

**Andrzej Bytnar\*, Roman Krok\*\***

\*Instytut Energetyki, Warszawa

\*\*Politechnika Śląska, Gliwice

## **DIAGNOSTYKA ON-LINE USZKODZEŃ RDZENIA I UZWOJENIA STOJANA DUŻEGO TURBOGENERATORA**

### **ON-LINE DIAGNOSTICS FOR LARGE TURBOGENERATOR CORE AND STATOR WINDING DAMAGES**

**Abstract:** The paper presents an original – worked out by the authors – way of on-line detecting the damages of a large turbogenerator core and stator winding. The distillate temperature measured at the outlet from the stator winding coils is a diagnostic signal. It was shown, using the stator thermal model developed, that the considered turbogenerator damages cause a measurable increase in the distillate temperature in some outlet boxes. The proposed way of prevention diagnostics enables determination of the kind and location of a damage as well as the preliminary estimation of its size. It allows elimination of wide damages of turbogenerators. The exemplary calculations were carried out for a 230 MW turbogenerator which is very common in the Polish power system.

#### **1. Wstęp**

W turbogeneratorach pracujących w cyklu zmiennych obciążeń dochodzi często do uszkodzeń zębów w skrajnych częściach rdzenia stojana. Zwarcia blach w głowach zębów rdzenia mogą powodować nadmierne wzrosty ich temperatury (aż do tzw. „pożaru żelaza”), a w konsekwencji doprowadzać do uszkodzenia izolacji prętów uzwojenia stojana i zwarcia doziemnego. Z praktyki remontowej wynika, że częstą przyczyną uszkodzeń izolacji prętów uzwojenia stojana są również ich lokalne przegrzania spowodowane zmniejszoną drożnością kanałów chłodzących w przewodach elementarnych – np. na skutek gromadzenia się produktów erozji.

Ograniczona liczba czujników do pomiaru temperatury rdzenia i uzwojenia stojana (lub ich brak) uniemożliwia wykrywanie tego typu uszkodzeń we wczesnej fazie ich rozwoju.

Autorzy stworzyli sieć cieplną do obliczeń rozkładu temperatury w prętach uzwojenia stojana - chłodzonego bezpośrednio destylatem - uwzględniającą zjawiska termiczne w zębie rdzenia, przy uszkodzaniu się izolacji jego blach oraz zmianach drożności kanałów chłodzących przewodów elementarnych. Przeprowadzone obliczenia cieplne dla turbogeneratorów dużej mocy (w formie przykładu podano ich wyniki dla maszyny o mocy 230 MW) umożliwiły opracowanie nowej metody diagnostyki on-line stanu technicznego zębów rdzenia i uzwojenia stojana.

#### **2. Uszkodzenia rdzenia stojana turbogeneratora**

Uszkodzenia elementów i węzłów konstrukcyjnych stojana turbogeneratora są spowodowane najczęściej wibracjami wywołanymi siłami pochodzącymi od zjawisk [1÷4]: magnetycznych (naciąg magnetyczny pomiędzy stojanem i wirnikiem), elektromagnetycznych (oddziaływanie pomiędzy prętami uzwojenia) i termomechanicznych (wydłużenia termiczne prętów i rdzenia).

W procesie uszkodzenia zębów rdzenia można wyodrębnić trzy fazy. W pierwszej dochodzi do oddzielenia się zewnętrznych blach zębów pakietów i uszkodzeń ich izolacji spowodowanych uderzeniami o rozpórki kanałów wentylacyjnych. W drugiej fazie rozwoju uszkodzenia na powierzchni wewnętrznej i bocznej skrajnych pakietów rdzenia pojawia się rudy, lub rudo-czarny pył. Pochodzi on głównie od korozji czarnej blach zębów. Uderzenia blach o rozpórki kanałów wentylacyjnych powodują ich „wycieranie”, a następnie łamanie. Swobodne fragmenty uszkodzonych blach mogą uszkadzać izolację prętów uzwojenia. W trzeciej fazie uszkodzeń dochodzi do nieodwracalnego rozwarstwienia się zębów skrajnych pakietów rdzenia. Zazwyczaj w tej fazie powstają zwarcia blach zębów, które wywołują nadmierne nagrzewanie żelaza czynnego i uszkodzenia izolacji prętów uzwojenia. Na skutek poważnego uszkodzenia izolacji prętów występują zwykle zwarcia doziemne uzwojenia stojana.

