

Wpływ modernizacji wentylatorów osiowych z tylnymi łopatkami kierowniczymi na wzrost mocy znamionowej generatorów typu TWW-230

Streszczenie W artykule przedstawiono zakres modernizacji wentylatorów osiowych do generatorów typu TWW-230 z tylnymi łopatkami kierowniczymi w osłonach. Na wybranych przykładach zastosowań zaprezentowano wyniki obliczeń cieplnych zweryfikowanych pomiarami generatora typu TWW-230 przed i po modernizacji wentylatorów oraz określono wpływ modernizacji wentylatorów z tylnymi łopatkami kierowniczymi na wzrost mocy znamionowej generatora.

Abstract This article presents the scope of axial-flow fans modernization with back guide blades in shields for the generators type TWW-230. Based on the selected examples of applications, there are presented results of thermal calculations that were verified by measurements of the generator type TWW-230, before and after the fan modernization. Additionally there are described the influence of fan modernization with back guide blades on the increase of generator rated power. *Axial-flow fans modernization with back guide blades in shields for the generators type TWW-230*

Słowa kluczowe: generator, wentylator osiowy z tylnymi łopatkami kierowniczymi w osłonach

Keywords: generator, axial-flow fan with back guide blades in shields

doi:10.12915/pe.2014.01.59

Wstęp

Generatory typu TWW-200-2(A) o mocy 200 MW po modernizacji mającej na celu podwyższenie mocy do 230 MW oznaczono symbolem TWW-230. Zwiększanie mocy znamionowej generatorów wymusza między innymi intensyfikację chłodzenia. W generatorach TWW-230 do chłodzenia elementów aktywnych (uzwojenia wzbudzenia oraz uzwojenia i rdzenia stojana) stosowane są wentylatory osiowe ssące współpracujące z osłonami bezłopatkowymi. Czynnikiem chłodzącym w tych generatorach jest wodór pod ciśnieniem 3 at.

W 2004 roku „Energoserwis” S.A. Lubliniec (obecnie TurboCare Poland S.A.) podjął prace projektowo-badawcze, przy współpracy z Politechniką Śląską, nad nową konstrukcją wentylatorów osiowych do tego typu generatorów. Nowe wentylatory zaprojektowano z łopatkami nastawnymi, pracującymi w układzie ssącym, które następnie poddano badaniom w skali modelowej na stano-wisku pomiarowym. Zmodernizowana konstrukcja wentyla-torów osiowych została wdrożona do produkcji w 2007 roku.

W następnym roku dokonano dalszej modernizacji konstrukcji wentylatora i zaprojektowano łopatki kierownicze usytuowane w osłonach wentylatorów generatora TWW-230. Po wykonaniu wentylatora z łopatkami kierowniczymi w skali modelowej przeprowadzono badania przepływowe na stanowisku pomiarowym.

Pozytywne wyniki badań na każdym etapie realizacji projektu skłoniły do zgłoszenia nowej konstrukcji wentylatorów osiowych z tylnymi łopatkami kierowniczymi do ochrony patentowej w Urzędzie Patentowym RP.

W pierwszej połowie 2013 roku dokonano pierwszego wdrożenia wentylatora osiowego z tylnymi łopatkami kierowniczymi służącego do chłodzenia generatora TWW-230.

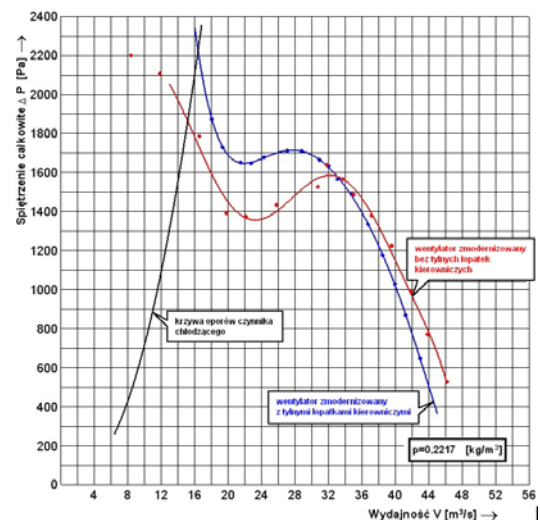
W niniejszym artykule przedstawiono wyniki obliczeń cieplnych zweryfikowanych na bazie pomiarów cieplnych generatora TWW-230 przed i po modernizacji wentylatorów oraz określono wpływ modernizacji wentylatorów z tylnymi łopatkami kierowniczymi na wzrost mocy znamionowej generatora.

