

## Aspekty zastosowania światłowodowego pomiaru temperatury punktów gorących w wysokonapięciowych uzwojeniach transformatorów dużych mocy

**Streszczenie.** W referacie przedstawiono problematykę wykonywania pomiarów temperatury w transformatorach dużych mocy. Na przykładach, przeprowadzonych w EthosEnergy Poland S.A. instalacji systemów pomiarowych temperatury działających w oparciu o czujniki optyczne, przedstawiono metodę bezpośredniego pomiaru temperatury punktów gorących w uzwojeniach. Zaprezentowano zasadę działania, konfigurację oraz korzyści wynikające z zastosowania nowoczesnej aparatury pomiarowej umożliwiającej ciągłą kontrolę temperatury.

**Abstract.** The paper presents the main aspects connected with temperature measurements execution in high power transformers. There are presented a method of hot spots direct measurements in transformer windings, based on the examples of optical fiber system installations realized by EthosEnergy Poland S.A. There are presented a principle of the system operation, its configuration and benefits resulting from application of modern measuring equipment making possible continuous temperature control. **The temperature measurements in high power transformers**

**Słowa kluczowe:** światłowód, hot spot, temperatura, uzwojenie.

**Keywords:** optic fiber, hot spot, temperature, winding.

### Wstęp

Obliczanie i pomiary temperatur należą do ważnych zagadnień w projektowaniu transformatorów. Zjawiska cieplne są bezpośrednio związane z obciążeniem transformatora, generowanymi w wyniku jego pracy stratami, a w konsekwencji z procesem starzeniowym izolacji.

Zaawansowane projektowanie, pomiar i kontrola temperatur transformatora w trakcie prób końcowych oraz podczas eksploatacji gwarantuje jego długotrwałą i bezpieczną pracę. Izolacja transformatorów olejowych wykonywana jest głównie z materiałów na bazie celulozy i zakłada się, że jej trwałości w normalnych warunkach eksploatacji powinna wynosić od 20 do 25 lat.

Standardowy pomiar temperatur transformatora realizowany jest najczęściej z wykorzystaniem termometrów, metodą oporową poprzez wykorzystanie zjawiska zależności rezystancji wynikającej ze zmiany temperatury. Najczęściej stosowany jest pomiar czujnikami typu Pt100 lub Ni100. W przypadku tych czujników metalem termoczułym jest wysokiej jakości platyna lub nikiel. Pomiary te mają jednak ograniczenie związane z obszarem instalacji czujników. Niedopuszczalne są zbliżenia do elementów pod napięciem, a tym samym ich instalacja w uzwojeniach. Z tej przyczyny czujniki te instalowane są na pokrywie w kapilarach wypełnionych olejem lub w górnym jarzmie rdzenia transformatora jako czujnik szczylinowy. Pomiar temperatury uzwojeń może być realizowany tylko pośrednio z wykorzystaniem modelu cieplnego.

Nowe możliwości stwarza wykorzystanie do pomiarów, światłowodowych czujników optycznych. Pierwsze próby realizacji bezpośredniego pomiaru temperatury w transformatorach z użyciem tych czujników podjęto w połowie lat 80-tych. Od tego momentu systemy pomiarowe są stale udoskonalane. Aktualnie istnieje możliwość bezpiecznej instalacji czujników optycznych bezpośrednio w uzwojeniach wysokonapięciowych nawet do 420kV.

### Procesy starzeniowe

Temperatura przewyższająca wartości dopuszczalne ma bezpośredni wpływ na przyspieszenie procesów starzeniowych izolacji. Dodatkowym akceleratorem tych procesów jest zawilgocenie izolacji. W połączeniu z upływem czasu i długotrwałym jej działaniem mamy do

czynienia z procesami starzeniowymi które określają tzw. czas życia izolacji.

Prawo sformułowane przez Arrheniusa dotyczące szybkości reakcji chemicznej zostało dla ograniczonego przedziału temperatur ujęte przez Montsingera [1,2] przybliżoną zależnością wykładniczą, w której czas  $\tau$  osiągnięcia stanu końcowego trwałości izolacji wyraża wzór:

$$(1) \quad \tau = Ae^{-p\Theta}$$

gdzie:  $A=7,154 \times 10^4$ ,  $p=0,0865$  – stałe;  $\Theta$  – temperatura w  $^{\circ}\text{C}$ .

