

Roman Krok, Politechnika Śląska, Gliwice

Stefan Sieradzki, Jan Adamek, „ENERGOSERWIS” S.A., Lubliniec

## CIEPLNE BADANIA SYMULACYJNE STOSOWANE PRZY OPRACOWYWANIU PROJEKTÓW MODERNIZACJI GENERATORÓW SYNCHRONICZNYCH

### THERMAL SIMULATION INVESTIGATIONS APPLIED WHEN WORKING OUT MODERNISATION PROJECTS OF SYNCHRONOUS GENERATORS

**Abstract:** The paper presents a software package for thermal computations of synchronous generators. The programs included in this package are applied when working out modernisation projects of synchronous generators for „ENERGOSERWIS” S.A. They enable carrying out thermal computations of the main construction elements of generators. They were used for working out quite a few modernisation projects of synchronous generators of 30 MW up to 500 MW aiming at increase in the rated power, replacement of the cooling medium (e.g. hydrogen by air), increase in the life and improvement of the weakest construction nodes. The use of the developed computer programs is illustrated by the example of a TGH-120 generator modernisation aiming at increase in its rated power up to 130 MW. Also the implementation of the TGH-120 generator modernisation to the manufacturing process in „ENERGOSERWIS” S.A. is presented in the paper. The measurement results are compared with the computation results.

#### 1. Wstęp

Wykonywane w „ENERGOSERWIS” S.A. Lubliniec modernizacje generatorów synchronicznych wymagają często opracowania nowych rozwiązań konstrukcyjnych elementów stojana i wirnika, w tym również zmiany ich systemów chłodzenia. W fazie projektowania jedynym sposobem sprawdzenia poprawności opracowanych rozwiązań konstrukcyjnych oraz realizacji, w wyniku ich wdrożenia, założonych w projekcie celów (np. zwiększenia mocy znamionowej generatora, obniżenia temperatury uzwojeń, zwiększenia żywotności izolacji) jest przeprowadzenie symulacji komputerowych.

Od kilkunastu lat w Katedrze Maszyn i Urządzeń Elektrycznych Politechniki Śląskiej we współpracy z „ENERGOSERWIS” S.A. Lubliniec prowadzone są prace badawcze, których celem jest opracowanie programów komputerowych do obliczeń cieplnych różnych typów remontowanych i modernizowanych generatorów. Efektem tych prac jest wykonanie, ciągle rozbudowywanego, pakietu programów komputerowych do obliczeń cieplnych generatorów o mocach znamionowych od 30 MW do 500 MW, o różnych konstrukcjach i systemach chłodzenia, pracujących zarówno w elektrowniach krajowych jak i zagranicznych, dla rozwiązań konstrukcyjnych opracowanych przez „ENERGOSERWIS” S.A. Lubliniec. Ciągłe doskonalenie modeli cieplnych generatorów

jest możliwe dzięki weryfikacji pomiarowej wyników obliczeń cieplnych.

Na przykładzie modernizacji wirnika generatora TGH-120 w celu zwiększenia mocy znamionowej do 130 MW zaprezentowane zostanie zastosowanie jednego z opracowanych modeli cieplnych uzwojenia wzbudzenia i sporządzonego na jego podstawie programu komputerowego w procesie projektowania. Wykonany w „ENERGOSERWIS” S.A. Lubliniec projekt modernizacji wirnika generatora TGH-120 został wdrożony do produkcji, zaś przeprowadzone w elektrowni pomiary cieplne generatora potwierdziły dużą dokładność odwzorowania temperatury przez sporządzony model cieplny.

#### 2. Pakiet programów komputerowych do obliczeń cieplnych generatorów synchronicznych

„ENERGOSERWIS” S.A. wykonał modernizacje i remonty wielu generatorów synchronicznych pracujących zarówno w elektrowniach krajowych, jak i zagranicznych. Generatory te różniły się mocami znamionowymi, systemami chłodzenia oraz mediami chłodzącymi (wodór, powietrze, woda) stosowanymi do chłodzenia elementów czynnych. W ramach wykonanych modernizacji opracowano i wdrożono wiele nowych rozwiązań konstrukcyjnych. Sprawdzenie realizacji celów założonych w projektach modernizacji (podwyższenie mo-

cy znamionowej generatora, zwiększenie jego żywotności, zamiana medium chłodzącego, udoskonalenie najsłabszych węzłów konstrukcyjnych itp.) wymagało w wielu przypadkach wykonania sprawdzających obliczeń cieplnych.

