

Waldemar Skomudek¹⁾, Jan Subocz²⁾, Marek Szrot³⁾

Ocena stanu technicznego wysokonapięciowych izolatorów przepustowych (Część 2)⁴⁾

Assessment of technical condition of high voltage studs type insulators of power transformers (Part 2)

Izolatory przepustowe są podstawowym wyposażeniem każdego transformatora energetycznego. Niezawodność pracy tych elementów w zasadniczy sposób rzutuje na jakość działania transformatorów, a czynnikiem zewnętrznym istotnie wspierającym ich trwałość jest prawidłowo opracowany i realizowany proces eksploatacji. Jednym z działań o szczególnym znaczeniu dla poprawnego funkcjonowania transformatorów jest przestrzeganie okresu ich badań [1,4,6,7]. Z praktyki eksploatacyjnej wynika, że czynność ta nie zawsze jest przestrzegana i najczęściej występuje wydłużanie czasu eksploatacji użytkowanych transformatorów. Ponadto analiza danych eksploatacyjnych wskazuje na to, że izolatory przepustowe zamontowane na transformatorze rzadko kiedy są szczegółowo diagnozowane i poddawane wymianie w trakcie eksploatacji. Doprowadziło to do stanu, w którym w zdecydowanej większości użytkowanych w kraju transformatorów wiek izolatorów przepustowych przekracza 25 lat.

Do oceny stopnia degradacji izolacji przepustów standardowo używa się pomiarów pojemności i współczynnika strat dielektrycznych przy częstotliwości sieciowej (50 Hz). Jednak doświadczenia praktyczne związane ze stosowaniem tej metody wykazały, że ma ona zbyt niski poziom czułości przy identyfikacji procesów starzeniowych i stopnia ich rozwoju w strukturze izolacji przepustu transformatorowego. Możliwym rozwinięciem tej metody mogą być dynamiczne pomiary procesów

relaksacyjnych. Jednak wymagają one wyłączenia transformatora, a ta czynność wielokrotnie nie może być wykonana ze względu na bieżące potrzeby systemu elektroenergetycznego. Stąd też podejmowane są próby wykorzystania specyfiki niektórych procesów fizycznych, które umożliwią diagnostykę izolacji bez konieczności wyłączenia transformatora. Proponuje się między innymi wykonywanie pomiarów wyładowań niezupełnych i dokonywanie oceny zarejestrowanych sygnałów za pomocą analizy emisji akustycznej lub promieniowania elektromagnetycznego. Do nowych propozycji diagnostycznych należy zaliczyć również metodę opartą na pomiarach emisji promieniowania cieplnego z wykorzystaniem techniki termowizyjnej. Główną jej zaletą jest możliwość dokonania oceny stanu technicznego izolatora przepustowego bez konieczności wyłączenia transformatora.

Mechanizm przebicia izolacji przepustu

Izolacja przepustów z izolacją stałą jest kompozytem polimerowym wykonanym w postaci papieru impregnowanego (typ RIP – Resin Impregnated Paper) lub za pomocą papieru sklejonego żywicą (typu RBP – Resin Bonded Paper). Matrycą polimerową tych kompozytów są żywice fenolowo-formaldehadowe lub epoksydowe, a technologie ich wytwarzania są odmianami powszechnie stosowanych metod przy produkcji laminatów, ze szczególnym uwzględnieniem zapewnienia właściwości wymaganych dla izolacji wysokonapięciowej. Do wymagań tych należą:

- stechiometryczne utwardzenie żywicy,
- odpowiednia adhezja żywicy do papieru elektroizolacyjnego,
- brak wolnych przestrzeni, kawern lub fazy ciekłej i lepko-sprężystej.