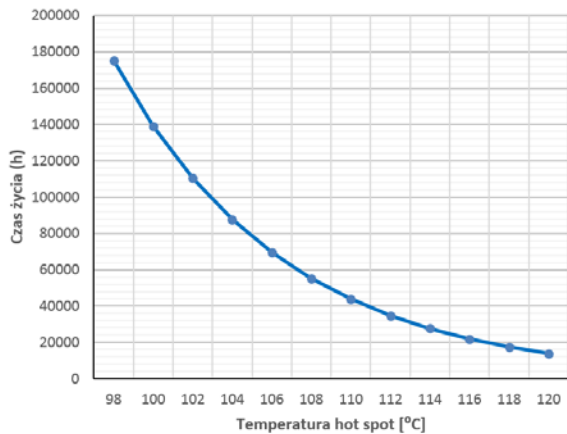
Wartość stałych we wzorze (1) są uzależnione od wielu czynników, takich jak początkowa jakość wyrobów celulozowych (dodatki chemiczne, skład surowca) i parametry otoczenia (zawartość wody, wolny tlen w układzie). Niezależnie od tego w przedziale temperatur od  $80^{\circ}\text{C}$  do  $140^{\circ}\text{C}$  odpowiadającym rzeczywistym warunkom pracy transformatora olejowego współczynnik  $p$  uznaje się za stały. Obecnie jego wartość jest tak ustalona, że szybkość starzenia izolacji podwaja się przy wzroście temperatury o  $6^{\circ}\text{C}$  [3].

W efekcie tych założeń dla transformatorów zaprojektowanych zgodnie z normą IEC 60076 [3,4] otrzymujemy względną szybkość cieplnego starzenia się izolacji równą jedności dla temperatury najgorętszego miejsca  $98^{\circ}\text{C}$ , czemu odpowiada praca w temperaturze otoczenia  $20^{\circ}\text{C}$  i przyrost temperatury najgorętszego miejsca  $78^{\circ}\text{C}$ . Względną szybkość starzenia określa następująco [4]:

$$(2) \quad V = 2^{(\Theta_h - 98)/6}$$

gdzie:  $V$  – względna szybkość starzenia cieplnego,  $\Theta_h$  – temperatura punktu gorącego w  $^{\circ}\text{C}$ .

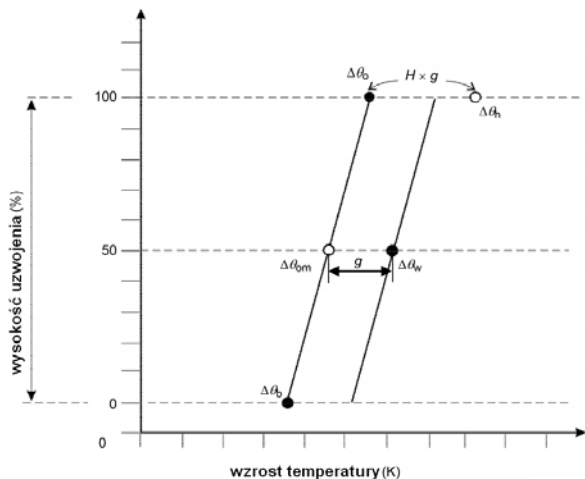
Coraz częściej transformatory mają układ izolacyjny wykonany z materiałów o ulepszonych właściwościach cieplnych. W wielu przypadkach transformatory z tą izolacją mają normalny oczekiwany czas życia w temperaturze najgorętszego miejsca  $110^{\circ}\text{C}$ . Wpływ wzrostu temperatury na czas życia izolacji celulozowej przedstawia rysunek nr 1.



Rys. 1. Czas życia izolacji celulozowej w funkcji temperatury punktu gorącego [4]

### Zagadnienie punktu gorącego – hot spot

Punkt gorący uzwojenia, tzw. „hot spot” to najważniejszy z parametrów związany z procesami starzeniowymi izolacji celulozowej transformatora. Zakładając, że transformator jest wykonany i eksploatowany prawidłowo, a udział czynników przyspieszających takich jak tlen i woda jest zminimalizowany, to najistotniejszym czynnikiem dla trwałości układu izolacyjnego pozostaje temperatura. Głównym źródłem temperatury są uzwojenia, w których w wyniku przepływu prądu powstają straty podstawowe i dodatkowe.



Rys.2. Wykres rozkładu temperatur w transformatorze [3]

gdzie:  $\Delta\theta_b$ ,  $\Delta\theta_{om}$ ,  $\Delta\theta_h$  – przyrost pomiędzy średnią temp. oleju w kadzi, a temperaturą oleju odpowiednio na górze, środku i dole uzwojenia,  $H$  – współczynnik hot-spot,  $g$  – gradient średniej temp. uzwojenia do średniej temp. oleju w kadzi,  $\Delta\theta_h$  – przyrost pomiędzy temp. oleju w kadzi, a temp. hot-spot,  $\Delta\theta_w$  – przyrost pomiędzy średnią temp. oleju, a średnią temp. uzwojenia.

Ze wzrostem wysokości uzwojenia jego temperatura rośnie. Dlatego punkt gorący  $\theta_h$  znajduje się w jego górnej strefie. Związane jest to z tym, że w strefie tej następuje koncentracja strat dodatkowych w uzwojeniu, ponadto uzwojenia najwyższych napięć mają dodatkowo wzmocnioną izolację elektryczną pogarszającą oddawanie ciepła.

