

doi:10.15199/48.2017.02.11

Metoda wyznaczania rozkładu temperatur w uzwojeniu wirnika chłodzonego bezpośrednio wodorem

Streszczenie: Do analizy stanu cieplnego uzwojenia wirnika chłodzonego bezpośrednio wodorem zastosowano metodę elementów skończonych, która jest stosowana w programie Solid Works. Metoda pozwala trójwymiarowo zbadać stan cieplny z uwzględnieniem różnych rodzajów odprowadzenia ciepła z elementów wirnika oraz nierównomierności warunków wymiany ciepła. W artykule przedstawiono wyniki badań cieplnych turbogeneratora o mocy 550 MW podczas biegu jałowego i trójfazowego zwarcia ustalonego. Badania wykonano w firmie Elektrotiażmasz. Temperatura uzwojenia wirnika wynosiła podczas pracy znamionowej 74,7°C. Z porównania wyników obliczeń i badań wynika, że różnica między nimi jest mniejsza od 5%.

Abstract: It is proposed to use the finite element method realized in the computer SolidWorks environment for the analysis of the temperature field of the rotor of 550-MW turbogenerator with direct hydrogen cooling. This technique allows to investigate the thermal state of the rotor in a three-dimensional statement, taking into account different types of heat in the elements of the rotor and irregular conditions of heat exchange between cooling medium. The relation for heat transfer coefficient between hydrogen and inner walls of the cooling channels of the rotor winding is proposed to use as a boundary conditions intended for the closure of the mathematical model for the thermal state of the rotor of the turbogenerator. The results of the thermal tests of 550-MW generator in the idling and short circuit are presented in the article. Thermal tests were carried out at the State Enterprise «Plant «Elektrotiażmasz». The maximum temperature of the rotor winding at rated load was 74,7 °C. The comparison of the calculated data and test results shows that the difference is less than 5%. **Analysis of the temperature field of the rotor of 550-MW turbogenerator with direct hydrogen cooling**

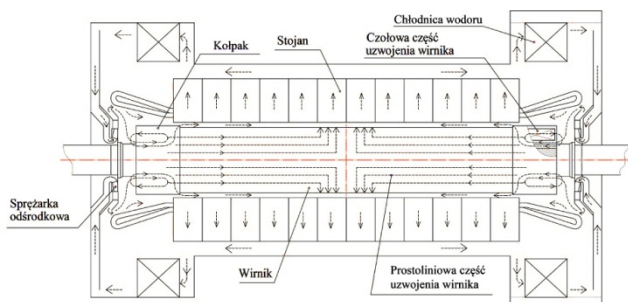
Słowa kluczowe: turbogenerator, uzwojenie wirnika, metoda elementów skończonych, stan cieplny.

Keywords: turbogenerator, rotor winding, finite element method, thermal state.

Przedstawienie problemu

Podstawowymi elementami turbogeneratorsa są: korpus, uzwojone stojana i wirnika, sprężarki odśrodkowe, chłodnice wodoru. Na wirniku umieszczone jest uzwojenie wzbudzenia w wyfrezowanych w beczce żłobkach o przekroju klinowym. Połączenia czołowe uzwojenia zabezpieczane są od sił odśrodkowych kołpakami.

Uzwojenie wzbudzenia jest bezpośrednio chłodzone wodorem. Schemat układu chłodzenia turbogeneratorsa przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat układu chłodzenia turbogeneratorsa o mocy 550 MW

Podczas projektowania turbogeneratorsów szczególną uwagę zwraca się na ocenę stanu cieplnego wirnika [1,2]. Temperaturę uzwojenia wirnika należy kontrolować, aby nie przekroczyć jej dopuszczalnej wartości dla danej klasy izolacji. Przekroczenie dopuszczalnego poziomu temperatury uzwojenia wirnika może doprowadzić do przedwczesnej degradacji izolacji.

Wirnik rozpatrywanego dwubiegunowego turbogeneratorsa o mocy 550 MW ma 36 żłobków, w których ułożone jest po 9 cewek na każdy biegun z tym, że jedna cewka ma 5 zwojów, a 8 cewek po 7 zwojów. Zwój wykonany jest z dwóch przewodników, które tworzą kanał do przepływu wodoru.

