

Roman Krok, Marian Pasko
Politechnika Śląska, Gliwice

PROPOZYCJE KONSTRUKCJI UZWOJENIA WZBUDZENIA UWZGLEDNIAJĄCE ZMIANĘ WARUNKÓW PRACY TURBOGENERATORÓW

SUGGESTED CONSTRUCTIONS OF EXCITATION WINDING TAKING INTO ACCOUNT CHANGE IN TURBOGENERATOR OPERATING CONDITIONS

Streszczenie: W artykule poruszono aktualny problem częstych uszkodzeń czoł uzwojenia wzbudzenia turbogeneratorów pracujących przy dużych zmianach obciążenia oraz licznych wyłączeniach i załączeniach do systemu elektroenergetycznego. Projekty modernizacji muszą zawierać nowe rozwiązania przeciwdziałające tym uszkodzeniom powstającym po bardzo krótkim okresie eksploatacji turbogeneratorów wykrywanych przy przeglądach. Opracowanie innowacyjnych konstrukcji uzwojeń wzbudzenia turbogeneratorów wspomogają zmodyfikowane sieci cieplne. W formie przykładu przedstawiono modernizację turbogeneraora TGH-120 w celu poprawy niezawodności pracy oraz podwyższenia mocy do 130 MW wdrożoną do produkcji w EthosEnergy Poland S.A. w Lublińcu.

Abstract: The current problem of frequent failures of end windings in excitation windings of turbogenerators operating with big load variations and numerous switchings on and off to the power grid is discussed in the paper. Any proposal for modernization must contain new solutions counteracting these failures, which usually arise after very short operational time of the turbogenerators and are identified during inspections. The elaboration of innovative winding designs for turbogenerator excitation winding is aided by modified thermal networks. We have described the instance of modernization of TGH-120 turbogenerator, which was conducted in order to improve its operational reliability and to raise its rated power up to 130 MW. It was implemented in EthosEnergy Poland S.A. in Lubliniec.

Słowa kluczowe: uszkodzenia turbogeneratorów, projektowanie uzwojenia wzbudzenia, sieci cieplne
Keywords: turbogenerator failure, excitation winding design, thermal networks

1. Wstęp

Coraz bardziej powszechna zmiana warunków pracy turbogeneratorów powoduje uszkodzenia niektórych elementów już po bardzo krótkim okresie eksploatacji. Podczas przeglądów turbogeneratorów bardzo często stwierdza się rozległe uszkodzenia czoł uzwojenia wzbudzenia. Dotyczy to tych turbogeneratorów, które pracowały przy dużych zmianach obciążenia oraz licznych wyłączeniach i załączeniach do sieci. Uszkodzenia czoł uzwojenia wzbudzenia wykrywane są w wielu typach turbogeneratorów różniących się budową oraz rozwiązaniem systemu chłodzenia. Poszukiwanie skutecznych sposobów przeciwdziałania tym uszkodzeniom jest przedmiotem prac badawczych przy modernizacjach turbogeneratorów w celu poprawy niezawodności pracy oraz podwyższenia mocy. Określenie przyczyn rozpatrywanych uszkodzeń turbogeneratorów oraz zaproponowanie odpowiednich środków zaradczych wymagało

utworzenia modeli do obliczeń rozkładu temperatury w uzwojeniach wzbudzenia o różnej strukturze kanałów wentylacyjnych.

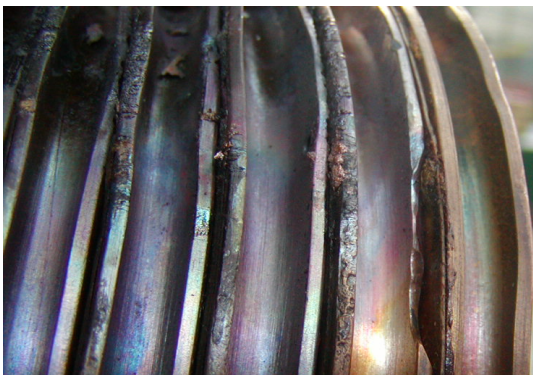
2. Uszkodzenia czoł uzwojenia wzbudzenia turbogeneratorów