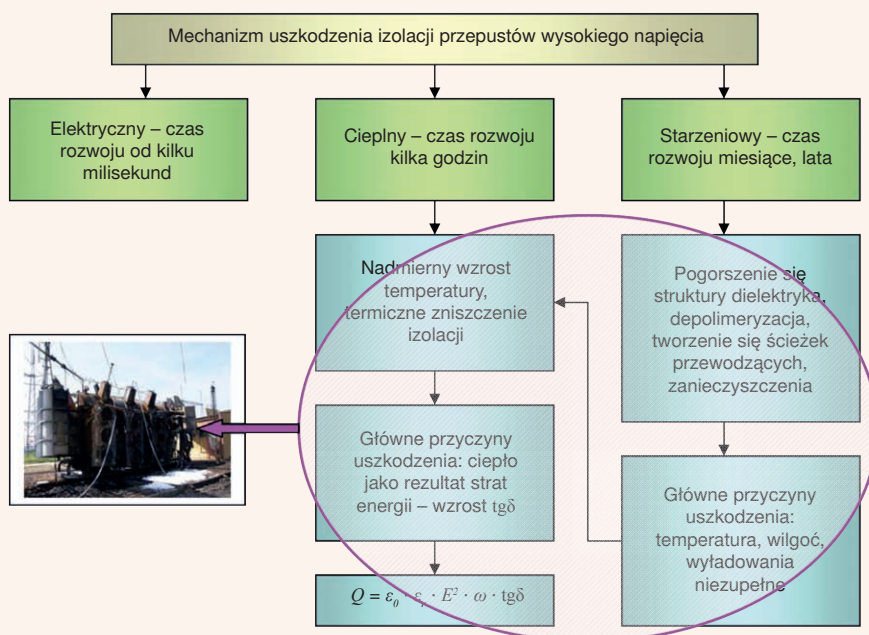
Wskutek niekorzystnego oddziaływania pola elektrycznego i czynników zewnętrznych (np. temperatury) izolacja izolatora przepustowego jest narażona na uszkodzenie według mechanizmu schematycznie przedstawionego na rysunku 1.

¹⁾ dr hab. inż. Waldemar Skomudek, prof. n.dzw., Politechnika Opolska, Katedra Zarządzania Projektami; w.skomudek@po.opole.pl

²⁾ dr hab. inż. Jan Subocz, prof. nadzw., Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny; jan.subocz@zut.edu.pl

³⁾ dr inż. Marek Szrot, *Energo-Complex Sp. z o.o.*; marek.szrot@energo-complex.pl

⁴⁾ Pracę zrealizowano w ramach projektu rozwojowego NCBiR R01004406/2009 pt.: Ocena stanu technicznego kondensatorowych przepustów wysokiego napięcia



Rys.1. Schemat mechanizmu uszkodzenia izolacji przepustów wysokiego napięcia

Prostym w zdefiniowaniu i najszybciej postępującym jest mechanizm elektrycznego przebicia izolacji. Czas jego rozwoju trwa do kilku milisekund i polega głównie na dostarczeniu przez pole elektryczne odpowiednio dużej energii do nośników ładunku (elektronów lub jonów), które spowodują zniszczenie struktury materiału izolacyjnego. Proces ten przebiega przeważnie w fazie amorficznej laminatu lub na granicy faz żywica-papier elektroizolacyjny. Energia wiązań większości tworzyw sztucznych jest rzędu 10⁵...12 eV, co po uwzględnieniu drogi swobodnej inicjujących elektronów lub jonów pozwala oszacować krytyczne natężenie lokalnego pola elektrycznego inicjującego przebicie na poziomie 10⁵...10⁶ V/m. Stąd w praktyce eksploatacyjnej mechanizm ten praktycznie nie występuje. Możliwy jest on natomiast podczas prób napięciowych, a dominuje w trakcie wyznaczania wytrzymałości elektrycznej jako parametru materiałowego.

Cieplny mechanizm przebicia izolacji jest właściwie konsekwencją niekorzystnego bilansu cieplnego w materiale, który powoduje w pierwszej kolejności termiczne zniszczenie struktury izolacyjnej, a następnie jej elektryczne przebicie pod wpływem roboczego natężenia pola elektrycznego. Formy dostarczenia energii cieplnej do zapoczątkowania tego mechanizmu mogą być różne. Dla przykładu mogą to być straty dielektryczne. Czas rozwoju cieplnego mechanizmu przebicia liczony jest zwykle w godzinach i – jak się wydaje – jest on najbardziej prawdopodobną bezpośrednią przyczyną większości awarii przepustów izolacyjnych. Wskazują na to okoliczności awarii, które najczęściej występują w godzinach wieczornych po upalnym dniu. W tych okolicznościach temperatura wewnątrz rdzenia mogła przekroczyć wytrzymałość cieplną izolacji i stworzyć warunki do rozwoju mechanizmu cieplnego, który po kilku godzinach prowadzi do awarii.