Ciśnienie i wydatek wodoru zapewniają sprężarki odśrodkowe z obu stron beczki wirnika. Zastosowano rozdzielne chłodzenie uzwojenia wirnika w części czołowej i

żłobkowej. Jeden strumień wodoru chłodzi uzwojenie w części żłobkowej przepływając wzdłuż wewnętrznych kanałów w zwojach i wypływa w środkowej części wirnika w odległości około 3 m przez promieniowe otwory w przewodnikach i klinach do szczeliny powietrznej. Drugi strumień wodoru chłodzi bezpośrednio połączenia czołowe uzwojenia wirnika i wypływa do szczeliny powietrznej.

Odśrodkowy wentylator zapewnia wyjściową prędkość wodoru z wentylatora o wartości ok. 180 m/s. Przepływowi wodoru w kanałach towarzyszą straty ciśnienia i prędkości. Poza tym miejscowe straty wentylacyjne są na wejściu pod kołpakami do uzwojenia ze względu na zmianę kierunku o ~90°. Podczas przepływu wzdłuż kanału wentylacyjnego prędkość wodoru maleje.

Średnia obliczeniowa prędkość wodoru według wyników obliczeń wentylacyjnych w kanale małej cewki wynosi ~100 m/s, dużej ~110 m/s. Zmiana prędkości oraz temperatury wodoru wzdłuż kanału przewodnika prowadzi do zmiany współczynnika wnikania ciepła (α). W projektowanym turbogeneratorsie zastosowano nadciśnienie wodoru 0,5 MPa. Dotychczas stosowane np. w turbogeneratorsach 300 MW nadciśnienie wodoru wynosiło 0,3 MPa.

Cel badań

Głównym zadaniem podczas projektowania turbogeneratorsa dużej mocy jest modernizacja istniejących i opracowanie nowych systemów chłodzenia, a także udoskonalenie metodyki obliczeń cieplnych. Jednym ze sposobów podwyższenia efektywności chłodzenia uzwojenia wirnika turbogeneratorsa 550 MW jest zastosowanie jego bezpośredniego chłodzenia wodorem. Dotychczas uzwojenia wirników turbogeneratorsów dużej mocy firmy Elektrotiażmasz były chłodzone bezpośrednio wodą. Zastosowanie wodoru umożliwi wyeliminowanie problemów związanych z zasilaniem uzwojenia wodą.

Podstawowym źródłem ciepła w wirniku jest jego uzwojenie. Poza tym, w awaryjnych stanach pracy takich jak zwarcia, niesymetryczne obciążenie występują dodatkowe źródła ciepła w innych elementach wirnika. Znaczne wydzielanie ciepła występuje wówczas w klinach i zębach wirnika. Ich wpływ na stan cieplny uzwojenia wirnika

jest najmniej zbadany, chociaż te źródła ciepła są dość istotne. Stan cieplny wirnika określony jest intensywnością procesów przepływu ciepła między uzwojeniem wirnika i chłodzącym wodorem.

Stosowane metody obliczeń

Przestrzenny ustalony rozkład przyrostu temperatury w becce wirnika i jego węzłach opisuje się nieliniowym równaniem różniczkowym cząstkowym Poissona [3]:

$$(1) \quad \lambda_x \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + w = 0$$

gdzie: θ - przyrost temperatury, K; w - objętościowa pojemność cieplna, W/m³; λ - współczynnik przewodności cieplnej, W/(m·K).

Rozwiązaniem równania jest przyrost temperatury w funkcji współrzędnych. Do rozwiązania równania stosuje się warunki brzegowe, z reguły III rodzaju, charakteryzujące warunki przekazywania ciepła na granicy systemu z środowiskiem chłodzącym. Analityczne rozwiązanie równania Poissona istnieje tylko dla obiektów o prostym kształcie, co jest głównym problemem podczas analizy stanu cieplnego złożonych kształtów, w tym uzwojenia wirnika turbogeneratora.