Z przeglądów wielu typów wirników turbogeneratorów pracujących przy dużych zmianach obciążenia i częstych odstawieniach przeprowadzonych po różnym czasie od przezwojenia wynika, że w procesie uszkodzeń czoł uzwojenia wzbudzenia można wyróżnić dwie fazy. W pierwszej z nich dochodzi do deformacji przewodów w czołach uzwojenia wzbudzenia. Najbardziej odkształcone są przewody położone bezpośrednio pod kołpakiem w zewnętrznych cewkach uzwojenia wzbudzenia – rys. 1. W tych najdłuższych przewodach czoł cewek uzwojenia wzbudzenia występuje największa dylatacja termiczna. W rozwiązaniu przedstawionym na zdjęciu bardzo cienkie i długie ścianki bocznych kanałów chłodzących w przewodach czoł uzwojenia wzbudzenia

uległy dużemu pofalowaniu. W efekcie dochodzi do zniszczenia fragmentów przekładek izolacyjnych pomiędzy przewodami. W drugiej fazie rozwoju uszkodzeń w miejscach przetarcia przekładek izolacyjnych powstaje łuk elektryczny powodujący wytopienie fragmentów przewodów oraz dalszą poważną degradację układu izolacyjnego w strefie czołowej uzwojenia wzbudzenia turbogeneratora (rys. 2).



Rys. 1. Początkowa faza uszkodzeń czoł uzwojenia wzbudzenia turbogeneratora



Rys. 2. Deformacja i nadtopienie przewodów w czołach uzwojenia wzbudzenia turbogeneratora

3. Modele cieplne wspomagające projektowanie uzwojeń wzbudzenia turbogeneratorów

Opracowywanie nowych konstrukcji uzwojeń wzbudzenia odpornych na pracę turbogeneratorów ze zmiennym obciążeniem wspomagają programy komputerowe sporządzone na bazie zmodyfikowanych sieci cieplnych [1].

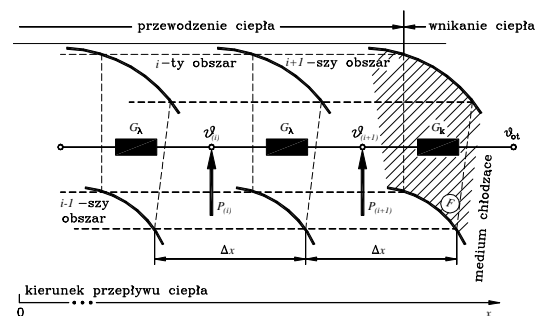
Metoda sieci cieplnych jest jedną z najstarszych metod stosowanych do obliczeń rozkładu temperatury w maszynach elektrycznych [2]. Pierwsze sieci cieplne zawierały kilka węzłów, zaś opisujące je układy równań rozwiązywano analitycznie.

Zwiększenie liczby węzłów sieci cieplnej stało się możliwe dzięki zastosowaniu do jej rozwiązywania najpierw maszyny analogowej, a potem maszyny cyfrowej. Wzrost liczby węzłów umożliwiał poprawę dokładności obliczeń rozkładu temperatury [3-7]. W klasycznych sieciach cieplnych każdemu elementowi maszyny elektrycznej biorącemu udział w wymianie ciepła jest przyporządkowany pojedynczy węzeł reprezentujący jego średnią temperaturę. Medium przepływające w kanale chłodzącym odpowiada również jeden węzeł reprezentujący średnią temperaturę. Przy takim sposobie modelowania nie ma możliwości obliczenia rozkładu temperatury w elementach maszyny elektrycznej oraz w przepływających w nich strugach medium chłodzącego.

W turbogeneratorach występują bardzo duże nierównomierności rozkładu temperatury zarówno w elementach konstrukcyjnych, jak i w strugach medium chłodzącego. Przybliżone wartości średnich temperatur elementów obliczone przy zastosowaniu klasycznych sieci cieplnych nie wystarczają do pełnej oceny stanu cieplnego turbogeneratorsa.

Nowa metoda zmodyfikowanych sieci cieplnych [1] daje możliwość zamodelowania rozkładu temperatury wewnątrz elementów turbogeneratorsa oraz w strugach medium w kanałach chłodzących w stanach cieplnie ustalonych i nieustalonych.

