

*uszkodzenia termiczne turbogeneratorów,
elementy skrajne rdzenia stojana, sieci ciepłne*

Andrzej BYTNAR*, Roman KROK**

BADANIE PRZYCZYŃ NADMIERNEGO NAGRZEWANIA SIĘ ELEMENTÓW SKRAJNYCH RDZENIA STOJANA DUŻEGO TURBOGENERATORA

Pomiary ciepłne turbogeneratorów wykonywane w elektrowniach wykazują często nadmierne nagrzewanie się elementów skrajnych stojana. Istnieje potrzeba diagnozowania przyczyn tego szkodliwego zjawiska w celu jego eliminacji. W artykule przedstawiono wyniki pomiarów ciepłnych kilku turbogeneratorów o mocy 380 MW oraz uszkodzenia termiczne skrajnych elementów stojana. Opracowano model ciepłny dla przegrzewających się elementów stojana turbogeneratora. Umożliwia on obliczenie występującego w nich rozkładu temperatury przy uwzględnieniu dodatkowych źródeł mocy ciepłej pojawiających się w rdzeniu. Różne temperatury mierzone w elementach skrajnych stojana turbogeneratorów tego samego typu, przy tym samym obciążeniu elektromagnetycznym, sugerują powstanie zwarć pomiędzy blachami usytuowanymi pod płytą dociskową lub zmniejszenie drożności kanałów wentylacyjnych w rdzeniu. Wykonane obliczenia ciepłne potwierdzają tę hipotezę. Zweryfikowane pomiarowo modele ciepłne mogą być bardzo przydatne przy opracowaniu projektów modernizacji turbogeneratorów w celu podwyższenia ich mocy znamionowej. W wielu przypadkach parametrem nadrzędnym ograniczającym wzrost mocy turbogeneratora jest temperatura skrajnych elementów stojana, a nie jak dotychczas przypuszczano temperatury uzwojeń stojana i wirnika.

1. WSTĘP

W niektórych turbogeneratorach pracujących w elektrowniach zawodowych powiększono moc czynną znamionową (przy znamionowym współczynniku mocy) po zwiększeniu sprawności części ciepłnej bloku energetycznego. Przy ocenie możliwości zwiększenia mocy turbogeneratorów brano pod uwagę głównie dopuszczalne przyrosty temperatury uzwojeń stojana i wirnika – przy zwiększonych ich obciążeniach prądowych, pominięto zaś przyrosty temperatur występujące w skrajnych częściach stojana – wywo-

* Instytut Energetyki, ul. Mory 8, 01-330 Warszawa.

** Zakład Maszyn Elektrycznych i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie, Politechnika Śląska, ul. Akademicka 10A, 44-100 Gliwice, Roman.Krok@polsl.pl

ływane skojarzonymi indukcjami rozproszenia połączeń czołowych uzwojeń stojana i wirnika. Okazuje się, że temperatury w tych częściach stojana są nadrzędnym ograniczeniem w ocenie możliwości zwiększenia mocy bloku – potwierdziły to wyniki badań doświadczalnych. Nadmierne temperatury w skrajnych elementach stojana doprowadzają do zwarć blach w zębach rdzenia oraz degradacji izolacji uzwojenia.

Stwierdzono, że w turbogeneratorach tego samego typu, mogą występować różne przyrosty temperatury, w tych samych obszarach płyt ściskających rdzeń stojana, przy identycznych wartościach elektrycznych parametrów obciążenia. W niniejszej pracy autorzy podjęli próbę wyjaśnienia tego zjawiska.

2. ANALIZA ZJAWISK FIZYCZNYCH W SKRAJNYCH ELEMENTACH STOJANA TURBOGENERATORA

2.1. ZJAWISKA MAGNETYCZNE

Na rysunku 1 pokazano dodawanie geometryczne przepływów magnetycznych w skrajnej części stojana. Trójkąt OAB_1O jest trójkątem przepływów głównych (albo ich wartości względnych) w stanie pewnego obciążenia turbogeneratorskiego [2].