Do chwili obecnej najbardziej rozpowszechnioną metodą wyznaczenia stanu cieplnego elementów turbogeneratora była metoda ekwiwalentnych schematów zastępczych opracowana w latach trzydziestych ubiegłego wieku. Według tej metody źródła ciepła, rozłożone na wirniku zastępuje się źródłami skupionymi umieszczonymi w węzłach, które imitują odpowiednie elementy wirnika. Przyrost temperatury równa się iloczynowi cieplnego strumienia ze źródła na oporze przepływu tego strumienia na granicy między elementami i chłodzącym środowiskiem lub na granicy między elementami.

Zaletą tej metody jest jej prostota. Jednak metoda nie umożliwia uwzględnienia złożonej przestrzennej geometrii elementów turbogeneratora i różnic w warunkach odprowadzania ciepła z różnych punktów powierzchni. Pozwala ocenić tylko średnie przyrosty temperatury.

Przedstawienie zadania

Rozwiązanie trójwymiarowego równania Poissona jest możliwe przy zastosowaniu odpowiednich metod numerycznych.

Najbardziej rozpowszechniona jest metoda elementów skończonych, która jest używana również w komputerowym środowisku SolidWorks [4]. Do określenia warunków brzegowych III-go rodzaju przyjmuje się rozkład współczynników wnikania ciepła na powierzchni wirnika i jego elementach oraz temperatury czynnika chłodzącego. Do określenia wydzielenia ciepła w zębie wirnika w stanach awaryjnych w [5] przedstawiona jest obliczeniowa metodyka, według której obliczenie wydzielenia ciepła w zębie wirnika na jednostkę długości $p_{3\delta v}$, wskutek działania v -tej harmonicznej siły magnetomotorycznej oblicza się według następującego wyrażenia:

Analogiczny wzór jest stosowany do obliczeń wydzielenia ciepła w klinie.

$$(2) \quad p_{3\delta v} = Re \left[\int_0^{\frac{t_2}{2}} E_{z3\delta}(x,0) \cdot H_{x3\delta}^*(x,0) dx \right] =$$

$$= \frac{AS_v^2 \cdot \omega_v \cdot \frac{\mu_0^2}{\mu}}{\left[\frac{\pi \cdot sh \cdot \frac{\pi \cdot \delta}{\tau_v} + \frac{\mu_0}{\mu} (1+j) \sqrt{\frac{\omega_v \cdot \mu \cdot \gamma_{3\delta}}{2}} ch \frac{\pi \cdot \delta}{\tau_v} \right]^2} \cdot \left[\sqrt{\frac{\omega_v \cdot \mu \cdot \gamma_{3\delta}}{2}} \cdot \frac{b_{3\delta}}{2} + \frac{b_{3\delta}}{4} \cdot \left| \frac{\beta'_{4v}}{\beta_{4v}} \right|^2 \cdot \sqrt{\frac{\omega_v \cdot \mu \cdot \gamma_{3\delta}}{2}} - \right. \\ \left. - Re j \varepsilon \frac{\pi \cdot b_{3\delta}}{2 \tau_v} \cdot \left(\frac{\beta'_{4v}}{\beta_{4v}} \right)^2 \cdot (-1) \frac{v-l}{2} \right. \\ \left. - Re j \varepsilon \frac{j \pi \cdot b_{3\delta}}{2 \tau_v} \cdot \left(\frac{\beta'_{4v}}{\beta_{4v}} \right)^2 \cdot (-1) \frac{v-l}{2} \right] \cdot W / cm.$$

$$(3) \quad p_{k_{lv}} = Re \left[\int_0^{\frac{b}{2}} E_{z_{k_{lv}}}(x,0) \cdot H_{x_{k_{lv}}}^*(x,0) dx \right] =$$