W celu utworzenia zmodyfikowanej sieci cieplnej dla stanu ustalonego elementy maszyny elektrycznej dzieli się w kierunku przepływu ciepła na obszary różnicowe (rys. 3), a następnie każdemu z nich zostaje przyporządkowany węzeł cieplny. Węzły sieci cieplnej łączy się przewodnościami cieplnymi.



Rys. 3. Sieć cieplna dla elementu maszyny elektrycznej w stanie cieplnie ustalonym

Przewodność dla strumienia ciepła przepływającego na skutek przewodzenia pomiędzy sąsiadującymi obszarami różnicowymi (rys. 3) wyznaczono z zależności:

$$G_{\lambda} = \frac{\lambda_x \cdot F}{\Delta x}, \quad (1)$$

gdzie: λ_x – przewodność cieplna właściwa materiału, z którego wykonany jest element w kierunku osi x , F – pole powierzchni ścianki oddzielającej sąsiadujące obszary.

Przewodność dla strumienia ciepła odprowadzanego z powierzchni ścianki obszaru różnicowego do omywającego ją medium chłodzącego (rys. 3) wyznaczono z zależności:

$$G_k = \alpha_k \cdot F, \quad (2)$$

gdzie: α_k – współczynnik odprowadzania ciepła, F – pole powierzchni ścianki obszaru, z której ciepło jest odprowadzane do medium chłodzącego.

W węzłach reprezentujących obszary różnicowe wydzielone wewnątrz przewodów uzwojenia wzbudzenia (rys. 3) występują dodatkowo straty mocy zależne od temperatury:

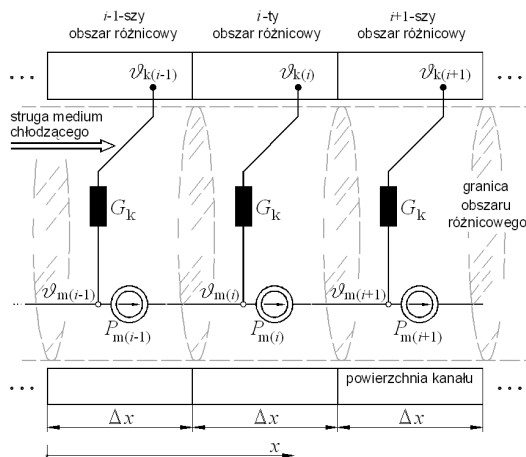
$$P_{(i)} = P_o \cdot (1 + \alpha \cdot \vartheta_{(i)}), \quad P_o = j^2 \cdot \rho_o \cdot V, \quad (3)$$

gdzie: P_o – straty mocy w wydzielonych obszarach w temperaturze odniesienia (przyjęto 0°C), α – temperaturowy współczynnik zmiany rezystancji materiału, z którego wykonane jest uzwojenie; $\vartheta_{(i)}$ – średnia temperatura i -tego obszaru, j – średnia gęstość prądu, ρ_o – rezystywność materiału, z którego wykonane jest uzwojenie w temperaturze odniesienia; V – objętość wydzielonych obszarów.

W pracy [1] przedstawiono oryginalną sieć cieplną dla strugi cieczy lub gazu przepływającej w kanale chłodzącym maszyny elektrycznej. Zawiera ona umowne siły prądomotoryczne (rys. 4) o wydatkach równych mocom cieplnym unoszonym przez strugę medium chłodzącego przepływającego w kanale:

$$P_{m(i)} = \dot{m} c_p \vartheta_{m(i)}, \quad (4)$$

gdzie: \dot{m} – strumień masy medium chłodzącego, c_p – ciepło właściwe medium przy stałym ciśnieniu, $\vartheta_{m(i)}$ – średnia temperatura medium w i -tym obszarze różnicowym wydzielonym wewnątrz kanału.