W ramach wspólnych prac wykonywanych przez Katedrę Maszyn i Urządzeń Elektrycznych Politechniki Śląskiej i „ENERGOSERWIS” S.A. opracowano, ciągle rozbudowywany, pakiet programów komputerowych do obliczeń cieplnych głównych węzłów konstrukcyjnych generatorów synchronicznych. Sporządzono modele cieplne wirników oraz stojanów generatorów synchronicznych o mocach znamionowych od 30 do 500 MW. Modele te uwzględniają różne rozwiązania konstrukcyjne uzwojeń wzbudzenia, uzwojeń i rdzeni stojanów oraz systemów chłodzenia, spotykane w wersjach fabrycznych generatorów, jak i nowe rozwiązania opracowane przez „ENERGOSERWIS” S.A.

Na obecnym etapie pakiet zawiera programy komputerowe do obliczeń cieplnych:

- uzwojeń wzbudzenia chłodzonych pośrednio oraz bezpośrednio (dla różnych konfiguracji kanałów chłodzących w wirniku powietrzem lub wodorem,
- uzwojeń i rdzeni stojanów chłodzonych pośrednio powietrzem lub wodorem,
- uzwojeń stojanów o różnych konstrukcjach prętów chłodzonych bezpośrednio powietrzem, wodorem lub wodą.

Sporządzone programy komputerowe umożliwiają:

- obliczenia pól temperatury w elementach konstrukcyjnych generatorów przy różnych obciążeniach oraz w różnych warunkach chłodzenia (np. różne temperatury powietrza lub wodoru na wlotach do generatora, różne temperatury wlotowe i wydatki destylatu chłodzącego pręty uzwojenia stojana),
- obliczenia średnich i maksymalnych przyrostów temperatur w wybranych elementach konstrukcyjnych,
- zlokalizowanie miejsc narażonych na uszkodzenia termiczne lub przyspieszony proces starzenia.

W oparciu o wyniki pomiarów cieplnych wielu typów generatorów synchronicznych dokonano weryfikacji pomiarowej uzyskanych z pomocą opracowanych programów komputerowych

wyników obliczeń cieplnych. Maksymalna niedokładność odwzorowania przyrostów temperatury w elementach konstrukcyjnych generatorów przez sporządzone modele cieplne nie przekracza 5 K, co biorąc pod uwagę skomplikowane obiekty w których modelowane jest pole temperatury można uznać za bardzo dobry wynik. Przy wykonywaniu programów komputerowych wiele uwagi poświęcono opracowaniu przejrzystych oraz pomocnych w analizach projektowych interfejsów wejściowo - wyjściowych. Danymi wejściowymi w programach są wielkości bezpośrednio podawane w dokumentacji technicznej generatorów. Dodatkowo sporządzono obszerne zestawienie wartości przewodności cieplnych właściwych materiałów izolacyjnych oraz pozostałych materiałów stosowanych do budowy generatorów. Wyniki obliczeń cieplnych prezentowane są w formie wykresów przedstawiających rozkłady temperatury w elementach konstrukcyjnych oraz w formie macierzy temperatur, które następnie mogą być obrabiane z pomocą innych programów matematycznych lub graficznych. Opracowane programy komputerowe stały się pomocnym narzędziem wspomagającym proces projektowania generatorów synchronicznych w „ENERGOSE-RWIS” S.A.

### 3. Modele cieplne generatorów synchronicznych

Modele cieplne generatorów synchronicznych sporządzono w oparciu o metodę różnic skończonych, wykorzystując interpretację równań różnicowych przewodnictwa ciepła w postaci sieci cieplno – elektrycznych.