Bezpośredni pomiar temperatury punktów gorących w uzwojeniach transformatorów wysokonapięciowych dużych mocy wiąże się z rozwiązaniem poważnego problemu jakim jest pomiar temperatury w obszarze o wysokich napięciach napięciowych. Niemożliwe jest bezpieczne zastosowanie pomiaru termometrycznego dotychczas stosowanymi technikami. Ze względu na słaby sygnał niemożliwy jest również skuteczny pomiar jakąkolwiek metodą pośrednią.

Zastosowanie czujników optycznych, wprowadzanych do wnętrza kadzi transformatora, umożliwia bezinwazyjny, prowadzony lokalnie, z małą inercją i on-line, pomiar temperatury w punktach gorących, a przesył informacji może odbywać się na duże odległości.

Zalety zastosowania włókien światłowodowych do pomiaru temperatury w transformatorach, to:

- bezpośredni pomiar w czasie rzeczywistym,
- praca w bezpośrednim kontakcie z punktem gorącym,
- odporna konstrukcja,
- brak zagrożeń dla uzwojeń wysokonapięciowych,
- odporność na działanie oleju, próżnię, impregnaty,
- odporność na działanie temperatury,
- odporność na wibrację i zmienne warunki pracy.

Optyczne czujniki temperatury można instalować:

- w uzwojeniach do 420kV,
- pomiędzy blachami i pakietami rdzenia,
- na elementach konstrukcji mechanicznej części aktywnej.

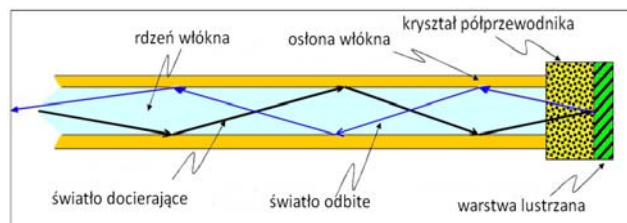
### Budowa światłowodowego czujnika temperatury

Światłowod (ang. optical fiber) jest falowodem służącym do przesyłania światła. Zbudowany jest z włókna dielektrycznego - najczęściej szklanego, noszącego nazwę rdzenia (ang. core) oraz otuliny, zwanej płaszczem (ang. cladding) z tworzywa sztucznego lub szkła o współczynniku załamania światła mniejszym niż współczynnik załamania rdzenia. Światło transmitowane jest przez światłowod w rdzeniu na skutek zachodzenia zjawiska całkowitego wewnętrznego odbicia. Zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia oznacza sytuację w której promień w rdzeniu padając pod kątem, większym od pewnego kąta, zwanego kątem granicznym na granicy faz rdzeń-płaszcz odbija się i wraca do rdzenia bez strat, co umożliwia propagację światła przez włókno.

Optyczny pomiar temperatury przebiega co do zasady następująco: przewód światłowodowy zapewnia przebieg wiązki światła emitowanego ze źródła oraz wiązki powrotnej. Na końcu rdzenia przewodu światłowodowego wykonanego ze szkła kwarcowego naniesiona jest warstwa arsenku galu (GaAs) o grubości  $\sim 100\mu\text{m}$  wraz z warstwą odbijającą wiązkę światła [5]. Podczas pomiaru wykorzystano zjawisko polegające na pochłanianiu przez kryształ podczas przechodzenia przez niego światła pewnej długości fali i tłumienia jego natężenia w sposób wykładniczy. Opisuje to poniższa zależność:

$$(3) \quad I_q = I_o e^{-\alpha d}$$

gdzie:  $I_o$  i  $I_q$  - wartość natężenia światła przed i po przejściu przez kryształ,  $d$  grubość powłoki kryształu,  $\alpha$  współczynnik pochłaniania światła.



Rys. 3. Zasada działania optycznego czujnika temperatury [6]

Jeżeli wartości geometryczne pozostają stałe wtedy współczynnik  $\alpha$  zależy tylko od temperatury [5]. W przypadku wzrostu temperatury dzięki zastosowaniu arsenku galu następuje większe wchłanianie światła, widmo światła niepochlóniętego przesuwają się do większych długości fali. W każdej temperaturze długość fali odbitej będzie inna. Dla poszczególnych temperatur następuje

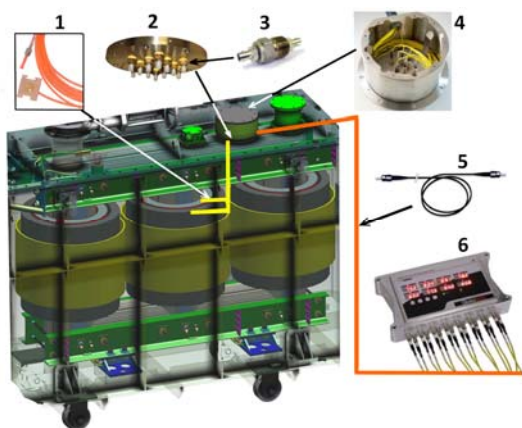
skok, nazywany przesunięciem absorpcyjnym. Dla arsenku galu zależność między określoną długością fali i temperaturą jest praktycznie liniowa. Zjawisko to zostało wykorzystane do pomiaru temperatury.

