

Andrzej Bytnar
Instytut Energetyki, Warszawa

ANALIZA ZJAWISK CIEPLNYCH I MAGNETYCZNYCH W CZĘŚCIACH SKRAJNYCH STOJANA DUŻEGO TURBOGENERATORA

ANALYSIS OF THERMAL AND MAGNETIC PHENOMENA IN EXTREME STATOR PARTS OF A BIG TURBOGENERATOR

Abstract: The paper discusses thermal phenomena occurring in extreme stator parts of big turbogenerators at various values of their load parameters. Results of thermal measurement analyses of extreme elements of turbogenerator stators of the type GTHW-360 are presented. An analysis of magnetic phenomena in extreme elements of turbogenerator stators was conducted with particular consideration of resultant values of leakage inductances of stator and rotor coil authangs versus power factor and turbogenerator stator current values. A modified diagram of limit loads was worked out for turbogenerators type GTHW-360.

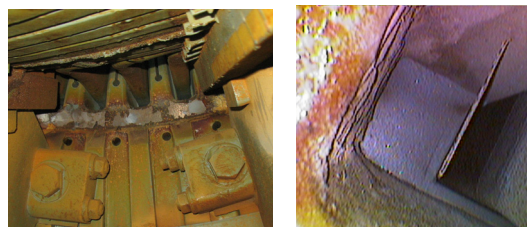
1. Wprowadzenie

Z analiz awaryjności turbogeneratorów pracujących w cyklu zmiennych obciążeń wynika, że w elementach skrajnych niektórych stojanów występują często nadmierne temperatury, które powodują ich erozję cieplną i uszkodzenie izolacji skrajnych blach rdzenia. Doprowadza to do zwarć blach w zębach rdzenia oraz degradacji izolacji uzwojenia [1÷4]. Uszkodzenia te są wywoływane w dużej mierze skojarzonymi strumieniami rozproszenia połączeń czołowych uzwojeń stojana i wirnika turbogeneratora [1÷5,7]. Celem niniejszej pracy jest poszerzenie wiedzy w tej dziedzinie oraz opracowanie wytycznych dla właściwej eksploatacji dużych turbogeneratorów oraz dla prowadzenia dalszych badań.

2. Analiza zjawisk cieplnych w skrajnych elementach stojana

W obszarze dna żłobków skrajnej części rdzenia niektórych turbogeneratorów typu GTHW-360 stwierdzono zmianę koloru pierścieni dociskowych, pojawienie się pyłu pochodzącego od erozji cieplnej oraz pęcherzy na izolacji ze wewnętrznych blach elektromagnetycznych (rys. 1). Turbogeneratory te, w niektórych elektrowniach, pracują ze zwiększoną mocą czynną (ok. 3,5 ÷ 5,5 %; przy znamionowym współczynniku mocy) po modernizacji części cieplnej bloków energetycznych.

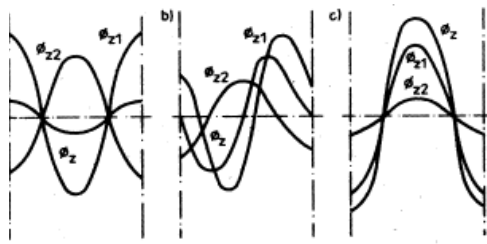
Powszechnie uważa się, że wysokie temperatury skrajnych elementach stojana mogą być



Rys. 1. Efekty znacznie podwyższonej temperatury płyt dociskowych i blach rdzenia w obszarze dna żłobków skrajnej części stojana turbogeneratora typu GTHW- 360

spowodowane dużą składową osiową skojarzonych magnetycznych strumieni rozproszenia połączeń czołowych uzwojeń stojana i wirnika, przy niedowzbudzeniu turbogeneratora (rys. 2). Dla ograniczenia niekorzystnego działania tej składowej strumienia stosuje się powszechnie różne rozwiązania konstrukcyjne takie jak: ekrany, boczniki magnetyczne, stopniowanie i przecięcia skrajnych zębów rdzenia oraz uintensywnione chłodzenie. Okazuje się jednak, że w niektórych typach turbogeneratorów – pomimo zastosowania tych rozwiązań konstrukcyjnych – występują nadmierne temperatury w niektórych częściach pierścieni dociskowych oraz w zębach rdzenia, również przy ich obciążeniach indukcyjnych.

