

Andrzej Bytnar<sup>\*</sup>, Roman Krok<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Instytut Energetyki, Warszawa

<sup>\*\*</sup>Politechnika Śląska, Gliwice

## TERMICZNA DIAGNOSTYKA STANU TECHNICZNEGO ZĘBÓW RDZENIA STOJANA DUŻEGO TURBOGENERATORA

### THERMAL DIAGNOSTICS OF STATOR CORE TEETH OF LARGE TURBOGENERATOR

**Abstract:** There is a method of application of output water from stator winding bars temperature measurement for on-line diagnostics of stator core teeth presented in the paper. In generators working at changeable load teeth failure in the end part region of stator core often happen. Lack of sensors for core temperature measurement makes it impossible to detect such kind of failures at the time when it appears. Laminations short-circuit in the end teeth cause „iron fire”. The large local temperature increases failures of bars insulation and stator windings short-circuit ground. The result of the research is determination a thermal model of the turbogenerator stator including the phenomenon „iron fire”. The results obtained during the investigations proved that the output water from stator winding bars temperature measurement is sufficient for diagnostics of the stator core teeth.

#### 1. Wstęp

Większość turbogeneratorów w światowej i krajowej energetyce pracuje w cyklu zmiennych obciążeń. Ten rodzaj pracy wpływa niekorzystnie na ich stan techniczny. Poważne uszkodzenia zębów skrajnych zapiekanych pakietów rdzenia stojana w tych turbogeneratorach [1] występują już nawet po około 3 latach początkowej ich eksploatacji. Istotne jest wykrywanie tego typu uszkodzeń we wczesnej fazie rozwoju. Zastosowanie diagnostyki prewencyjnej umożliwia znaczne ograniczenie zakresu uszkodzeń, co w konsekwencji wpływa na zmniejszenie kosztów wynikających z postępu awaryjnego oraz niezbędnego remontu maszyny.

W artykule przedstawiono możliwość wykorzystania temperatury destylatu mierzonej na wypływie z poszczególnych zwojów uzwojenia stojana do oceny stanu technicznego zębów rdzenia turbogeneratora. Przykładowe obliczenia cieplne wykonano dla turbogeneratora o mocy 230 MW. Stworzona sieć cieplna umożliwia obliczanie rozkładu przyrostu temperatury, w prętach uzwojenia stojana chłodzonego bezpośrednio destylatem, przy rozwijającym się „pożarze żelaza czynnego” w skrajnych pakietach rdzenia. Z uzyskanych wyników obliczeń symulacyjnych wynika, iż mierzone temperatury gorącego destylatu wpływającego z poszczególnych zwojów uzwojenia mogą być wykorzystane do diagnostyki on-line stanu technicznego zębów rdzenia stojana.

#### 2. Uszkodzenia rdzenia stojana turbogeneratora

Uszkodzenia elementów i węzłów konstrukcyjnych stojana turbogeneratora są powodowane siłami pochodzącymi od zjawisk [1]: 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 [1, 2, 3]. W pierwszej dochodzi do oddzielenia się zewnętrznych blach i częściowego rozwarstwienia zębów pakietów rdzenia. W oddzielających się blachach zewnętrznych zaczynają powstawać uszkodzenia izolacji spowodowane ich uderzeniami o rozpórki kanałów wentylacyjnych. Początek uszkodzeń części zębowej pakietu można stwierdzić jedynie poprzez badania wibracyjne, gdyż przy zwykłych oględzinach rdzenia nie są one widoczne. W drugiej fazie rozwoju uszkodzenia na powierzchni wewnętrznej i bocznej skrajnych pakietów rdzenia pojawia się rudy lub rudoczarny 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 roz-

warstwienia się zębów skrajnych pakietów rdzenia. Zazwyczaj w tej fazie powstają zwarcia blach zębów, które wywołują „pożar żelaza czynnego”. Na skutek poważnego uszkodzenia prętów (rys. 1) występują zwarcia doziemne uzwojenia stojana.