Czujnik cechuje się szybkim działaniem przy niewielkich rozmiarach. Dzięki tym cechom możliwe jest wykorzystanie tego rozwiązania w pomiarach temperatury punktu gorącego w transformatorach dużych mocy.

### Konfiguracja systemów pomiarowych

W EthosEnergy Poland S.A. wykorzystano instalacje systemów pomiaru światłowodowego kilku wiodących firm. Systemy oparte są w zasadzie o podobną konfigurację elementów pomiarowych. W ich skład wchodzi te same elementy różniące się nieznacznie (tabela 1). Ogólną konfigurację systemu pomiarowego pokazano na rysunku 4.

Pierwszym najważniejszym i najczulszym składnikiem tego systemu (rys.4) jest światłowód pomiarowy (1). Montaż dokonywany jest w punkcie pomiarowym zlokalizowanym wewnątrz kadzi transformatora. Instalacja czujnika powinna być przeprowadzona w sposób dokładny, tak by chronić czujnik przed uszkodzeniem przy czynnościach montażowych podczas produkcji transformatora i zapewnić jego trwałość w czasie eksploatacji. Jeżeli wykrycie uszkodzenia światłowodu pomiarowego nastąpi po zalaniu transformatora olejem praktycznie nie ma możliwości jego wymiany, dlatego wielokrotnie przeprowadzana jest procedura testowa światłowodu podczas procesu produkcji transformatora. Montaż światłowodów wykonywany jest w uzwojeniach, czasami również w rdzeniu lub na elementach konstrukcji części aktywnej. Należy zwrócić uwagę na fakt, że napięcia na zaciskach liniowych uzwojeń transformatorów dużych mocy w krajowej energetyce mogą mieć wartość 420kV.



Rys. 4. Konfiguracja systemu pomiarowego z zastosowaniem czujników światłowodowych: (1) światłowodowy czujnik optyczny, (2) płyta przepustów, (3) przepust światłowodowy, (4) skrzynka osłona, (5) przewód wyprowadzeniowy, (6) rejestrator temperatury

### Światłowodowe czujniki optyczne (1)

Do pomiarów temperatury w transformatorach stosowane są światłowodowe czujniki optyczne producentów kanadyjskich, tj. Nortech, Neoptix i Opsens. W oparciu o produkty tych firm stosowana jest odpowiednia aparatura rejestrująca wraz ze specjalistycznym oprogramowaniem. Najważniejsze parametry dla trzech typów czujników optycznych przedstawia Tabela 1.

Zasadnicza różnica w wykonaniu czujników optycznych TPT-62, T2S i OTG-T, to średnica rdzenia światłowodu, która wynosi 62,5µm lub 200µm. W związku z tym systemy te nie są kompatybilne. Szczegóły techniczne wykonania przykładowego przewodu T2S przedstawiono na rysunku 5. Konstrukcje końcówek czujników w obu rozwiązaniach

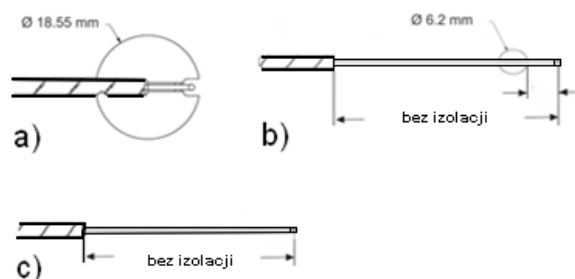
różnią się, lecz co do zasady działania rozwiązania są podobne. Wykorzystują powłokę arsenku galu (GaAs) i powłokę odbijającą światło.

Tabela 1. Porównanie parametrów czujników optycznych

Cecha / Producent	Nortech (Fiso)	Neoptix (Qualitrol)	Opsens (Lumasense)
Oznaczenie producenta	TPT-62	T2S	OTG-T
Średnica rdzenia światłowodu	62,5µm	200µm	62,5µm
Średnica końcówki czujnika	1,1mm	1,21mm	1,1mm
Średnica pierwszej powłoki ochronnej	0,85mm	1,21mm	1mm
Średnica zewnętrznej powłoki osłonowej	3,15mm	3,1mm	3,0mm
Zakres pomiarowy temperatury	-40..225°C	-80..250°C	-40..230°C
Długość światłowodu	1..15m	1..25m	według zamówienia
Dokładność pomiarowa systemu	±1°C	±1°C	±0,8°C
Rozdzielczość pomiaru	0,1°C	0,1°C	0,1°C



Rys. 5. Wykonanie przewodu światłowodowego przeznaczony do pomiaru temperatury [7]



Rys. 6. Typy zakończeń czujników optycznych [8]