Z przeprowadzonych, przez Instytut Energetyki, badań pola magnetycznego w pobliżu bocznej powierzchni głowy skrajnego zęba rdzenia stojana dużego turbogeneratora wynika, że dużą

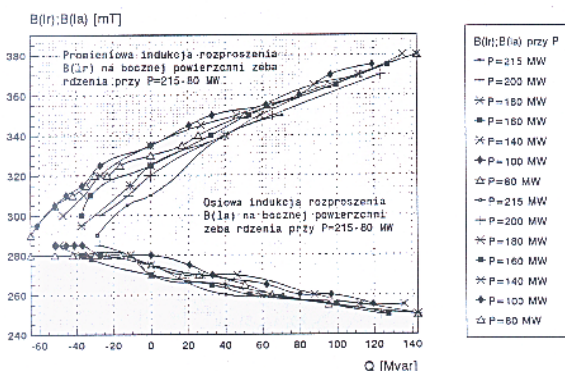


Rys. 2. Współdziałanie osiowych strumieni rozproszenia połączeń czołowych uzwojenia stojana i wirnika:

a) obciążenie indukcyjne, b) obciążenie czynne, c) obciążenie pojemnościowe

ϕ_{z1} - składowa osiowa strumienia rozproszenia od prądu w czołach uzwojenia stojana,
 ϕ_{z2} - składowa osiowa strumienia rozproszenia od prądu w czołach uzwojenia wirnika,
 ϕ_z - wypadkowy osiowy strumień rozproszenia

wartość osiąga wypadkowa składowa promieniowa indukcji rozproszenia połączeń czołowych uzwojeń stojana i wirnika. Składowa ta ma największą wartość przy dużej mocy biernej indukcyjnej, a jej wartość maleje wraz obniżaniem się tej mocy w zakresie indukcyjnym i wzroście tej mocy w zakresie pojemnościowym (rys. 3). To spostrzeżenie sugeruje konieczność uwzględnienia wektora przestrzennego indukcji rozproszenia połączeń czołowych uzwojeń stojana i wirnika (B_{la3D}) przy wyznaczaniu strat dodatkowych w elementach skrajnych stojana.



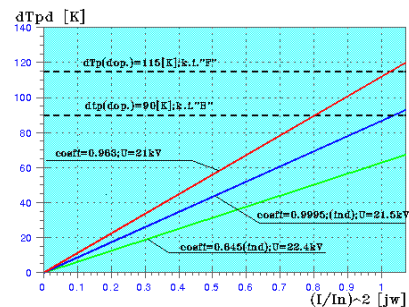
Rys. 3. Wypadkowe składowe promieniowa i osiowa indukcji rozproszenia połączeń czołowych uzwojeń stojana i wirnika turbogeneratora o mocy 230 MW

Badania rozkładów temperatur i indukcji B_{la3D} w skrajnych elementach konstrukcyjnych stojanów turbogeneratorów – w całym obszarze dopuszczalnych ich obciążeń – umożliwi opraco-

wanie zaleceń dla ich modernizacji i wytycznych do projektowania nowych maszyn.

Autor artykułu przeprowadził badania temperatury palców dociskowych (T_{pd}) na wysokości dana żłobków w kilku turbogeneratorach typu GTHW-360 przy różnych: mocach czynnych (P), współczynnikach mocy ($\cos\varphi$) i napięciach uzwojenia stojana (U_s).