Rys. 1. Zwarcie blach zębów skrajnych pakietów rdzenia („pożar żelaza”) oraz uszkodzenie izolacji pręta uzwojenia w stojanie dużego turbogeneratora

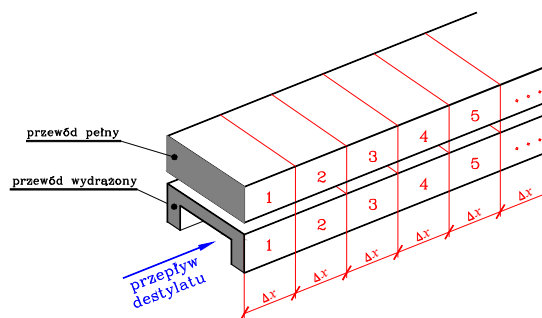
### 3. Model cieplny stojana turbogeneratora z uszkodzonym rdzeniem

Model cieplny sporządzono dla stojana turbogeneratora o mocy 230 MW. Uzwojenie stojana chłodzone bezpośrednio destylatem zbudowane jest z prętów o konstrukcji przedstawionej na rys. 5.

W rozpatrywanym turbogeneratorze kolektory wodne wlotowe i wylotowe zwojów w uzwojeniu stojana zabudowane są od strony turbiny. W konsekwencji sieć cieplną wystarczy utworzyć tylko dla dwóch prętów uzwojenia stojana (odległych o poskok uzwojenia) połączonych szeregowo. 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 kanałach chłodzących znajdujących się wewnątrz przewodów wydrążonych,
- zjawisko unoszenia ciepła w strudze destylatu.

W prętach uzwojenia stojana wydzielono wielokrotnie powtarzający się fragment (rys. 2) zawierający: 1 przewód pełny, 1/2 przewodu wydrążonego oraz 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 (rys. 3) reprezentujący jego średnią temperaturę.



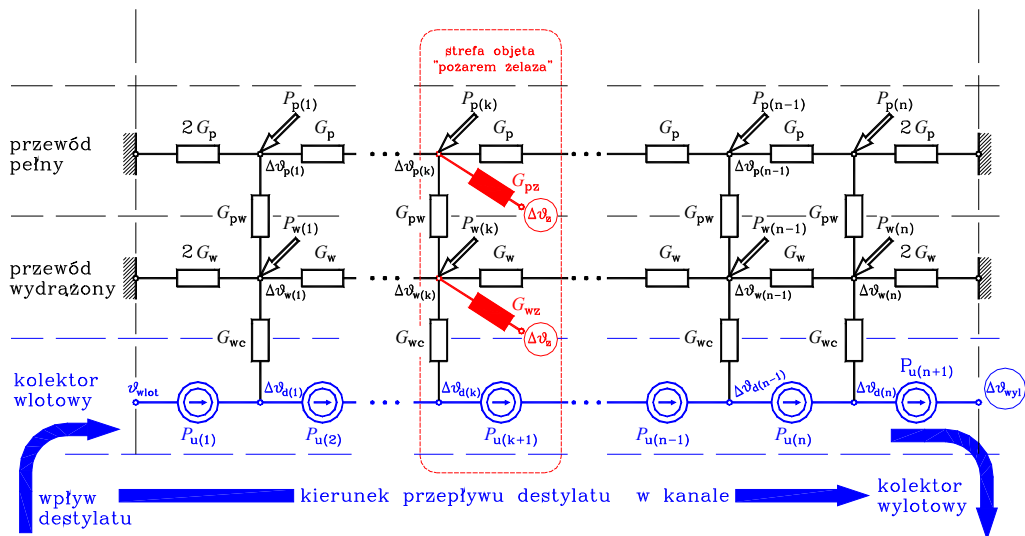
Rys. 2. Podział wydzielonego fragmentu pręta uzwojenia stojana na obszary różnicowe wzdłuż jego długości

Sieć cieplną do obliczeń rozkładu temperatury w uzwojeniu stojana turbogeneratora z nieuszkodzonym rdzeniem opisano w publikacjach [4, 5]. Przy tworzeniu tej sieci pominięto strumień ciepła przepływający przez bardzo grubą warstwę izolacji głównej prętów (około 6 mm) do zębów rdzenia (o niższej temperaturze). Gdy izolacja blach tej części rdzenia nie jest uszkodzona, strumień ten ma pomijalnie małą wartość w stosunku do strumienia ciepła przepływającego z rozważanych przewodów elementarnych uzwojenia do wydzielonej części przepływającego destylatu.

