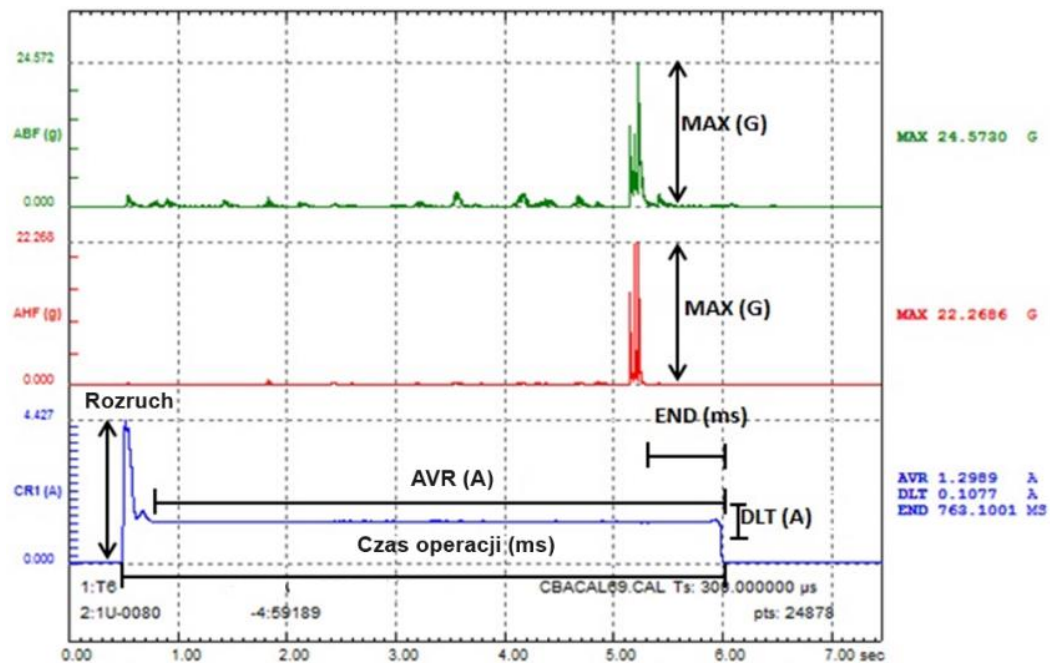


Rysunek 3 Widok kadzi z zaznaczonym miejscem montażu czujnika i jego widok. Pomiar drgań jest wykonywany akcelerometrem i zapisywany w jednostkach przyspieszenia. Sygnały drgań i prądu próbkowane są z częstotliwością 100000 próbek/sekundę. Taka częstotliwość pozwala na właściwe odwzorowanie sygnału akustycznego. Po rejestracji następuję **analiza sygnałów**, polegająca na **obliczaniu obwiedni przebiegów**.



Omówienie układu pomiarowego

Widok okna przedstawiającego pomiar wibroakustyczny i pomiar prądu pobieranego przez napęd PPZ przedstawiono na Rysunku 4.



Rysunek 4 Widok okna z pomiarem wibroakustycznym i pomiarem prądu pobieranego przez napęd [7]



Omówienie układu pomiarowego

W oknie przedstawiono sygnał akustyczny przy niskiej i wyższej częstotliwości.

Doświadczenie pokazało, że **zjawiska mechaniczne mają tendencję do pojawiania się w obwiedni niskich częstotliwości** (pomiędzy 2 a 10 kHz), **podczas gdy zjawiska elektryczne** (łuki elektryczne) **pojawiają się w obwiedni wysokich częstotliwości** (pomiędzy 10 a 20 kHz).

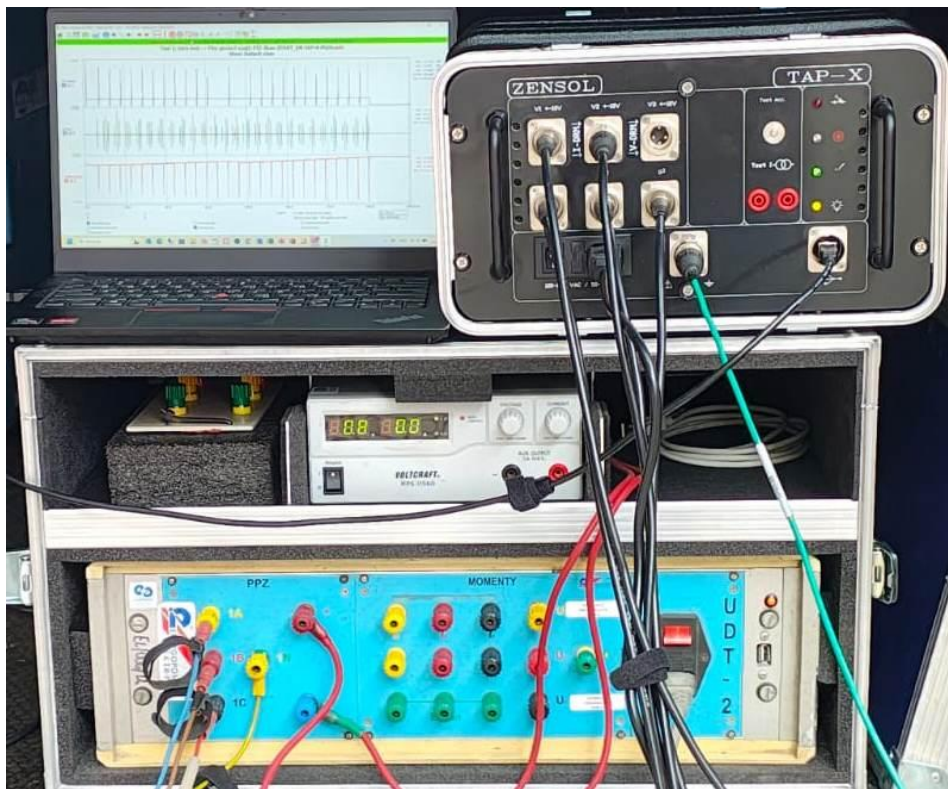
W dalszej analizie zostanie przedstawione wykorzystanie praktyczne rozbicia sygnału do celów diagnostycznych.

Kolejnym pomiarem, o który został rozbudowany analizator TAP-X jest możliwość wykonania pomiarów czasów własnych przełącznika zaczepek oraz pracy klatki wybierakowej przez wprowadzenie sygnału prądu z miernika UDT-2 na wejście prądowe TAP-X.



