

Kazimierz Jagiela, Janusz Rak, Marek Gała, Marian Kępiński
 Politechnika Częstochowska, Częstochowa

DIAGNOSTYKA TRANSFORMATORA PIECO-KADZI PO USUNIĘCIU AWARII

DIAGNOSTICS OF A LADLE FURNACE TRANSFORMER AFTER DAMAGE REPAIR

Abstract: The paper presents results of diagnostic tests of a ladle furnace transformer conducted after damage repair, before putting the ladle to operation. In the tests, the waveforms of voltages and currents were recorded digitally on the primary and secondary side of the transformer in no-load as well as in under-load state. Additional temperature measurements of the transformer casing during its operation, conducted with an infrared camera, are also presented. The recorded data were numerically processed. The results made it possible to assess condition of the transformer components (core, windings and casing), indicate hazards and formulate operation recommendations.

1. Wstęp

Specjalną grupę transformatorów dużej mocy stanowią transformatory przeznaczone do stalowniczych procesów elektrotermicznych, w tym do pieców łukowych AC i DC oraz pieco-kadzi stosowanej w tzw. metalurgii pozapiecowej [4]. W trakcie eksploatacji transformatora pieco-kadzi o mocy 15 MVA wystąpiła awaria spowodowana zapaleniem się przegrzanego oleju transformatorowego po jego wycieku z rozszczelnionej obudowy. Nastąpiło to na przepustach toru wieloprądowego, które uległy spękaniu w wyniku oddziaływań termiczno-mechanicznych podczas pracy (rys. 1) [2].



Rys. 1. Widok przegrzanych przepustów niskiego napięcia transformatora pieco-kadzi [2]

W konsekwencji uszkodzenia przepustów izolacyjnych uzwojenia strony wtórnej transformatora, wycieku oleju, jego zapłonu i pożaru wystąpiły dalsze, następujące zniszczenia:

- 1) uszkodzenie odgromników zaworowych;
- 2) uszkodzenie kabli zasilających wysokiego napięcia 20 kV;

- 3) uszkodzenie w wyniku pożaru kabli sterowniczych i pomiarowych.

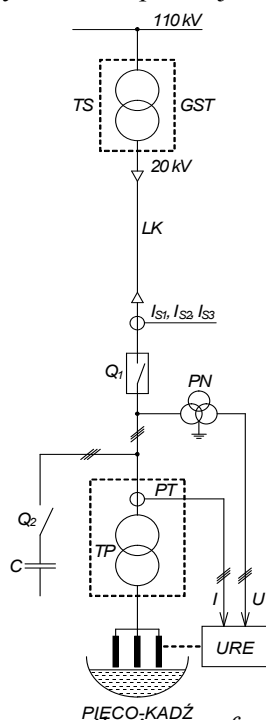
Po usunięciu przez ekipy remontowe skutków awarii i włączeniu transformatora do sieci wystąpiła nieprawidłowa praca napędu elektrod i znacząca asymetria obciążenia transformatora z powodu niewłaściwego podłączenia sygnałów prądowych z przekładników PT do układu regulacji elektrod – URE (rys. 2). Skutkiem asymetrii obciążenia było powstanie strumienia składowej zerowej, co spowodowało koncentrację pola magnetycznego o dużym natężeniu w obszarze wyprowadzeń wieloprądowych, ze szczególnym uwypukleniem ostrza dwu krawędzi bocznych pokrywy transformatora, co objawiło się znacznym nagraniem tego miejsca pokrywy. Dodatkowym czynnikiem sprzyjającym nierównomiernemu rozkładowi pola magnetycznego był jeden ze stalowych elementów dystansowych umieszczony w rogu między pokrywą transformatora a blachą kadzi. Producent transformatora poziomą powierzchnię tego elementu pokrył materiałem izolacyjnym, który jednakże w czasie wieloletniej pracy uległ w tym miejscu uszkodzeniu. W pozostałych narożnikach pokrywy, izolacja ta istniała lub była w stanie częściowego uszkodzenia.