W celu ułatwienia montażu czujnika optycznego we wstawce opracowane zostały dwa wykonania zakończenia światłowodu, z dyskiem lub bez. Po wycięciu otworu we wstawce montaż polega na wciśnięciu dysku z czujnikiem w otwór (rys. 6a). Dopasowanie powinno być tak dobrane aby nie było konieczne dodatkowe klejenie elementów. Wstawka w tym przypadku powinna mieć grubość minimum 3,5 mm dzięki czemu nie nastąpi uszkodzenie rdzenia światłowodu pod wpływem siły prasującej uzwojenia. W innym przypadku (rys.6b) dzięki krótszej izolacji osłonowej światłowodu można instalację przeprowadzić przy pomocy wstawki o grubości 2mm. Ostatnie rozwiązanie (rys. 6c) umożliwi montaż we wstawce o grubości 1,5mm lub na innej dowolnej powierzchni pomiarowej.

Wszystkie modele światłowodów pomiarowych zakończone są standardową końcówką typu ST umożliwiającą dalsze podłączenie do przepustu wyprowadzeniowego. Kolory zewnętrznej izolacji osłonowej



dobierane są w jaskrawych kolorach, tak aby zapewnić dobrą widoczność przewodu. Zapewnienie mechanicznej trwałości światłowodu realizowane jest poprzez zabezpieczenie powłokami teflonu. Pierwsza warstwa ma na celu osłonięcie światłowodu i posiada wzdłużną szczelinę, która pozwala na impregnację olejem. Druga zewnętrzna osłona ma postać spiralną i stanowi główną osłonę przed uszkodzeniem mechanicznym. Spiralne nacięcia pozwalają na swobodne układanie przewodu zapewniając jednocześnie penetrację oleju. Izolacje są niezależne i przemieszczanie izolacji zewnętrznej nie uszkadza izolacji wewnętrznej lub światłowodu.

### Płyta przepustów (2)

Kolejnym elementem systemu pomiarowego jest płyta przepustów montowana na kadzi lub pokrywie transformatora. Dzięki zainstalowanym na niej przepustom (3) (rys.7) możliwe jest wyprowadzenie sygnału poza każdą transformatora. Przepusty obustronnie przystosowane są do połączenia z końcówkami ST.

Na płycie wykonanej ze stali instalowane jest od kilku do kilkunastu przepustów. Przepusty są wkręcane w nagwintowane otwory z użyciem uszczelnienia. Wewnątrz przepustu znajduje się światłowód zapewniający drogę dla sygnału świetlnego.



Rys. 7. Płyta przepustów

Płyty mogą być dostarczone z wcześniej zainstalowanymi przepustami i przetestowane na szczelność. Przepusty z zewnątrz osłonięte są przez pokrywę przepustów (4) będącą rodzajem skrzynki, w której można również bezpiecznie zwinąć naddatek przewodu światłowodowego.

### Przewody wyprowadzeniowe (5)

Na zewnątrz transformatora, sygnał musi zostać doprowadzony do rejestratora. W tym celu wykorzystuje się zewnętrzne przewody krosowe tzw. patchcords. Przewody te wykonywane są w identycznej technologii co światłowód wewnętrzny jednak inny jest typ zewnętrznej izolacji osłonowej. Wodoszczelną izolację o średnicy 3mm wykonuje się z poliuretanu wzmocnionego włóknem kevlarowym. Długość przewodu dobierana jest z zależności od miejsca instalacji przetwornika sygnału i może wynosić na-wet kilkaset metrów. Przewody formowane są w wiązki. Na obu końcach przewodu zainstalowane są końcówki typu ST.

### Rejestratory temperatury (6)

Ostatnim elementem układu pomiarowego jest rejestrator. Umożliwia prowadzenie ciągłego odczytu temperatury oraz jego rejestrację. Wszyscy producenci oferują urządzenia dedykowane do własnych układów pomiarowych. W zależności od potrzeb dostosowywana jest ilość kanałów pomiarowych dzięki czemu przy systemach najprostszyc możliwe jest ograniczenie kosztów tego najdroższego elementu układu pomiarowego.

W związku z tym, że podczas instalacji czujników optycznych w transformatorze wymagana jest wielokrotna kontrola, opracowano również proste urządzenia

jednokanałowe umożliwiające przetestowanie pojedynczego światłowodu i odczyt temperatury w punkcie jego instalacji (rys.8). Podstawową ich zaletą są niewielkie rozmiary oraz zasilanie bateryjne ułatwiające pomiar kontrolny podczas instalacji fabrycznej światłowodów lub ich kontrolę w miejscu pracy transformatora. Komunikacja z urządzeniami odbywa się poprzez komputer z użyciem portu RS-232. Możliwa jest również rejestracja wyniku pomiaru przy wykorzystaniu karty pamięci SD.