Omówienie układu pomiarowego

Widok zestawu mierników do kompleksowych podobciążeniowego przełącznika zacze-
pów przedstawiono na Rysunku 5.

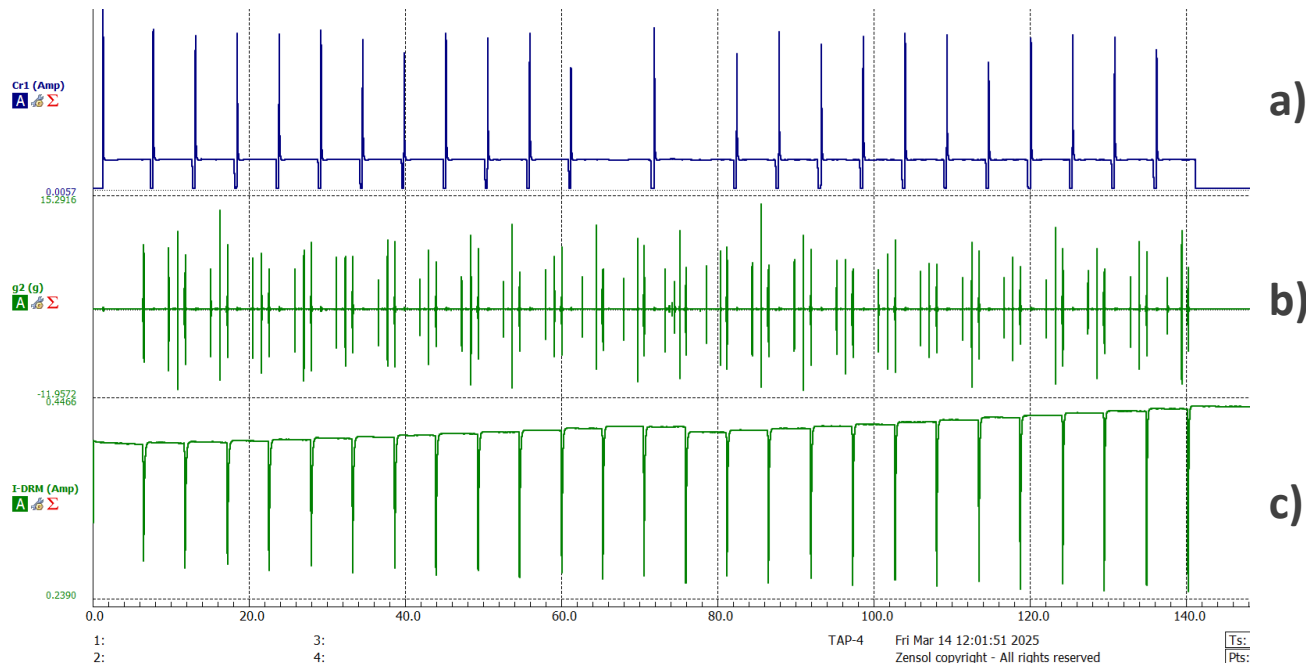


Rysunek 5 Widok zestawu mierników do pomiarów kompleksowych podobciążeniowego przełącznika zacze-
pów



Omówienie układu pomiarowego

Wprowadzenie dodatkowego sygnału prądowego z miernika UDT-2 pozwoliło na **jednoczesny pomiar sygnału akustycznego, pomiar prądu pobieranego przez napęd i prądu w czasie cyklu przełączania przełącznika zacze**pów. Widok ekranu z zapisem trzech parametrów przedstawiono na Rysunku 6.



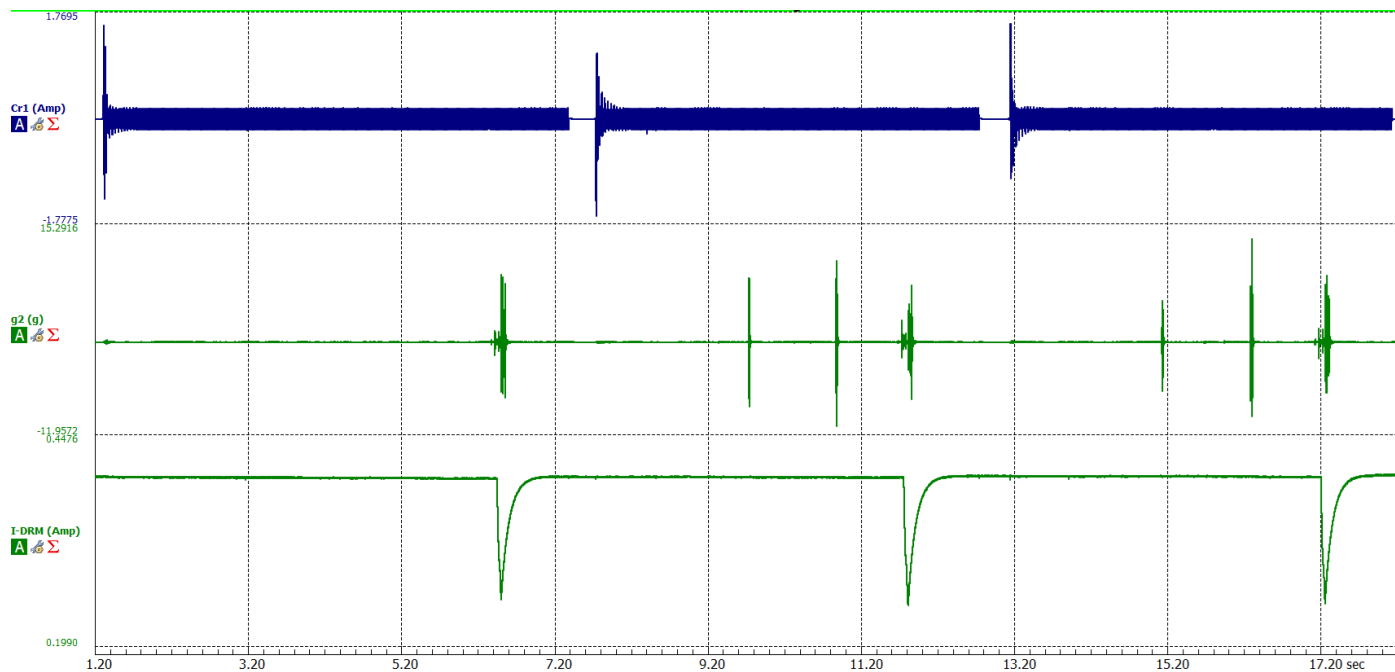
Rysunek 6 Widok okna z wynikami pomiarów PPZ:

- a) przebieg prądu pobieranego przez silnik napędu,
- b) przyspieszenie drgań powstających podczas przełączania,
- c) przebieg prądu przełączania w pełnym zakresie.