Nadmierne nagrzewanie zębów rdzenia stojana może być również powodowane przez skojarzone strumienie rozproszenia połączeń czołowych uzwojeń stojana i wirnika (szczególnie w obszarze pracy pojemnościowej turbogeneratora).

### 3. Zmniejszenie drożności kanałów chłodzących w prętach uzwojenia stojana

Destylat, wykorzystywany do chłodzenia uzwojenia stojana w dużych turbogeneratorach, powoduje erozję ścianek wydrążonych kanałów w przewodach elementarnych. Produkty erozji gromadzące się w kanałach mogą poważnie zmniejszać ich drożność. W konsekwencji wzrasta temperatura prętów, w których zmniejsza się przepływ destylatu, co znacznie zmniejsza żywotność głównej izolacji uzwojenia. Występowanie tego typu zjawiska potwierdzają oględziny remontowanych turbogeneratorów.

### 4. Sieć cieplna do obliczeń rozkładu temperatury w uzwojeniu stojana turbogeneratorsa z uszkodzonym rdzeniem oraz przy zakłóceniach w rozplywie destylatu chłodzącego

Sieć cieplną sporządzono dla uzwojenia stojana turbogeneratorsa o mocy 230 MW [1, 6]. Uzwojenie chłodzone bezpośrednio destylatem zbudowane jest z prętów o konstrukcji przedstawionej na rysunku 1.

W rozpatrywanym turbogeneratorze kolektory wodne wlotowe i wylotowe zezwojów uzwojenia stojana znajdują się od strony turbiny. W tym przypadku adekwatną sieć cieplną (dla analizy zachodzących procesów) tworzą dwa pręty uzwojenia połączone szeregowo (odległe o poskok żłobkowy uzwojenia).

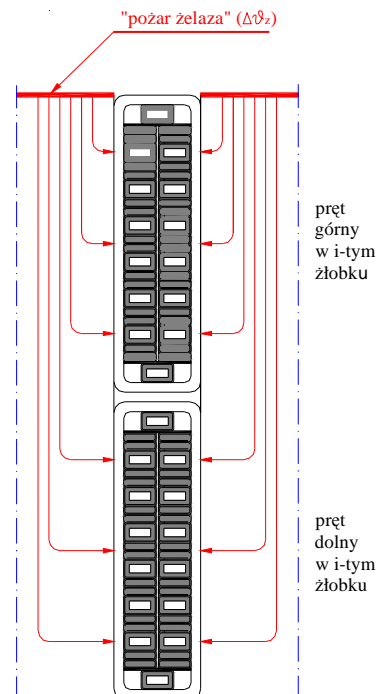
W modelu cieplnym uwzględniono:

- straty dodatkowe w przewodach elementarnych prętów uzwojenia wywołane zjawiskiem wypierania prądu,
- zależność strat mocy w przewodach elementarnych od ich temperatury,
- nagrzewanie się destylatu przepływającego w wydrążonych kanałach przewodów elementarnych,
- zjawisko unoszenia ciepła w strudze destylatu.

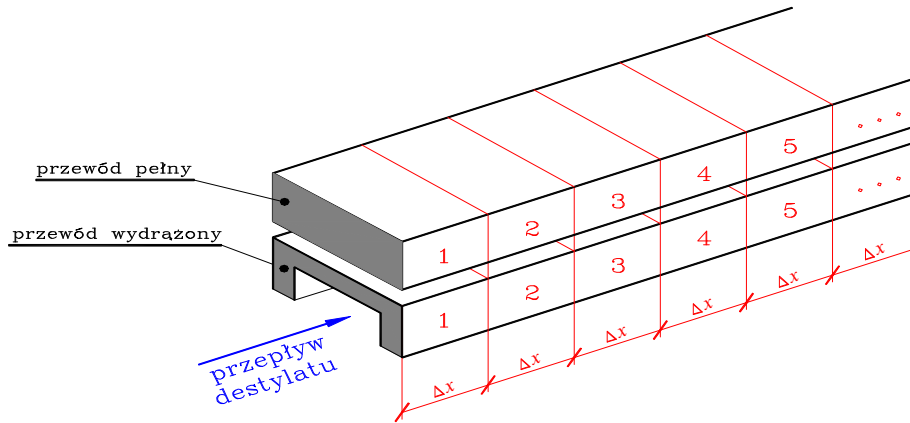
W prętach uzwojenia stojana wydzielono wielokrotnie powtarzający się fragment zawierający (rys. 2): 1 przewód pełny,  $\frac{1}{2}$  przewodu wy-