W jednym z turbogeneratorów, przyrosty temperatury palców dociskowych od strony turbiny $dT_{pd(T)}$, przy obciążeniu $P = 380$ MW;



Rys. 4. Przyrost temperatury palców dociskowych rdzenia stojana od strony turbiny ($dT_{pd(T)}$) w funkcji kwadratu względnego prądu twornika I/I_n przy $\cos\varphi = \text{const.}$ i różnym napięciu uzwojenia stojana U_s w jednym z badanych turbogeneratorów typu GTHW – 360 (ekstrapolacja wyników pomiarów cieplnych)

$\cos\varphi$; napięciu uzwojenia stojana U_s : 0.845 ind; 22.4 kV, 0.9995 ind; 21.5 kV, 0.983 poj; 21 kV wynosiły odpowiednio: ok. 67 K, 70.3 K, 95 K. W innym turbogeneratorze tego typu przy $P = 349$ MW; $\cos\varphi = 0.9967$ ind i $U_s = 21.2$ kV, przyrosty temperatury palców dociskowych wynosiły: $dT_{pd(T)} = 60.4$ K, zaś od strony pierścieni (P); $dT_{pd(P)} = 79.7$ K. Przy wartościach parametrów turbogeneratora $P = 380$ MW; $\cos\varphi_{\text{ind}} = 0.9967$ i $U_s = 21.2$ kV; przyrosty te wynosiły odpowiednio $dT_{pd(T)} = 82$ K i $dT_{pd(P)} = 105$ K (po przeliczeniu zmierzonych temperatur w kwadracie prądu stojana).

Okazuje się, że temperatura pierścienia dociskowego rdzenia stojana turbogeneratora typu GTHW- 360, w pobliżu dna żłobków (rys. 1), jest wyższa średnio o ok. 25°C od temperatury jego części z palcami dociskowymi – przy podobnych wartościach parametrów obciążeń elektrycznych. Zostało to stwierdzone po zainstalowaniu dodatkowych czujników temperatury w ww. obszarze pierścieni dociskowych.

Tak wysokie temperatury stwarzają poważne zagrożenie tak dla izolacji blach rdzenia jak i dla

prętów uzwojenia położonych na dnie żłobków w skrajnych części rdzenia turbogenerатора. Z przeprowadzonych badań cieplnych skrajnych elementów stojana wynika, że na ich temperatury mają wpływ wartości parametrów obciążenia maszyny tj. prąd stojana i wirnika, napięcie stojana oraz współczynnik mocy. Trzeba tutaj podkreślić, że większość turbogeneratorów nie jest wyposażona w czujniki do pomiaru temperatury pierścieni dociskowych i skrajnych elementów rdzenia, co znacznie utrudnia analizę występujących zjawisk termicznych – mających wpływ na ich stan techniczny.

3. Analiza zjawisk magnetycznych w skrajnych elementach stojana

Skojarzenia magnetyczne pomiędzy uzwojeniami wirnika i stojana, w obszarze połączeń czołowych, są nieco odmienne od tych, które występują w żłobkowej części maszyny. Związane jest to z tym, że w obszarze połączeń czołowych strumienie magnetyczne podstawowej harmonicznej mają składowe w trzech kierunkach podczas, gdy strumienie te w części żłobkowej, mają praktycznie tylko jedną składową (promieniową). Oprócz tego, skojarzenia magnetyczne w obszarze połączeń czołowych zmieniają się – dla każdej części uzwojenia – wzdłuż ich długości w tym obszarze.

Przewodność magnetyczna Λ_{fl} dla strumienia rozproszenia wywołanego przez prąd płynący w połączeniach czołowych uzwojenia wirnika (wnikającego do powierzchni czołowych pakietów rdzenia i skojarzonego z połączeniami czołowymi stojana) jest mniejsza niż przewodność magnetyczna Λ_{al} , dla strumienia rozproszenia wywołanego przez prąd płynący w połączeniach czołowych uzwojenia stojana (wnikającego do powierzchni czołowych pakietów i skojarzonego z połączeniami czołowymi uzwojenia wirnika). Wynika to z faktu, że połączenia czołowe uzwojenia stojana, wywołujące składową wypadkową indukcji B_{al} , są położone bliżej pakietów rdzenia niż połączenia czołowe uzwojenia wirnika.