Po wykonaniu napraw elementów izolacyjnych oraz właściwym podłączeniu sygnałów prądowych z przekładników prądowych do układu regulacji elektrod, ponownym sprawdzeniu stanu izolacji transformatora i oporności uzwojeń oraz właściwości oleju przystąpiono do rejestracji napięć i prądów transformatora dla jego różnych stanów pracy z jednoczesną kon-

tróją temperatury w niewaligicznych miejscach pokrywy transformatora. Pomierzone wartości napięć i prądów z wykorzystaniem metod komputerowych i oprogramowania DasyLab umożliwiły przeprowadzenie obliczeń pobieranych mocy oraz zawartości wyższych harmonicznych prądów transformatora. W czasie tych prób nie wystąpiły zauważalne, niepokojące zdarzenia w torach zasilania i regulacji elektrod oraz nie stwierdzono nadmiernego nagrzania obudowy transformatora pieco-kadzi.

2. Opis instalacji zasilania transformatora pieco-kadzi

Schemat ideowy instalacji zasilania transformatora pieco-kadzi stalowni huty przedstawiono na rysunku 2. Transformator TP zasilany jest ze stacji elektroenergetycznej GST 110 kV / 20 kV kablami wysokonapięciowymi 20 kV (LK na rys. 1) o długości ok. 1,5 km dochodzącymi do komory transformatora. Z kadzi transformatora sztywnymi walcowymi profilami (po cztery na fazę – rys. 6) wyprowadzone są trzy fazy niskiego napięcia, które elastycznymi przewodami, chłodzonymi wodą, podłączone są do trzech elektrod pieca kadziowego. Ruchem elektrod steruje układ regulacji URE, do którego podano sygnały z przekładników prądowych PT i napięciowych PN. Ponadto w rozdzielni przypięcowej średniego napięcia zainstalowane są kondensatory C do kompensacji mocy biernej.



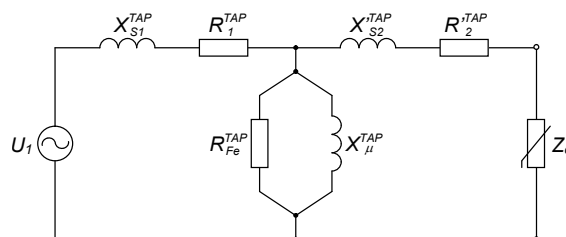
Rys. 2. Schemat zasilania transformatora pieco-kadzi

3. Parametry transformatora pieco-kadzi

Podstawowe dane techniczne badanego transformatora typu TOTOM-L 510-16/56 oraz parametry jego schematu zastępczego [3] przedstawiono na rys. 3 zamieszczono w tabeli 1.

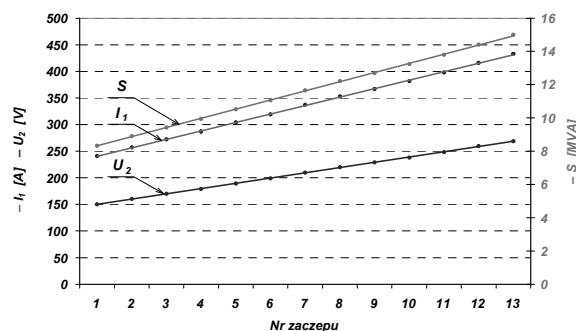
Tabela 1
Parametry elektryczne transformatora

Parametr	Jednostka	Wartość
Moc pozorna	MVA	15
Napięcie pierwotne	kV	20
Napięcie wtórne	V	268÷150
Prąd znamionowy pierwotny	A	433
Prąd znamionowy wtórny	kA	32,1
Grupa połączeń	-	Yd1
Częstotliwość	Hz	50
Ilość poz. przełącznika	TAP	13
Napięcie zwarcia u_z^{TAP}	%	3,1÷4,56
Reaktancje rozproszenia X_{s1}^{TAP} i X_{s2}^{TAP}	Ω	0,541 ^{TAP=13}
Rezystancje R_1^{TAP} i R_2^{TAP}	Ω	0,05÷0,102
Reaktancja magnesująca X_{μ}^{TAP}	Ω	483÷6300
Rezystancja R_{Fe}^{TAP}	Ω	2670 ^{TAP=13}
Przekładnia zwoj. u_{zw}^{TAP}	-	74,5÷133