Na powierzchniach zębów skrajnych pakietów rdzenia objętych „pożarem żelaza” występuje bardzo wysoka temperatura. Widoczne na nich nadtopienia blach (rys. 1) świadczą o przekroczeniu temperatury topienia żelaza ( $1535^{\circ}\text{C}$ ). W tym przypadku od powierzchni zęba rdzenia – na której występuje „pożar żelaza” – do przewodów elementarnych prętów uzwojenia stykających się z uszkodzonym zębem przepływa strumień ciepła o znacznej wartości. W celu jego uwzględnienia, w sieci cieplnej (rys. 3) wprowadzono dodatkowe węzły o przyroście temperatury powierzchni zęba, na której rozwija się „pożar żelaza” ( $\Delta\vartheta_z$ ). W węzłach tych dołączono zastępcze przewodności dla strumieni ciepła przepływających ze strefy objętej „pożarem żelaza” do:

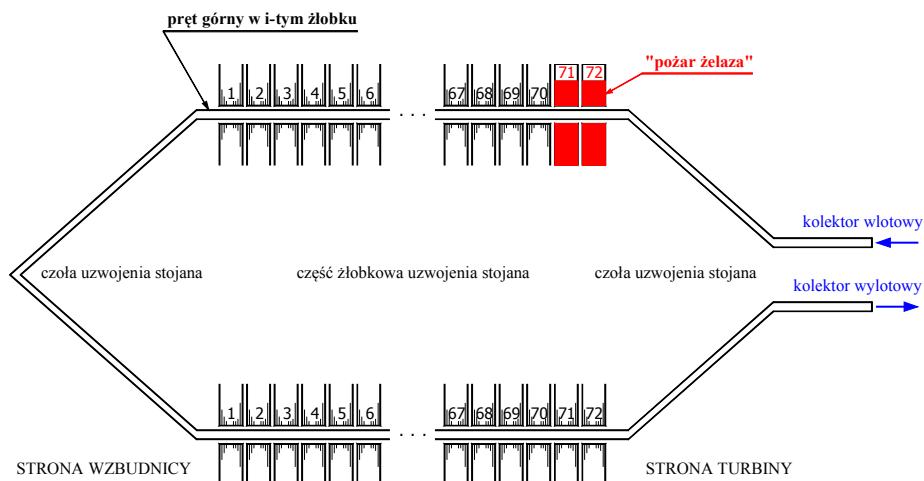
- elementarnych przewodów pełnych ( $G_{pz}$ ),
- elementarnych przewodów wydrążonych ( $G_{wz}$ ).

Przewodności cieplne  $G_{pz}$  i  $G_{wz}$  mają różne wartości wynikające z różnej długości dróg dla strumieni cieplnych płynących od uszkodzonego zęba do górnego i dolnego pręta w „ $i$ -tym” złobku.

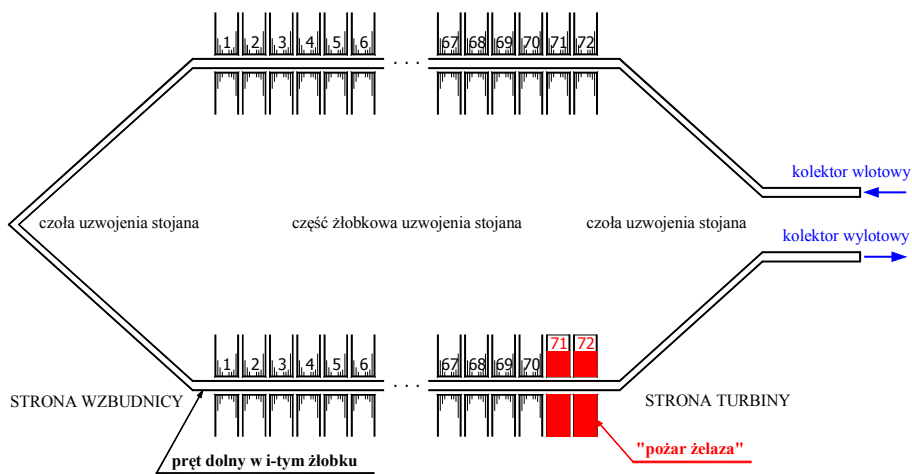


Rys. 3. Sieć cieplna dla zwoju uzwojenia stojana turbogeneratora chłodzonego bezpośrednio destylatem przy „pożarze żelaza czynnego” w zębie w skrajnych pakietach rdzenia