drążonego oraz  $\frac{1}{2}$  kanału chłodzącego, w którym przepływa destylat. Wymienione elementy podzielono na obszary różnicowe o długości  $\Delta x$ , a następnie każdemu z nich przyporządkowano węzeł sieci cieplnej reprezentujący jego średnią temperaturę (rys. 3).

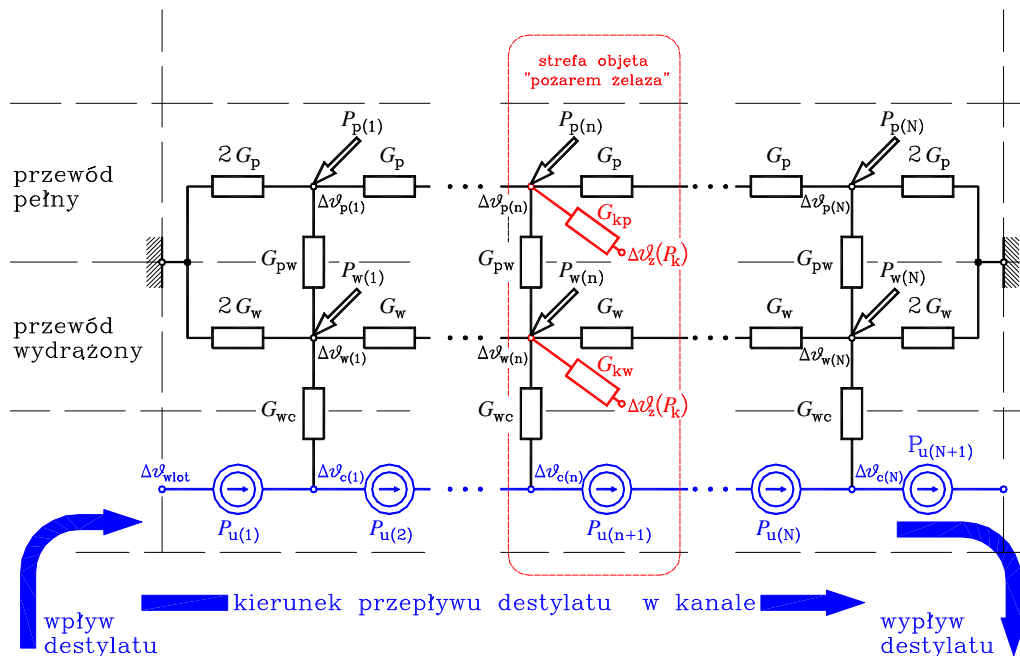
Na powierzchniach zębów skrajnych pakietów rdzenia w obszarze rozwijających się zwarcie blach może wzrastać temperatura do wartości topienia się żelaza (ok. 1540°C) i wyższej – przy znacznych zakłóceniach w przepływie gazu chłodzącego w promieniowych kanałach wentylacyjnych (przy uszkodzonych rozpórkach). W tym przypadku od powierzchni uszkodzonych zębów rdzenia do przewodów elementarnych prętów uzwojenia, stykających się z tymi zębami, przepływają strumienie ciepła o znacznej wartości. Dla ich uwzględnienia, w sieci cieplnej (rys. 3) wprowadzono dodatkowe węzły o przyroście temperatury powierzchni skrajnych uszkodzonych zębów rdzenia - zależnej od strat wydzielanych na skutek zwarcia blach  $\Delta\vartheta_z(P_k)$  – z których przepływają strumienie ciepła do przewodów elementarnych prętów pełnych i wydrążonych odpowiednio poprzez przewodności cieplne  $G_{kp}$  i  $G_{kw}$ .