Sumowanie wektorów przepływu wzbudzenia F_{f1} oraz oddziaływania twornika F_a wyznacza przepływ w szczelinie przywirnikowej F_δ – wywołujący w tej szczelinie strumień Φ_δ i indukcję wypadkową B_δ . Wartość przepływu F_δ , przy niezmięionej wartości napięcia na zaciskach uzwojenia stojana, ma wartość niezmienną i niezależną od wartości prądu twornika I oraz kąta fazowego φ . Ten wykres przepływów przedstawia stan magnetyczny w głównym obwodzie magnetycznym, czyli w rdzeniu stojana. W tym obwodzie przewodności magnetyczne dla strumienia twornika Λ_a i dla strumienia wzbudzenia Λ_f są jednakowe.

Trójkąt $C_1B_1AC_1$ jest sumą przepływów części wzbudzenia, oddziaływania twornika i rozproszenia (albo ich wartości względnych) w obszarze połączeń czołowych uzwojeń. Wypadkowy przepływ rozproszenia F_{lap1} , wywołujący strumień rozproszenia w obszarze połączeń czołowych (wypadkowa indukcja rozproszenia B_{lap1}), wynosi:

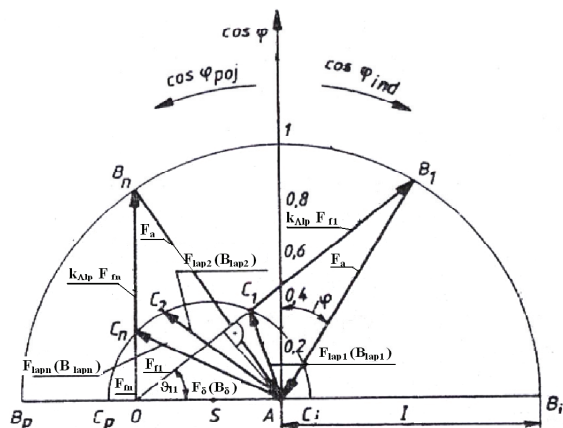
$$F_{lap1} = F_a + k_{\Lambda lp} F_{f1}, \quad (1)$$

gdzie:

$k_{\Lambda lp} F_{f1}$ – efektywny przepływ rozproszenia wzbudzenia,

F_{f1} – całkowity przepływ wzbudzenia.

Wektor \underline{AC}_1 oznacza wartość przepływu rozproszenia F_{lap1} , przy danym obciążeniu turbogeneratorskiego, który wywołuje indukcję rozproszenia B_{lap1} (czyli $F_{lap1} = \underline{AC}_1$ lub w innej skali $B_{lap1} = \underline{AC}_1$).



F_{δ} ; F_a , F_{lap1} , F_{δ} – przepływ magnetyczny: wzbudzenia; oddziaływania twornika wraz z rozproszeniem żłbkowym; wypadkowego rozproszenia połączeń czołowych uzwojeń stojana wirnika, w szczelinie przywornikowej, k_{Alp} – stosunek przewodności magnetycznych dla strumieni rozproszenia połączeń czołowych uzwojenia wirnika i stojana, φ – kąt fazowy, δ_1 – szczelinowy kąt obciążenia

Rys. 1. Dodawanie przepływów magnetycznych w skrajnej części stojana turbogenerators
Fig. 1. Addition of magnetomotive forces in the stator end region of the turbogenerator

Przy stałym prądzie twornika $I = \text{const}$ (który powoduje przepływ rozproszenia twornika F_a) i zmianie charakteru obciążenia turbogenerators, punkt B_1 trójkąta przepływów głównych będzie poruszał się po okręgu koła zatoczonego z punktu A promieniem R_{Blap} . W przypadku obciążenia pojemnościowego, może on przyjąć położenie np. B_n – wówczas wektor \underline{AC}_n będzie miarą wartości przepływu rozproszenia F_{lapn} lub wypadkowej indukcji rozproszenia B_{lan} przy tym obciążeniu.

Jak widać na rysunku 1, koniec wektora indukcji rozproszenia B_{lap} porusza się po okręgu koła (przechodzącego przez punkty C_i , C_1 , C_2 , C_n , C_p) zatoczonego z punktu S.