Rys. 8. Przenośne urządzenia pomiarowe Nomad

Główne urządzenia rejestrujące pracujące na zainstalowanych transformatorach umożliwiają obsługę do 16 kanałów pomiarowych jednocześnie (rys.9). Posiadają zakres pomiarowy od  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $230^{\circ}\text{C}$ , dokładność pomiaru  $1^{\circ}\text{C}$ , wbudowaną pamięć do rejestracji danych pomiarowych na przestrzeni wielu lat. Szereg wyjść pozwala na współpracę z komputerem, komunikację z systemem nadzoru lub nawet sterowanie urządzeniami chłodzącymi (rys.9).



Rys. 9. Rejestrator Nortech Sentinel II.

### Rekomendacje w zakresie instalacji czujników światłowodowych.

W związku z tym że pomiary światłowodowe w transformatorach rozpoczęto wykonywać w latach 80-tych podjęto również próby sformułowania wytycznych w normach co do ilości instalowanych czujników. Dokonano tego w załączniku informacyjnym E do normy PN-EN 60076-2 [3] (tabela 2).

Zaproponowano rozwiązanie w którym ilość instalowanych czujników światłowodowych uzależnia się od mocy transformatora trójfazowego. Zastosowano dwa przedziały mocy od 20 do 100MVA oraz powyżej 100MVA. W przypadku pierwszego przedziału mocy wprowadzono dodatkowy podział zależny od rodzaju zastosowanego w transformatorze układu chłodzenia.

Tabela 2. Rekomendacje ilości instalowanych czujników wg normy PN-EN-60076-2 [3]

Moc znamionowa [MVA]	System chłodzenia	Ilość czujników i faza instalacji				
		Suma czujników	Na fazie środkowej		Na fazach bocznych	
			Uzwojenie GN	Uzwojenie DN	Uzwojenie GN	Uzwojenie DN
≥100	Wszystkie	8	2	2	1	1
Od 20 do 100	ON...OF..	6	1	1	1	1
	OD..	8	2	2	1	1

Norma dopuszcza również stosowanie różnych konfiguracji pomiarowych uzgodnionych pomiędzy zamawiającym i producentem. Często stosowaną praktyką jest także bazowanie na wytycznych eksperckich.

W krajowych specyfikacjach technicznych spotyka się wymagania instalacji systemu składającego się z 6. lub 9. czujników optycznych, dwa lub trzy na fazę w zależności czy na kolumnie zainstalowano również uzwojenie regulacyjne. Zdarza się także wymóg zainstalowania dodatkowego czujnika optycznego do pomiaru temperatury rdzenia.

Zgodnie z kryteriami rekomendowanymi przez autora opartymi na obserwacjach zestarzałej izolacji remontowanych lub uszkodzonych transformatorów oraz wynikach szczegółowych obliczeń cieplnych najważniejszym obszarem pomiarowym są górne strefy uzwojeń środkowej fazy transformatora. Jeżeli uzwojenia i połączenia uzwojeń zostały wykonane poprawnie można ograniczyć się do pomiaru tej fazy. Dobrą praktyką jest również wprowadzanie czujników rezerwowych. Jeżeli chodzi natomiast o uzależnienie ilości instalowanych czujników od rodzaju chłodzenia to trudno uzasadnić taki podział. W zależności od potrzeb klienta i typu transformatora EthosEnergy Poland S.A. jest w stanie przedstawić własne rekomendacje co do instalacji czujników poparte wcześniejszą analizą obliczeniową.

### Przygotowanie instalacji systemu pomiarowego

Przed wykonaniem instalacji przewodu światłowodowego konieczna jest jego kontrola pod względem poprawności działania. Kontrola ta powinna być powtarzana kilkakrotnie na różnych etapach produkcji transformatora. Pozwala to na wyeliminowanie z użycia światłowodów wadliwych lub uszkodzonych.

Wraz z instalacją pierwszego systemu światłowodowego w EthosEnergy Poland S.A. wprowadzono kontrolę światłowodu na następujących etapach:

- po otrzymaniu światłowodów,
- bezpośrednio przed instalacją w transformatorze,
- po instalacji w transformatorze,
- przed procesem suszenia części aktywnej,
- po zalaniu transformatora olejem,
- przed próbą cieplną transformatora.

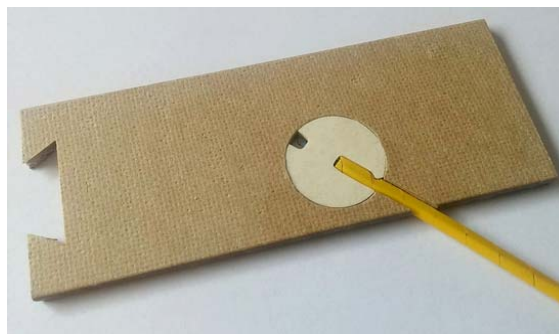
Próby kontroli zostały tak dobrane aby przeprowadzać je w momencie zakończenia poszczególnych etapów produkcji niosących ryzyko uszkodzenia zainstalowanych wewnątrz transformatora światłowodów. Pomimo istnienia pancerzy ochronnych na światłowodach należy zachować zwiększoną ostrożność podczas prac montażowych, a procedura kontrolna nie może zostać pominięta. Dzięki jej zastosowaniu istnieje możliwość identyfikacji uszkodzenia światłowodu i ewentualnej jego wymiany. Jeżeli wymiana światłowodu jest niemożliwa jest on eliminowany z pomiaru.