Konstrukcja nowych wentylatorów z tylnymi łopatkami kierowniczymi

W generatorach TWW-230 czynnik chłodzący napływa na wentylator ze szczeliny pomiędzy wirnikiem, a stojanem generatora oraz ze strefy połączeń czołowych stojana, a następnie kierowany jest przez osłonę wentylatora oraz

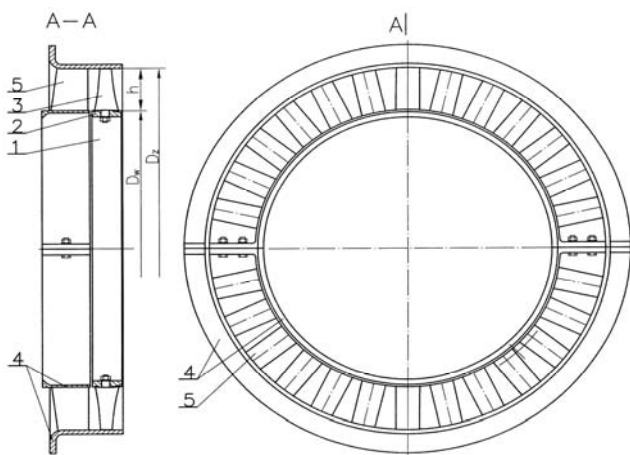
poprzez kanały w korpusie generatora do chłodnic, gdzie po ochłodzeniu przepływa do rdzenia stojana i wirnika generatora.

Przetłaczany czynnik wpływający z osłony wentylatora osiowego ma pewną energię kinetyczną, która stanowi stratę wylotową wentylatora. Energia ta może być zamieniona na ciśnienie statyczne, a przez to zwiększyć ciśnienie całkowite wytwarzane przez wentylator. Zamiana energii kinetycznej czynnika chłodzącego wpływającego z osłony wentylatora na energię statyczną (ciśnienie) jest możliwa poprzez zastosowanie w osłonie odpowiednio wyprofilowanych łopatek kierowniczych usytuowanych bezpośrednio za łopatkami wirnika wentylatora. Na rys. 1 przedstawiono charakterystyki wentylatora zmodernizowanego bez tylnych łopatek kierowniczych w osłonach oraz z tylnymi łopatkami kierowniczymi i ich punkty pracy.

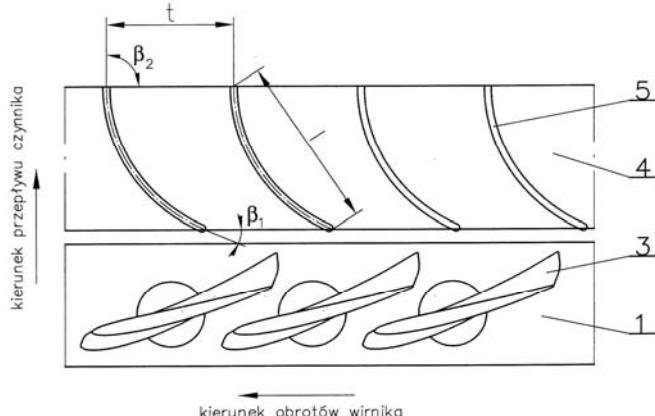


Rys. 1. Charakterystyki pracy zmodernizowanego wentylatora z tylnymi łopatkami kierowniczymi i bez łopatek kierowniczych

Konstrukcję wentylatora osiowego z tylnymi łopatkami kierowniczymi usytuowanymi w osłonie wirnika przedstawiono na rysunkach 2 i 3 gdzie wirnik wentylatora osiowego (1), składa się z piasty (2) i łopatek (3) oraz tylnych łopatek kierowniczych (5) umieszczonych w osłonie wentylatora (4).



Rys. 2. Konstrukcja osłony wentylatora osiowego z wirnikiem osiowym i tylnymi łopatkami kierowniczymi w widoku z przodu oraz przekroju wzdłużnym



Rys. 3. Rozwinięcie palisad łopatek wirnika wentylatora i łopatek kierowniczych

Badania modelowe wykonane na Politechnice Śląskiej w Gliwicach przeprowadzono dla różnych wersji wentylatora oryginalnego i zmodernizowanego. W tabeli 1 zestawiono parametry punktów pracy tych wentylatorów.

