

Stefan Sieradzki*, Jan Adamek*, Roman Krok**, Jan Kapinos**

*TurboCare Poland S.A., Lubliniec

*Politechnika Śląska, Gliwice

WPŁYW MODERNIZACJI WENTYLATORÓW OSIOWYCH NA WZROST MOCY TURBOGENERATORÓW

THE INFLUENCE OF AXIAL FANS MODERNIZATION ON TURBOGENERATOR POWER INCREASE

Abstract: In this paper the scope of high power turbogenerators axial fans modernization was shown. On example of selected application in turbogenerator TWW-320-2Y3, thermal calculation results, verified on the basis of thermal measurements before and after the modernization, were presented. Effect of this type of fans modernization on the increase of turbogenerator nominal power was shown as well.

1. Wstęp

Modernizacja układu wentylacji turbogeneratorów w celu wzrostu intensywności chłodzenia elementów czynnych jest jednym ze sposobów podwyższenia ich mocy znamionowej. Turbogeneratory chłodzone są w różny sposób, w zależności od konstrukcji oraz mocy znamionowej. Jako czynnik chłodzący stosowany jest wodór lub powietrze. Przepływ czynnika chłodzącego wymuszany jest za pomocą wentylatorów zamocowanych na wale wirnika. Najczęściej spotykanym rozwiązaniem jest układ dwóch wentylatorów, osadzonych pojedynczo po obydwu stronach wirnika. Wentylatory mogą pracować w układzie ssącym lub tłoczącym czynnik chłodzący. W turbogeneratorach stosowane są wentylatory osiowe lub promieniowe. Wentylatory osiowe mogą mieć łopatki ustawione na stałe (tzn. ze stałym kątem ustawienia łopatki w piaście wentylatora) lub nastawne (tzn. ze zmiennym kątem ustawienia łopatki w piaście wentylatora).

Turbogeneratory typu TWW-200-2 wyprodukowane przez „Dolmel” we Wrocławiu na licencji „Elektrosiły” mają wirniki z wentylatorami osiowymi z łopatkami ustawionymi na stałe w piaście. Wentylatory te pracują w układzie ssącym. „Energoserwis” S.A. Lubliniec przy współpracy z Politechniką Śląską w 2004 roku podjął prace projektowe oraz badawcze nad nowymi wentylatorami do tego typu turbogeneratorów.

Nowe wentylatory pracujące w układzie ssącym zaprojektowano jako osiowe z łopatkami nastawnymi. Prace projektowe i badawcze zakończono w pierwszej połowie 2007 roku. Geometryczne cechy konstrukcyjne nowej

łopatki zgłoszono do Urzędu Patentowego RP celem uzyskania ochrony patentowej. Patent uzyskano w 2009 roku. Wentylatory nowej konstrukcji zastosowano po raz pierwszy w drugiej połowie 2007 roku w trakcie modernizacji turbogeneratorskiego typu TWW-320-2Y3 (rys.1) polegającej na wprowadzeniu zmian w uzwojeniu wzbudzenia i uzwojeniu stojana w celu podwyższenia mocy znamionowej turbogeneratorskiego. Konstrukcja wentylatorów stosowanych dotychczas w tym turbogeneratorze była identyczna, jak w turbogeneratorach typu TWW-200-2.