Wartość stosunku przewodności magnetycznych strumieni rozproszenia, w obszarze połączeń czołowych uzwojeń $k_{\Lambda l}$, zależy od konstrukcji turbogenerатора i może zmieniać się w przedziale

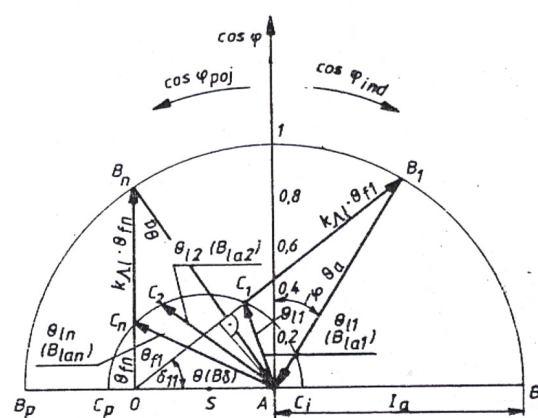
$$0 < k_{\Lambda l} < 1, \quad (1)$$

gdzie:

$$k_{\Lambda l} = \frac{\Lambda_{fl}}{\Lambda_{al}}$$

Sumowanie geometryczne przepływów magnetycznych w części czołowej uzwojeń (ze względu na ich specyfikę) jest nieco odmienne od sumowania przepływów w części żłobkowej maszyny (strumienie rozproszenia stojana i wirnika w obszarze skrajnym turbogenerатора nie podlegają prawu stałej wartości ich sumy geometrycznej) Można jednak skonstruować dla tej części wykresy wektorowe, podobne jak dla części żłobkowej. Pozwoli to na przeanalizowanie zmian przepływu wypadkowego Θ_l wywołującego wypadkową indukcję rozproszenia B_{la} [5].

Na rysunku 5 pokazano dodawanie geometryczne przepływów wywołujących strumienie promieniowe (w części żłobkowej uzwojeń). Trójkąt OAB_1O jest trójkątem przepływów głównych (albo ich wartości względnych) w stanie pewnego obciążenia turbogeneratora.



Rys. 5. Dodawanie przepływu głównego w rdzeniu i rozproszenia w obszarze połączeń czołowych uzwojeń stojana i wirnika turbogeneratora

Sumowanie wektorów przepływu oddziaływania twornika Θ_a (rozproszenia twornika) oraz przepływu wzbudzenia Θ_{fl} , wyznacza wypadkowy przepływ Θ – wywołujący strumień wypadkowy Φ i indukcję wypadkową B_δ . Wartość przepływu Θ , przy niezmienniej wartości napięcia na zaciskach uzwojenia stojana, ma wartość niezmienną i niezależną od wartości prądu twornika I oraz kąta fazowego φ . Tak sporządzony wykres przepływów przedstawia stan magnetyczny w głównym obwodzie magnetycznym, czyli w rdzeniu stojana. W tym obwodzie przewodności magnetyczne dla stru-

mienia twornika Λ_a i dla strumienia wzbudzenia

Λ_f są jednakowe ($\frac{\Lambda_f}{\Lambda_a} = 1$).

Trójkąt AB_1C_1A jest trójkątem przepływów rozproszenia (albo ich wartości względnych) w obszarze połączeń czołowych uzwojeń. Wypadkowy przepływ rozproszenia Θ_{11} , wywołujący strumień rozproszenia w obszarze połączeń czołowych (wypadkowa indukcja rozproszenia B_{1a1}), wynosi

$$\Theta_{11} = \Theta_a + k_{Al} \Theta_{f1}, \quad (2)$$

gdzie:

$k_{Al} \Theta_{f1}$ – efektywny przepływ rozproszenia wzbudzenia,

Θ_{f1} – całkowity przepływ wzbudzenia.

Wektor \underline{AC}_1 oznacza wartość przepływu rozproszenia Θ_{11} , przy danym obciążeniu turbogeneratora, który wywołuje indukcję rozproszenia B_{1a1} (czyli $\Theta_{11} = \underline{AC}_1$ lub w innej skali $B_{1a1} = \underline{AC}_1$).

Przy stałym prądzie twornika $I_a = \text{const}$ (który powoduje przepływ rozproszenia twornika Θ_a) i zmianie charakteru obciążenia turbogeneratora, punkt B_1 trójkąta przepływów głównych, będzie poruszał się po okręgu koła zatoczonego z punktu A promieniem R_{B1a} . W przypadku obciążenia pojemnościowego, może on przyjąć położenie np. B_n – wówczas wektor \underline{AC}_n będzie miarą wartości przepływu rozproszenia Θ_{1n} lub wypadkowej indukcji rozproszenia B_{1an} przy tym obciążeniu.