W celu opracowania sieci cieplno – elektrycznych elementy konstrukcyjne generatorów, w których obliczane jest pole temperatury, zostały podzielone na obszary różnicowe. Każdemu obszarowi różnicowemu przyporządkowano na schemacie cieplno – elektrycznym jeden węzeł cieplny. Temperatura w węźle cieplnym jest równa średniej temperaturze odpowiadającego mu obszaru różnicowego.

W sporządzonych modelach cieplnych generatorów synchronicznych uwzględniono:

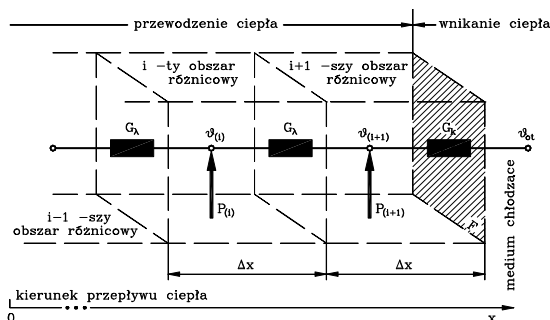
- strumienie ciepła przepływające w elementach konstrukcyjnych zarówno w kierunku poosiowym, jak i w kierunku promieniowym,
- zmiany temperatur mediów chłodzących wzdłuż długości kanałów wentylacyjnych,

- zjawisko unoszenia ciepła w strugach mediów chłodzących przepływających w kanałach,
- podstawowe i dodatkowe straty mocy w uzwojeniach i rdzeniach stojanów,
- straty mocy w uzwojeniach wzbudzenia oraz w warstwach przypowierzchniowych odkuwek wirników, w klinach żłobkowych i w ekranach tłumiących wirników,
- różne wartości przewodności cieplnych właściwych pakietów blach stojanów w kierunku poosiowym i promieniowym.

Przewodność cieplną drogi dla strumienia ciepła przepływającego poprzez przewodzenie pomiędzy sąsiednimi obszarami różnicowymi (rys.1) wyznaczono z relacji:

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

gdzie:  $\lambda$  - przewodność cieplna właściwa materiału z którego wykonany jest element,  $\Delta x$  - długość (w kierunku poosiowym) obszaru różnicowego,  $F$  - pole powierzchni ścianki oddzielającej sąsiednie obszary różnicowe.



Rys.1. Podział w kierunku poosiowym wybranego elementu na obszary różnicowe

Przewodność cieplną drogi dla strumienia ciepła przepływającego poprzez wnikiwanie ciepła ze ścianki obszaru różnicowego (rys.1) do medium chłodzącego wyznaczono z relacji:

$$G_k = k \cdot F \quad (2)$$

gdzie:  $k$  - współczynnik wnikiwania ciepła,  $F$  - pole powierzchni ścianki obszaru różnicowego, z której ciepło wnika do medium chłodzącego.

W obszarach różnicowych uzwojeń stojana i wzbudzenia występują zależne od temperatury straty (rys.1), które wyznaczono z relacji:

$$P_{(i)} = P_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \mathcal{G}_{(i)}), \quad P_0 = k_d \cdot j^2 \cdot \rho_0 \cdot V \quad (3)$$

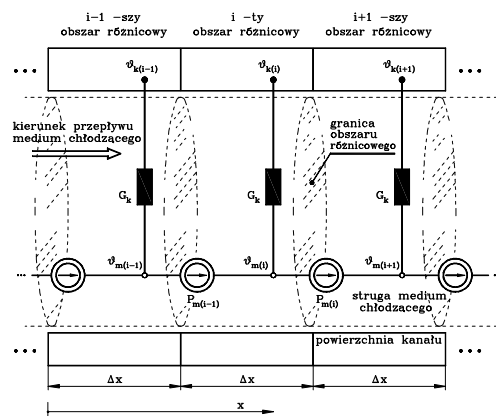
gdzie:  $P_0$  - straty w obszarach różnicowych w temperaturze odniesienia  $0^\circ\text{C}$ ,  $\alpha$  - temperaturowy współczynnik zmiany rezystancji miedzi,  $\rho_0$  - rezystywność miedzi w temperaturze  $0^\circ\text{C}$ ,

$\mathcal{G}_{(i)}$  - średnia temperatura  $i$ -tego obszaru różnicowego,  $k_d$  - współczynnik strat dodatkowych,  $j$  - średnia gęstość prądu w uzwojeniu,  $V$  - objętość obszarów różnicowych.