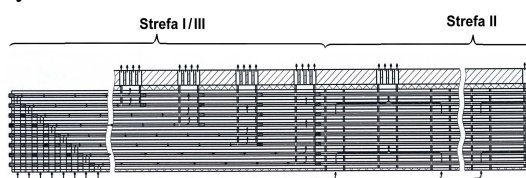
Rys. 4. Sieć cieplna dla strugi medium przepływającego w kanale chłodzącym maszyny elektrycznej w stanie cieplnie ustalonym

4. Modernizacja wirnika turbogeneratorsa TGH-120

Zasadniczym celem zmiany konstrukcji wirnika było wyeliminowanie powtarzających się uszkodzeń czoł uzwojenia wzbudzenia wywołanych trudnymi warunkami pracy turbogeneratorsa charakteryzującym się dużymi zmianami obciążenia oraz częstymi odstawieniami. Dodatkowo zmiany w uzwojeniu wzbudzenia stanowiącym najbardziej wykorzystany pod względem cieplnym element miały umożliwić podwyższenie mocy turbogeneratorsa do 130 MW przy znamionowym współczynniku mocy $\cos \varphi_n = 0,80$ indukcyjny.

Realizacja tak postawionych celów wymagała znacznego zwiększenia sztywności przewodów w czołach uzwojenia wzbudzenia przy jednoczesnym zapewnieniu możliwości ich przemieszczania się na skutek zjawisk dylatacyjnych. Konieczne było również zwiększenie skuteczności chłodzenia uzwojenia wzbudzenia.

W rozpatrywanym turbogeneratorsie w wersji fabrycznej zastosowano osiowo – promieniomowy system chłodzenia uzwojenia wzbudzenia - rys. 5.



Rys. 5. Sieć wentylacyjna uzwojenia wzbudzenia turbogeneratorsa TGH-120

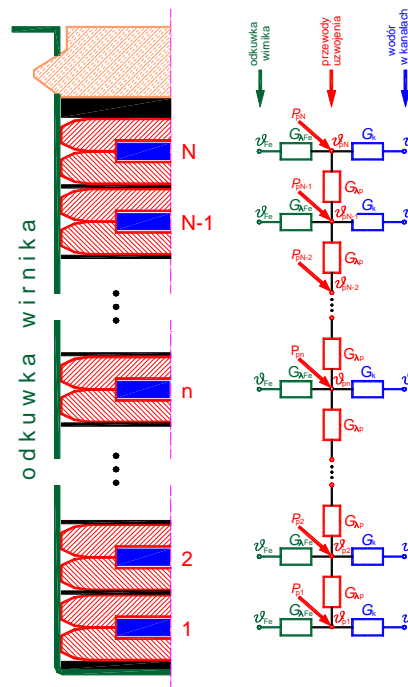
Kanały osiowe w przewodach uzwojenia wzbudzenia podzielone są na krótkie odcinki zasilane równolegle wodorem, co zapewnia bardzo małą nierównomierność rozkładu temperatury w kierunku osiowym połączoną z dużą skutecznością chłodzenia. Biorąc pod uwagę wymienione zalety osiowo - promieniowego systemu chłodzenia uzwojenia wzbudzenia zaproponowano zastosowanie takiego samego rozwiązania również w zmodernizowanym wirniku turbogeneratora.

W rozpatrywanym systemie chłodzenia uzwojenia wzbudzenia turbogeneratora część wodoru opuszczającego chłodnicę kierowana jest do wirnika. Wentylatory osadzone na wale wtłaczają zimny wodór na każdym z końców odkuwki wirnika częściowo do szczeliny przywirnikowej, a częściowo pod kołpaki. W wirniku można wyróżnić trzy strefy chłodzenia. Strefa I i III obejmuje połączenia czołowe oraz niewielki fragment części żłobkowej na końcu odkuwki, zaś strefa II część żłobkową uzwojenia wzbudzenia. Otwory wlotowe w strefie I i III znajdują się w czołach uzwojenia wzbudzenia, a wylotowe w klinach żłobkowych na końcu odkuwki wirnika. Otwory wlotowe w strefie II znajdują się w kanałach podżłobkowych, zaś wylotowe w klinach żłobkowych na całej długości odkuwki wirnika.

Sporządzając sieć odwzorowującą wymianę ciepła w wirniku turbogeneratora wykorzystano fakt, że temperatura wodoru przepływającego w bardzo krótkich odcinkach osiowych kanałów chłodzących w przewodach uzwojenia jest praktycznie stała. W konsekwencji w modelu cieplnym wystarczy uwzględnić jedynie wymianę ciepła w płaszczyźnie przekroju poprzecznego żłobka.