$$\frac{AS_v^2 \cdot \omega_v \cdot \mu_0}{\left[\frac{\pi \cdot sh \cdot \frac{\pi \cdot \delta}{\tau_v} + \beta'_{3v} \cdot ch \frac{\pi \cdot \delta}{\tau_v} \right]^2} Re j \cdot \left[\beta'_{3v} \cdot \frac{b}{2} + \beta'_{3v} \cdot \frac{j \pi}{\tau_v} \cdot \frac{\pi \cdot sh \cdot \frac{\pi \cdot \delta}{\tau_v} + \beta'_{3v} \cdot ch \frac{\pi \cdot \delta}{\tau_v}}{\lambda_1^2 - \left(\frac{\pi}{\tau_v} \right)^2} \cdot \frac{\pi \cdot \delta \cdot \mu}{\tau_v \cdot \mu_0} \cdot sh \frac{\pi \cdot \delta}{\tau_v} + \beta'_{4v} \cdot ch \frac{\pi \cdot \delta}{\tau_v} - \right. \\ \left. - \beta'_{4v} \cdot \frac{j \pi}{\tau_v} \cdot \frac{\pi \cdot \sigma \cdot \eta \cdot \frac{\pi \cdot \delta}{\tau_v} + \beta'_{3v} \cdot \chi \cdot \eta \cdot \frac{\pi \cdot \delta}{\tau_v}}{\lambda_1^2 - \left(\frac{\pi}{\tau_v} \right)^2} \cdot \frac{\pi \cdot \delta \cdot \mu}{\tau_v \cdot \mu_0} \cdot \sigma \cdot \eta \cdot \frac{\pi \cdot \delta}{\tau_v} + \beta'_{4v} \cdot \chi \cdot \eta \cdot \frac{\pi \cdot \delta}{\tau_v} \right] \cdot W/cm$$

W przedstawionym wzorze: $E_{z3\delta}$ - osiowa składowa natężenia pola elektrycznego, A/cm; $H_{x3\delta}$ - styczna składowa natężenia pola w zębie, A/cm; $b_{k_{lv}}, b_{3\delta}$ - szerokość klina, zęba, cm; t_2 - zębowa podziałka wirnika; AS_v^2 - liniowe obciążenie v -tej harmonicznej siły magnetomotorycznej stojana, A/cm; ω_v - częstotliwość kątowna prądów wirowych, Hz; μ_0 - przenikalność magnetyczna próżni, H/cm; μ - przenikalność magnetyczna, H/cm; τ_v - podziałka bieguno-wa v -tej harmonicznej siły magnetomotorycznej stojana, A/cm; δ - szczelina powietrzna, cm; j - gęstość prądu, A/cm²; $\gamma_{3\delta}$ - przewodność materiału klinów i zębów, 1/Ω · cm;

$\beta'_{4v}, \beta_{4v}, \lambda_2$ - dodatkowe współczynniki według [5].

Gwiazdką (*) oznaczono wartości zespolone sprzężone. Sumaryczne wydzielenie ciepła w zębach i klinach wyznacza się według wzoru:

$$(4) \quad p_v = Z_2 \cdot \sum_v \left(p_{3\delta v} + p_{k_{lv}} \right) \cdot l_p \cdot k_m, \text{ kW}$$

gdzie: Z_2 - liczba zębów wirnika; l_p - długość wirnika, cm; k_m - współczynnik uwzględniający wpływ końcówek wirnika oraz klinowania żłobków dzielonymi klinami na długości wirnika.

Według wzoru (4) ilość wydzielonego ciepła w zębach i klinach podczas zwarcia ustalonego odpowiada źródłu o mocy 2 kW na długości wirnika 3 m.

Obliczenia stanu cieplnego powinny być wykonywane z uwzględnieniem złożonego trójwymiarowego rozkładu parametrów podstawowego i dodatkowego wydzielania ciepła oraz warunków brzegowych III-go rodzaju.

Badanie pola temperaturowego wirnika wykonano wykorzystując program SolidWorks. Zadanie zostało rozwiązane w dwóch etapach: w pierwszym etapie do wyznaczenia współczynników wnikania ciepła obliczono przepływ czynnika chłodzącego metodą elementów skończonych. Czynnikiem chłodzącym jest wodór o temperaturze 40°C i nadciśnieniu 0,5 MPa. W przypadku warunków brzegowych III – go rodzaju tworzy się podział współczynników wnikania ciepła na powierzchni wirnika i wewnętrznych ściankach kanałów przewodników z prądem.

Intensywność wymiany ciepła określona jest współczynnikiem wnikania ciepła.