Omówienie układu pomiarowego

Na Rysunku 7 przedstawiono zapis parametrów w czasie przełączenia na trzech zaczepek.

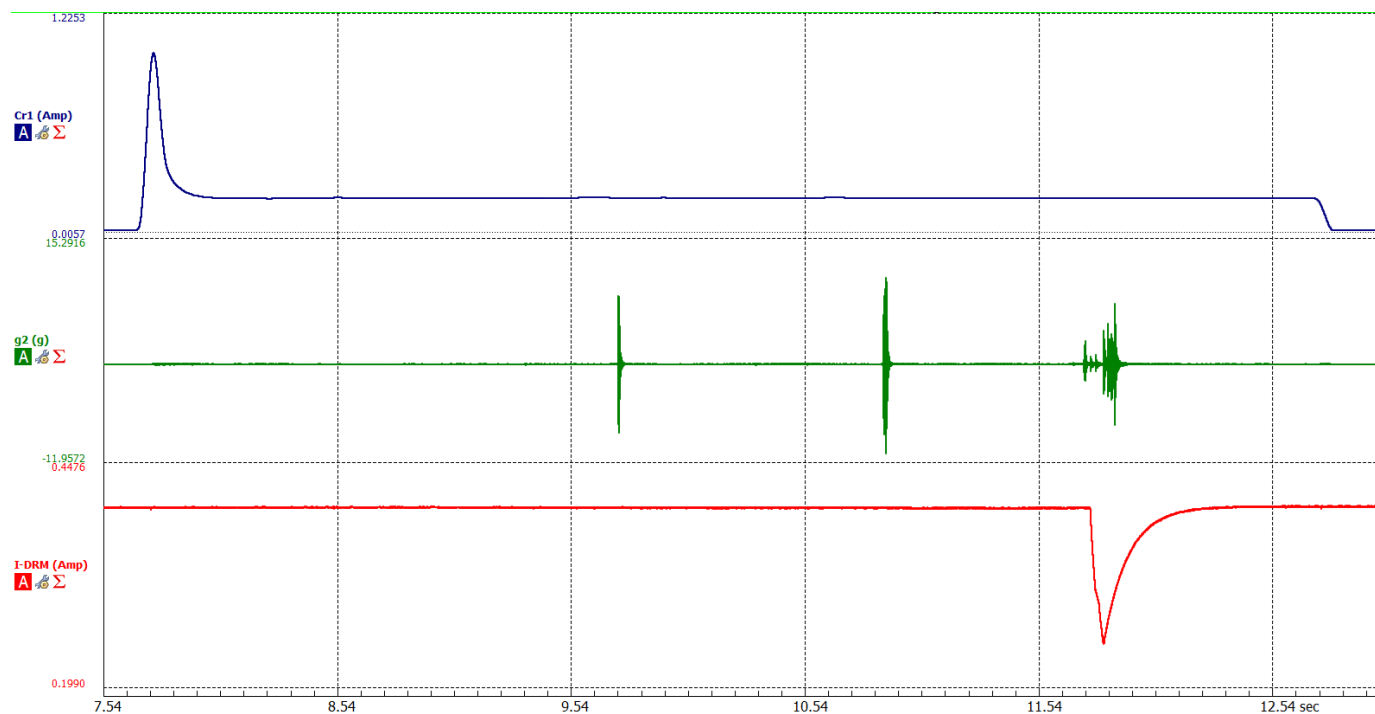


Rysunek 7 Widok okna z zapisem przełączania przełącznika zaczepek na trzech zaczepek. Szczegółową analizę można przeprowadzić po wykonaniu **obwiedni prądu pobieranego przez napęd** oraz **sygnału akustycznego**. Widok okna pomiarowego przedstawiającego zapis parametrów w czasie przełączania na jednym zaczepie przedstawiono na Rysunku 7.



Omówienie układu pomiarowego

Rysunek 8 Widok okna przedstawiającego zapis parametrów w czasie przełączania na jednym zaczeple.



Na zapisie widoczna jest **wielkość prądu pobieranego przez napęd, praca klatki wybierakowej i pomiar czasów własnych przełącznika mocy.**

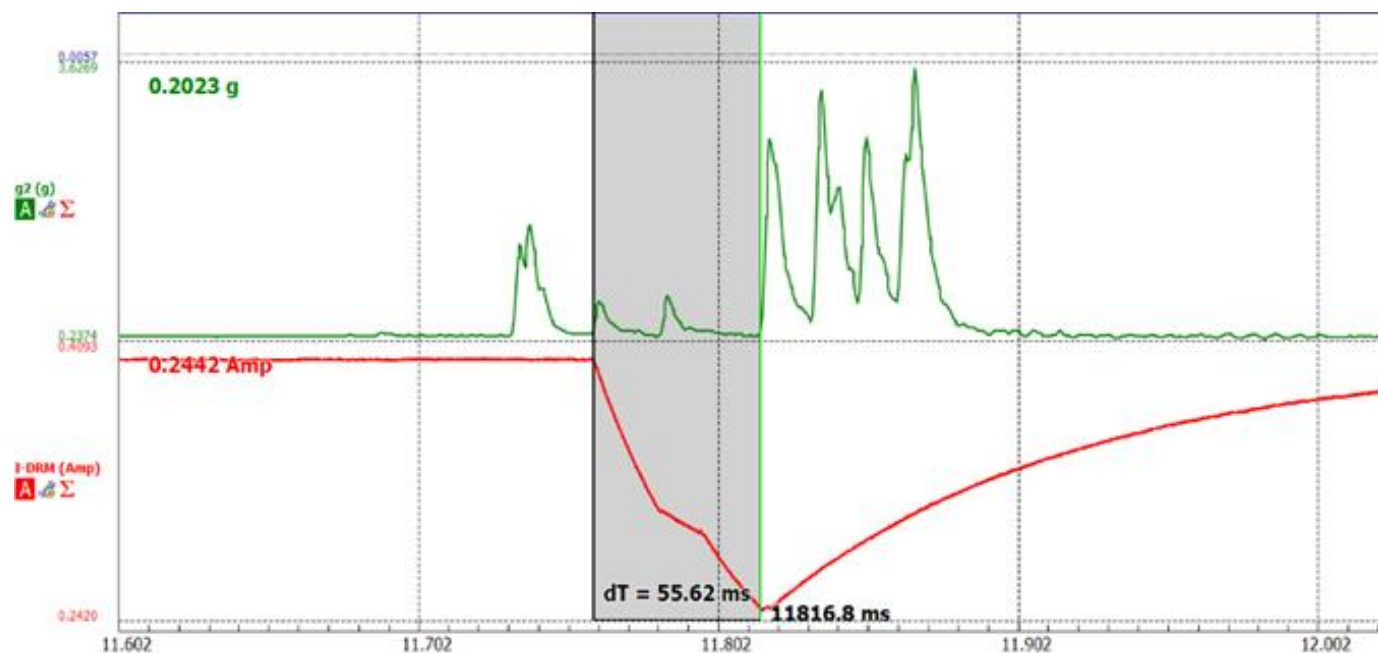
Ocenę pracy przełącznika mocy przeprowadzono analizując obszar w którym wystąpiło przełączenie przełącznika mocy.