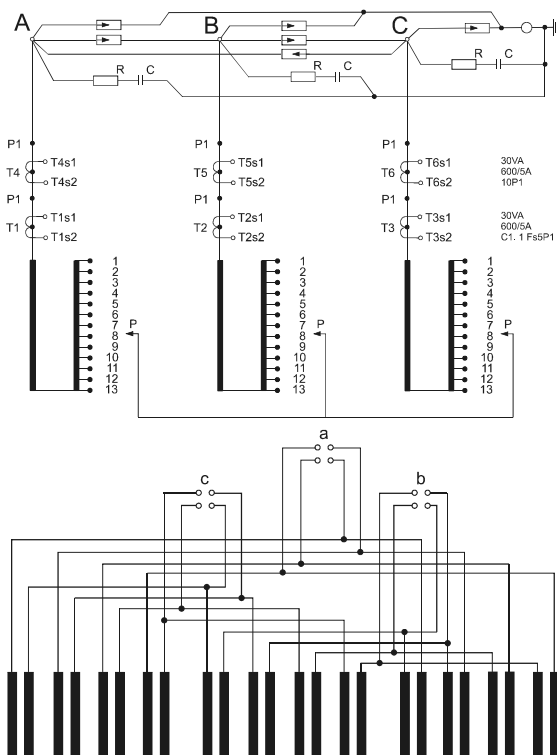
Rys. 3. Schemat zastępczy transformatora pieco-kadzi

Wartości napięć strony wtórnej, prądów strony pierwotnej i mocy pozornej transformatora przy zachowaniu nominalnej wartości prądu wtórnego dla poszczególnych pozycji przełącznika zaczełów podano w formie graficznej na rys. 4.

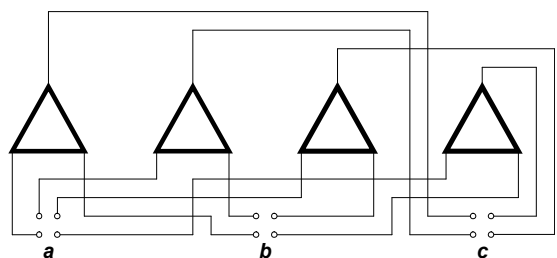


Rys. 4. Wykres zmian napięć i prądów na poszczególnych pozycjach przełącznika zaczełów

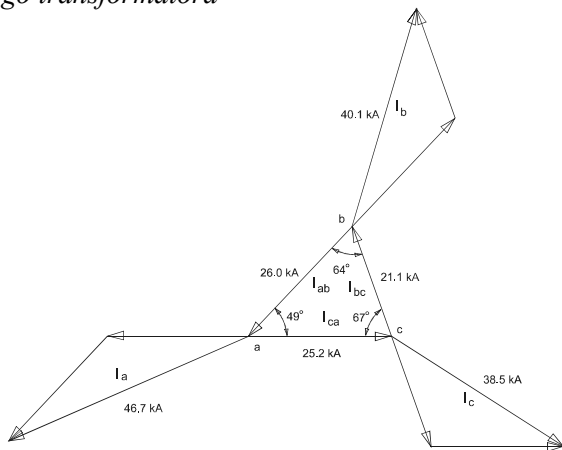
Schematy połączeń uzwojeń dla obwodu pierwotnego i wtórnego transformatora przedstawiono na rys. 5 i 6.



Rys. 5. Schemat uzwojeń pierwotnych i wtórnych transformatora pieco-kadzi



Rys. 6. Schemat konfiguracji uzwojenia wtórnego transformatora



Rys. 7. Wykres wskazowy prądów uzwojeń wtórnych transformatora pieco-kadzi

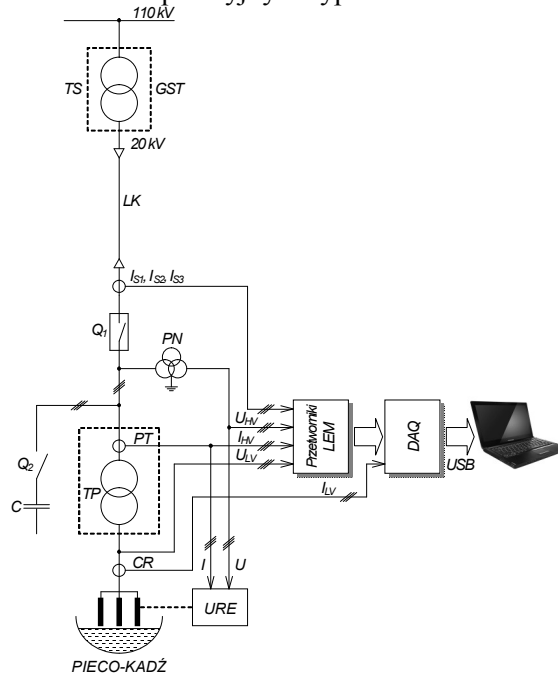
W celu zilustrowania rozplywu prądów obwodu wtórnego, sporządzono wykres wskazowy dla prądów liniowych i fazowych (rys. 7) przykładowo dla dziewiątej pozycji przełącznika zacze- pów (TAP=9). Wykres pokazuje asymetrię wynikającą z różnej dla poszczególnych faz wartości reluktancji magnetycznej i impedancji doprowadzeń wraz z połączeniami czołowymi.