We fragmentach schematów cieplnych odwzorowujących wymianę ciepła w strugach mediów chłodzących (powietrze, wodór lub woda) przepływających w kanałach występują dodatkowo (patrz rys.2) źródła mocy cieplnych o wydatkach równych mocom cieplnym unoszonym przez te strugi:

$$P_{m(i)} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \mathcal{G}_{m(i)} \quad (4)$$

gdzie:  $\dot{m}$  - strumień masy medium chłodzącego w kanale,  $c_p$  - ciepło właściwe medium chłodzącego przy stałym ciśnieniu,  $\mathcal{G}_{m(i)}$  - średnia temperatura medium chłodzącego w  $i$ -tym obszarze różnicowym kanału.



Rys.2. Zastępczy schemat cieplny dla strugi medium chłodzącego w kanale wentylacyjnym

Modele cieplne generatorów synchronicznych o różnej budowie i różnych systemach chłodzenia otrzymano w wyniku połączenia węzłów cieplnych, reprezentujących średnie temperatury obszarów różnicowych, przewodnościami cieplnymi związanymi z wymianą ciepła pomiędzy sąsiadującymi obszarami różnicowymi.

Pole temperatury w generatorze opisuje układ równań algebraicznych powstały w wyniku zastosowania metody potencjałów węzłowych (tutaj temperatur węzłowych) do rozwiązania opracowanych schematów cieplnych, postaci:

$$G \cdot \vec{\mathcal{G}} = \vec{P} \quad (5)$$

gdzie:  $G$  - macierz przewodności cieplnych,  $\vec{\mathcal{G}}$  - wektor temperatur węzłowych,  $\vec{P}$  - wektor wymuszeń cieplnych.

#### 4. Zastosowanie programów komputerowych do obliczeń cieplnych generatorów synchronicznych przy sporządzaniu projektów modernizacji

Pakiet programów komputerowych do obliczeń cieplnych generatorów synchronicznych wspomaga w „ENERGOSERWIS” S.A. prace związane z opracowywaniem projektów modernizacji generatorów synchronicznych. W artykule zaprezentowano przykład jego zastosowania przy opracowywaniu projektu modernizacji generatora TGH-120 celem zwiększenia mocy znamionowej do 130 MW.

##### 4.1 Cele i zakres modernizacji generatora TGH-120

Zasadniczymi celami modernizacji generatora TGH-120 było:

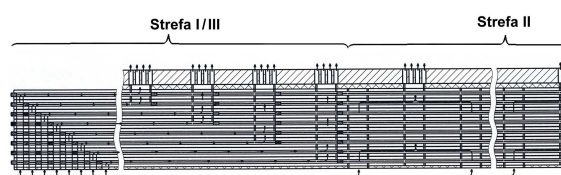
- dostosowanie wirnika do pracy przy podwyższonej mocy znamionowej generatora do  $P = 130$  MW przy  $\cos\varphi = 0,80$ ;
- przystosowanie do częstych uruchomień oraz do pracy ze zmiennym w szerokim zakresie obciążeniem mocą czynną i bierną,
- unowocześnienie konstrukcji,
- wyeliminowanie niedoskonałości dotychczasowych rozwiązań niektórych węzłów konstrukcyjnych,
- zastosowanie najnowszych materiałów do budowy elementów wirnika,
- podniesienie niezawodności pracy generatora i zwiększenie bezpieczeństwa dla obsługi.

Szczegółowy zakres modernizacji wirnika generatora TGH-120 obejmował:

- wprowadzenie nowej konstrukcji uzwojenia z aksjalno – radialnym systemem chłodzenia,
- wykonanie pełnego uzwojenia tłumiącego,
- zastosowanie izolacji klasy F,
- wprowadzenie nowej konstrukcji usztywnień połączeń czołowych uzwojenia wzbudzenia, wyprowadzeń prądowych oraz głowicy pierścieni ślizgowych,
- zmianę sposobu osadzenia i zabezpieczenia kołpaków,
- zastosowanie bimetalowych wyważników w beczce wirnika.