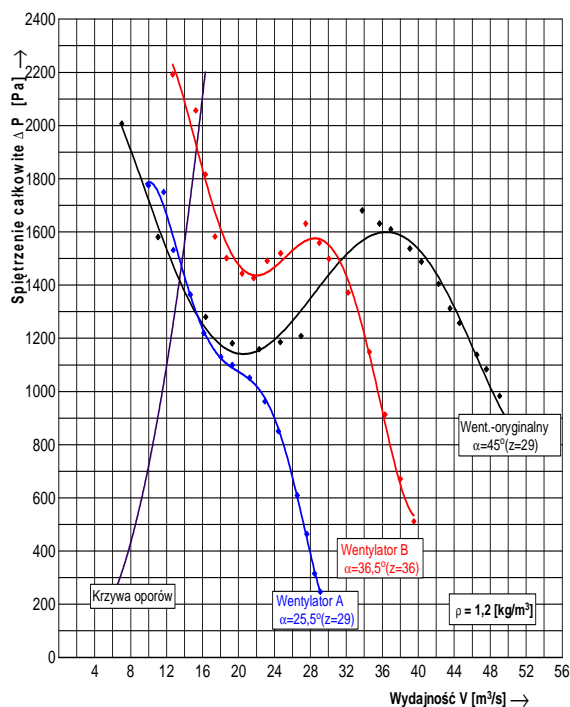


Rys. 1. Wirnik turbogeneratorskiego TWW-320-2Y3 z nowymi wentylatorami

2. Konstrukcja nowych wentylatorów

W celu zwiększenia wydajności nowego wentylatorskiego do turbogeneratorskiego TWW-200-2 - w porównaniu do wentylatorskiego oryginalnego - zaprojektowano dwa typy łopatek (typ A i B) o odmiennych geometrycznych cechach konstrukcyjnych w stosunku do łopatki oryginalnej. Na bazie tych łopatek skonfigurowano dwa nowe wentylatory. Wentylator z łopatkami typu A zaprojektowano

z liczbą łopatek: $z=29$, natomiast wentylator z łopatkami typu B zaprojektowano z liczbą łopatek: $z=36$. Oba wentylatory w wersji modelowej zostały zbadane na stanowisku pomiarowym w Politechnice Śląskiej w Gliwicach [6]. Punkty pracy wentylatora oryginalnego oraz nowych wentylatorów osiowych z łopatkami nastawnymi (przy ustawieniu łopatek zapewniającym maksymalną wydajność) do turbogeneratorsa TWW-200-2 wyznaczono na podstawie zmierzonych charakterystyk wentylatorów oraz krzywej oporów aerodynamicznych układu wentylacyjnego turbogeneratorsa obliczonej przez zespół pracowników Politechniki Warszawskiej [4].



Rys.2. Punkty pracy nowych wentylatorów (z łopatkami typu A i B) oraz wentylatora oryginalnego do turbogeneratorsa TWW-200-2

Współrzędne punktów pracy nowych wentylatorów przy kącie ustawienia łopatek zapewniającym maksymalną wydajność oraz wentylatora z łopatką oryginalną zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1. Punkty pracy nowych wentylatorów z łopatką nastawną dla badanych kątów ustawienia łopatek i wentylatora z łopatką oryginalną.

Rodzaj wentylatora	Typ łopatki	Liczba łopatek	Kąt ustawienia łopatki	Wydajność [m ³ /s]	Spłężnienie całkowite [Pa]
Oryginalny stały	oryginalna	$z=29$	$\alpha=45^\circ$	13,3	1425
Nowy nastawny A	A	$z=29$	$\alpha=25,5^\circ$	13,8	1490
Nowy nastawny B	B	$z=36$	$\alpha=36,5^\circ$	15,7	1905

3. Obliczenia cieplne turbogeneratorsa TWW-320-2Y3

Wykonano obliczenia cieplne uzwojeń wzbudzenia i stojana turbogeneratorsa TWW-320-2Y3 w wersji fabrycznej. Uzyskane wyniki obliczeń porównano z wynikami pomiarów cieplnych przeprowadzonych w Elektrowni przed modernizacją turbogeneratorsa. Weryfikacja pomiarowa wyników obliczeń umożliwiła określenie dokładności sporządzonych modeli cieplnych. Wykorzystując zweryfikowany pomiarowo model cieplny uzwojenia wzbudzenia turbogeneratorsa TWW-320-2Y3 przeprowadzono obliczenia mające na celu wyznaczenie maksymalnego prądu wzbudzenia, przy którym średni przyrost temperatury uzwojenia wzbudzenia osiąga wartość dopuszczalną określoną przez producenta (71 K).