Rys. 1. Przepływ strumieni ciepła z powierzchni zęba skrajnych pakietów rdzenia objętych „pożarem żelaza” do prętów uzwojenia stojana chłodzonych bezpośrednio destylatem



Rys. 2. Podział wydzielonego fragmentu pręta uzwojenia stojana turbogeneratora na obszary różnicowe wzdłuż jego długości



Rys. 3. Sieć cieplna dla zwoju uzwojenia stojana turbogeneratora chłodzonego bezpośrednio destylatem przy „pożarze żelaza czynnego” w zębie w skrajnych pakietach rdzenia

Wykorzystując sporządzoną sieć cieplną opracowano algorytm oraz program komputerowy dla symulacyjnych badań cieplnych uzwojenia stojana turbogeneratora, gdy w zębach skrajnych pakietów rdzenia rozwija się „pożar żelaza” lub dochodzi do zmniejszenia drożności kanałów chłodzących w jego przewodach elementarnych.

### 5. Straty w miejscu uszkodzenia izolacji rdzenia turbogeneratora

Straty w miejscu zwarcia blach w rdzeniu turbogeneratorów można wyznaczyć ze wzoru [5]:

$$P_k = \frac{(222 h g B_j)^2}{r_k}, \quad (1)$$

gdzie:

$h$  – odległość miejsca powstania zwarcia blach rdzenia od powierzchni płaszczyznej jarzma,

$g$  – grubość zwartych blach,

$B_j$  – indukcja w jarzmie,

$r_k$  – przejściowa rezystancja zwarcia blach.

Wartość rezystancji  $r_k$  jest zmienna i przypadkowa, zależy przede wszystkim od rozmiarów uszkodzenia izolacji blach oraz od typu turbogeneratora i rodzaju jego pracy.

Ze względu na stosunkowo małą przewodność cieplną blach (tak w poprzek jak i wzdłuż) oraz ograniczone warunki chłodzenia, strumienie ciepłe (w stanach cieplnie ustalonych) płynące w kierunku elementów stojana o niższych tem-

peraturach oraz do czynnika chłodzącego w kanałach promieniowych rdzenia są małe. Powoduje to bardzo duży wzrost temperatury zęba rdzenia w obszarze uszkodzonym. I tak np. przyrost ten wynosi około  $200^{\circ}\text{C}$  w środku pakietu, przy stratach rzędu 155 W. Tak duży przyrost temperatury powoduje gwałtowne starzenie się izolacji sąsiednich blach i rozszerzenie się obszaru uszkodzeń (dalszy wzrost strat miejscowych i przyrost temperatury). Zwarcie blach przeradza się ostatecznie w „pożar żelaza” powodujący nadtopienie fragmentów rdzenia, a następnie uszkodzenie izolacji prętów. Przy wysokich temperaturach zęba (rzędu  $1000^{\circ}\text{C}$ ) wzrastają znacząco strumienie ciepłe płynące do pobliskich elementów prętów uzwojenia powodując ich dodatkowe nagrzewanie. To zjawisko zostało wykorzystane w metodzie diagnostyki prewencyjnej zwarć w rdzeniu stojana.

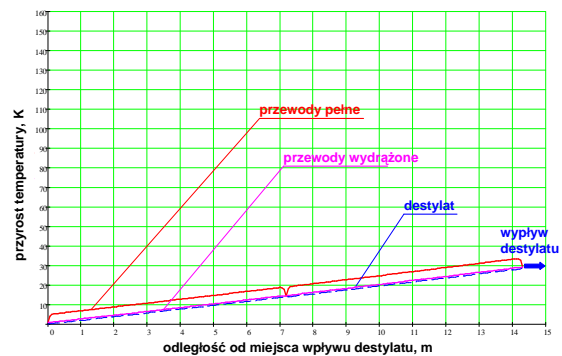
## 6. Obliczenia cieplne uzwojenia stojana turbogenerators przy uszkodzeniu rdzenia oraz zakłóceniach w rozplywie destylatu chłodzącego