Promień tego okręgu R_{Blap} oraz odległość środka S koła indukcji rozproszenia od punktu A (końca wektora wypadkowego przepływu głównego \underline{OA}) można wyznaczyć z zależności:

$$R_{Blap} = I_r \left(\frac{k_z}{1 + k_z} \right), \quad (2)$$

gdzie:

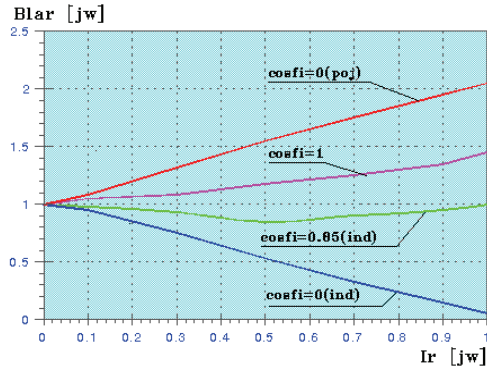
$$I_r = I_a / I_n,$$

I_n – znamionowy prąd twornika,

$$\underline{AS} = k_z k_{Alp}, \quad k_z \text{ – stosunek zwarcia.}$$

Na rysunku 2 przedstawiono, dla ww. turbogenerators, zależności $B_{lar} = f(I_r)$ przy $\cos \varphi = \text{const}$. Przy znamionowym prądzie twornika, wartość wypadkowej indukcji rozproszenia B_{lar} jest największa przy $\cos \varphi = 0_{poj}$ – zaś najmniejsza przy $\cos \varphi = 0_{ind}$.

Indukcja B_{lap} powoduje nagrzewanie skrajnych elementów stojana turbogenerators (płyty dociskowych i blach rdzenia) [1, 2].



Rys. 2. Zależności wartości względnej wypadkowej indukcji rozproszenia B_{lap}/B_{lapn} od wartości względnej prądu twornika I_r przy współczynnikach mocy $\cos \varphi = \text{const}$ dla turbogeneratora typu GTHW-360

Fig. 2. Dependence of the relative value of the total leakage magnetic flux density B_{lap}/B_{lapn} on the relative value of the armature current I_r at power factors $\cos \varphi = \text{const}$ for the turbogenerator of type GTHW-360

2.2. ZJAWISKA CIEPLNE

2.2.1. POMIAR TEMPERATURY PIERŚCIENI DOCISKOWYCH RDZENIA STOJANA

W pięciu turbogeneratorach typu TGHW-360, w których zwiększono moc czynną znamionową wykonano pomiary przyrostu temperatury pierścieni dociskowych rdzenia stojana, przy nowej znamionowej mocy czynnej $P = 380$ MW i współczynniku mocy $\cos \varphi_n = 1$ w stanie cieplnie ustalonym. Zmierzone przyrosty temperatury wynosiły odpowiednio: 111 K (turbogenerator nr 1), 115 K (– nr 2), 125 K (– nr 3), 146 K (– nr 4) i 155 K (– nr 5). Nadmierne nagrzewanie się elementów skrajnych rdzenia stojana występujące w niektórych turbogeneratorach prowadzi do ich uszkodzeń termicznych – rysunek 3.



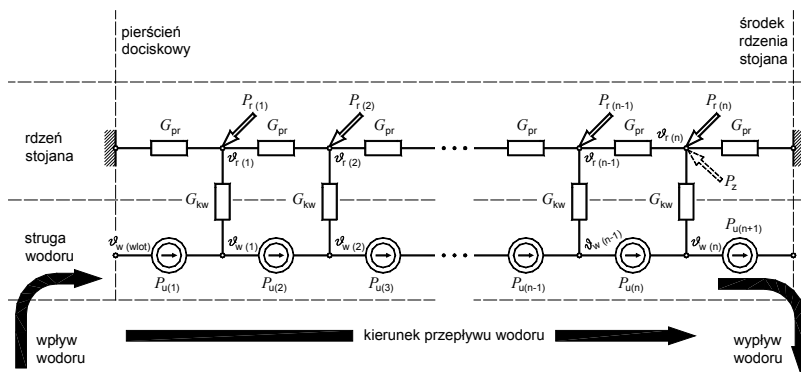
Rys. 3. Uszkodzenia termiczne pierścienia dociskowego oraz położonych pod nim blach rdzenia stojana
Fig. 3. Thermal damage of the clamping ring and the stator core laminations located under it

2.2.2. ZMODYFIKOWANA SIĘĆ CIEPLNA DLA RDZENIA STOJANA TURBOGENERATORA

Dla rdzenia stojana turbogeneratorsa TGHW-360 utworzono zmodyfikowaną sieć cieplną [4, 5, 6], która umożliwi obliczenie pola temperatury zarówno przy zmniejszonej drożności najbliższych kanałów wentylacyjnych, jak i przy zwarciu skrajnych blach rdzenia.