4. Analiza pomiarowa prądów i napięć transformatora pieco-kadzi

Do rejestracji napięć i prądów strony pierwotnej oraz wtórnej transformatora pieco-kadzi TP skonfigurowano układ pomiarowy o schemacie przedstawionym na rysunku 8. Przebiegi napięć i prądów strony pierwotnej (20 kV) uzyskano z przekładników napięciowych PN i prądowych PT o następujących danych:

$$20000/\sqrt{3} \text{ V} / 100/\sqrt{3} \text{ V} \text{ i } 600 \text{ A} / 5 \text{ A}.$$

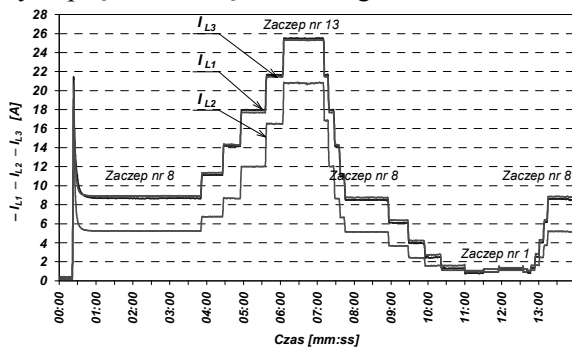
Prąd strony wtórnej transformatora rejestrowany był z użyciem cewek Rogowskiego typu CWT600, natomiast napięcia zasilania elektrod były bezpośrednio podłączone do zespołu przetworników separacyjnych typu LEM.



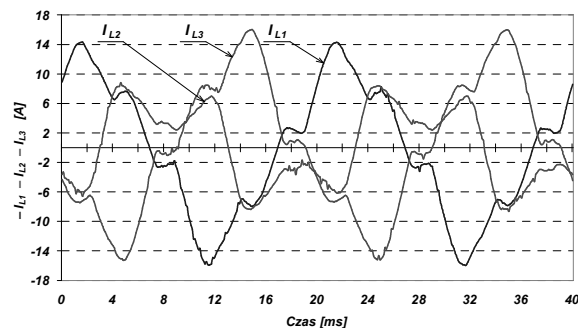
Rys. 8. Schemat układu pomiarowego transformatora pieco-kadzi

Pomiary zostały wykonane na biegu jałowym transformatora dla trzynastu pozycji przełącznika zacze- pów oraz w dwu stanach obciążenia uzależnionych od programu technologicznego realizowanego przy odpowiednich pozycjach zacze- pów. Pomiary prowadzono przy ciągłej kontroli temperatury pokrywy transformatora.

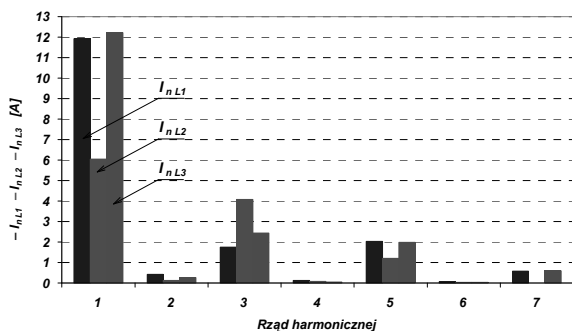
Zarejestrowane przebiegi napięć i prądów posłużyły do utworzenia baz danych w systemie komputerowym z aplikacją DasyLab. Niezależnie, z wykorzystaniem analizatora jakości energii CA Arnaux-Chauvin, dokonano bezpośredniego pomiaru mocy czynnych, biernych i pozornych po stronie pierwotnej transformatora. Istotne wyniki uzyskane dla próby biegu jałowego zilustrowano na rysunkach 9, 10 i 11. Przedstawiają one wartości skuteczne i chwilowe prądów I_{L1} , I_{L2} i I_{L3} dla poszczególnych zaczepek wraz z analizą harmoniczną amplitud tych prądów do rzędu siódmego.