Uzwojenie wzbudzenia turbogeneratora fabrycznego nawinięte jest przewodem składającym się z dwóch ceowników o bardzo małej wysokości w stosunku do szerokości - rys. 5. Czoła uzwojenia wzbudzenia wykonane takim przewodem mają małą sztywność i przy zmiennym obciążeniu oraz częstych załączaniach i wyłączeniach turbogeneratora ulegają uszkodzeniom. Duże straty ponoszone przez elektrownię związane z kolejnymi awaryjnymi odstawieniami bloku i remontami wirnika stały się bodźcem do rozpoczęcia prac badawczych związanych z przystosowaniem czoła uzwojenia wzbudzenia do nowego reżimu pra-

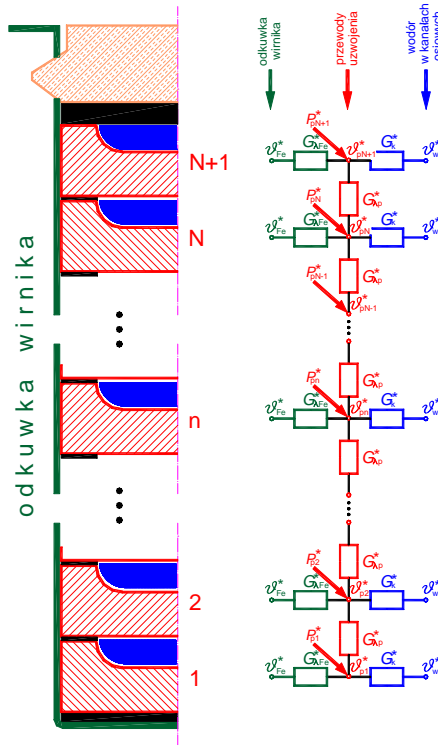
cy turbogeneratora. Rozwiązanie problemu było bardzo trudne, ponieważ modernizacja wirnika miała dodatkowo umożliwić podwyższenie mocy turbogeneratora do 130 MW przy jednoczesnym zachowaniu znamionowego współczynnika mocy.



Rys. 5. Przekrój poprzeczny żłobka wirnika turbogeneratora fabrycznego oraz sieć cieplna

Uzyskanie znacznego wzrostu sztywności przewodów w czołach uzwojenia wzbudzenia turbogeneratora przy jednoczesnej dużej poprawie skuteczności chłodzenia przewodów na całej długości wymagało odejścia od klasycznego sposobu rozmieszczenia osiowych kanałów wentylacyjnych wewnątrz przewodów. W opracowanym innowacyjnym rozwiązaniu systemu chłodzenia uzwojenia wzbudzenia turbogeneratora strugi wodoru przepływają pomiędzy sąsiednimi przewodami uzwojenia – rys. 6. Nowy przewód uzwojenia wzbudzenia ma kształt ceownika. Jego wysokość jest znacznie większa niż w wersji fabrycznej, co skutkuje dużym wzrostem sztywności. Dodatkowo pole powierzchni na której odbywa się wymiana ciepła pomiędzy pojedynczym przewodem, a omywającymi go od dołu i od góry strugami wodoru powiększono o 23% w porównaniu do powierzchni kanału wewnątrz przewodu w wersji fabrycznej. Powoduje to znaczną poprawę chłodzenia uzwojenia wzbudzenia zarówno w części czołowej,

jak i żłobkowej. Zwiększenie liczby przewodów w każdym żłobku wirnika o jeden w porównaniu do wersji fabrycznej umożliwiło zmniejszenie prądu wzbudzenia potrzebnego do wytworzenia wymaganego przepływu wzbudzenia. Wymianę ciepła w przekroju poprzecznym żłobka zmodernizowanego wirnika turbogeneratorsa odwzorowano przy wykorzystaniu sieci cieplnej – rys. 6.