Jak widać rysunku 5, koniec wektora indukcji rozproszenia B_{1a} 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_{B1a} oraz odległość środka S koła indukcji rozproszenia od punktu A (końca wektora wypadkowego przepływu głównego OA) można wyznaczyć z zależności:

$$R_{B1a} = I_r \left(\frac{k_z}{1 + k_z} \right), \quad (3)$$

gdzie:

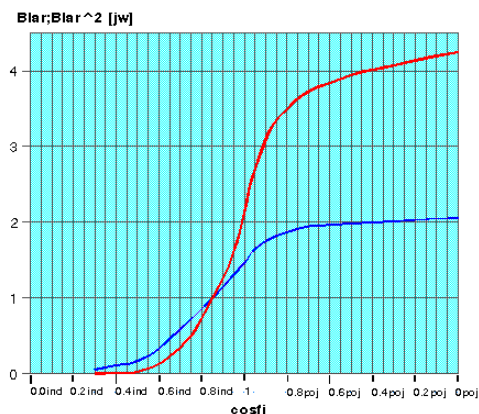
$$I_r = \frac{I_a}{I_n}; I_n - \text{znamionowy prąd twornika,}$$

$\underline{AS} = k_z k_{Al}$; k_z – stosunek zwarcia.

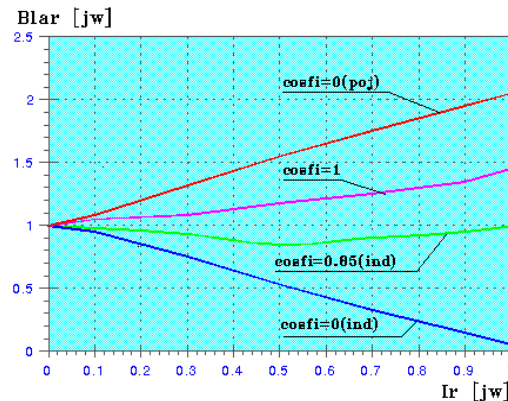
Wykorzystując podaną zasadę wyznaczania indukcji rozproszenia B_{1a} przedstawiono – na rysunku 6 – zależności jej wartości względnej B_{lar}

; B_{lar}^2 (odniesionej do tej indukcji przy obciążeniu znamionowym maszyny B_{1a}/B_{1an}) od współczynnika mocy $\cos\phi$ przy prądzie twornika $I_r = 1$; dla turbogeneratora typu GTHW – 360.

Jak widać wypadkowa indukcja rozproszenia połączeń czołowych uzwojeń stojana i wirnika (przy nominalnej wartości prądu twornika) rośnie wraz ze wzrostem wartości $\cos\phi$ w zakresie obciążeń indukcyjnych i obniżaniem się wartości tego parametru w zakresie obciążeń pojemnościowych.



Rys. 6. Zależność wartości względnej wypadkowej indukcji rozproszenia B_{lar} oraz B_{lar}^2 (od współczynnika mocy $\cos\phi$ przy względnej wartości prądu twornika $I_r = 1$ dla turbogeneratora GTHW-360



Rys. 7. Zależności wartości względnej wypadkowej indukcji rozproszenia B_{la}/B_{lan} od wartości względnej prądu twornika I_r przy współczynnikach mocy $\cos\phi = \text{const}$. dla turbogeneratora typu GTHW – 360

W przypadku turbogeneratora typu GTHW-360 wzrost ten jest znaczny (w skrajnych częściach stojana nie ma ekranów i boczników magnetycznych). I tak w odniesieniu do wartości indukcji rozproszenia przy znamionowej wartości prądu i napięciu stojana oraz $\cos\phi = 0.85$ indukcja ta

wzrasta o 23.8 %; 50.2 % i 100 % odpowiednio przy $\cos\varphi = 0.95_{\text{ind}}$; $\cos\varphi = 1$ i $\cos\varphi = 0.95_{\text{poj}}$.