Następnie wykorzystując sporządzony model elektromagnetyczny generatora określono odpowiadającą temu prądowi wzbudzenia (przy znamionowym współczynniku mocy $\cos\phi_n=0,90$) znamionową moc czynną, wydawaną do systemu elektroenergetycznego. Dla prądu stojana odpowiadającego temu stanowi pracy turbogeneratorsa obliczono rozkład temperatury w prętach uzwojenia stojana.

W celu określenia możliwości wzrostu mocy turbogeneratorsa po modernizacji układu wentylacji polegającej na zastosowaniu nowych wentylatorów o zwiększonej wydajności wykonano obliczenia cieplne turbogeneratorsa TWW-320-2/MWT (wersja po modernizacji wentylatorów). Wyznaczono maksymalny prąd wzbudzenia tego turbogeneratorsa, przy którym średni przyrost temperatury uzwojenia wzbudzenia ma wartość maksymalną podaną

przez producenta (71 K). Następnie dla tego prądu wzbudzenia (przy znamionowym współczynniku mocy $\cos\phi_n=0,90$) obliczono, wykorzystując model elektromagnetyczny, znamionową moc wydawaną do systemu elektroenergetycznego oraz prąd stojana. Dla wyznaczonej wartości prądu stojana obliczono rozkład temperatury w prętach uzwojenia stojana. Wykonana analiza porównawcza wyników pomiarów i obliczeń cieplnych rozpatrywanych wersji turbogeneratora umożliwiła określenie możliwości wzrostu mocy w wyniku modernizacji układu wentylacji i zastosowaniu nowych wentylatorów o zwiększonej wydajności.

4. Określenie wzrostu prędkości wodoru w kanałach wentylacyjnych wirnika po modernizacji turbogeneratora

Wzrost prędkości wodoru w kanałach wentylacyjnych wirnika zmodernizowanego turbogeneratora TWW-320-2/MWT określono obliczeniowo wykorzystując wyniki pomiaru turbogeneratora zmodernizowanego w pełnym zakresie (zmiany w uzwojeniu wzbudzenia i stojana turbogeneratora oraz zastosowanie nowych wentylatorów) wykonanego w Elektrowni przy obciążeniu mocą czynną 308 MW. W rozpatrywanym stanie pracy zmodernizowanego turbogeneratora przy prądzie wzbudzenia $I_w=2253$ A i temperaturze zimnego destylatu $\vartheta_{zd}=31^\circ\text{C}$, średni przyrost temperatury uzwojenia wzbudzenia wynosił **42,7 K**.

Wykorzystując sporządzony model uzwojenia wzbudzenia wykonano serię obliczeń cieplnych, zwiększając stopniowo prędkości wodoru w kanałach wentylacyjnych wirnika. Przy prędkościach zwiększonych o **24%** (w porównaniu do wersji fabrycznej generatora) uzyskano zgodność pomiędzy średnim przyrostem temperatury wyznaczonym z obliczeń, oraz z pomiarów cieplnych. Biorąc pod uwagę fakt, że wprowadzone zmiany konstrukcyjne w wirniku turbogeneratora nie spowodowały zmian kształtu i wymiarów kanałów chłodzących, podany wzrost prędkości wodoru jest wywołany wyłącznie zastosowaniem nowych wentylatorów. Należy w tym miejscu wspomnieć, że badania modelowe zmodernizowanego wentylatora wykonane w tunelu aerodynamicznym (nowy wentylator z łopatkami typu B – tabela 1) wykazały wzrost

wydajności medium chłodzącego o około **18%** w porównaniu do wersji fabrycznej.

5. Zwiększenie mocy znamionowej turbogeneratora po zastosowaniu nowych wentylatorów

Celem wykonanych obliczeń cieplnych i elektromagnetycznych było określenie możliwości zwiększenia mocy znamionowej turbogeneratora po modernizacji. Zmodernizowany turbogeneratore TWW-320-2Y3 z zabudowanymi nowymi wentylatorami o zwiększonej wydajności oznaczono symbolem TWW-320-2/MWT.