Typowy, starzeniowy mechanizm przebicia izolacji zbliżony jest do cieplnego, z tą jednak różnicą, że zmiany struktury kompozytu może spowodować znacznie więcej czynników,

do których należą między innymi: wyładowania niezupełne, wilgoć, drgania, oddziaływania chemiczne czy też wysokoenergetyczne promieniowanie. Jednak ostatecznie prowadzi on do zapoczątkowania mechanizmu cieplnego przy napięciu znamionowym.

Analiza mechanizmów uszkodzenia izolacji izolatorów kompozytowych prowadzona w różnych ośrodkach badawczych wykazała, że rola bezpośredniego oddziaływania pola elektrycznego w tym procesie jest pomijalnie mała w pierwszej jego fazie, natomiast jest decydująca w końcowym etapie procesu degradacji izolacji. Ta krótka analiza dowodzi, że rozkład temperatury wewnątrz rdzenia izolatora przepustowego jest głównym, obok gęstości mocy wyładowań niezupełnych, czynnikiem sprzyjającym rozwojowi procesu starzenia izolacji [5, 3].

Analiza modelu cieplnego izolatora przepustowego typu RIP

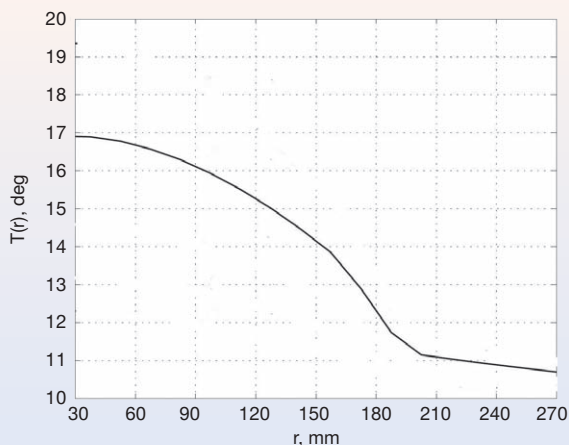
Generowane przez izolator pole termiczne można analizować między innymi za pomocą matematycznego modelu z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Wymaga to uwzględnienia takich parametrów, jak: wymiary geometryczne przepustu, wartości zewnętrznej temperatury osłony, współczynnika strat dielektrycznych, prądu obciążenia oraz warunków wymiany ciepła z otoczeniem.

W przypadku przepustu typu RIP matematyczny model ustalonego, przestrzennego rozkładu temperatury w cylindrycznym układzie współrzędnych ($r; -\Phi, -z$) opiera się na założeniu, że głównym źródłem ciepła są straty dielektryczne, a współczynnik strat dielektrycznych w określonym punkcie objętości rdzenia opisany jest nieliniową zależnością w postaci [2, 3]:

$$\operatorname{tg}\delta = \operatorname{tg}\delta_0 \cdot e^{\alpha(T(r;-\Phi,-z)-20)} \quad (1)$$

gdzie: $T(r, \Phi, z)$ jest funkcją opisującą przestrzenny rozkład temperatury, $tg\delta_0$ jest współczynnikiem strat dielektrycznych występujących w temperaturze 20°C , a α jest współczynnikiem zależny od stopnia zestarzenia izolacji.

Przyjmując odpowiednie wymiary geometryczne przepustu, stałe materiałowe elementów składowych (laminat żywiczno-papierowy, porcelana, impregnat) oraz temperaturę powierzchni osłony porcelanowej równą $T = 10^\circ\text{C}$ można wykreślić m.in. rozkład temperatury po promieniu przepustu od powierzchni sworznia prądowego do powierzchni osłony zewnętrznej (rys. 2).