Omówienie układu pomiarowego

Porównanie przebiegów i wyznaczenie poszczególnych obszarów pracy przełącznika zaczepów wymaga przeprowadzenia oceny prawidłowości pracy, ewentualnie stopnia zużycia elementów mechanicznych i elektrycznych.

Ocenę wyników pomiarów wibroakustycznych i pomiaru prądu pobieranego przez napęd przeprowadzić można na podstawie kryteriów zamieszczonych w Tabeli 1. Ocenę prawidłowości pracy przełącznika mocy przeprowadza się w oparciu o kryteria zamieszczone w Tabeli 2.



Rysunek 9 Widok okna z powiększonym obszarem przełączania przełącznika mocy.



Omówienie układu pomiarowego

Tabela 1. Zestawienie kryteriów do oceny wyników z pomiarów prądu pobieranego przez napędu i pomiarów wibroakustycznych PPZ.

Wielkość obliczana:	Limit:	Opis
Czas operacji	10%	Całkowity czas pomiędzy początkiem I końcem pracy silnika napędu (czas pobierania prądu). Pokazuje charakterystykę przełączania góra/dół oraz różnicę przełączania parzysty/nieparzysty.
Średnie natężenie prądu (AVR)	10%	Średnie natężenie prądu przy stabilnej pracy silnika (plateau na charakterystyce). Jeżeli podczas przełączania wzrośnie obciążenie, wartość średnia natężenia prądu na płaskiej części charakterystyki zmieni się.
Prąd rozruchu	10%	Max natężenie prądu podczas rozruchu. Znaczna zmiana prądu rozruchu oznacza anomalny start silnika
Różnica prądu (DLT)	10%	Różnica pomiędzy największym i najmniejszym natężeniem prądu na płaskiej części charakterystyki. W większości przypadków, różnica ta powinna być bliska 0. Większe wartości mogą oznaczać problemy ze smarowaniem napędu.
Prąd całkowity	10%	Pole powierzchni pod charakterystyką prądową. Pozwala wykryć problem ze smarowaniem, podobnie jak różnica prądu, ale podczas całej operacji przełączania.
Czas zakończenia operacji (END)	30%	Różnica czasu pomiędzy zakończeniem zmiany zaczeu a końcem poboru prądu. Wskazuje na problem z synchronizacją i hamowaniem.
HF MAX	30%	Max. amplituda przyspieszenia przy wysokiej częstotliwości (HF). Porównanie amplitud przy wysokiej I niskiej częstotliwości (HF) I (LF) pokazuje stopień zużycia styków.
Odchylenie	1.0 - -1.0	Odchylenie amplitudy przyspieszenia od średniej od wartość odchylenia standardowego. Pokazuje, które zaczepty odbiegają od średniej.
LF MAX	30%	Max. amplituda przyspieszenia przy niskiej częstotliwości (LF). Porównanie amplitud przy wysokiej I niskiej częstotliwości (HF) I (LF) pokazuje stopień zużycia styków.



Omówienie układu pomiarowego

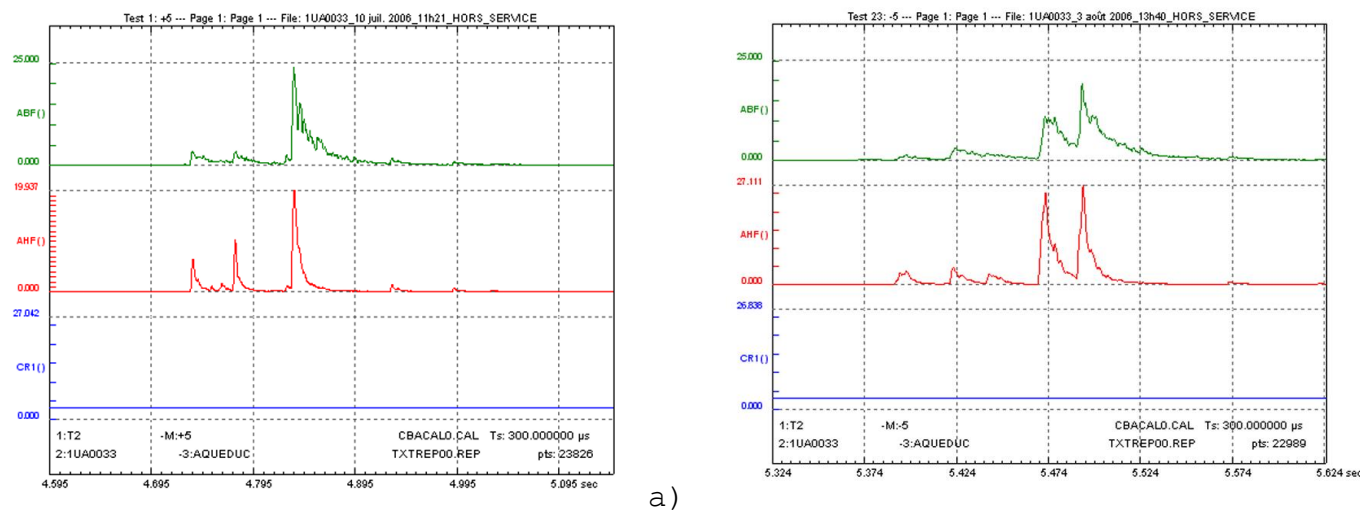
Tabela 2 Typowe uszkodzenia PPZ wykrywane przez pomiar czasów własnych, ich symptomy oraz kryteria decydujące o skierowaniu przełącznika do przeglądu/remontu.