5.1. Wyznaczenie mocy znamionowej turbogeneratora TWW-320-2Y3

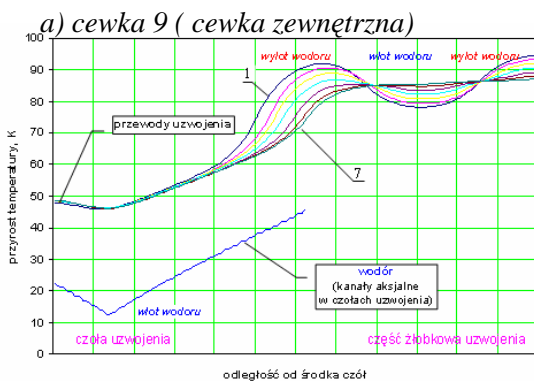
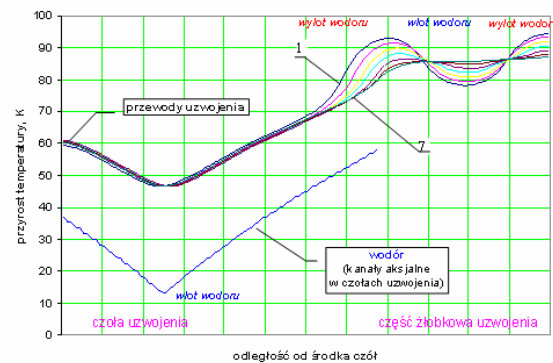
Moc znamionowa turbogeneratora TWW-320-2Y3 (wersja fabryczna) podana przez producenta wynosi $P_n=310$ MW przy współczynniku mocy $\cos\phi_n=0,90$. Prąd wzbudzenia w tym stanie pracy turbogeneratora według danych producenta wynosi $I_w=2774$ A. Przed odstawieniem turbogeneratora do remontu i modernizacji wykonano pomiary cieplne w Elektrowni. Z wyników przeprowadzonych pomiarów oraz obliczeń cieplnych wynika, że w znamionowym stanie pracy tego turbogeneratora średni przyrost temperatury uzwojenia wzbudzenia wynosi 83 K i przekracza o 12 K wartość dopuszczalną podaną w dokumentacji techniczno ruchowej turbogeneratora (71 K). W związku z powyższym wykonano dla turbogeneratora TWW-320-2Y3 serię obliczeń cieplnych, celem których było określenie maksymalnego prądu wzbudzenia, który płynąc w uzwojeniu wzbudzenia spowoduje jego nagrzanie do temperatury dopuszczalnej (średni przyrost temperatury uzwojenia wzbudzenia wynosi 71 K). Następnie wykorzystując model elektromagnetyczny turbogeneratora obliczono odpowiadającą temu prądowi wzbudzenia moc czynną przy $\cos\phi_n=0,90$ oraz prąd stojana. Obliczona moc czynna dla rozpatrywanego stanu pracy turbogeneratora wynosi **275 MW**, prąd wzbudzenia 2575 A, a prąd stojana 8820 A.

5.2. Określenie mocy znamionowej generatora TWW-320-2/MWT

Celem wykonanych obliczeń było określenie możliwości zwiększenia mocy znamionowej rozpatrywanego turbogeneratorsa po wymianie wentylatorów na nowe o zwiększonej wydajności. Przyjęto do obliczeń, że uzwojenia wzbudzenia i stojana zmodernizowanego turbogeneratorsa są takie same, jak w wersji fabrycznej.

Dla turbogeneratorsa TWW-320-2/MWT wykonano serię obliczeń cieplnych celem których było określenie maksymalnego prądu wzbudzenia, który płynąc w uzwojeniu wzbudzenia spowoduje jego nagrzanie do temperatury dopuszczalnej (średni przyrost temperatury uzwojenia wzbudzenia wynosi 71 K).