Do wyznaczenia współczynnika wnikania ciepła z wewnętrznej ścianki kanału wentylacyjnego w zwoju o przekroju prostokątnym przyjęto wzór podany w pracy [6]:

$$(5) \alpha = \frac{\lambda}{d_{\text{skB}}} \cdot \alpha_{\text{TP}} \cdot \left(1 - \frac{0,45}{2,4 + \text{Pr}}\right) \cdot \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{-n} \cdot \zeta, \quad \text{W/m}^2 \cdot \text{K}$$

gdzie: λ - współczynnik przewodności cieplnej wodoru, W/(m·K); d - hydrauliczna średnica, m; d_1 - ekwiwalentna średnica kanału wentylacyjnego przewodnika, m; d_2 - ekwiwalentna średnica zewnętrzna zwoju, m; $d_{\text{skB}} = d_2 - d_1$ - ekwiwalentna średnica zwoju, m; Pr - liczba Prandtla, określona według temperatury wodoru; ζ - współczynnik poprawkowy, definiowany stosunkiem d_1/d_2 ;

α_{TP} - współczynnik wnikania ciepła dla okrągłej rury, który oblicza się według wzoru:

$$(6) \alpha_{\text{TP}} = \frac{\frac{\xi}{8} \cdot \text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \psi}{1 + \frac{900}{\text{Re}} + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8}} \cdot (\text{Pr}^{2/3} - 1)}$$

ψ - współczynnik uwzględniający właściwości gazu; n - współczynnik poprawkowy w zakresie $\text{Re } 10^4 - 10^5$ $n=7$;
 ξ - współczynnik oporu tarcia przy izotermicznym przepływie w gładkich rurach

$$(7) \xi = (1,82 \cdot \text{lgRe} - 1,64)^{-2}$$

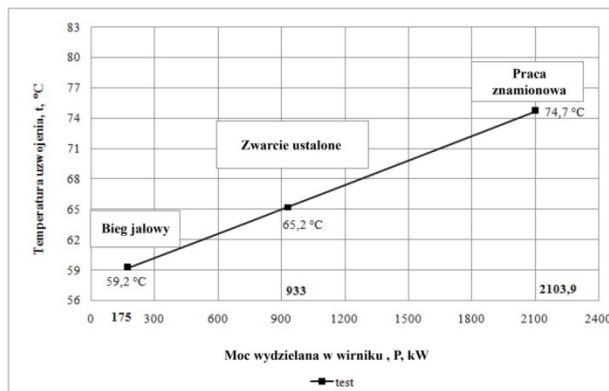
Wyrażenie (5) obowiązuje dla przepływu burzliwego w zakresie wartości d_1/d_2 od 0,03 do 1, liczby Prandtla Pr od 0,7 do 100 i liczby Reynoldsa Re od 10^4 do 10^6 .

Możliwość stosowania tych wzorów do rozwiązania problemu bezpośredniego chłodzenia wirnika wodorem nie jest jeszcze wystarczająco sprawdzona w przypadku turbogeneratorów, w pierwszym przybliżeniu wykorzystujemy wyrażenie (5). Przy określaniu α uwzględniono wpływ prędkości i zmianę warunków temperaturowych. Współczynnik wnikania ciepła istotnie zmieniał się przy przepływie w żłobkowej części uzwojenia wirnika. Przyjęto trzy odcinki wzdłuż długości przewodnika o mniej więcej stałej wartości α wzdłuż każdego z odcinków. Przyjęte do obliczeń wartości α zgodnie z wyrażeniem (5) wynoszą odpowiednio: 1200 W/(m²·K), 1000 W/(m²·K) i 800 W/(m²·K).

Metodyka wykonania badań

Do oceny obliczeń modelowych opisujących stan cieplny wirnika w firmie "Elektrotiazmasz" były wykonane badania cieplne turbogeneratorsa 550 MW podczas biegu jałowego oraz trójfazowego zwarcia ustalonego. Temperaturę uzwojenia wirnika wyznaczono metodą techniczną [7]. Temperatura zimnego wodoru na wyjściu z chłodnic wynosiła 40 °C.