##### 4.2 Założenia projektu modernizacji wirnika generatora TGH-120 w celu podwyższenia mocy znamionowej do 130 MW

W generatorze TGH-120 zarówno w wersji fabrycznej, jak i po modernizacji zastosowano aksjalno – radialny (patrz rys.3) system chłodzenia uzwojenia wzbudzenia.

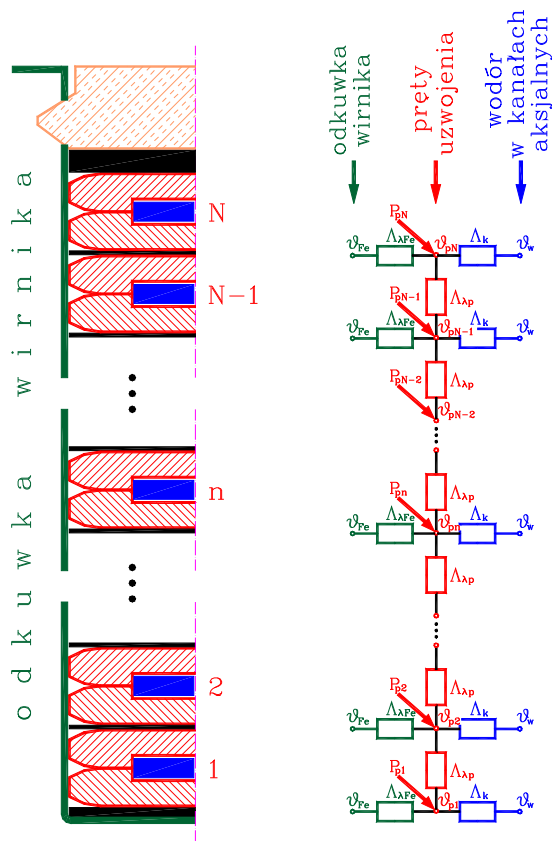


Rys.3. Schemat aksjalno – radialnego systemu chłodzenia uzwojenia wzbudzenia

W rozwiązaniu tym część zimnego wodoru opuszczającego chłodnicę generatora kierowana jest do wirnika. Zimny wodór za pomocą wentylatorów wtłaczany jest na każdym z końców wirnika częściowo do szczeliny przywirnikowej, a częściowo pod kołpaki. W wirniku można wyróżnić trzy strefy chłodzenia. Strefa pierwsza i trzecia dotyczy połączeń czołowych, a strefa druga dotyczy żłobkowej części wirnika. Otwory wlotowe dla strefy pierwszej i trzeciej znajdują się w części czołowej uzwojenia, zaś otwory wylotowe dla tych stref usytuowane są w klinach żłobkowych w części krańcowej beczki wirnika. Otwory wlotowe dla strefy drugiej znajdują się w podżłobkach wirnika, a otwory wylotowe tej strefy w klinach żłobkowych.

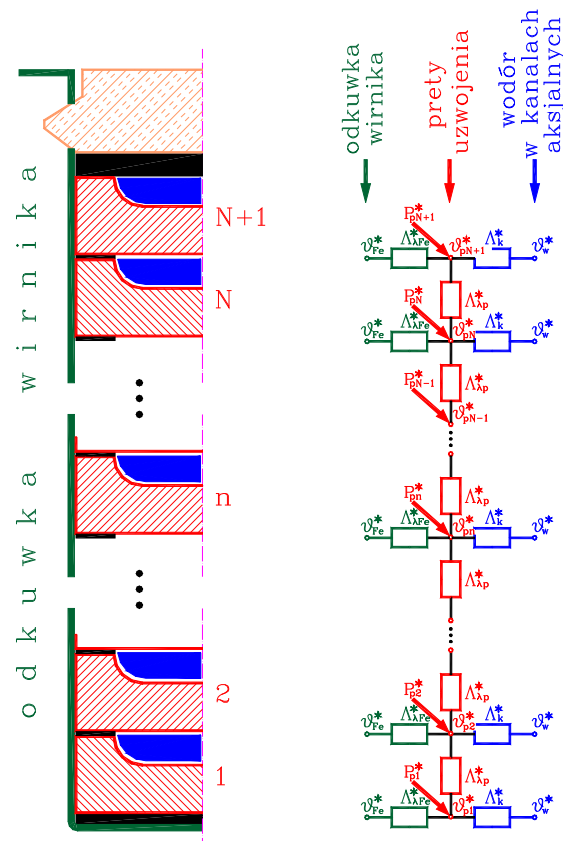
W wirniku generatora TGH-120 zastosowany jest bezpośredni system chłodzenia uzwojenia wzbudzenia. Wodór przepływa w kanałach aksjalnych znajdujących się w prętach uzwojenia. Kanały te podzielone zostały na bardzo krótkie odcinki zasilane w sposób równoległy wodorem. Takie rozwiązanie systemu chłodzenia uzwojenia wzbudzenia zapewnia bardzo małą nierównomierność rozkładu temperatury wzdłuż prętów uzwojenia, co umożliwia pominięcie w modelu matematycznym strumieni ciepła przepływających wzdłuż prętów.