Rys. 9. Średnie wartości skuteczne prądów I_{L1} , I_{L2} i I_{L3} strony pierwotnej transformatora podczas próby biegu jałowego



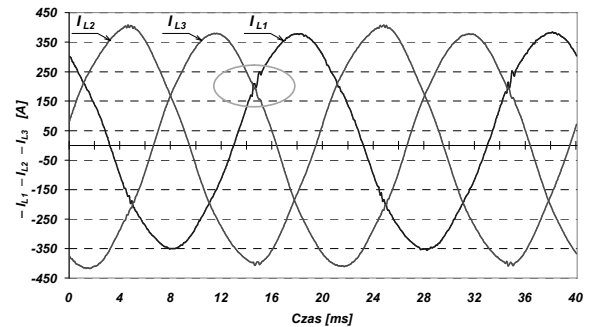
Rys. 10. Wartości chwilowe prądów I_{L1} , I_{L2} i I_{L3} strony pierwotnej transformatora podczas próby biegu jałowego dla TAP=8



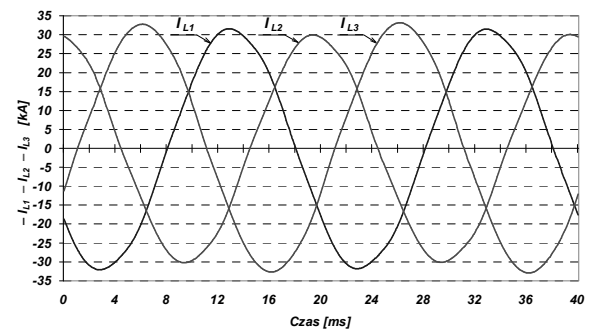
Rys. 11. Amplitudy pierwszych siedmiu harmonicznych prądów I_{L1} , I_{L2} i I_{L3} strony pierwotnej transformatora podczas próby biegu jałowego dla TAP=8

Na podstawie zamieszczonych na powyższych rysunkach przebiegów i widma harmonicznych można stwierdzić, że występuje widoczna niesymetria prądów (prąd w fazie L2 jest mniejszy niż w dwóch pozostałych). Efekt ten jest spowodowany asymetrią obwodu magnetycznego transformatora pieco-kadzi wynikającą z geometrii jego rdzenia i dotyczy środkowej kolumny transformatora, w której strumień magnetyczny różni się co do wartości od strumieni w kolumnach skrajnych. Szczególnie zjawisko to można ocenić na podstawie wartości składowych amplitud pierwszej i trzeciej harmonicznej, gdzie dla podstawowej harmonicznej amplituda prądu fazy drugiej jest prawie dwukrotnie mniejsza od pozostałych, zaś dla trzeciej harmonicznej jest niemal dwukrotnie większa.

Asymetria prądów nie występuje natomiast w czasie normalnej pracy transformatora pieco-kadzi podczas obciążenia dla poszczególnych pozycji przełącznika zaczepek. Na kolejnym rysunku 12 przedstawiono wartości chwilowe prądów dla obciążenia transformatora mocą ok. 12MVA dla ósmej pozycji przełącznika zaczepek. Jednocześnie przy wykorzystaniu cewek Rogowskiego rejestrowane były przebiegi prądów dla strony wtórnej transformatora, których kształt pokazano na rys. 13.



Rys. 12. Wartości chwilowe prądów I_{L1} , I_{L2} i I_{L3} strony pierwotnej transformatora podczas obciążenia $S=12$ MVA dla TAP=8



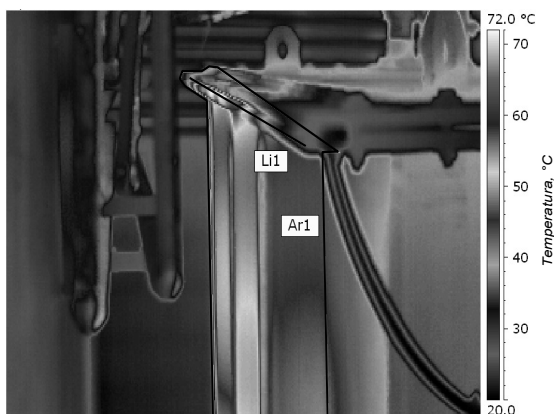
Rys. 13. Wartości chwilowe prądów I_{L1} , I_{L2} i I_{L3} strony wtórnej transformatora podczas obciążenia $S=12$ MVA dla TAP=8