Celem przeprowadzonych obliczeń cieplnych uzwojenia stojana turbogenerators (o mocy 230 MW) było określenie wpływu zwarcia blach zęba rdzenia oraz zmniejszenia drożności kanałów chłodzących w przewodach elementarnych na wzrost temperatury destylatu na wypływach z rozpatrywanych zezwojów uzwojenia. Wykazanie istotnego przyrostu temperatury (mierzanego) gorącego destylatu w skrzynkach odpływowych, wywołanego rozpatrywanymi uszkodzeniami turbogenerators, miało potwierdzić możliwość jego wykorzystania jako sygnału diagnostycznego.

Dla celów porównawczych wykonano obliczenia rozkładu przyrostu temperatury w uzwojeniu stojana w znamionowym stanie pracy, przy temperaturze zimnego destylatu  $30^{\circ}\text{C}$  (temperatura odniesienia). W turbogenerators z nieuszkodzonym rdzeniem oraz w pełni drożnymi kanałami chłodzącymi w przewodach elementarnych, rozkłady temperatury w poszczególnych zezwojach uzwojenia stojana są identyczne (rys. 4). Przyrost temperatury destylatu na wylocie ze wszystkich zezwojów uzwojenia stojana wynosi  $28,6\text{ K}$ .

Zwarcia blach w zębie skrajnych pakietów rdzenia powodują zarówno znaczny wzrost przyrostu temperatury samego zęba, jak i bez-

pośrednio przylegających do niego odcinków elementarnych prętów uzwojenia stojana oraz destylatu (w sąsiednich żłobkach). Ciepło odprowadzane z uszkodzonego zęba powoduje istotny wzrost temperatury destylatu wpływającego z rozpatrywanych zezwojów zawierających te elementarne pręty.

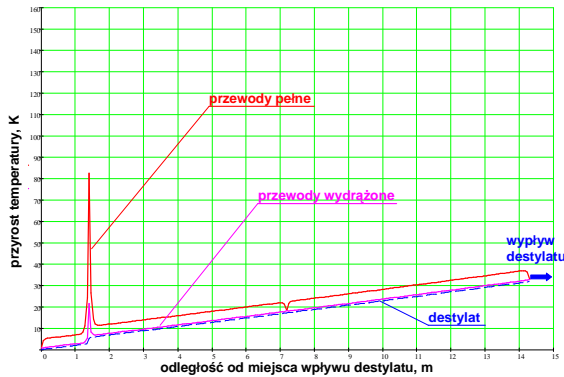


Rys. 4. Rozkłady przyrostu temperatury w przewodach elementarnych oraz w strudze destylatu wzdłuż długości zezwojów uzwojenia stojana turbogenerators z nieuszkodzonym rdzeniem przy znamionowym wydatku destylatu

Wartość przyrostu temperatury destylatu na wypływie z tych zezwojów zależy od przyrostu temperatury w strefie objętej „pożarem żelaza” ( $\Delta\vartheta_z$ ) oraz szerokości tej strefy (liczby zwartych blach i pakietów rdzenia). Na rysunku 5 przedstawiono przykładowy rozkład temperatury w zezwoju zawierającym pręt górny „i-tego” żłobka stojana stykający się bezpośrednio z zębem objętym „pożarem żelaza”. Obliczenia wykonano dla przypadku zwarcia blach zęba – w jednym skrajnym pakiecie rdzenia – gdy przyrost temperatury na jego powierzchni wynosi  $\Delta\vartheta_z = 1500\text{ K}$ .