Na rys.3 przedstawiono odpowiadające temu stanowi pracy turbogeneratorsa rozkłady przyrostu temperatury w przewodach uzwojenia wzbudzenia.



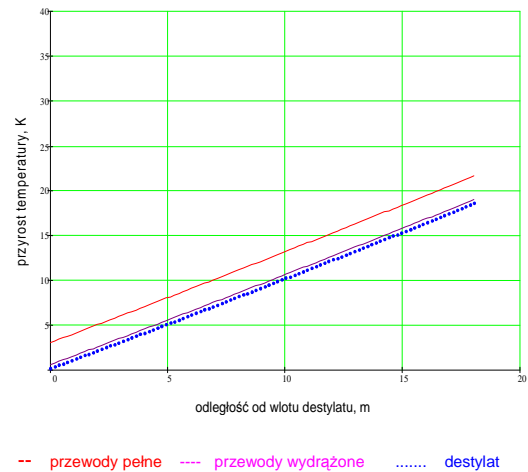
b) cewka 1 (cewka wewnętrzna)

Rys. 3. Rozkłady przyrostu temperatury wzdłuż długości przewodów uzwojenia wzbudzenia w rozpatrywanym stanie pracy turbogeneratorsa TWW-320-2/MWT -

$$I_W=2815 \text{ A}, P=301 \text{ MW}, \cos\varphi=0,90;$$

$$I_S=9655 \text{ A}, Q_d=35 \text{ m}^3/\text{h}, \vartheta_{zd}=45 \text{ }^\circ\text{C}, \vartheta_{zw}=44 \text{ }^\circ\text{C}$$

Wykorzystując model elektromagnetyczny turbogeneratorsa obliczono moc czynną (przy $\cos\varphi_n=0,90$) odpowiadającą analizowanemu stanowi pracy oraz prąd stojana. Na rys.4 zamieszczono obliczone rozkłady przyrostu temperatury w przewodach elementarnych prętów uzwojenia stojana dla tego stanu pracy zmodernizowanego turbogeneratorsa. Przyrost temperatury destylatu w rozpatrywanym stanie pracy turbogeneratorsa wynosi **18,6 K**. Przy maksymalnej temperaturze zimnego destylatu **45°C** oznacza to, że temperatura gorącego destylatu wynosi **63,6°C** i jest mniejsza od dopuszczalnej (85K) o **21,4 K**. Maksymalny przyrost temperatury uzwojenia stojana wynosi **21,7 K** i jest on mniejszy od dopuszczalnego (60 K) o **38,3 K**.



Rys.4. Rozkłady przyrostu temperatury wzdłuż długości przewodów elementarnych prętów uzwojenia stojana w rozpatrywanym stanie pracy turbogeneratorsa TWW-320-2/MWT - $I_W=2815 \text{ A}, P=301 \text{ MW}, \cos\varphi=0,90,$ $I_S=9655 \text{ A}, Q_d=35 \text{ m}^3/\text{h}, \vartheta_{zd}=45 \text{ }^\circ\text{C}, \vartheta_{zw}=44 \text{ }^\circ\text{C}$

6. Podsumowanie i wnioski końcowe

W tabeli 2 zestawiono moce znamionowe turbogeneratorsa w wersjach fabrycznej (TWW-320-2Y3) i po modernizacji wentylatorów (TWW-320-2/MWT) określone na podstawie wykonanych obliczeń cieplnych i elektromagnetycznych.