### Przykłady instalacji

Czujniki światłowodowe instalowane są zgodnie z wytycznymi producentów systemów pomiarowych, jednak w związku z tym, że konstrukcje transformatorów są bardzo

różne konieczne jest niejednokrotnie dopasowanie sposobu instalacji do istniejących warunków i konstrukcji uzwojenia.

W celu pomiaru temperatury punktu gorącego konieczny jest montaż końcówki czujnika na styku z przewodem uzwojenia w sposób zapewniający jak najbardziej dokładny pomiar w obszarze gdzie temperatura jest największa czyli w środku wymiaru promieniowego cewki. W związku z tym, że w większości uzwojeń transformatorów dużych mocy wykonywane są kanały chłodzące pomiędzy cewkami (w uzwojeniach cewkowych) lub zwojami (w uzwojeniach śrubowych) istnieje możliwość wykorzystania tego faktu do montażu światłowodu. W celu wykonania kanału chłodzącego pomiędzy cewkami umieszczana jest wstawka dystansowa.



Rys. 10. Wstawka dystansowa z czujnikiem światłowodowym

Najłatwiejszym sposobem instalacji byłoby jej przeprowadzenie podczas nawijania uzwojenia. Jednak istnieje zagrożenie przypadkowego uszkodzenia lub wyrwania światłowodu podczas dalszego nawijania uzwojenia, jego transportu lub osadzania na kolumnie.

Rekomenduje się więc przeprowadzenie montażu na jak najpóźniejszym etapie produkcji transformatora. W przypadku uzwojeń następuje to po osadzeniu ich na kolumnie, przed założeniem kolejnych tulei i barier izolacyjnych które uniemożliwią dostęp do cewek. Wstawka lub jeżeli to konieczne kilka wstawek dystansowych o sumarycznej grubości min. 3,5 mm musi zostać usunięta z uzwojenia. W jej miejsce wprowadzona zostaje wcześniej przygotowana wstawka z czujnikiem pomiarowym (rys.10). Przykład czujnika światłowodowego zainstalowanego pomiędzy cewkami uzwojenia 220kV przedstawia rys. 11.



Rys.11. Czujnik światłowodowy umieszczony w uzwojeniach

Długość wewnętrznych przewodów światłowodowych wynosi od 1 do 15m i jest z góry ustalana podczas ich zamawiania. W związku z tym lokalizacja płyty i długości przewodów światłowodowych instalowanych wewnątrz kadzi muszą być dobrane tak żeby umożliwić prawidłowy montaż przewodu. Należy uwzględnić odpowiedni naddatek na prowadzenie przewodu po elementach części aktywnej transformatora bez powodowania naprężeń lub zagięć przewodu (rys.12,13). Prowadząc przewód lub wiązkę przewodów należy również unikać miejsc gdzie montowane



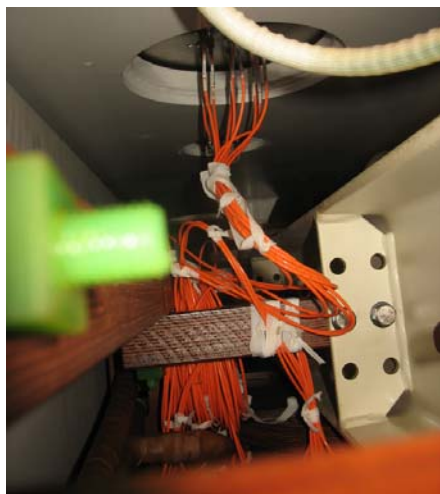
są elementy transportowe jak trawersy lub ucha, aby nie doszło do ich zmiążdżenia.

Dla wyznaczenia bezpiecznej trasy prowadzenia przewodu światłowodowego można wykorzystać wolne obszary układu izolacyjnego. Jest to możliwe po analizie projektu układu izolacyjnego. Należy jednak uwzględnić możliwości przemieszczania się klinów podczas jego doprasowywania.