W tabeli 1 zestawiono (dla znamionowej pracy turbogenerators) przyrosty temperatury gorącego destylatu wpływającego z zezwojów uzwojenia stojana ( $\Delta\vartheta_{\text{wyl}}$ ) – zawierających pręty leżące w „i-tym” żłobku w pobliżu uszkodzonego zęba rdzenia w obrębie jednego skrajnego pakietu – oraz wartości tych przyrostów temperatury w odniesieniu do turbogenerators z nieuszkodzonym rdzeniem ( $\Delta'\vartheta_{\text{wyl}}$ ). Już w początkowej fazie rozwoju „pożaru żelaza” w zębie jednego pakietu ( $\Delta\vartheta_z = 1000\text{ K}$ ), średnie przyrosty temperatury destylatu na wypływach z zezwojów zawierających pręty położone w sąsiednim żłobku wzrastają o  $2,2\text{ K}$  (zezwoj zawierający pręt górny) i  $1,6\text{ K}$  (zezwoj zawierający pręt dolny). Porównanie mierzonych temperatur destylatu, na wypływach ze wszystkich zezwojów uzwojenia sto-

jana, umożliwia wykrycie kilkustopniowych przyrostów temperatury destylatu na wylotach z zewojów z prętami bezpośrednio sąsiadującymi z uszkodzonymi zębami rdzenia (w czasie eksploatacji turbogeneratora).



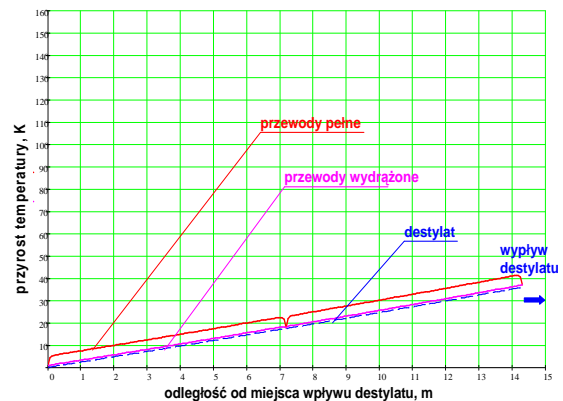
Rys. 5. Rozkład przyrostu temperatury w przewodach elementarnych oraz w strudze destylatu wzdłuż długości zewoju zawierającego pręt górny „i-tego” żłobka stojana stykający się bezpośrednio z zębem objętym „pożarem żelaza” ( $\Delta\vartheta_z=1500$  K, uszkodzenie jednego skrajnego pakietu rdzenia)

Tab. 1. Wpływ „pożaru żelaza” w zębie jednego skrajnego pakietu rdzenia na przyrost temperatury destylatu w skrzynce wylotowej

Rodzaj zwoju	$\Delta\vartheta_z$	$\Delta\vartheta_{wyl}$ ( $\Delta'\vartheta_{wyl}$ )
	[K]	[K]
z prętem górnym	1000	30,8 (2,2)
	1500	31,9 (3,3)
	2000	33,0 (4,4)
z prętem dolnym	1000	30,2 (1,6)
	1500	31,0 (2,4)
	2000	31,8 (3,2)

Z upływem czasu zwiększa się zarówno wartość przyrostu temperatury w strefie objętej „pożarem żelaza”, jak i rozmiar tej strefy. W konsekwencji wzrasta różnica temperatury destylatu na wpływach z zewojów zawierających pręty znajdujące się w bezpośrednim sąsiedztwie uszkodzenia rdzenia, a pozostałymi - do których praktycznie nie dopływają strumienie ciepłe generowane w strefie zwarcia blach. Wzrost temperatury destylatu w skrzynce wylotowej zewoju uzwojenia stojana może być również spowodowany zmniejszoną drożnością kanałów elementarnych przewodów prętów - np. na skutek osadzania się produktów erozji.

Na rysunku 6 przedstawiono obliczone rozkłady przyrostu temperatury w przewodach elementarnych oraz w strudze destylatu (wzdłuż długości zewoju), gdy wydatek destylatu jest zmniejszony do 80% wydatku znamionowego (przy pełnej drożności kanałów chłodzących). Pozostałe parametry charakteryzujące stan pracy turbogeneratora mają wartość znamionową.