W rozpatrywanym typie turbogeneratorsa zastosowano osiowy system chłodzenia rdzenia stojana. Rdzeń jest podzielony na dwie symetryczne części. Zimny wodór wpływa do kanałów osiowych przez otwory w pierścieniu dociskowym, zaś wypływa do kanałów promieniowych w okolicy środka rdzenia stojana.

W celu sporządzenia zmodyfikowanej sieci cieplnej, rdzeń stojana w obszarze jednej podziałki żłobkowej podzielono, w kierunku osiowym, na elementy o różnicowej szerokości Δx . Każdemu elementowi oraz przepływającej w nim strudze wodoru przyporządkowano po jednym węzle sieci cieplnej – rysunek 4. W modelu cieplnym pominięto niewielki strumień ciepła przepływający z rdzenia do uzwojenia stojana chłodzonego destylatem poprzez bardzo grubą warstwę izolacji głównej prętów (jednostronna grubość tej izolacji wynosi 5,15 mm).



Rys. 4. Zmodyfikowana sieć cieplna dla rdzenia stojana turbogeneratorsa
Fig. 4. Modified thermal network for the stator core of the turbogenerator

Zmodyfikowana sieć cieplna dla rdzenia stojana turbogeneratorsa składa się z następujących elementów:

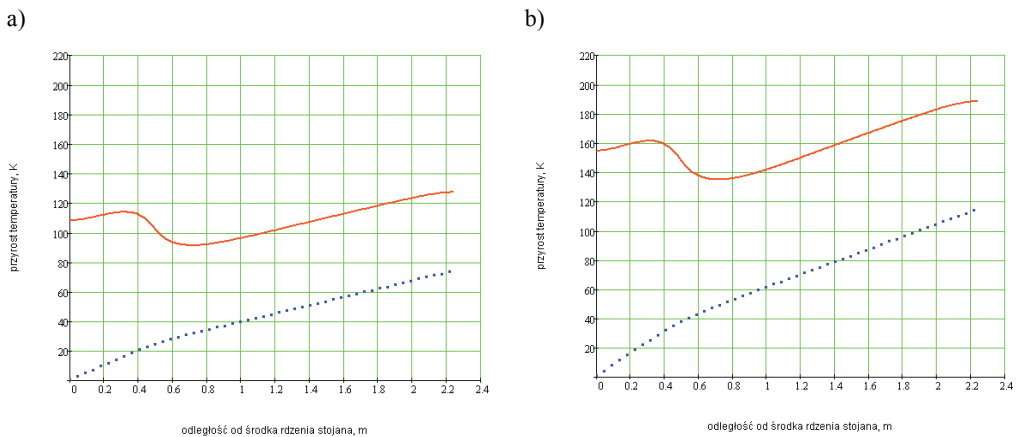
- przewodności dla strumienia ciepła przepływającego na skutek przewodzenia w rdzeniu stojana w kierunku osiowym G_{pr} ,
- przewodności dla strumienia ciepła przepływającego na skutek konwekcji z powierzchni kanałów osiowych do strugi przepływającego w nich wodoru G_{kw} ,
- strat mocy w wydzielonych obszarach różnicowych rdzenia zależnych od indukcji magnetycznej $P_{r(i)}$,

- zastępczych źródeł o wydatkach równych mocom cieplnym unoszonym przez strugę wodoru przepływającą w kanałach osiowych w wydzielonych obszarach różnicowych rdzenia $P_{u(i)}$,
- strat mocy w miejscu zwarcia blach P_z – przyjęto, że zwarcie występuje pomiędzy blachami znajdującymi się bezpośrednio pod pierścieniem dociskowym,

Wartości elementów sieci cieplnej wyznaczono wykorzystując zależności podane w pracach [3–5].

2.2.3. BADANIE WPŁYWU ZMNIEJSZENIA DROŻNOŚCI KANAŁÓW WENTYLACYJNYCH NA ROZKŁAD TEMPERATURY W RDZENIU STOJANA TURBOGENERATORA

Za pomocą zmodyfikowanej sieci cieplnej obliczono rozkład przyrostu temperatury w rdzeniu stojana turbogeneratora typu TGHW-360, o powiększonej mocy znamionowej, przy w pełni drożnych kanałach wentylacyjnych (rys. 5a) oraz przy zmniejszeniu wydatku wodoru o 35% (rys. 5b) i jego obciążeniu elektrycznym identycznym, jak przy pomiarach cieplnych (rozdział 2.2.1).