Tabela 2. Moce znamionowe (obliczone) dla turbogeneratorsa w wersjach fabrycznej i po modernizacji wentylatorów

Oznaczenie wersji turbogeneratorsa	Jedn.	TWW 320-2Y3	TWW 320-2/MWT
Znamionowa moc czynna	MW	275	301
$\cos \varphi$		0,9	0,9
Prąd wzbudzenia	A	2575	2815
Prąd stojana	A	8820	9655
Średni przyrost temperatury uzwojenia wzbudzenia	K	71	71
Maksymalny przyrost temperatury uzwojenia stojana	K	17,9	21,7

Z przeprowadzonych obliczeń i pomiarów wynika, że analizowany turbogenerator w wersji fabrycznej ma moc znamionową 275 MW - przy $\cos\varphi_n=0,90$ i dopuszczalnym średnim przyroście temperatury uzwojenia wzbudzenia 71 K. Moc znamionowa obliczona turbogeneratorsa po zastosowaniu zmodernizowanych wentylatorów wzrosła do 301 MW przy $\cos\varphi_n=0,90$, (czyli o około 9%) przy dopuszczalnym średnim przyroście temperatury uzwojenia wzbudzenia 71 K. Uzyskanie tego wzrostu mocy turbogeneratorsa potwierdziły wyniki wstępnych pomiarów cieplnych przeprowadzonych w lipcu 2008 roku w Elektrowni.

Literatura

- [1] Latek W.: *Turbogeneratorsy*, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 1973
 [2] Krok R.: *Sieci cieplne w modelowaniu pola temperatury w maszynach elektrycznych prądu przemiennego*, Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010
 [3] Kapinos J., Krok R.: *Wstępna ocena wpływu modernizacji wentylatorów i konstrukcji uzwojeń na wzrost mocy generatorsa TWW-320-2Y3*. Praca

niepublikowana (opracowanie wykonane na zlecenie „ENERGOSERWIS” S.A. Lubliniec), kwiecień 2009

[4] Partyka W., Mukosiej J., Kosk J., Szczypior J., Skupińska D., Klimek S.: *Obliczenia wentylacyjne turbogeneratorsa TWW-230*. Praca niepublikowana (opracowanie wykonane na zlecenie „ENERGOSERWIS” S.A. Lubliniec), Politechnika Warszawska, grudzień 1998

[5] Prysok E.: *Weryfikacja geometrii i profilu łopatki wentylatorsa osiowego nastawnego do wirnika turbogeneratorsa o mocy 230 MW chłodzonego wodorem*. Praca niepublikowana (opracowanie wykonane na zlecenie „ENERGOSERWIS” S.A. Lubliniec), sierpień 2004

[6] Prysok E.: *Wykonanie obliczeń aerodynamicznych wentylatorsa do generatorsa TWW-230 ze zmodernizowaną łopatką nastawną na bazie dotychczasowych wyników badań przepływowych wentylatorsów modelowych*. Praca niepublikowana (opracowanie wykonane na zlecenie „ENERGOSERWIS” S.A. Lubliniec), czerwiec 2007

[7] Sieradzki S., Prysok E., Otte J., Dziuba J., Adamek J.: *Badania optymalizacyjne osiowych wirników wentylatorsów do generatorsów dużej mocy*. VII Międzynarodowa Konferencja „Wentylatorsy i pompy przemysłowe”, Politechnika Śląska, Gliwice 2008

Autorzy

Dr inż. Stefan Sieradzki, TurboCare Poland S.A., ul. Powstańców Śląskich 85, (34) 357 21 41, Stefan.Sieradzki@turbocare.pl

Inż. Jan Adamek TurboCare Poland S.A., ul. Powstańców Śląskich 85, (32) 357 21 04, Jan.Adamek@turbocare.pl

Dr inż. Roman Krok, Politechnika Śląska, Zakład Maszyn Elektrycznych i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie, Gliwice, ul. Akademicka 10a, 32 237 29 29, Roman.Krok@polsl.pl

Dr inż. Jan Kapinos, Politechnika Śląska, Zakład Maszyn Elektrycznych i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie, Gliwice, ul. Akademicka 10a, 32 237 10 04, Jan.Kapinos@polsl.pl

Recenzent

dr hab. inż. Bronisław Drak, prof. Pol. Śl.