Zarejestrowane przebiegi chwilowych wartości prądów pierwotnych transformatora (rys. 12) pozwoliły na zdiagnozowanie stanu technicznego przełącznika zaczepów. Zauważalne odkształcenia od sinusoidy przebiegu prądu pierwszej fazy w postaci niewielkich oscylacji charakterystycznych dla zjawisk występujących podczas komutacji (fragment przebiegu zaznaczony elipsą) świadczą o postępującej deformacji przełącznika zaczepów. Potwierdzają to zamieszczone na rys. 13 przebiegi prądów wtórnych o wartościach skutecznych rzędu 22 kA, w których nie widać znaczących zniekształceń. Występuje jedynie niewielka asymetria spowodowana nieliniowym charakterem obciążenia jakim niewątpliwie jest łuk elektryczny.

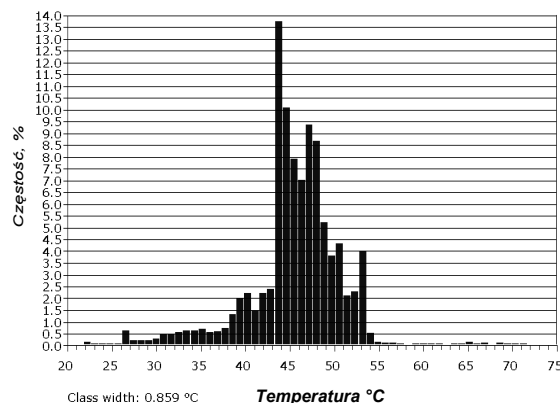
5. Badania termowizyjne transformatora

Po usunięciu awarii i ponownym załączeniu transformatora przeprowadzono również badania termowizyjne. Do badań wykorzystano kamerę termowizyjną ThermoCAM P65 wyposażoną w niechłodzony, microbolometryczny detektor podczerwieni typu FPA o zakresie widmowym $7,5\div 13\ \mu\text{m}$ [1].

Rezultatem przeprowadzonych badań był liczny zbiór termogramów, będących obrazem stanu cieplnego powierzchni zewnętrznej obudowy transformatora. Zarejestrowane termogramy poddano następnie szczegółowej analizie, wykorzystując do tego celu oprogramowanie ThermalCAM Reporter. Przeprowadzona została analiza statystyczna zmian wartości temperatury określonej dla wyodrębnionych na termogramach elementów obudowy oraz wyznaczono histogramy i charakterystyki zmian wartości temperatury, co pozwoliło na dokładną ilościową ocenę wyników badań.

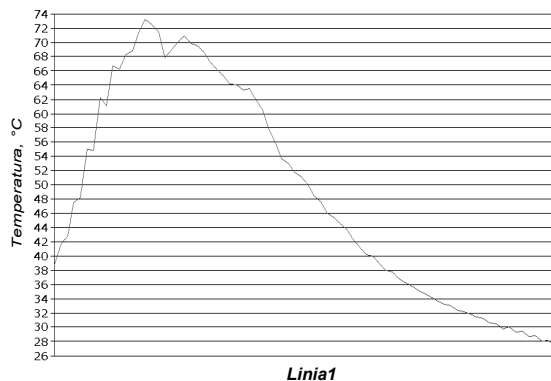


Rys. 14. Termogram górnej części transformatora z naniesionym obszarem Ar1 i linią Li1



Rys. 15. Histogram temperatury obszaru Ar1 z termogramu przedstawionego na rys. 14

Pomiary termowizyjne wykonano dla wybranych fragmentów obudowy transformatora, które podczas pracy nagrzewały się nadmiernie. Na rysunku 14 przedstawiony został termogram transformatora ukazujący fragment jego pokrywy, kołnierza oraz górną część bocznej ściany obudowy. Na termogramie wyróżniono obszar oznaczony symbolem Ar1 oraz linię Li1. Na rysunku 15 zaprezentowano histogram temperatury dla obszaru Ar1, natomiast na rysunku 16 przedstawiony został rozkład temperatury wzdłuż linii Li1.