Wyniki badań



Rys. 2. Zależność średniej temperatury uzwojenia wirnika od strat mocy wydzielonych w wirniku

Temperatura uzwojenia wirnika przy pracy znamionowej jest określona poprzez ekstrapolację zmierzonych wartości temperatur przy biegu jałowym i zwarcie ustalonym. Wartość prądu znamionowego uzwojenia wirnika podczas pracy znamionowej wynosiła 4650 A. Temperatura uzwojenia wirnika podczas pracy znamionowej wynosiła 74,7 °C, a podczas zwarcia ustalonego 65,2 °C. Dopuszczalna temperatura uzwojenia wirnika o klasie izolacji F wynosi 155 °C.

Wyniki obliczeń

Wykonano obliczenia, w których został określony stan cieplny wirnika przy pracy znamionowej oraz przy awaryjnych stanach pracy z uwzględnieniem dodatkowych źródeł ciepła.

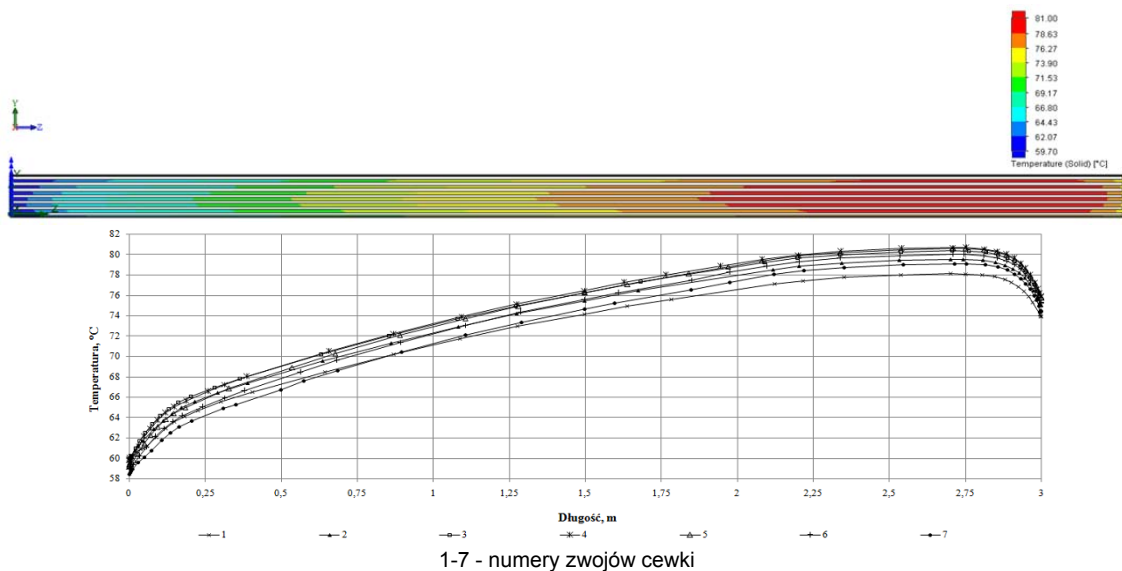
Warunki brzegowe III rodzaju zostały określone według wzoru (5), przyjęcie których było potwierdzone badaniami eksperymentalnymi.

Wyniki obliczenia rozkładu temperatur prętów wzdłuż długości dużej cewki podczas pracy znamionowej otrzymane metodą elementów skończonych przedstawiono na rys. 3.