Rys. 2. Rozkład temperatury po promieniu przepustu typu RIP (220 kV) uzyskany z analizy pola termicznego dla temperatury otoczenia $T_0 = 10^\circ\text{C}$, współczynnika $\alpha = 0,01$ oraz $tg\delta_0 = 0,015$ [3]

Stosując symulacje komputerowe można wykazać, że w sprzyjających okolicznościach temperatura w dolnych warstwach rdzenia izolatora przepustowego może osiągnąć wartość rzędu $80\text{-}100^\circ\text{C}$. Biorąc pod uwagę, że izolacja tego przepustu wykonana jest z kompozytu „żywica fenolowo-formaldehydowa-papier” oddziaływanie takiej temperatury przekracza długotrwałą odporność cieplną zarówno papieru jak i żywicy. Zatem, należy spodziewać się stopniowej degradacji izolacji, zwłaszcza w głębszych jej warstwach w pobliżu sworznia prądowego.

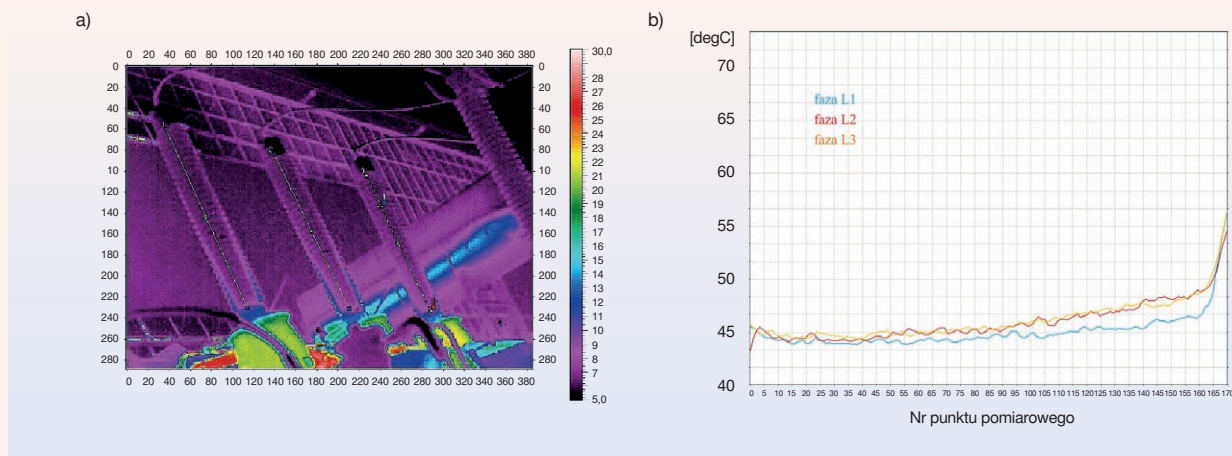
Zastosowanie techniki termowizyjnej do badania przepustów typu RIP

Znajomość modelu cieplnego przepustu można wykorzystać do rozwiązania zagadnienia odwrotnego, jakim jest oszacowanie temperatury dolnych warstw rdzenia na podstawie znajomości geometrii przepustu, temperatury zewnętrznej osłony porcelanowej oraz temperatury otoczenia. Do realizacji tego celu można wykorzystać obraz zewnętrznego pola uzyskany z cyfrowej analizy termogramu rejestrowanego przez kamerę termowizyjną [8, 10]. Pomiar taki możliwy jest do wykonania w systemie on-line bez potrzeby wyłączenia transformatora z ruchu elektrycznego. Za podstawę oceny stanu technicznego przepustu przyjmuje się wartość oszacowanej temperatury wewnątrz izolacji, a w szczególności jej rozkład w dolnych warstwach wzdłuż osi przepustu.