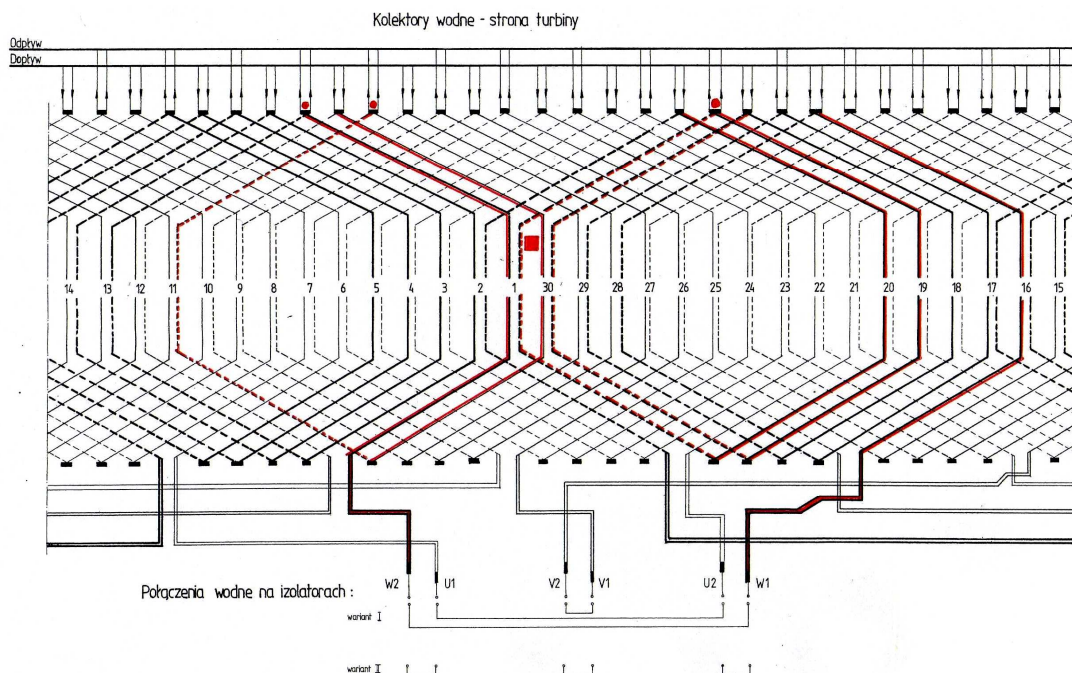
Rys. 6. Rozkłady przyrostu temperatury w przewodach elementarnych oraz w strudze destylatu wzdłuż długości zewoju przy wydatku destylatu zmniejszonego do 80% wartości znamionowej

Przyrost temperatury destylatu w skrzynce wylotowej rozważanego zewoju z nie w pełni drożnymi kanałami chłodzącymi (zmniejszenie wydatku destylatu do 80%) wynosi  $\Delta\vartheta_{wyl} = 36,2$  K (rys. 6) i jest on o  $\Delta'\vartheta_{wyl} = 7,6$  K większy niż w skrzynkach wylotowych pozostałych zewojów (rys. 4), w których wydatek destylatu jest znamionowy.

W tabeli 2 zestawiono uzyskane wyniki obliczeń cieplnych przy różnym zmniejszeniu wydatku destylatu na skutek ograniczenia drożności kanałów chłodzących w prętach uzwojenia stojana turbogeneratora.

Tab. 2. Wpływ zmniejszenia drożności kanałów chłodzących w zewoju uzwojenia stojana na przyrost temperatury destylatu na jego spływie

Względny procentowy wydatek destylatu	$\Delta\vartheta_{wyl}$ ( $\Delta'\vartheta_{wyl}$ )
	K
100% (w pełni drożne kanały)	28,6 (0)
90%	32,0 (3,4)
80%	36,2 (7,6)
70%	41,8 (13,2)
60%	49,5 (20,9)



■ - „pożar żelaza czynnego” w zębem w skrajnych pakietach rdzenia

● - skrzynki odpływowe w których wzrasta temperatura destylatu

Rys. 7. Schemat obiegu destylatu w uzwojeniu stojana turbogeneratorsa o mocy 230 MW z zaznaczonym zębem rdzenia objętym „pożarem żelaza” oraz skrzynkami odpływowymi w których wzrasta temperatura destylatu

Zmniejszenie wydatku destylatu w zezwoju uzwojenia stojana zaledwie o 10% powoduje mierzalny kilkustopniowy wzrost temperatury gorącego destylatu na jego spływie.