Rys. 5. Rozkład przyrostu temperatury w rdzeniu stojana oraz w strudze wodoru przy:
a) w pełni drożnych kanałach, b) zmniejszonym wydatku wodoru o 35%

Fig. 5. Temperature-rise distribution in the stator core and in the stream of hydrogen at:
a) fully permeable ducts, b) hydrogen output decreased by 35%

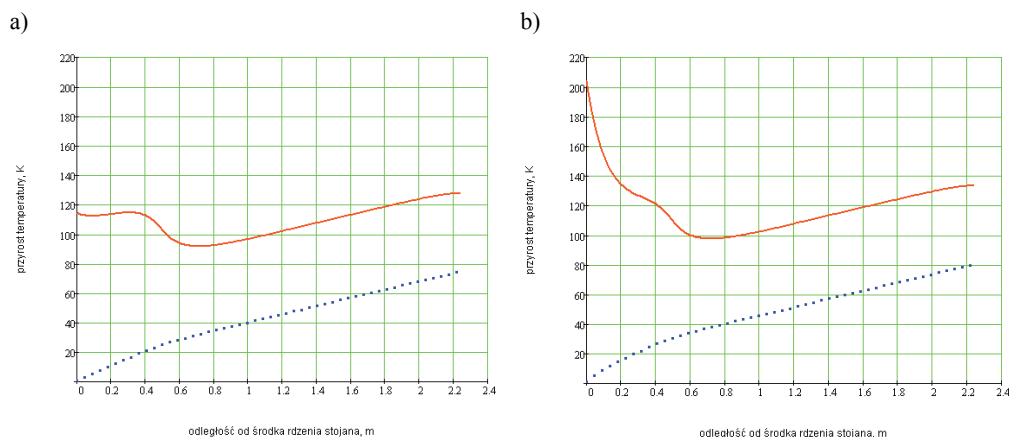
Przy pełnej drożności kanałów wentylacyjnych w rdzeniu przyrost temperatury pierścienia dociskowego wynosi 108,2 K, a zatem różni się jedynie o 2,8 K od najmniejszego zmierzonego przyrostu temperatury w turbogeneratorze nr 1. Przy wydatku wodoru w kanałach wentylacyjnych rdzenia zmniejszonym o 35%, obliczony przyrost temperatury pierścienia dociskowego wynosi 154,7 K, a zatem jest równy maksymalnemu zmierzonymu przyrostowi temperatury w turbogeneratorze nr 5. Różnice zmierzonego przyrostu temperatury pierścienia dociskowego rdzenia stojana

w pięciu turbogeneratorach, w tych samych warunkach pracy, mogą być zatem spowodowane częściową niedrożnością osiowych kanałów wentylacyjnych w rdzeniu wywołaną osadzaniem się w nich produktów erozji termicznej – złuszczonej izolacji blach oraz oderwanych fragmentów lakieru.

2.2.4. BADANIE WPŁYWU ZWARCIA BLACH NA ROZKŁAD TEMPERATURY W RDZNIU STOJANA TURBOGENERATORA

Wykorzystując zmodyfikowaną sieć cieplną obliczono rozkład przyrostu temperatury w rdzeniu stojana analizowanego turbogeneratorsa przy zwarciu 5. blach skrajnych rdzenia ($P_z = 9,7$ W) oraz 20. blach ($P_z = 155$ W), położonych w pobliżu pierścienia dociskowego, i jego obciążeniu elektrycznym identycznym, jak przy pomiarach cieplnych (rys. 6).

Z uzyskanych wyników obliczeń wynika, że różnice pomiędzy zmierzonym przyrostem temperatury pierścienia dociskowego w pięciu turbogeneratorach – w tych samych warunkach pracy – mogą być spowodowane zwarcie blach w skrajnej części rdzenia stojana.