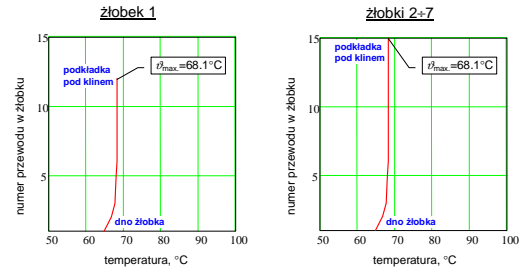


Rys. 6. Przekrój poprzeczny żłobka zmodernizowanego wirnika turbogeneratorsa oraz sieć cieplna

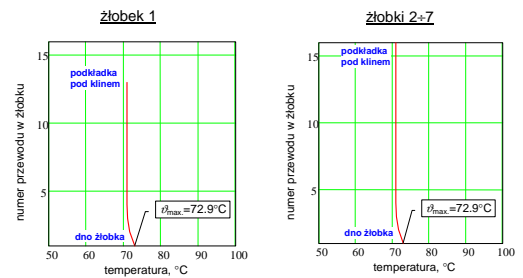
Szczegółowy opis utworzonych sieci cieplnych wraz ze wzorami umożliwiającymi wyznaczenie parametrów zamieszczono w pracy [1].

Wykorzystując programy komputerowe opracowane na bazie sieci cieplnych obliczono rozkłady temperatury w żłobkach wirnika turbogeneratorsa TGH-120 w wersji fabrycznej przy obciążeniu znamionową mocą czynną 120 MW (rys.7) oraz po modernizacji przy obciążeniu mocą czynną podwyższoną do 130 MW (rys.8). Obliczona średnia temperatura zmodernizowanego uzwojenia wzbudzenia przy obciążeniu turbogeneratorsa mocą 130 MW wynosi 72,5°C i jest aż o 42,5°C mniejsza od dopuszczalnej (115°C). Należy zwrócić uwagę na fakt, że zgodnie z projek-

tem modernizacji izolację uzwojenia wzbudzenia turbogeneratorsa wykonano w klasie F, zaś temperaturę dopuszczalną przyjęto dla klasy B.

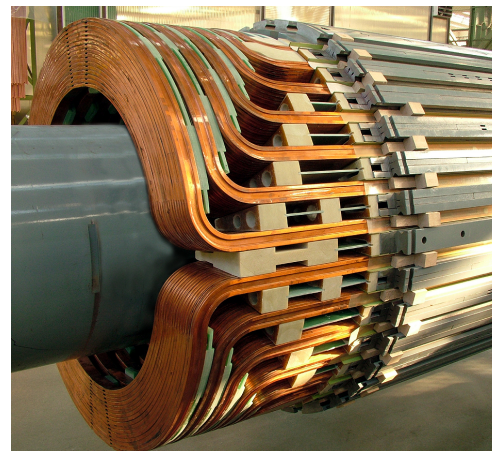


Rys. 7. Rozkłady temperatury w przewodach uzwojenia wzbudzenia wzdłuż wysokości żłobków wirnika turbogeneratorsa TGH-120 w wersji fabrycznej w znamionowym stanie pracy - $P_n=120\text{ MW}$, $\cos\varphi_n=0,80\text{ ind}$.



Rys. 8. Rozkłady temperatury w przewodach uzwojenia wzbudzenia wzdłuż wysokości żłobków zmodernizowanego wirnika turbogeneratorsa TGH-120 przy obciążeniu mocą $P=130\text{ MW}$ oraz $\cos\varphi_n=0,80\text{ ind}$.

Projekt modernizacji wirnika turbogeneratorsa TGH-120 wdrożono do produkcji w EthosEnergy Poland S.A. w Lublińcu – rys. 9 oraz 10.



Rys. 9. Czola zmodernizowanego uzwojenia wzbudzenia turbogeneratorsa TGH-120 [8]



Rys. 9. Zmodernizowany wirnik turbogenera-
tora TGH-120 [8]

Wykonane sprawdzające pomiary cieplne wykazały możliwość pracy turbogenera-
tora ze zmodernizowanym wirnikiem przy obciążeniu
mocą czynną podwyższoną do 130 MW
i znamionowym współczynniku mocy. Wpro-
wadzone zmiany konstrukcyjne w wirniku
turbogenera-
tora wyeliminowały uszkodzenia
czoł uzwojenia wzbudzenia.