Na rysunku 7 przedstawiono schemat obiegu destylatu w uzwojeniu stojana rozpatrywanego turbogeneratorsa o mocy 230 MW. Dla celów analizy założono, że w głowie zęba skrajnego pakietu rdzenia powstały zwarcia blach przeradzające się w „pożar żelaza”. Ciepło wydzielające się w zębem rdzenia, (w obszarze objętym uszkodzeniem) przepływa do prętów uzwojenia najbliższych położonych żłobków (nr 1 oraz 30). W konsekwencji powoduje to wzrost przyrostu temperatury destylatu w trzech skrzynkach odpływowych odpowiednich zezwojów zawierających pręty górne i dolne. Istniejąca korelacja położenia pomiędzy potencjalnymi miejscami występowania zwarć w zębach rdzenia, a skrzynkami odpływowymi zezwojów uzwojenia stojana (w których

wzrasta temperatura destylatu) umożliwia wstępną lokalizację uszkodzonego fragmentu rdzenia. Bazując na tej zależności można utworzyć selektywny system diagnostyki stanu technicznego zębów rdzenia oraz kanałów chłodzących prętów uzwojenia stojana turbogeneratorsa. Odróżnia on „pożar żelaza” – wywołujący wzrost przyrostu temperatury destylatu na wypływach od 1 do 3 zezwojów uzwojenia od zmniejszenia się drożności kanałów chłodzących pręty – powodującego wzrost przyrostu temperatury destylatu na wypływach w przypadkowych (odnośnych) zezwojach uzwojenia.

## 8. Wnioski

1. Przeprowadzone badania symulacyjne wykazały, że mierzone podczas pracy turbogeneratorsa temperatury gorącego destylatu (na wypływach z poszczególnych zezwojów uzwojenia stojana)

można wykorzystać do oceny stanu technicznego zębów rdzenia oraz drożności elementarnych kanałów chłodzących w prętach uzwojenia stojana.

2. System diagnostyki prewencyjnej bazujący na pomiarach temperatury gorącego destylatu pozwala zapobiegać rozległym uszkodzeniom turbogeneratorów.
3. Zaleca się wyposażać turbogeneratory z bezpośrednim chłodzeniem wodnym (destylatem) uzwojenia stojana w czujniki do pomiaru temperatury na wypływie tego medium z poszczególnych zewojów. Umożliwia to wprowadzenie skutecznej diagnostyki termicznej rdzenia i uzwojenia stojana turbogenerators.

### Literatura

- [1] Bytnar A., Krok R.: *Termiczna diagnostyka stanu technicznego zębów rdzenia stojana dużego turbogenerators.* Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne, nr 83/2009, BOBRME KOMEL, s. 201-206.
- [2] Bytnar A.: *Uszkodzenia rdzenia stojana turbogenerators w aspekcie niektórych zjawisk fizycznych.* XLIII International Symposium on Electrical Machines SME 2007, Poznań, 2-5 July 2007.
- [3] Butov A. V. i dg: *Povrezdaemost' i kontrol' zubcovyh zon zapecennykh krajnih paketov stali*

*serdecnikov statorom turbogenerators.* Elektrieskie Stancji, nr 5, cc.41-47, 2001.

[4] Cloyde V., Maugham P. E.: *Upgrading of generators to improve reliability.* Iris Rotating Machine Conference, Santa Monica, CA, June. pp.1-10, 2003.

[5] Bytnar A.: *Wybrane zagadnienia z konstrukcji i eksploatacji turbogenerators.* Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1983.

[6] Krok R.: *Sieci cieplne w modelowaniu pola temperatury w maszynach elektrycznych prądu przemiennego.* Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.

### Autorzy

prof. dr hab. inż. Andrzej Bytnar

Instytut Energetyki, 01-330 Warszawa,  
tel. (022) 836-3201, (022) 3451-265,  
e-mail: andrzej.bytnar@ien.com.pl

dr inż. Roman Krok

Politechnika Śląska, Zakład Maszyn Elektrycznych i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie, ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice, tel. (032) 237-29-29,  
e-mail: Roman.Krok@polsl.pl

### Recenzent

Dr hab. inż. Sławomir Szymaniec, prof. P.O.