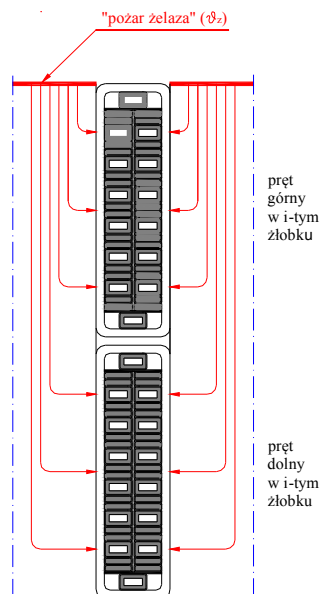
a)



b)



Rys. 4. Zwoje uzwojenia stojana zawierające pręty umieszczone w „i-tym” żłobku stykające się bezpośrednio z zębem rdzenia objętym „pożarem żelaza”: a) zwój z prętem górnym, b) zwój z prętem dolnym



Rys. 5. Przepływ ciepła z powierzchni zęba skrajnych pakietów rdzenia objętych „pożarem żelaza” do prętów uzwojenia stojana chłodzonych bezpośrednio destylatem

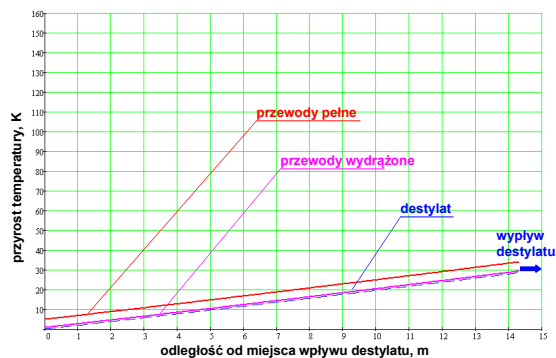
Wykorzystując tę sieć cieplną opracowano algorytm obliczeń, a następnie program komputerowy do badań cieplnych uzwojenia stojana turbogeneratorskiego, w którego zębach skrajnych pakietów rdzenia rozwija się „pożar żelaza”.

#### 4. Badania cieplne uzwojenia stojana turbogeneratorskiego przy rozwijającym się uszkodzeniu rdzenia

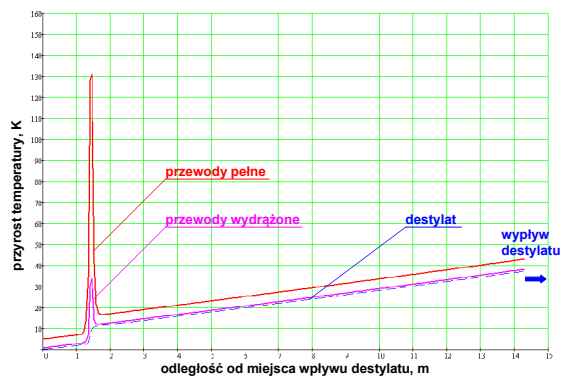
Obliczenia cieplne wykonano dla turbogeneratorskiego o mocy 230 MW, w znamionowym stanie pracy przy temperaturze zimnego destylatu 30°C (temperatura odniesienia dla obliczania przyrostów temperatury).

W turbogeneratorskiej z nieuszkodzonym rdzeniem rozkłady temperatury w poszczególnych zwojach uzwojenia stojana są jednakowe - rys. 6. Przyrost temperatury destylatu we wszystkich kolektorach wylotowych wynosi 28,6 K.