Rozwiązania konstrukcyjne uzwojenia wzbudzenia generatora w wersji fabrycznej i po modernizacji różnią się liczbą oraz kształtem przewodów umieszczonych w żłobkach oraz rozmieszczeniem kanałów aksjalnych w tych przewodach. Na rys. 4 i 5 przedstawiono przekroje poprzeczne żłobków wirnika generatora TGH-120 w wersjach fabrycznej i po modernizacji, zaś obok nich zamieszczono schematy cieplno - elektryczne odwzorowujące wymianę ciepła w żłobkach wirnika.



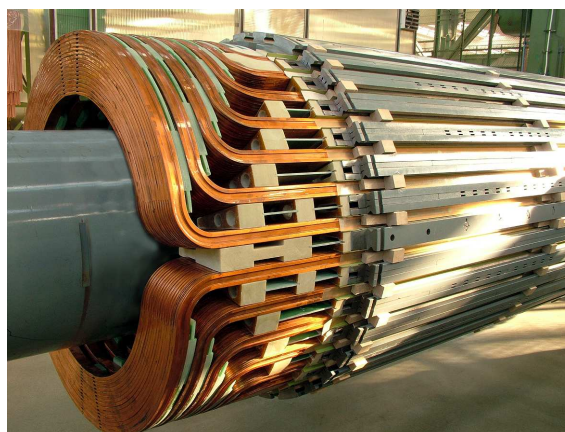
Rys.4. Sieć ciepło – elektryczna odwzorowująca wymianę ciepła w żłobkach wirnika generatora TGH-120 w wersji fabrycznej

Z przeprowadzonych cieplnych badań symulacyjnych uzwojenia wzbudzenia generatora TGH-120 po modernizacji wynika, iż po wprowadzeniu zmian konstrukcyjnych w wirniku dla zwiększenia mocy znamionowej generatora do 130 MW (przy znamionowym współczynniku mocy  $\cos\phi_n=0,80$ ; znamionowym nadciśnieniu wodoru w generatorze  $\Delta p_n=0,21$  MPa i temperaturze zimnego wodoru  $40^\circ\text{C}$ ) średnia temperatura uzwojenia wzbudzenia będzie wynosiła  $72,5^\circ\text{C}$  i wzrośnie zaledwie o  $3,5^\circ\text{C}$  w odniesieniu do wersji fabrycznej przy obciążeniu generatora mocą 120 MW.



Rys.5. Sieć ciepło – elektryczna odwzorowująca wymianę ciepła w żłobkach wirnika generatora TGH-120 po modernizacji

Opracowany w „ENERGOSERWIS” S.A. projekt modernizacji wirnika generatora TGH-120 wdrożono (rys.6 i 7) do produkcji.