5. Podsumowanie

Wymiernym efektem prac badawczych wyko-
nywanych przez prawie 25 lat jest opracowa-
nie wielu projektów modernizacji uzwojeń
wzbudzenia różnych typów turbogeneratorów.
Uzyskana duża poprawa chłodzenia uzwojenia
wzbudzenia (najczęściej najbardziej wykorzy-
stany pod względem cieplnym element) umoż-
liwiła znaczne podwyższenie mocy wielu ty-
pów turbogeneratorów. Dodatkowo wprowa-
dzone zmiany konstrukcyjne czoł uzwojenia
wzbudzenia wyeliminowały uszkodzenia po-
wodowane pracą turbogeneratorów przy du-
żych zmianach obciążenia i częstych odsta-
wieniach.

Wiele opracowanych projektów modernizacji
turbogeneratorów zostało wdrożonych do pro-
dukcji. Sprawdzające pomiary cieplne wyka-
zały uzyskanie znacznego wzrostu mocy tur-
bogeneratorów w wyniku wprowadzonych
zmian [9, 10], w niektórych przypadkach na-
wet o 20%. Na jedno z innowacyjnych roz-
wiązań eliminujących uszkodzenia czoł uzwo-
jenia wzbudzenia turbogenera-
tora uzyskano patent na wynalazek [11].

6. Literatura

[1]. Krok R. "Sieci cieplne w modelowaniu pola
temperatury w maszynach elektrycznych prądu
przemianowego", Wydawnictwo Politechniki Ślą-
skiej, Monografia, Gliwice 2010.

[2]. Hak J. "Die inneren axialen Wärmewiderstän-
de einer elektrischen Maschine", Archiv für Elekt-
rotechnik, Heft 1, s. 58-76, 1957.

[3]. Kalander G. "Temperature simulation of a 15
kW induction machine operating at variable
speed", International Conference on Electrical Ma-
chines, Manchester, United Kingdom, p. 943-947,
1992.

[4]. Rioul M. "Development of thermohydraulic
modelling for the determination of hot spots in
the bars and the slot thermal image for the stator
900 MW turbogenerators", Proceedings of
ICEM'94, Paris, France, p. 437-441, 1994.

[5]. Mukosiej J. "Universal program for thermal
calculation of electric machines by the method of
equivalent thermal networks (ETN)", Proceedings
of ICEM'96, Vigo, Spain, p. 377-381, 1996.

[6]. Gurazdowski D., Zawilak J. "Rozkład tempera-
tury w przecie uzwojenia stojana turbogenera-
tora", Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, Ko-
mel, nr 75, str. 177-184, 2006.

[7]. Gurjewicz E.I., Filin A.G. "Pole temperatury
w uzwojeniu stojana dużego turbogenera-
tora przy lokalnych uszkodzeniach wewnętrznego wodnego
systemu chłodzenia", Elektryczestwo, №3,
str. 23-29, 2010.

[8]. Adamek J., Krok R. "Modernizacja wirnika
w celu zwiększenia mocy znamionowej genera-
tora TGH-120 do 130 MW", Energetyka, №9,
str. 594-597, 2005.

[9]. Krok R., Pasko M. "**Modernizacje turboge-
neratorów z podwyższeniem mocy w aspekcie
obniżania kosztów wytwarzania oraz poprawy
jakości energii elektrycznej**", Zeszyty Problemo-
we "Maszyny Elektryczne", Nr 3(103), str. 115-
120, 2014.

[10]. Krok R., Pasko M. "Współczesne trendy do-
skonalenia konstrukcji turbogeneratorów", Napędy
i Sterowanie, Nr 2, str. 62-67, 2015.

[11]. Sieradzki S., Adamek J., Kardas D., Kapinos
J., Krok R. "Przewód uzwojenia wzbudzenia gene-
ratora", Patent na wynalazek nr 218474 udzielony
przez Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej
na rzecz Turbocare Poland S.A. w Lublińcu.

Autorzy

dr hab. inż. Roman Krok
Politechnika Śląska, Instytut Elektrotechniki
i Informatyki, Zakład Maszyn Elektrycznych
i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie,
ul. Akademicka 10A, 44-100 Gliwice,
e-mail: Roman.Krok@polsl.pl

prof. dr hab. inż. Marian Pasko
Politechnika Śląska, Instytut Elektrotechniki
i Informatyki, Zakład Maszyn Elektrycznych
i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie,
ul. Akademicka 10A, 44-100 Gliwice,
e-mail: Marian.Pasko@polsl.pl