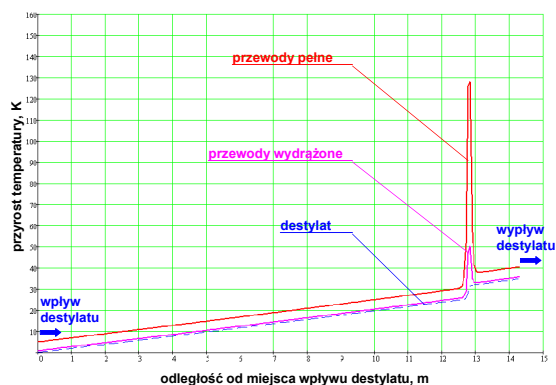
Zwarcia blach w zębie skrajnych pakietów rdzenia powodują zarówno wzrost przyrostu temperatury samego zęba, jak i bezpośrednio przylegających do nich odcinków prętów uzwojenia stojana. Wykorzystując opracowany program komputerowy wykonano obliczenia cieplne rozkładów przyrostu temperatury w zwojach uzwojenia stojana zawierających pręty leżące w „i-tym” żłobku (bezpośrednio stykające się z zębem rdzenia objętym „pożarem żelaza”) - rys. 7 i 8.



Rys. 6. Rozkłady przyrostów temperatury w przewodach elementarnych oraz w strudze destylatu wzdłuż długości zwojów uzwojenia stojana turbogeneratorskiego z nieuszkodzonym rdzeniem



Rys. 7. Rozkład przyrostu temperatury w przewodach elementarnych oraz w strudze destylatu wzdłuż długości zwoju zawierającego pręt górny „i-tego” żłobka stojana stykający się bezpośrednio z zębem objętym „pożarem żelaza” ( $\vartheta_2 = 2000$  K, uszkodzenie dwóch skrajnych pakietów rdzenia – rys. 4a)



Rys. 8. Rozkład przyrostu temperatury w przewodach elementarnych oraz w strudze destylatu wzdłuż długości zwoju zawierającego pręt dolny „i-tego” żłobka stojana stykający się bezpośrednio z zębami objętymi „pożarem żelaza” ( $\vartheta_2 = 2000$  K, uszkodzenie dwóch skrajnych pakietów rdzenia – rys. 4b)

Na długości uszkodzonego zęba rdzenia występuje lokalnie bardzo duży wzrost przyrostu temperatury przewodów elementarnych górnego i dolnego pręta. Na tym odcinku zwiększa się również przyrost temperatury destylatu przepływającego w odnośnych przewodach wydrążonych. Część ciepła generowanego w strefie objętej „pożarem żelaza” przepływa przez uszkodzony ząb rdzenia (wzdłuż jego wysokości), izolację główną górnego i dolnego pręta do przewodów elementarnych i destylatu (tych prętów). Liniowy rozkład przyrostu temperatury w strudze destylatu wzrasta o pewną stałą wartość poczynając od miejsca występowania „pożaru żelaza”. W konsekwencji wzrasta przyrost temperatury destylatu w skrzynkach wylotowych zwojów uzwojenia stojana, których pręty stykają się bezpośrednio z zębem objętym „pożarem żelaza”. Wartość tego wzrostu przyrostu temperatury gorącego destylatu zależy od przyrostu temperatury w strefie objętej „pożarem żelaza” ( $\Delta \vartheta_z$ ) oraz od szerokości tej strefy (liczby uszkodzonych pakietów rdzenia). Dla rozpatrywanego przypadku uszkodzenia rdzenia ( $\Delta \vartheta_z = 2000$  K – „pożar” występuje w dwóch skrajnych pakietach rdzenia), przyrosty temperatury gorącego destylatu wzrastają odpowiednio o 8,8 K (dotyczy zwoju z rys. 4a) oraz o 6,3 K (dotyczy zwoju z rys. 4b).

Z upływem czasu zwiększa się zarówno wartość temperatury w strefie objętej „pożarem żelaza”, jak i rozmiar tej strefy. Na początku „pożar” występuje przeważnie w jednym skrajnym pakiecie rdzenia, a następnie rozprzestrzenia się na kolejne. Spowodowane jest to znacznym zmniejszeniem się efektu chłodzenia pakietów w wyniku ograniczenia przepływu wodoru w najbliższej położonych kanałach promieniowych rdzenia (niszczenie się ich rozpórek) oraz uszkodzania się izolacji blach na skutek wzrostu ich wibracji (znaczne obniżenie ciśnienia prasowania w rozważanych częściach pakietów).