Symptomy uszkodzenia	Przyczyny	Kryteria decydujące o skierowaniu PPZ do przeglądu
Wystąpienie przerw w cyklu przełączania	Wypalenie styku lub uszkodzona sprężyna na styku	Czas przerwy > 2 ms
Zbyt długi czas całkowity	Uszkodzenie głównej sprężyny	$t_c > 40\%$ wartości fabrycznych
Za krótki czas całkowity	Niewłaściwy dobór głównej sprężyny	Minimalne wartości podane w tabeli Z6.1 [6]
Niejednoczesność otwarcia styków (przełączniki trójfazowe)	Zużycie styków głównych lub jednego z wybieraków	> 3 ms
Niejednoczesność otwarcia styków (przełączniki jednofazowe)	Niewłaściwe ustawienie przekładni	> 250 ms
Czas t_2 jest krótszy od wartości podanej przez producenta	Uszkodzenie styków przejściowych	$t_2 < 40\%$ wartości fabrycznych
Czasy t_1 i t_3 są krótsze od wartości podanej przez producenta	Zużycie lub uszkodzenie styków głównych	$t_1 < 10$ ms
Wydłużenie czasu t_1	Uszkodzenie głównej sprężyny przełączającej	$t_1 > 40\%$ wartości fabrycznych
Czas rezystorowy $t_2 \approx 0$ i skrócenie czasu całkowitego t_c	Przerwa lub zwarcie w przełączniku mocy	$t_c < 50\%$ wartości fabrycznych

Omówienie wybranych usterek w procesie przełączania

Przeprowadzenie oceny otrzymanych wyników pomiaru wykonuje się na podstawie kryteriów przedstawionych w Tabeli 1 i 2.

Na Rysunku 10 przedstawiono wynik analizy w którym stwierdzono występowanie różnic w sygnale akustycznym przed i po naprawie.



Rysunek 10 Widok okna przedstawiającego sygnały akustyczne niskiej i wysokiej częstotliwości:

- a) **przed naprawą,**
- b) **po naprawie [8].**

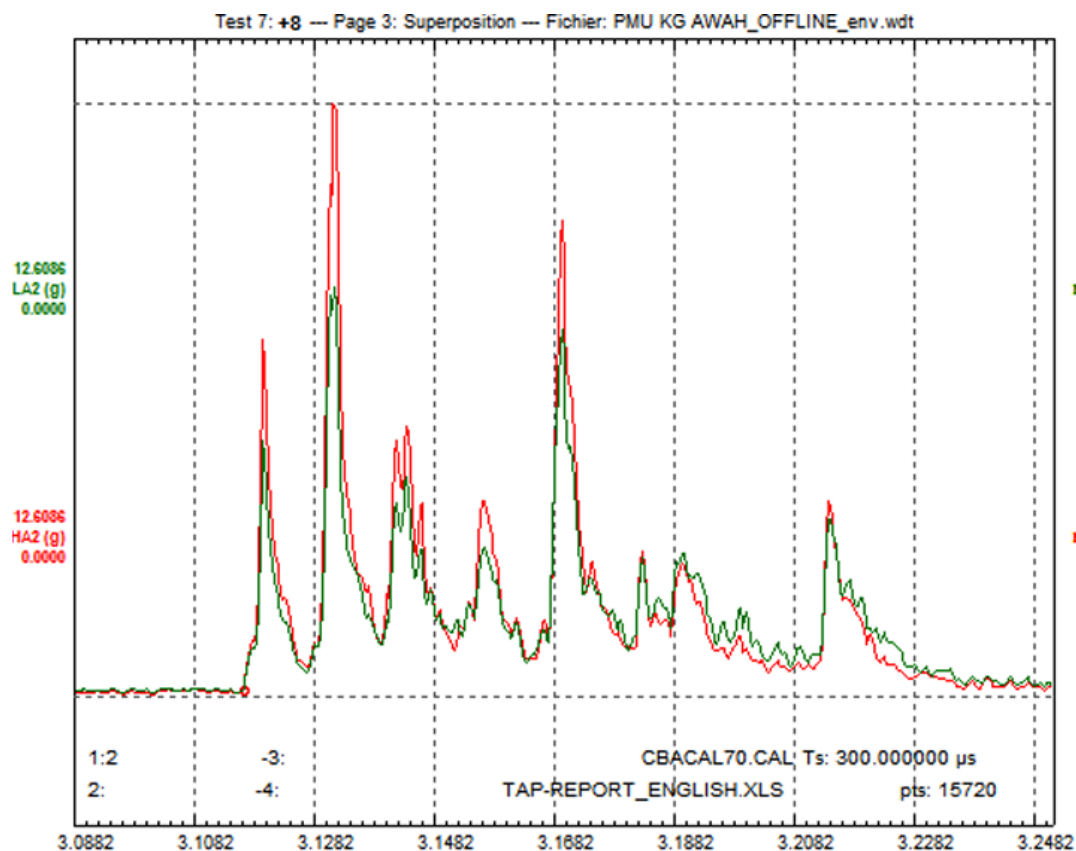
Analiza wykazała występowanie znacznej różnicy w amplitudach pomiędzy wykresem przy niskiej (kolor zielony) i wysokiej częstotliwości (kolor czerwony).

Po wykonanej naprawie widoczne jest **znaczne obniżenie amplitudy sygnału akustycznego przy wyższej częstotliwości**. Występowanie różnicy było związane ze zużyciem styków przełącznika mocy. Program do analizy wyników umożliwia nałożenie wykresów. Pozwala to na wyznaczenie zmian w zarejestrowanych przebiegach i wyznaczenie współczynników podanych w Tabeli 1.



Omówienie wybranych usterek w procesie przełączania

Na Rysunku 11 przedstawiono nałożenie wykresów wykonanych dla niskiej i wysokiej częstotliwości.



Rysunek 11 Nałożenie wykresów wykonanych dla niskiej i wysokiej częstotliwości [7].