Na rysunku 7 przedstawiono, dla ww. turbogeneratorsa, zależności $B_{\text{lar}} = f(I_r)$ przy $\cos\varphi = \text{const}$. Przy znamionowym prądzie twornika, wartość wypadkowej indukcji rozproszenia B_{lar} jest największa przy $\cos\varphi = 0_{\text{poj}}$ – zaś najmniejsza przy $\cos\varphi = 0_{\text{ind}}$.

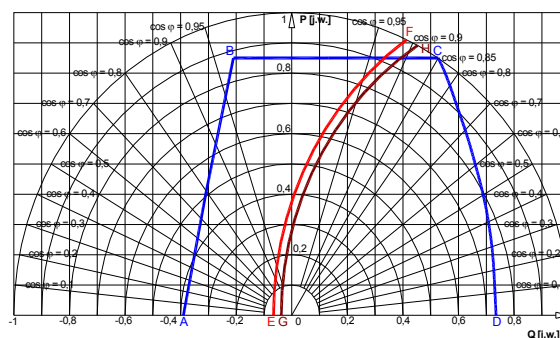
Głębokość wnikania osiowych strumieni rozproszenia połączeń czołowych uzwojeń stojana i wirnika w objętość zębów rdzenia zależy od ich stanu nasycenia magnetycznego [3, 4]. W stanie nienasyconym maszyny (przy zwarciu oraz przy znacznie obniżonym napięciu uzwojenia stojana) strumienie te wnikają jedynie w części skrajne zębów, zaś w stanie nasyconym również w dalsze ich części (na odległość do ok. 1 m od skraju rdzenia). Wpływa to istotnie na wartość temperatur skrajnych zębów i elementów pierścieni dociskowych (w pierwszym przypadku są one znacznie wyższe, niż w drugim).

W niektórych dużych turbogeneratorach są instalowane miedziane ekrany (pomiędzy pierścieniami dociskowymi, a rdzeniem stojana) dla zmniejszenia wartości indukcji rozproszenia połączeń czołowych uzwojeń. Przy zainstalowanym ekranie miedzianym, obserwuje się pełne (praktycznie) ekranowanie jarzma rdzenia od strumieni rozproszenia i istotne zmniejszenie indukcji rozproszenia w pobliżu dna żłobków. Przy tym magnetyczny strumień rozproszenia w mniejszym stopniu wypierany jest do skraju pierścienia zwróconemu ku uzwojeniu. Taka konstrukcja, mimo że zmniejsza nagrzewanie skrajnych elementów turbogeneratorsa, ustępuje pod względem efektywności konstrukcjom z magnetycznymi bocznikami. Z praktyki eksploatacyjnej wynika jednak, że w wielu przypadkach, nie zapewnia ona możliwości pracy maszyny, w obszarze pojemnościowym z $\cos\varphi \leq 0.95$, przy nominalnej mocy czynnej.

Z prowadzonych badań wynika, że sam niemagnetyczny pierścień dociskowy (bez ekranu) nie zapewnia wymaganego zmniejszenia indukcji rozproszenia na powierzchniach czołowych rdzenia stojana. Stwierdzono, że prądy wirowe w pierścieniu wypierają strumień rozproszenia w obszar pomiędzy dnem żłobka, a jego obrzeże. Doprowadza to do zwiększenia indukcji rozproszenia w tym obszarze o 10 ÷ 14 % [4].

4. Graniczne obciążenie turbogeneratorsa wynikające z kryterium termicznego dla pierścieni dociskowych rdzenia

Względna wartość wypadkowej indukcji rozproszenia połączeń czołowych uzwojeń stojana i wirnika B_{lar} , przy obciążeniu znamionowym turbogeneratorsa, umożliwia wyznaczenie jego granicznych obciążeń związanych z nadmiernym nagrzewaniem się pierścieni dociskowych rdzenia stojana (modyfikacja wykresu obciążeń P ; Q podanego przez wytwórcę). Należy w tym przypadku wyznaczyć dopuszczalną względną wartość indukcji rozproszenia $B_{\text{lar(dop)}}$ wynikającą z kryterium termicznego dla pierścieni dociskowych ($T_{\text{pd}} < T_{\text{pd(dop)}}$) oraz zmierzyć temperaturę najgorętszego ich miejsca (T_{pdn} – w pobliżu dna żłobków rdzenia) przy obciążeniu znamionowym turbogeneratorsa [5; 7].