Rys. 6. Rozkład przyrostu temperatury w rdzeniu stojana turbogeneratorsa oraz w strudze wodoru przy zwarcie: a) 5. blach, b) 20. blach usytuowanych bezpośrednio pod pierścieniem dociskowym
Fig. 6. Temperature-rise distribution in the turbogenerator stator core and in the stream of hydrogen after short-circuiting: a) 5 steel sheets, b) 20 steel sheets located directly under the clamping ring

2.2.5. ZAGROŻENIA TERMICZNE W ELEMENTACH SKRAJNYCH RDZENA STOJANA PRZY PODWYŻSZENIU MOCY TURBOGENERATORA

W analizowanych pięciu turbogeneratorach typu TGHW-360 zabudowano dodatkowe czujniki, za pomocą których zmierzono przyrost temperatury pierścienia dociskowe-

go rdzenia stojana przy obciążeniu turbogeneratorsa mocami czynnymi odpowiednio 360 i 380 MW przy znamionowym współczynniku mocy $\cos\varphi_n = 0,85$. Przyrost temperatury pierścienia dociskowego oraz bezpośrednio przylegającego do niego skrajnego fragmentu rdzenia wynosi 108 K przy obciążeniu turbogeneratorsa mocą 360 MW oraz 120 K przy obciążeniu mocą 380 MW. Wykorzystując opracowaną sieć cieplną obliczono temperatury skrajnych części rdzenia stojana turbogeneratorsa. Różnica pomiędzy wynikami obliczeń i pomiaru nie przekracza 2,1 K.

Przy temperaturze zimnego wodoru 40 °C i obciążeniu turbogeneratorsa mocą 380 MW temperatura izolacji blach bezpośrednio przylegających do pierścienia dociskowego wynosi 160 °C, czyli jest o 5 K wyższa od temperatury dopuszczalnej długotrwale dla izolacji klasy F (155 °C). W przypadku rozpatrywanego turbogeneratorsa temperatura skrajnych elementów rdzenia stojana jest zatem parametrem nadrzędnym ograniczającym wzrost mocy.

3. PODSUMOWANIE

Zamieszczone w artykule wyniki symulacyjnych badań cieplnych potwierdziły podaną przez autorów hipotezę, że przyczyną różnic zmierzonego przyrostu temperatury płyty dociskowej rdzenia rozpatrywanych turbogeneratorsów typu TGHW-360, pracujących przy tym samym obciążeniu elektromagnetycznym, są zwarcia blach skrajnych rdzenia (co jest najbardziej prawdopodobne), lub zmniejszona drożność najbliższej położonych jego kanałów wentylacyjnych.

Przedstawiona sieć cieplna (zwyfikowana pomiarowo) może być wykorzystywana przy opracowywaniu projektów modernizacji turbogeneratorsów w celu zwiększenia ich mocy czynnej oraz dopuszczalnego obszaru obciążenia pojemnościowego.

LITERATURA

- [1] ATAMANOV V.V., *Kontrol sostojanija krajnih paketov aktivnoj stali turbogeneratorsa pod nagruzkoi*, Električeskie Stancii, 2005, Nr 6.
- [2] BYTNAR A., *Analiza zjawisk cieplnych i magnetycznych w częściach skrajnych stojana dużego turbogeneratorsa*, Zeszyty Problemowe BOBRME KOMEL „Maszyny Elektryczne”, Nr 92, Katowice 2011, 45–50.
- [3] BYTNAR A., KROK R., *System diagnostyki online uszkodzeń termicznych stojana dużego turbogeneratorsa*, Napędy i Sterowanie, Nr 6, Racibórz 2011, 54–58.
- [4] KROK R., *Sieci cieplne w modelowaniu pola temperatury w maszynach elektrycznych prądu przemiennego*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Monografia, Gliwice 2010.
- [5] KROK R., *Sieci cieplne w modelowaniu pola temperatury w maszynach elektrycznych i transformatorach*, Przegląd Elektrotechniczny, Nr 10, Warszawa 2010, 318–323.
- [6] SWIFT G., MOLINSKI T.S., LEHN W., *A fundamental approach to transformer thermal modeling – Part I: Theory and equivalent circuit*, IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, No. 16, 171–175.

INVESTIGATIONS OF CAUSES OF THE STATOR END ELEMENTS EXCESSIVE HEATING OF THE LARGE TURBOGENERATOR

Thermal measurements of turbogenerators in power plants show often excessive heating of stator elements in the end region. The paper presents results of thermal measurements performed on several 380 MW turbogenerators and thermal damages of stator end elements. A thermal model for overheated stator elements of the turbogenerator was developed. Various temperatures measured in the stator end elements of turbogenerators of the same type at the same electromagnetic load, suggests emergence of short-circuits between steel sheets located under the clamping plate or decrease of ventilating duct permeability in the core. The thermal calculations confirm this hypothesis. The verified by measurements thermal models can be very useful in developing modernization projects of turbogenerators for increasing their rated power.