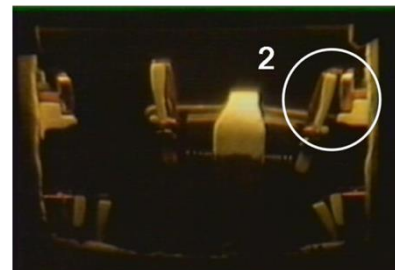
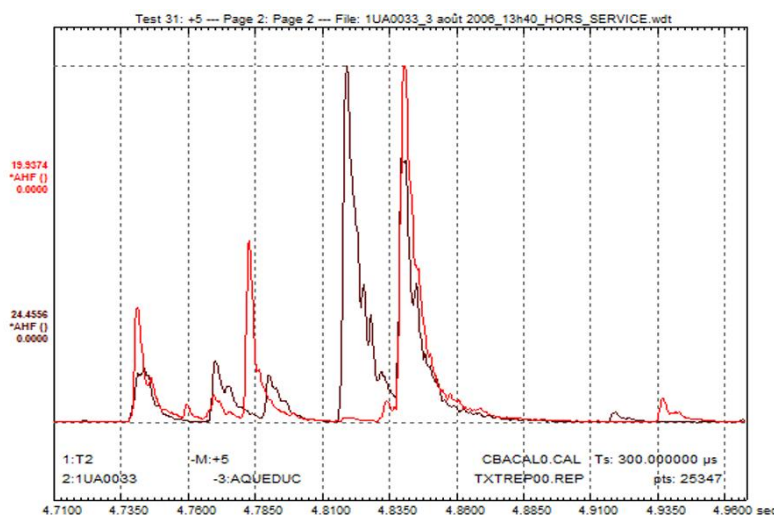
Nałożenie wykresów pozwoliło na wyznaczenie podanego w Tabeli 1 współczynnika HF/LF.

Występowanie różnicy powyżej podanej w tabeli wartości wskazuje na występowanie zużycia styków.



Omówienie wybranych usterek w procesie przełączania

Na Rysunku 12 przedstawiono nałożenie wykresów przed i po naprawie i w którym stwierdzono zużyte styki przed naprawą oznaczone kolorem czerwonym. Kolorem czarnym przedstawiono sygnał otrzymany po wymianie styków. Na zdjęciu po prawej stronie przedstawiono styk przełącznika w powiększeniu i styków po przełączeniu, oznaczonych numerem 2.



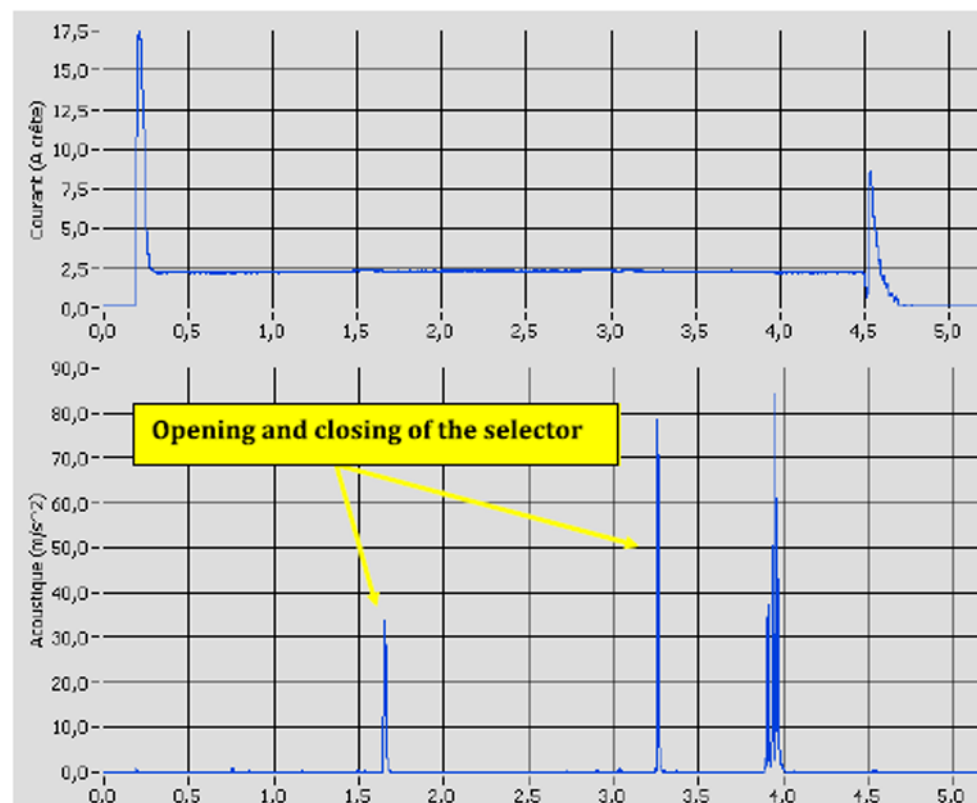
Rysunek 12 Nałożenie wykresów uzyskanych z pomiarów wibroakustycznych przed naprawą (kolor czerwony) i po naprawie (kolor czarny) [7].

Zużycie styków jest widoczne jako różnice między obwiedniami. Przełącznik zaczepów w którym nie wystąpiło zużycie będzie wykazywał podobne charakterystyki. W miarę wzrostu zużycia jedna z obwiedni stanie się dominująca.

Pomiar parametrów przełącznika wykonywany jest w trakcie całego procesu przełączania. Oznacza to możliwość oceny prawidłowości pracy klatki wybierakowej.

Omówienie wybranych usterek w procesie przełączania

Na Rysunku 13 przedstawiono wykres prądu w czasie cyklu przełączania (górny wykres) oraz sygnał wibroakustyczny na którym widoczne są sygnały z otwierania z zamykania klatki wybierakowej (dolny wykres).