Rys. 8. Zmodyfikowany wykres granicznego obciążenia turbogeneratorsa typu GTHW-360 ($P = 370 \text{ MW}$, $U = 22 \text{ kV}$, $\cos\varphi = 0.85$) ABCD – ograniczenie obciążenia P ; Q podane przez producenta maszyny, EF (GH) – ograniczenia obciążenia P ; Q przyrostem dopuszczalnej temperatury pierścienia dociskowego rdzenia i przy zimnym wodrze 25°C (35°C); przy znamionowym prądzie $I_{\text{stn}} = 1$ i napięciu $U_{\text{stn}} = 1$ uzwojenia stojana.

Dopuszczalny przyrost temperatury pierścieni dociskowych związany jest z klasą izolacji uzwojenia stojana turbogeneratorsa [6]. W prowadzonych rozważaniach przyjęto, że wartość tego przyrostu wynosi 115 K dla klasy F (90 K dla klasy B).

Zmodyfikowany wykres granicznego obciążenia dla turbogeneratorsa typu GTHW-360 (o mocy czynnej $P = 1.08 P_n$ przy $\cos\varphi_{\text{ind}} = 0.85$) przedstawiono na rysunku 8. Jak widać zjawiska cieplne, w skrajnych częściach stojana znacznie ograniczają generację mocy maszyny.

Przedstawione zagadnienie jest niezmiernie istotne przy projektowaniu nowych oraz modernizacji i eksploatacji starszych konstrukcji turbogeneratorów dużej mocy. Należy więc prowadzić dalsze prace teoretyczne i eksperymentalne związane z tą tematyką.

5. Wnioski

1. Zjawiska termiczne w skrajnych elementach stojana dużego turbogenerato- ra mogą w znacznym stopniu ograniczać jego dopuszczalne obciążenia.
2. Zastosowanie ekranów ochronnych oraz uintensywnionego chłodzenia, w obszarze skrajnych elementów stojana, umożliwia eliminowanie niekorzystnych zjawisk termicznych wywołanych skojarzonymi strumieniami rozproszenia połączeń czołowych uzwojeń stojana i wirnika turbogenerato- ra.
3. Istnieje zapotrzebowanie na interdyscypli- narne prace naukowo-badawcze, których wyniki stworzą podstawy dla właściwych rozwiązań konstrukcyjnych nowych turbo- generatorów oraz umożliwią skuteczną mo- dernizację już eksploatowanych.

6. Literatura

[1] Atamanov V.V.: *Kontrol' sostojanija krajnih pakietov aktivnoj stali turbogenerato- ra pod nagruzkoj*. Električeskie Stancii, Nr 6, 2005.

[2] Bytnar A.: *Turbogenerator stator failures due to some physical phenomena*. Poznan University of Technology Academic Jurnal, Electrical Engineer- ing, No 2, 2007.

[3] Bytnar A.: *Obciążalność dużego turbogenerato- ra w aspekcie niektórych zjawisk fizycznych wystę- pujących w jego stojanie*. Wydawnictwa Politechni- ki Warszawskiej, Prace Naukowe Elektryka z. 94. 1990.

[4] Glebov I i drug.: *Učet anormal'nyh režimov pri konstrirovanii i ekspluatacii mošnyh turbogene- ratorov*. Električestvo Nr 11, 1983.

[5] Latek W., Partyka W., Bytnar A.: *New operating chart for large power turbogenerato- rs*. CIGRE Paris 26th August. – 1st September 1990, pp.11-101.

[6] *Norma PN-EN 60034-1: 2005. Maszyny Elek- tryczne wirujące. Dane znamionowe i parametry*.

[7] Partyka W.: *Strumienie rozproszone w turboge- neratorach 200 i 500 MW*. Proceedings of XXXI International Symposium on Electrical Machines, Gliwice – Ustroń 1995.

Autor

Dr hab. inż. Andrzej Bytnar, prof. IEn
Instytut Energetyki, ul. Mory 8, 01-330 Warszawa,
tel. (22) 836-3201, (22) 3451-265,
e-mail: andrzej.bytnar@ien.com.pl

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Sławomir Szymaniec