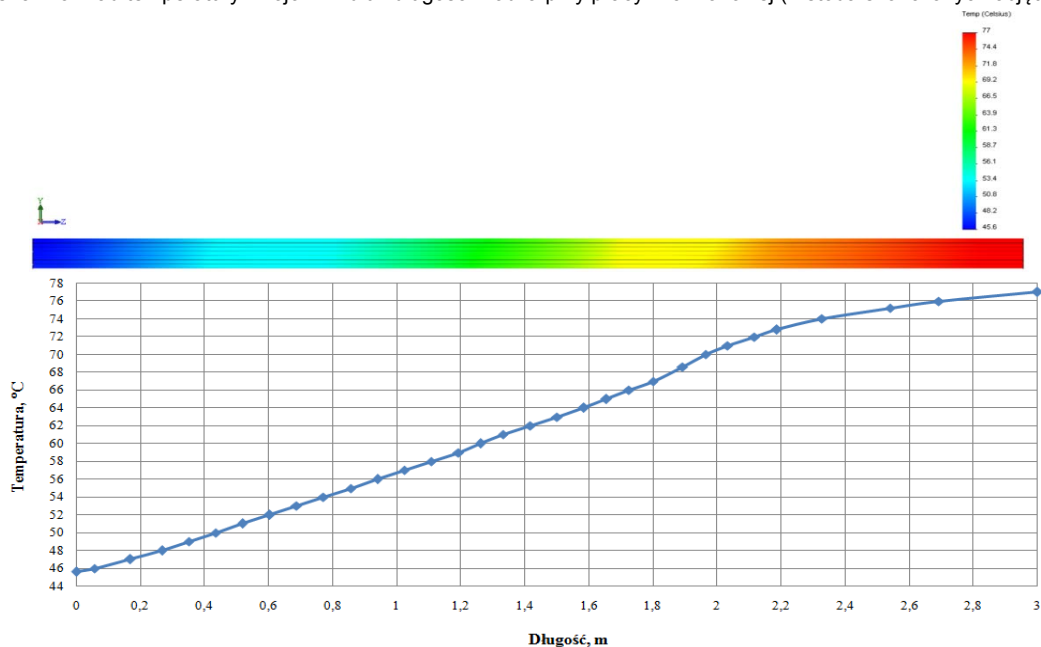
Według wyników obliczeń metodą elementów skończonych maksymalna temperatura w punkcie najgorętszym w środkowej części wirnika – przy pracy znamionowej wynosi 77°C, nie jest przekroczona dopuszczalna temperatura dla izolacji klasy F. Wzrost temperatury uzwojenia w środkowej części wirnika przy równomiernym odprowadzeniu ciepła (na długości 3 m, rysunek 4) wynika z przyrostu temperatury wodoru podczas przepływu wzdłuż długości kanału w przewodniku.

Na rysunku 5 przedstawiono rozkład temperatury w przekroju poprzecznym wirnika przy zwarcie ustalonym.

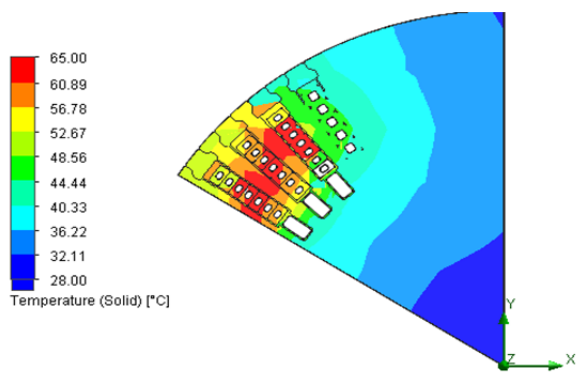
Obliczenia wykonano dla 1/6 całego uzwojenia wirnika. Wyjście chłodzącego wodoru z uzwojenia następuje w odległości 2,85 m poprzez kanały promieniowe. Dlatego należy rozpatrywać zmianę temperatury w przekroju poprzecznym położonym 2,85 m od wejścia wodoru do przewodnika (wzdłuż osi z), dla uniknięcia wpływu końcówek obliczeniowej przestrzeni na wartość wyniku.



Rys. 3. Rozkład temperatury zwojów wzdłuż długości żłobka przy pracy znamionowej (metoda skończonych objętości)



Rys. 4. Rozkład temperatury zwojów wzdłuż długości żłobka przy pracy znamionowej (metoda skończonych elementów)



Rys. 5. Rozkład temperatury w przekroju poprzecznym wirnika podczas zwarcia ustalonego w odległości 2,85 m (środek beczki wirnika)

Na granicy obliczeniowej przestrzeni występuje zaniżenie wyników w porównaniu z wartościami rzeczywistymi. Z rysunku 5 wynika, że odprowadzenie ciepła z zębów i klinów podczas zwarcia ustalonego ma mały wpływ na ciepły stan uzwojenia wirnika w porównaniu z odprowadzaniem ciepła w przewodnikach uzwojenia. Podczas znamionowej pracy natężenie prądu elektrycznego w uzwojeniu wirnika ma największą wartość. Przy zwarcu ustalonym prąd wirnika jest około 1,5 razy mniejszy od wartości znamionowej. Odprowadzanie ciepła z przewodników jest proporcjonalne do kwadratu prądu i ma największą wartość podczas pracy znamionowej. Dlatego też ciepłe parametry wirnika mają największe wartości przy pracy znamionowej.