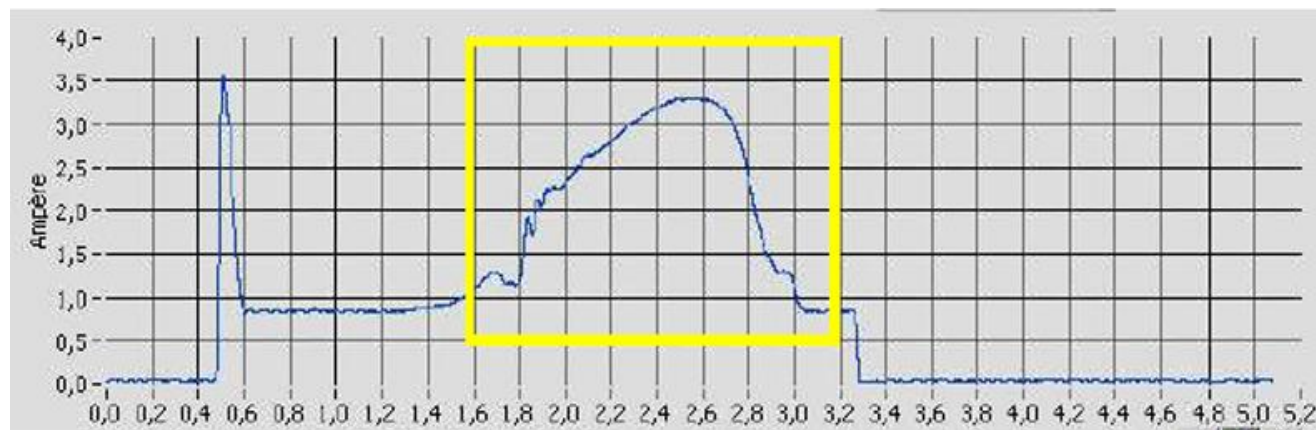
Rysunek 13 Wykres prądu pobieranego przez napęd i sygnał akustyczny z rejestracji przełączania styków klatki wybierakowej i przełącznika mocy [7].

Ocenę prawidłowości działania napędu przeprowadza się na podstawie zmian wielkości prądu w czasie przełączania. W Tabeli 1 zamieszczono dopuszczalne wartości.



Omówienie wybranych usterek w procesie przełączania

Na Rysunku 14 przedstawiono wykres prądu pobieranego przez napęd, na którym można zauważyć wyraźne powiększenie jego wartości.



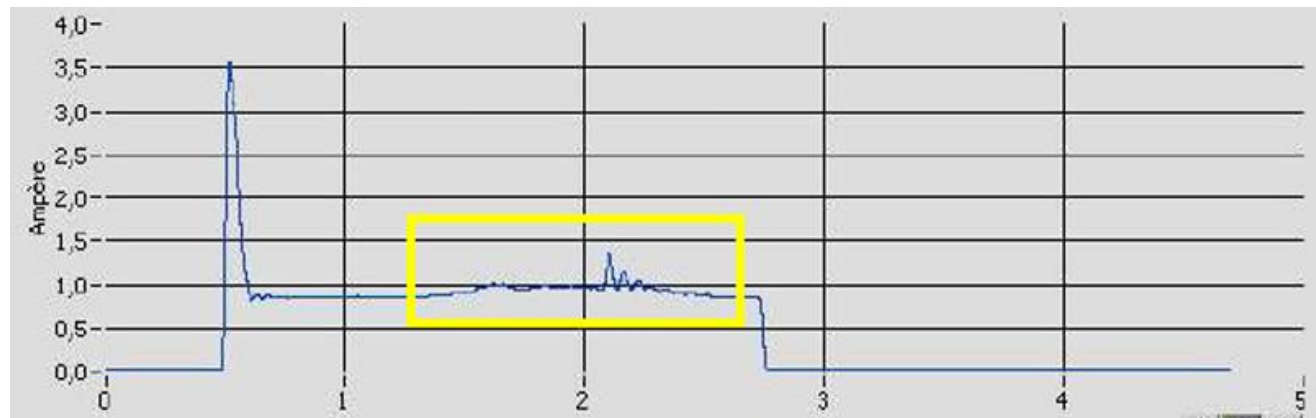
a)

Rysunek 14 Wykres prądu pobieranego przez napęd:

a) przed naprawą,
b) po naprawie [7].

Przyczyną wzrostu prądu był brak właściwego smarowania elementów przekładni. Program umożliwia wykonanie porównania pomiarów czasów własnych podobciążeniowego przełącznika zaczeów i zmian parametrów w trakcie pracy.

Wymagania dotyczące dopuszczalnych zmian czasów zamieszczono w Tabeli 2.

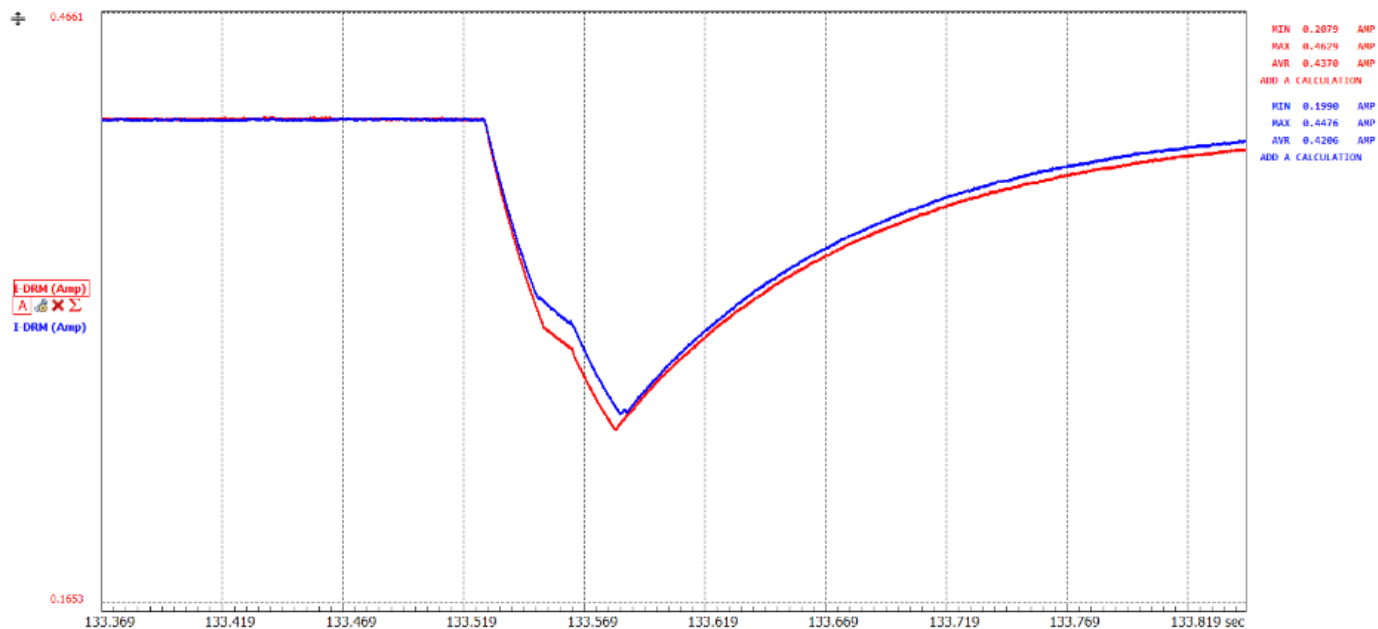


b)



Omówienie wybranych usterek w procesie przełączania

Na Rysunku 15 przedstawiono nałożenie dwóch pomiarów w trakcie przełączania ze styków 2->3 i 3->2.