Wczesne wykrycie tego bardzo groźnego w skutkach zjawiska umożliwiłoby ograniczenie zakresu uszkodzeń, a w konsekwencji znaczne obniżenie kosztu postoju i remontu turbogeneratora. Jest ono możliwe przez pomiar temperatury destylatu w skrzynkach wylotowych wszystkich zwojów uzwojenia stojana. Postuluje się więc, by wprowadzić ten pomiar we wszystkich turbogeneracjach z bezpośrednim chłodzeniem uzwojenia stojana (w nielicznych typach dużych maszyn jest on instalowany przez wytwórcę). Różnice temperatur gorącego

destylatu w skrzynkach wylotowych można wykorzystać jako wskaźnik zwarcia blach w zębach pakietów rdzenia turbogeneratora.

Wykonano serię badań symulacyjnych mających określić wpływ stopnia rozwoju „pożaru żelaza” w zębie skrajnych pakietów na temperaturę destylatu wypływającego ze zwojów uzwojenia zawierających pręty bezpośrednio stykające się z uszkodzonym zębem. Wykonując badania zmieniano zarówno wartość przyrostu temperatury w zębie rdzenia strefy objętej „pożarem żelaza” ( $\Delta \vartheta_z = 1000, 1500, 2000$  K), jak i jej szerokości (jeden, dwa lub trzy skrajne pakiety po tej samej stronie rdzenia). Wyniki obliczeń cieplnych przedstawiono w tabelach 1 i 2. Podano w nich przyrosty temperatury gorącego destylatu w skrzynkach wylotowych rozpatrywanych zwojów uzwojenia stojana przy „pożarze” ( $\Delta \vartheta_{wyl}$ ), zaś w nawiasach okrągłych wzrost tych przyrostów w odniesieniu do sytuacji, w której rdzeń nie jest uszkodzony ( $\Delta' \vartheta_{wyl}$ ).

Już w początkowej fazie rozwoju „pożaru żelaza” w zębie jednego pakietu ( $\Delta \vartheta_z = 1000$  K), średni przyrost temperatury destylatu na wypływach ze zwojów zawierających pręty bezpośrednio stykające się z uszkodzonym zębem rdzenia wzrasta o 1,9 K. Wraz ze wzrostem przyrostu temperatury w strefie „pożaru żelaza” rosną przyrosty temperatury gorącego destylatu na wypływach z rozpatrywanych zwojów uzwojenia. Przy uszkodzeniu zęba w jednym pakiecie i temperaturze w strefie „pożaru żelaza”  $\Delta \vartheta_z = 2000$  K, średni przyrost temperatury destylatu na wypływach ze zwojów zawierających pręty bezpośrednio stykające się z uszkodzonym zębem rdzenia wzrasta o 3,8 K – tabela 1.

Znaczny wzrost przyrostu temperatury gorącego destylatu na wypływach z rozpatrywanych zwojów występuje przy wzroście liczby pakietów objętych „pożarem żelaza” – do dwóch lub trzech. Rozprzestrzenienie się uszkodzenia na drugi skrajny pakiet rdzenia przy  $\Delta \vartheta_z = 2000$  K powoduje wzrost średniego przyrostu temperatury destylatu na wypływach ze zwojów zawierających pręty bezpośrednio stykające się z uszkodzonym zębem rdzenia o 7,6 K – tabela 2. W przypadku, gdy uszkodzenie zęba obejmie trzy skrajne pakiety, średni przyrost temperatury destylatu na wypływach z rozpatrywanych zwojów wzrasta o 11,3 K – tabela 3.

Tabela 1. Wpływ „pożaru żelaza” w zębie jednego skrajnego pakietu rdzenia na przyrost temperatury destylatu w kolektorze wylotowym

Rodzaj zwoju	$\Delta t_z$ [K]	$\Delta t_{wyi}$ ( $\Delta' t_{wyi}$ ) [K]
z prętem górnym (rys.4a)	1000	30,8 (2,2)
	1500	31,9 (3,3)
	2000	33,0 (4,4)
z prętem dolnym (rys.4b)	1000	30,2 (1,6)
	1500	31,0 (2,4)
	2000	31,8 (3,2)

Tabela 2. Wpływ „pożaru żelaza” w zębie dwóch skrajnych pakietów rdzenia na przyrost temperatury destylatu w kolektorze wylotowym