Rys. 12. Zestaw światłowodów zainstalowanych w transformatorze

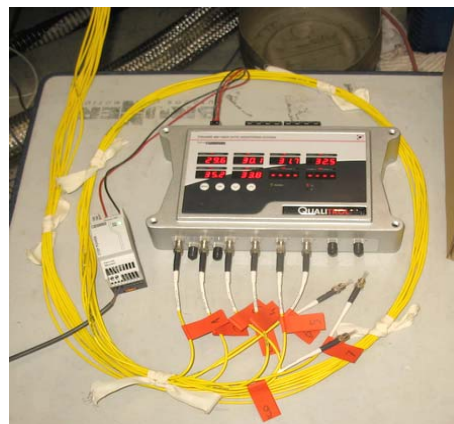
Kolejnym elementem układu pomiarowego jest płyta przepustów światłowodowych (rys.13) przykręcana do wcześniej spawanego kołnierza na kadzi bądź pokrywie transformatora. Poprzez szczelne przepusty światłowodowe układ zostaje połączony z przewodami zewnętrznymi. Po zalaniu transformatora olejem nie ma jakichkolwiek możliwości ingerencji w układ pomiarowy.



Rys. 13. Połączenie czujników optycznych do płyty przepustów

W przypadku praktyki stosowanej przez EthosEnergy Poland S.A. zainstalowany układ światłowodowy jest wykorzystany podczas fabrycznych prób odbiorowych. Oprócz wyznaczenia podczas próby nagrzewania wymaganych normami średniego przyrostu temperatury uzwojeń i temperatury oleju pod pokrywą rejestrowane są w sposób ciągły odczyty temperatur punktów gorących realizowane przez czujniki optyczne. Uzyskiwany pomiar jest porównywany z wcześniejszymi wynikami obliczeń. Pozwala to również na uzyskanie wartości odniesienia jakie występują podczas pracy w warunkach znamionowych lub przeciążeniowych.

W EthosEnergy Poland S.A. przeprowadzono od 2010 roku instalacje systemów światłowodowych kilku wiodących producentów. Wypracowano szczegółowe rozwiązania i analizy porównawcze systemów oraz wyników pomiarowych z obliczeniami.



Rys. 14. Pomiary temperatur z wykorzystaniem rejestratora T/GUARD 405

Największa dotychczasowa instalacja obejmowała dwanaście światłowodów. Do rejestracji wykorzystano urządzenie Nortech Sentinel II (rys.9), a dokładnie dwa rejestratory 6-cio kanałowe. Umożliwiło to jednoczesny pomiar temperatury na 12 kanałach.

### Podsumowanie

Stosowane powszechnie metody pomiaru temperatur transformatorów pozwalają jedynie na wyznaczenie uśrednionych wartości temperatur uzwojeń, a wartość maksymalna jest uzyskiwana dzięki skalowanemu modelowi cieplnemu. Zastosowanie pomiaru z zastosowaniem czujników optycznych pozwala na ciągły pomiar rzeczywistych wartości w obszarach, w których pomiar był do tej pory niemożliwy ze względu na wysokie napięcia napięciowe. Stwarza to możliwość instalacji czujników w punktach gorących (hot-spot) mających decydujący wpływ na stopień zesterzenia izolacji.

W EthosEnergy Poland S.A. przeprowadzono dotychczas instalacje różnych rodzajów czujników optycznych w 16. typach transformatorów. Przeprowadzone z ich zastosowaniem pomiary potwierdziły możliwość skutecznego wykorzystania czujników do pomiaru temperatury części aktywnej transformatorów nawet o napięciu 420 kV.

Wykorzystując zaawansowane oprogramowanie komputerowe opracowano metodykę prawidłowego rozmieszczenia punktów pomiarowych, która została zweryfikowana podczas pomiarowych prób nagrzewania transformatora.

**Autor:** mgr inż. Arkadiusz Kulik, EthosEnergy Poland S.A., ul. Powstańców Śląskich, 42-700 Lubliniec, E-mail: [Arkadiusz.Kulik@ethosenergygroup.pl](mailto:Arkadiusz.Kulik@ethosenergygroup.pl)

### LITERATURA

- [1] E.Jeziński, *Transformatory. Budowa i projektowanie*. Wyd. WNT Warszawa, 1963.
- [2] Dombek G., Nadolny Z., Przybyłek P.: "Konsekwencje zesterzenia cieczy elektroizolacyjnej na efektywność chłodzenia transformatora," *Poznan University Technology Academic Journals, Electrical Engineering*, no.86, p.303–312.
- [3] PN-EN 60076-2:2011, "Transformatory część 2: Przyrosty temperatury dla transformatorów olejowych"
- [4] IEC-60076-7:2005 "Przewodnik obciążania transformatorów"
- [5] P. Zheng, S. Pan, C. Chen, and Y. Ren, "Research on A Networked Optical Fiber Temperature Sensor of Large Power transformer windings," pp. 515–518, 2006.
- [6] S. P. Kennedy, T. Gordner, J. Bérubé, Q. Neoptix, R. Ringlee, and J. Aubin, "Hot Spot Studies for Sheet Wound Transformer Windings," *80th Int. Conf. Doble Clients*, pp. 1–11, 2013.
- [7] Qualitrol, "A Training Session, Neoptix Fiber-Optic Thermometers," no. May, 2014.
- [8] Nortech, *Fiso - Product Catalog*. 2016 .