Rysunek 15 Nałożenie wykresów czasów własnych w trakcie przełączania styków z pozycji 2->3 i 3->2

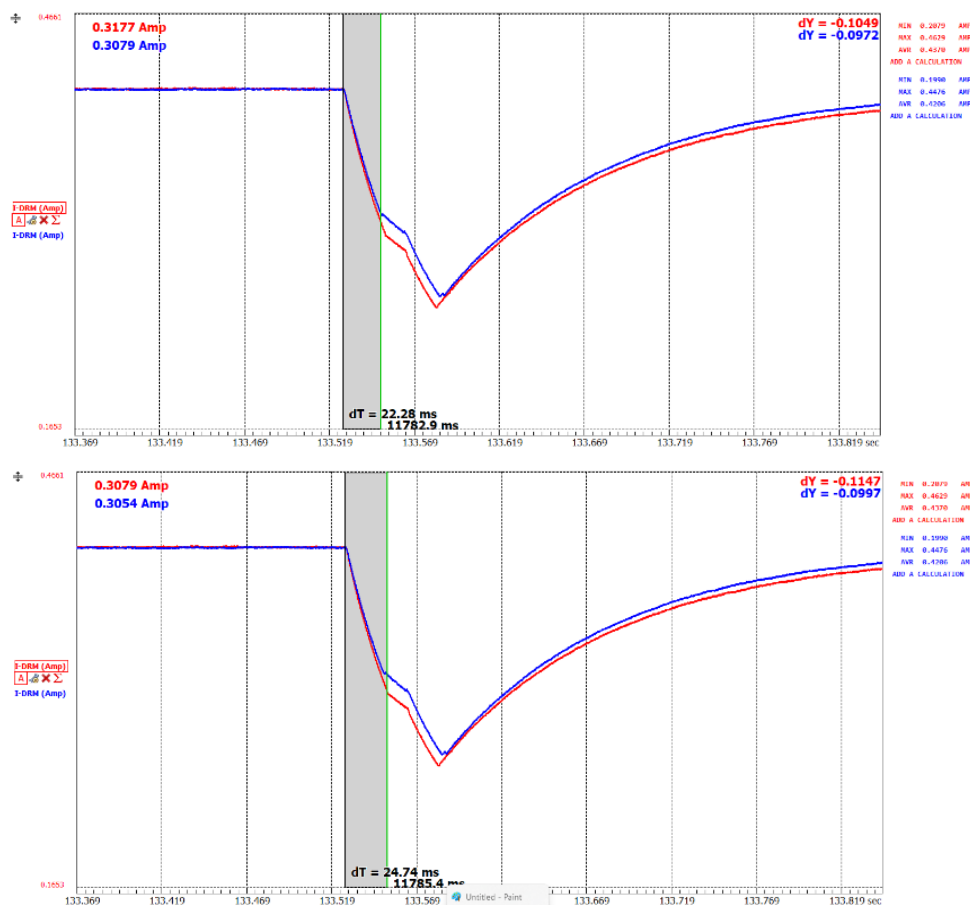
Kolor niebieski 2->3,
Kolor czerwony 3->2

Nałożenie wykresów **umożliwia określenie dynamiki zmian.**



Omówienie wybranych usterek w procesie przełączania

Na Rysunku 16 podano wyznaczone czasy t_1 przy przełączaniu zaczeów w dwóch kierunkach.



Czas T1:
2->3 24,28 ms;
3->2 22,74 ms

Rysunek 16 Wyznaczenie czasów własnych t_1 przy przełączaniu z pozycji 2->3 i 3->2.

Szczegółowe wymagania dotyczące dopuszczalnych wartości czasów własnych dla różnych typów przełączników podano w [6].

Szczególnie przydatna jest opcja umożliwiająca porównanie przebiegów wykonanych na nowej jednostce z pomiarami w eksploatacji oraz zapisu plików w formacie .csv



Wnioski

Pomiar kompleksowy przełączników zaczepów pozwala na:

- Jednoczesne wykonywanie pomiarów przełącznika zaczepów,
- Ocenę prawidłowości działania przełącznika mocy napędu, klatki wybierakowej i napędu,
- Określenie rodzaju defektu,
- Wykonanie porównań z wcześniejszymi wynikami pomiarów.

Literatura

- [1] C. Engelen, M. Foata, J. Hammerle, M. Wolfram, C. Plath, A. Savaliev; Practical Application of On-Load Tap Changer Vibro-Acoustic Fingerprinting and Diagnostic. International Conference on Condition Monitoring, Diagnosis and Maintenance CMDM 2021 (5th edition), September 9th -11th 2021, Radisson Blu Hotel Bucharest.
- [2] Raław M., Gielniak J. Zastosowanie wibroakustyki w diagnostyce podobciążeniowego przełącznika zaczepów, Politechnika Poznańska Instytut Energetyki Zakład Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych.
- [3] VAM 1, User Manual, Omicron electronics GmbH.
- [4] 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.
- [5] Cichoń A., Nowa metoda diagnostyki stanu technicznego podobciążeniowego przełącznika zaczepów, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej*, Opole 2011.
- [6] Ramowa Instrukcja Eksploatacji Transformatorów, Gliwice 2022.
- [7] Diagnostic/Typical signatures TAP-X, OTM-X, ZENSOL.com Copyright 1992-2017, REV 02– 12-12- 2017
- [8] Fouad Brikci, Vibro-Acoustic Testing Applied on Tap Changers and Circuit Breakers Article TechCon, 2017.
- [9] TB 939, Technical Brochure Cigre, Analysis of AC transformer reliability, working group WG A2.62, September 2024.



Dziękuję za uwagę

dr inż. Zbigniew Szymański

Zakład Pomiarowo-Badawczy Energetyki
"ENERGOPOMIAR-ELEKTRYKA" Sp. z o.o.

+48 32 237 66 03 sekretariat@elektryka.com.pl www.elektryka.com.pl