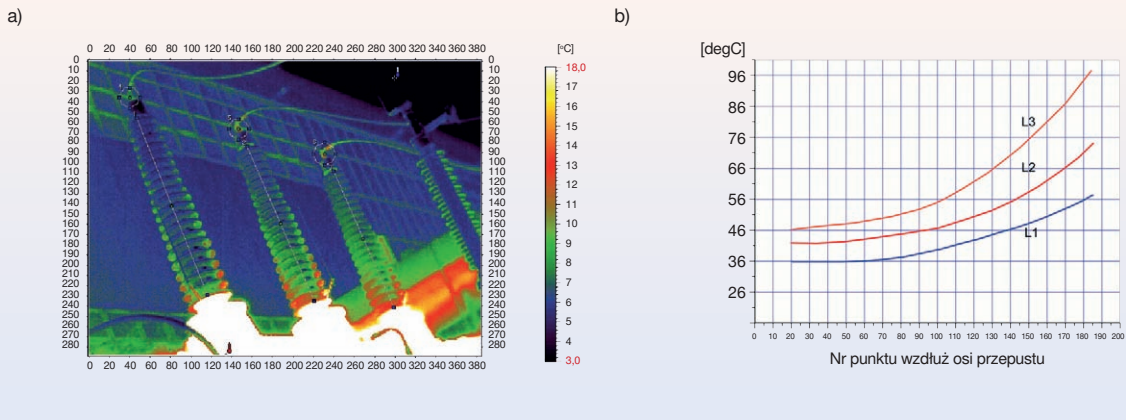
Praktyczny sposób zastosowania takiego podejścia do diagnostyki przepustów zaprezentowano w dalszej części artykułu na przykładzie dwóch transformatorów typu TNEP 240 000/220PN oraz TFBN 240 000/220, które wyposażone były w komplet przepustów RIP 220 kV, odpowiednio typu OTF 1050/245 oraz OTF 245 (rys. 3, 4). W obu przypadkach pomiary wykonano w tym samym dniu przy temperaturze otoczenia ok. 3°C .

Na rysunku 3a przedstawiono termogram przepustów zamontowanych na transformatorze typu TNEP 240 000/220PN, natomiast na rysunku 3b oszacowany rozkład temperatury w warstwach izolacji przylegających do rury z przewodem fazowymi wzdłuż osi przepustów przy założeniu temperatury otoczenia 35°C . Wynika z niego, że we wszystkich przepustach obliczony rozkład temperatury był niemal identyczny, a jej oszacowana wartość w dolnej części izolacji w pobliżu flanszy nie powinna przekraczać 50°C .

Na tej podstawie można wnioskować, że w izolacji przepustów nie powinny występować procesy intensywnego starzenia. Wnioski te skonfrontowano ze standardowymi pomiarami współczynnika strat dielektrycznych. Wykazały one, że jego wartości były zbliżone dla wszystkich przepustów i zawierały się w granicach $tg\delta_{50\text{Hz}} = 0,6\text{-}0,7\%$.



Rys. 3. Termogram przepustów typu RIP 220 kV transformatora TNEP 240 000/220PN (a) oraz obliczony wewnętrzny rozkład temperatury po osi przepustu (b)



Rys. 4. Termogram przepustów typu RIP 220 kV transformatora TFBN 240 000/220 (a) oraz obliczony rozkład temperatury po długości wewnętrznej warstwy izolacji (b)

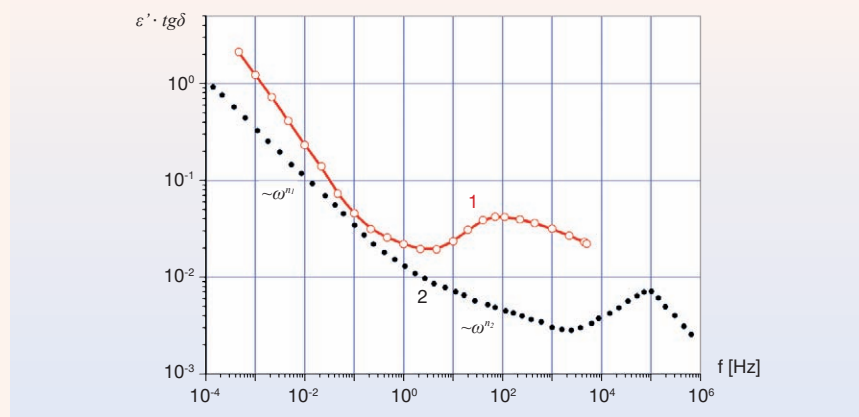
Natomiast w przypadku transformatora TFBN 240 000/220 matematyczna analiza pola termicznego wykazała, że dla przepustów fazy L1 i L2 należy spodziewać się wewnętrznej temperatury izolacji nie większej niż 70 °C, co jest dopuszczalną temperaturą pracy. Ale dla przepustu fazy L3 obliczona temperatura tych warstw w pobliżu kołnierza (flanszy) może wynosić już około 90°C i tym samym przekraczać długotrwałą odporność cieplną kompozytu, a zwłaszcza papieru. Zatem, można spodziewać się wystąpienia procesu termicznej degradacji izolacji.