Rodzaj zwoju	$\Delta t_z$ [K]	$\Delta t_{wyi}$ ( $\Delta' t_{wyi}$ ) [K]
z prętem górnym (rys.4a)	1000	33,0 (4,4)
	1500	35,2 (6,6)
	2000	37,4 (8,8)
z prętem dolnym (rys.4b)	1000	31,7 (3,1)
	1500	33,3 (4,7)
	2000	34,9 (6,3)

Tabela 3. Wpływ „pożaru żelaza” w zębie trzech skrajnych pakietów rdzenia na przyrost temperatury destylatu w kolektorze wylotowym

Rodzaj zwoju	$\Delta t_z$ [K]	$\Delta t_{wyi}$ ( $\Delta' t_{wyi}$ ) [K]
z prętem górnym (rys.4a)	1000	35,1 (6,5)
	1500	38,4 (9,8)
	2000	41,7 (13,1)
z prętem dolnym (rys.4b)	1000	33,3 (4,7)
	1500	35,7 (7,1)
	2000	38,1 (9,5)

Przeprowadzone badania symulacyjne wykazały, że temperatura gorącego destylatu mierzona na wypływach ze wszystkich zwojów uzwojenia stojana może być wykorzystana do diagnostyki on-line stanu technicznego zębów rdzenia stojana. Umożliwia ona sygnalizowanie uszkodzeń zębów nawet w początkowej fazie ich rozwoju. Dodatkową zaletą zaproponowanej metody diagnostycznej jest możliwość przybliżonej lokalizacji miejsca uszkodzenia. „Pożar żelaza” w zębach rdzenia powoduje bowiem istotny wzrost temperatury destylatu na wypływie ze zwojów uzwojenia stojana, których pręty bezpośrednio stykają się z tymi zębami.

## 5. Wnioski

1. Przeprowadzone badania symulacyjne wykazały, że mierzone podczas pracy turbogeneratora temperatury gorącego destylatu na

wypływach z poszczególnych zwojów uzwojenia stojana można wykorzystać do wykrywania oraz wstępnej oceny uszkodzeń zębów rdzenia.

2. System diagnostyki prewencyjnej bazujący na pomiarach temperatury gorącego destylatu, na wypływach z poszczególnych zwojów uzwojenia stojana, pozwoli zapobiec 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 zwojów. Umożliwi to wprowadzenie diagnostyki termicznej stanu technicznego zębów rdzenia stojana.

## 6. Literatura

- [1] Bytnar A.: *Uszkodzenia rdzenia stojana turbogeneratora w aspekcie niektórych zjawisk fizycznych*. XLIII International Symposium on Electrical Machines SME 2007, Poznań, 2-5 July 2007
- [2] Butov A. V. i dg: *Povrezdaemost' i kontrol' zubcovyh zon zapecennych krajnih paketov stali serdecnikov statorom turbogeneratorov*. Elektriceskie Stancji, nr 5, cc.41-47, 2001
- [3] Cloyde V., Maugham P. E.: *Upgrading of generators to improve reliability*. Iris Rotating Machine Conference, Santa Monica, CA, June. pp.1-10, 2003
- [4] Kapinos J., Krok R., Miksiewicz R.: *Rozkład temperatur w przecie uzwojenia twornika generatora synchronicznego z chłodzeniem bezpośrednim*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka z. 138, Gliwice, ss. 285-294, 1994
- [5] Krok R., Sieradzki S., Adamek J.: *Zastosowanie sieci ciepłno – elektrycznych w systemie komputerowego wspomaganie projektowania generatorów synchronicznych*. XLII International Symposium on Electrical Machines SME'2006, Krakow, 3-6.07.2006

## Autorzy

Prof. dr hab. inż. Andrzej Bytnar,  
e-mail: [andrzej.bytnar@ien.com.pl](mailto:andrzej.bytnar@ien.com.pl)  
Instytut Energetyki,  
ul. Mory 8, 01-330 Warszawa,  
tel. (022) 836-3201, (022) 3451-265;  
Dr inż. Roman Krok,  
e-mail: [Roman.Krok@polsl.pl](mailto:Roman.Krok@polsl.pl)  
Politechnika Śląska,  
Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych,  
ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice,  
tel. (032) 237-29-29