Rys. 16. Rozkład temperatury wzdłuż linii Li1 z termogramu przedstawionego na rys. 14

Wyniki badań termowizyjnych potwierdziły, iż remont transformatora został przeprowadzony prawidłowo i przyniósł pożądane efekty. Właściwe odizolowanie pokrywy transformatora od jego kadzi doprowadziło do ograniczenia zjawiska występowania prądów wirowych. Naroża pokrywy transformatora pieco-kadzi przestały się nadmiernie nagrzewać. Zarejestrowane wartości temperatur niewalgiicznych miejsc obudowy transformatora nie przekraczały 75°C , co świadczy o prawidłowych warunkach pracy transformatora.

6. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych, pomiarów statycznych rezystancji uzwojeń oraz stanu izolacji uzwojeń i oleju elektroizolacyjnego a także badań termowizyjnych stwierdzono, że stan techniczny transformatora pieco-kadzi po usunięciu awarii jest zadowalający o czym świadczą następujące ustalenia:

- pomierzone w trakcie okresowych badań parametry elektryczne transformatora są zgodne z danymi zawartymi w dokumentacji producenta, zarejestrowane prądy biegu jałowego transformatora nie odbiegają od normy, a ich wartości skuteczne są zbliżone do podanych w dokumentacji techniczno-ruchowej transformatora;
- zmierzone wartości strat mocy podczas biegu jałowego nie odbiegają od podanych w dokumentacji, co wskazuje, że nie występują zwarcia w pakiecie rdzenia magnetycznego;
- stwierdzona asymetria i obecność w prądzie magnesowania trzeciej harmonicznej są naturalnym wynikiem geometrii konstrukcji obwodu magnetycznego i sposobu połączeń uzwojeń;
- wykonane badania oleju jednoznacznie potwierdzają tezę, iż stan techniczny oleju elektroizolacyjnego transformatora pieca kadziowego jest dobry, a transformator może być w dalszym ciągu eksploatowany;
- rozkład temperatury na płaszczyźnie pokrywy transformatora oraz krawędziach bocznych mieści się w zakresie dopuszczalnych wartości nie przekraczając podczas pracy pod obciążeniem 75°C, przy czym po wyłączeniu obciążenia transformatora temperatura ta stosunkowo szybko obniża się;
- obciążenia prądowe strony pierwotnej i wtórnej transformatora, jak wykazały pomiary (rys. 12 i rys. 13), nie przekraczają nominalnych wartości. Podobnie, w czasie pracy transformatora moc pobierana przez pieco-kadź osiąga wartość 80-90% znamionowej mocy transformatora; oznacza to brak przeciążeń, co korzystnie wpływa na warunki eksploatacji transformatora, gdyż nie występuje przyspieszone starzenie elementów izolacyjnych jego konstrukcji;
- pewien niepokój budzi jedynie stan przełącznika zaczepów (istnienie oscylacji napięcia i prądu charakterystycznych dla zja-

wisk występujących podczas komutacji widoczne na przebiegach po stronie pierwotnej transformatora pieco-kadzi (rys. 12);

- w ramach doraźnych działań mających na celu zmniejszenie nagrzewania elementów obudowy transformatora, zostały usunięte metalowe podkładki dystansowe z naroży, a w to miejsce włożone izolacyjne diamagnetyczne podkładki ze szkła epoksydowego. Według obserwacji dokonanych w trakcie bieżącej eksploatacji zauważono obniżenie temperatury kadzi i pokrywy w tych newralgicznych miejscach.

7. Literatura

- [1]. Gała M., Wyczółkowski R., Jagieła K., Kępiński M., Rak J.: *Zastosowanie termowizji do oceny stanu technicznego transformatora pieco-kadzi*. Nowe Technologie i Osiągnięcia w Metalurgii i Inżynierii Materiałowej. Politechnika Częstochowska 2009, s. 292-295.
- [2]. Jagieła K., Gała M., Rak J., Wyczółkowski R., Mnich M.: *Ekspertyza przyczyn awarii transformatora pieco-kadzi wraz z oceną jego stanu technicznego*. Raport BZ-3-302-1/08 Zakład Badań Jakości Energii Elektrycznej Instytutu Elektrotechniki Przemysłowej Politechniki Częstochowskiej. Częstochowa 2008 (oprac. niepublikowane).
- [3]. Jezierski E.: *Transformatory. Podstawy teoretyczne*. WNT Warszawa 1965.
- [4]. Lis T.: *Współczesne metody otrzymywania stali*. Wyd. Pol. Śląskiej. Gliwice 2000.
- [5]. Matulewicz W.: *Eksploatacja maszyn elektrycznych w elektroenergetyce*. Wyd. Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1993.