Wykonane w odstępie kilku miesięcy pomiary współczynnika strat potwierdziły, że generacja ciepła w tych przepustach jest większa. Wynosiły one $\text{tg}\delta_{50\text{Hz}} = 1,58\%$, $1,15\%$ oraz $1,72\%$ odpowiednio dla przepustów L1, L2, L3, co wskazuje na zaawansowany etap procesu starzenia zwłaszcza w fazie L3. Przeprowadzone spektroskopowe pomiary procesów relaksacyjnych potwierdziły te przypuszczenia (rys.5). W przypadku przepustu fazy L3 zaobserwowano bowiem dodatkowy proces relaksacyjny w zakresie częstotliwości 10-1000 Hz (krzywa 1), który może być spowodowany zawartością produktów starzenia w kawernach izolacji lub też tzw. β -relaksacją dużych grup makromolekularnych powstałych w wyniku rozkładu termicznego żywicy bądź papieru. Warto zwrócić uwagę, że w poprawnie utwardzonych, nowych kompozytach ży-

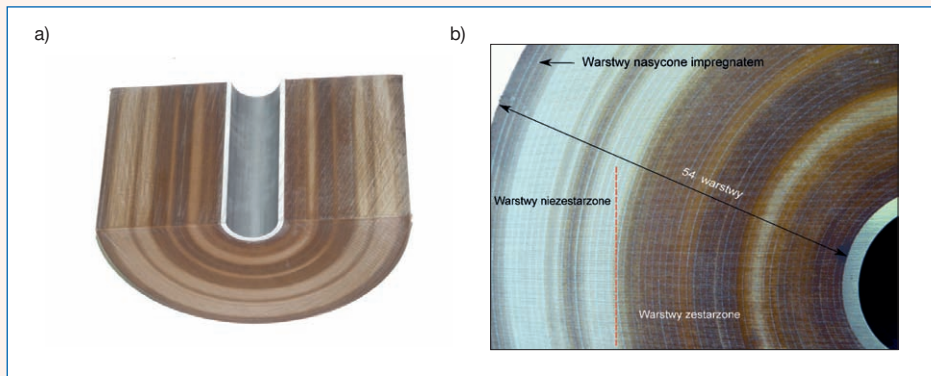
wic termoutwardzalnych w procesach elektrycznych dla częstotliwości niższych od 100 Hz dominuje relaksacja według uniwersalnego prawa Jonschera lub przewodnictwo jonowe [8, 11, 12]. Natomiast β -relaksacją grup bocznych żywicy i zbrojenia (np. celulozy) lokuje się znacznie powyżej 10 kHz (rys.5 – krzywa 2).

Na podstawie wyników uzyskanych z analizy spektroskopowej oraz termowizyjnej podjęto decyzję o wycofaniu przepustu fazy L3 z eksploatacji. Po zdemontowaniu z transformatora izolatora przepustowego fazy L3 poddano go szczegółowym badaniom dokonując przede wszystkim jego wewnętrznej rewizji.

Na rysunku 6 przedstawiono obraz przekroju poprzecznego izolacji przepustu z zaznaczonymi warstwami, w których postępuje proces degradacji termicznej kompozytu papierowo-żywicznego. Z uzyskanego materiału badawczego wynika, że izolacja przepustu jest zbudowana z pięćdziesięciu czterech warstw kompozytu przedzielonych ekranami sterującymi. Zarejestrowany proces degradacji izolacji postępuje w trzydziestu jeden warstwach, a w dwunastu z nich jest on bardzo zaawansowany (rys.6b). Należy podkreślić, że zasięg zdegradowanego obszaru izolacji w dużym stopniu pokrywał się z rejonem występowania podwyższonej temperatury, wyznaczonym na podstawie matematycznego modelowania rozkładu temperatury.