Rys.6. Uzwojenie wzbudzenia generatora TGH-120 po modernizacji



Rys.7. Widok wirnika generatora TGH-120 po modernizacji

#### 4.3 Weryfikacja pomiarowa wyników obliczeń cieplnych zmodernizowanego wirnika generatora TGH-120

Po modernizacji generatora wykonano w elektrowni pomiary cieplne w trzech stanach pracy przy znamionowym współczynniku mocy  $\cos\varphi_N=0,80$ ; nadciśnieniu wodoru 0,15 MPa i obciążeniu generatora mocami czynnymi wynoszącymi odpowiednio: 90 MW, 110 MW i 118 MW. Średnie przyrosty temperatury uzwojenia wzbudzenia wyznaczono w oparciu o zmierzone w stanach cieplnie ustalonych przyrosty rezystancji uzwojenia wzbudzenia.

W celu określenia niedokładności odwzorowania temperatury przez sporządzony model cieplny wirnika zmodernizowanego generatora porównano wyniki obliczeń i pomiarów. Maksymalna niedokładność odwzorowania średniej temperatury uzwojenia wzbudzenia przez opracowany model cieplny wynosi zaledwie **4,6 K**, co biorąc pod uwagę skomplikowaną strukturę obiektu można uznać za bardzo dobry wynik.

#### 5. Wnioski końcowe

Przedstawiony w artykule przykład zastosowania programów komputerowych do obliczeń cieplnych generatorów synchronicznych w procesie ich projektowania potwierdza zadowalającą w zastosowaniach praktycznych dokładność odwzorowania temperatury. Opracowany w „ENERGOSERWIS” S.A. projekt modernizacji wirnika generatora TGH-120 został wdrożony do produkcji, zaś wykazany najpierw obliczeniowo w fazie wykonywania projektu, a następnie potwierdzony pomiarowo niski przyrost temperatury uzwojenia wzbudzenia potwierdza możliwość uzyskania założonego w projekcie modernizacji podwyższenia mocy znamionowej generatora do 130 MW przy za-

chowaniu znamionowego współczynnika mocy oraz przy znamionowym nadciśnieniu wodoru w generatorze.

#### Literatura

- [1]. Adamek J., Krok R.: *Modernizacja wirnika w celu zwiększenia mocy znamionowej generatora TGH-120 do 130 MW*. "Energetyka" No.9, 2005
- [2]. Paszek W., Krok R.: *Ocena koncepcji i założeń technicznych modernizacji generatora TGH-120 umożliwiająca podniesienie mocy do 130 MW z przystosowaniem do częstych uruchomień i pracy ze zmiennym obciążeniem mocą czynną i bierną w szerokim zakresie*. Opracowanie wykonane na zlecenie „ENERGOSERWIS” S.A., Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych Politechniki Śląskiej w Gliwicach, 03.11.2003 r.
- [3]. Paszek W., Drak B., Kapinos J., Pilch Z.: *Modernizacja wirnika turbogeneratora TGH-120*. Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych Politechniki Śląskiej w Gliwicach, Opracowanie Nr 1/NB-128/RE-4/94
- [4]. Latek W.: *Turbogeneratory*. WNT, Warszawa 1973
- [5]. Krok R., Miksiewicz R.: *Thermal Models of Turbogenerator Rotors for Different Cooling Systems used in CAD*. International Conference and Exhibition on Power Electronics and Motion Control EPE-PEMC 2000, Kosice, Slovak Republic
- [6]. Krok R., Miksiewicz R.: *Pakiet programów komputerowych do analizy pól temperatury w wirnikach turbogeneratorów chłodzonych powietrzem oraz wodorem*. „Energetyka”, No.2, 1997
- [7]. Krok R., Miksiewicz R.: *Application of thermal resistance network for the analysis of thermal fields in turbogenerator rotors with director and intermediate cooling of windings*. ICEM'96, Vigo, Spain

#### Autorzy

dr inż. Roman Krok

Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych Politechniki Śląskiej,

ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice,  
tel. (032) 237-29-29, fax (032) 237-14-47,  
e-mail: Roman.Krok@polsl.pl

dr inż. Stefan Sieradzki, inż. Jan Adamek

„ENERGOSERWIS” S.A.,

ul. Powstańców Śląskich 85, 42-701 Lubliniec,  
tel. (034) 35-72-141, fax (034) 35-63-517,  
e-mail: Stefan.Sieradzki@energoserwis.pl,  
e-mail: Jan.Adamek@energoserwis.pl