Wnioski

Zbadano stan cieplny wirnika turbogeneratora o mocy 550 MW z bezpośrednim chłodzeniem uzwojenia wodorem. Problem został rozwiązany trójwymiarowo.

Uwzględniono zmianę intensywności wnikania ciepła podczas przepływu wodoru wzdłuż kanałów w przewodnikach uzwojenia. Przy wyznaczaniu stanu cieplnego wirnika podczas zwarcia ustalonego uwzględniono odprowadzenie ciepła z zębów i klinów wirnika. Według wyników obliczeń metodą elementów skończonych temperatura żłobkowej części cewki podczas pracy znamionowej nie przekracza 77°C. Porównanie danych obliczeniowych z wynikami badań bezpośrednich wskazuje, że różnica między obliczonymi temperaturami i wynikami pomiarów wynosi nie więcej niż 5 %. Stan cieplny wirnika nie stanowi ograniczeń dla wartości znamionowej mocy turbogenerатора. Istnienie rezerwy w zakresie nagrzewania daje możliwość zwiększenia mocy turbogenerатора. Krótkotrwała praca asynchroniczna np. podczas zwarcia nie doprowadzi do uszkodzenia uzwojenia.

Autorzy: dr hab. inż., docent Gakał Pawło, Kierownik Katedry Aerokosmicznej Techniki Ciepłej, Narodowy Aerokosmiczny Uniwersytet im. N.E. Żukowskiego «ChAI», Ukraina; tel.: 788-42-05, e-mail: pavlo.gakal@gmail.com; inżynier-konstruktor I kategorii Ovsyannikowa Elena – GP «Przedsiębiorstwo «Eletrotiażmasz», Narodowy Aerokosmiczny Uniwersytet im. N.E. Żukowskiego «ChAI», Ukraina, tel. kom. +38 (093) 308-61-54, e-mail: Ovsyannikova Elena90@mail.ru; dr hab. inż., profesor IEn Jerzy Przybysz – Kierownik Pionu Elektrycznego, Instytut Energetyki Instytut Badawczy, 01-330 Warszawa, ul. Mory 8, tel.kom. 600215127, e-mail: jerzy.przybysz@ien.com.pl; dr inż. Kierownik sektoru obliczeń mechanicznych, Tretjak Aleksej – GP «Przedsiębiorstwo «Eletrotiażmasz», Ukraina, tel. kom. +38 (063) 710-66-71, e-mail: alex3tretjak@mail.ru.

LITERATURA

- [1] Станиславский Л., Езовит Г., Карташевский П., Спивак Б., Черемисов И., Чигиринский А., Эксплуатация и ремонт турбогенератора ТГВ-300. *Издательство «Техника»*, Киев, (1973)
- [2] Przybysz J., Metoda wyznaczania rozkładu temperatur w uzwojeniu wirnika turbogeneratora. *Archiwum Elektrotechniki* z. 4 t. XXII, str. 767-777, (1973)
- [3] Извехов В., Серихин А., Абрамов А., Проектирование турбогенераторов. *Издательство МЭИ*, Москва, (2005)
- [4] Алямовский А., Собачкин А., Одинцов Е., Харитонович А., Пономарев Н., SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике. *Издательство «БХВ-Петербург»*, Санкт-Петербург, (2008)
- [5] Данилевич Я., Брынский Е., Добавочные потери в зубах и клиньях ротора турбогенератора, вызванные высшими гармоническими м.д.с. обмотки статора. Сборник «Высокоиспользованные турбо- и гидрогенераторы с непосредственным охлаждением. Теория, расчет, исследования», *Издательство «Наука»*, Ленинград, (1971)
- [6] Под общей редакцией Юренева В., Лебедева П., Теплотехнический справочник, в 2-х томах, Том 2, *Издательство «Энергия»*, Москва, (1976)
- [7] Гуревич Э., Егорова Т., Сидельников Б., Солдатенкова Н., Сочава М., Чернышев Н., Испытание синхронных машин. *Издательство СПбГПУ*, Санкт-Петербург, (2004).