Rys. 5. Częstotliwościowa charakterystyka stratności przepustu fazy L3 transformatora TFBN 240 000/220 (1) oraz charakterystyka wzorcowa kompozytów termoutwardzalnych (2)



Rys. 6. Rewizja wewnętrzna izolacji przepustu typu RIP 220 kV [9]: a) fragment badanej izolacji, b) ekspozycja warstwowego ułożenia izolacji przepustu ze wskazaniem obszarów z zaawansowanym procesem starzenia izolacji

Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały, że istnieje możliwość diagnozowania przepustów typu RIP za pomocą pomiarów termowizyjnych. Proces ten opiera się głównie na ocenie temperatury w głębokich warstwach rdzenia izolatora przepustowego. Czynnością poprzedzającą cyfrową analizę termogramów jest modelowanie pola termicznego izolatora przepustowego z wykorzystaniem metody elementów skończonych. W przypadku badanego izolatora przepustowego uzyskane wyniki z modelowania i rewizji wewnętrznej rdzenia wykazały, że obecność wysokiej temperatury osłony przepustu może doprowadzić do przekroczenia jej długotrwałej odporności cieplnej i w konsekwencji do termicznej degradacji izolacji.

Zaprezentowana metoda oceny stanu technicznego izolacji z wykorzystaniem techniki termowizyjnej jest prosta w zastosowaniu, a jej szczególną zaletą jest możliwość wykonania niezbędnych rejestracji obrazów termograficznych bez konieczności wyłączenia transformatora. Jednak metoda ta wymaga jeszcze zebrania kolejnych doświadczeń, które pozwolą na pełne potwierdzenie jej skuteczności w identyfikacji procesów starzeniowych w izolatorach przepustowych wysokiego napięcia, wykonanych zarówno na bazie impregnatów żywicznych jak i olejowych.

LITERATURA

- [1] Analiza awaryjności stacji transformatorowych SN/nn na przykładzie wybranych Spółek Dystrybucyjnych. Raport PTPIREE, Poznań 2001-2002
- [2] Власов А.Б.: Диагностическая модель тепловизионного контроля высоковольтных вводов. Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования – ред. А.И. Таджибаева, Выпуск 27. Санкт–Петербург 2005, с. 41-54
- [3] Emirsajtów Z., Subocz J.: Modelowanie rozkładu temperatury w przepuście WN. *Przegląd Elektrotechniczny* 2010, nr 11b, s.154-157
- [4] Govender K., Moodley L., Nesbitt A.: Partial discharge detection using RFI measurements. *Transmission and Distribution*, April 2010, p. 26-28
- [5] Krüger M.: Transformer diagnosis – practical experience using simple methods like winding resistance measurement, dynamic tap changer testing, ratio, leakage reactance capacitance and dissipation factor measurement. Omicron Electronics GmbH, Austria
- [6] Монастырский А.Е.: Экономические аспекты эксплуатации трансформаторного оборудования. Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования – ред. А.И. Таджибаева, Выпуск 27. Санкт–Петербург 2005, с. 7-11
- [7] Skomudek W., Szrot M.: Ocena stanu technicznego wysokonapięciowych izolatorów przepustowych transformatorów mocy (1). *Energetyka* 2011, nr 10
- [8] Subocz J.: Wybrane zagadnienia przewodnictwa i relaksacji dielektrycznej w aspekcie diagnostyki izolacji kompozytowej. *Prace Naukowe PS* nr 580. Szczecin 2003
- [9] Subocz J., Zenker M., Mroziak A.: Wpływ temperatury na odpowiedź dielektryczną przepustów transformatorowych wysokiego napięcia z izolacją stałą. *Pomiary- Automatyka-Kontrola* 2011, nr 4, s. 376-379
- [10] Wańkowicz J., Bielecki J., Szrot M., Subocz J., Malewski R.: HV bushing failure in service, diagnostics and modelling of oil-type bushings. CIGRE Plenary Session A2-104. Paris 2010
- [11] Jonscher A.: Dielectric relaxation in solids. *J. Phys. D.: Appl. Phys.*, 32 (1999), R57
- [12] Das-Gupta D.K., Scarpa P.C.N.: Modeling of dielectric Relaxation Spectra of Polymers in the Condensed Phase. *IEEE Electrical Insulation Magazine* 1999, Vol. 15, No 2