Tabela 1. Parametry punktu pracy wentylatora oryginalnego i zmodernizowanego z tylnymi łopatkami kierowniczymi oraz bez łopatek kierowniczych.

Typ wirnika wentylatora	Wydajność wentylatora	Śpiżnienie całkowite wentylatora
	m ³ /s	Pa
zmodernizowany z tylnymi łopatkami kierowniczymi	16,45	2230
zmodernizowany bez tylnych łopatek kierowniczych	15,4	1840
oryginalny z tylnymi łopatkami kierowniczymi	14,85	1790
oryginalny bez tylnych łopatek kierowniczych	13,3	1425

Określenie możliwości zwiększenia mocy zmodernizowanego generatora TWW-230/dw (generator z nowymi wentylatorami bez tylnych łopatek kierowniczych)

Najbardziej wykorzystanym pod względem cieplnym elementem aktywnym rozpatrywanego generatora jest uzwojenie wzbudzenia. Nagrzewanie zatem tego elementu

limituje maksymalną dopuszczalną moc czynną wydawaną przez generator do sieci przy znamionowym współczynniku mocy $\cos\phi_n=0,85$ indukcyjny.

Wykorzystując sporządzoną sieć cieplną dla uzwojenia wzbudzenia zmodernizowanego generatora wykonano obliczenia cieplne celem których było wyznaczenie maksymalnego dopuszczalnego prądu wzbudzenia, przy którym średni przyrost temperatury uzwojenia wzbudzenia ma wartość dopuszczalną (70 K).

Wykorzystując sporządzony model elektromagnetyczny generatora obliczono odpowiadającą jego pracy przy maksymalnym dopuszczalnym prądzie wzbudzenia $I_{fd}=2760$ A i znamionowym współczynniku mocy $\cos\phi_n=0,85$ ind.:

maksymalną dopuszczalną moc czynną $P_d=245$ MW, maksymalny dopuszczalny prąd stojana $I_d=10523$ A.

Za pomocą utworzonej sieci cieplnej obliczono rozkład przyrostu temperatury w prętach uzwojenia stojana w dopuszczalnym stanie pracy zmodernizowanego generatora limitowanym pełnym wykorzystaniem cieplnym uzwojenia wzbudzenia. Obliczony maksymalny przyrost temperatury uzwojenia stojana zmodernizowanego generatora przy maksymalnym dopuszczalnym prądzie stojana $I_d=10523$ A wynosi 36,4 K, a zatem jest o 12,6 K mniejszy od dopuszczanego przez wytwórcę (49 K).

Obliczony maksymalny przyrost temperatury rdzenia stojana zmodernizowanego generatora dla maksymalnego dopuszczalnego prądu stojana $I_d=10523$ A wynosi 50,5 K, a zatem jest mniejszy o 4,5 K od dopuszczanego przez wytwórcę (55 K).

Reasumując, zmodernizowany generator TWW - 230/dw z nowymi wentylatorami wirnika bez tylnych łopatek kierowniczych może pracować przy maksymalnej dopuszczalnej mocy czynnej $P_d=245$ MW i $\cos\phi_n=0,85$. Z wykonanych obliczeń cieplnych wynika, że w tym stanie pracy generatora średni przyrost temperatury uzwojenia wzbudzenia jest dokładnie równy dopuszczanemu przez wytwórcę i wynosi 70 K, zaś maksymalne przyrosty temperatury zarówno uzwojenia, jak i rdzenia stojana są mniejsze od dopuszczalnych.

Obliczenia cieplne zmodernizowanego generatora TWW-230 z nowymi wentylatorami oraz tylnymi łopatkami kierowniczymi oznaczonego TWW-240-2/mP przy obciążeniu mocą 255 MW i znamionowym współczynniku mocy.

Wykorzystując sporządzony model elektromagnetyczny wyznaczono wartości podstawowych parametrów elektrycznych przy obciążeniu rozpatrywanego generatora mocą czynną $P=255$ MW i znamionowym współczynniku mocy $\cos\phi_n=0,85$ ind., które wynoszą odpowiednio:

prąd stojana $I=11000$ A,
prąd wzbudzenia $I_f=2900$ A.

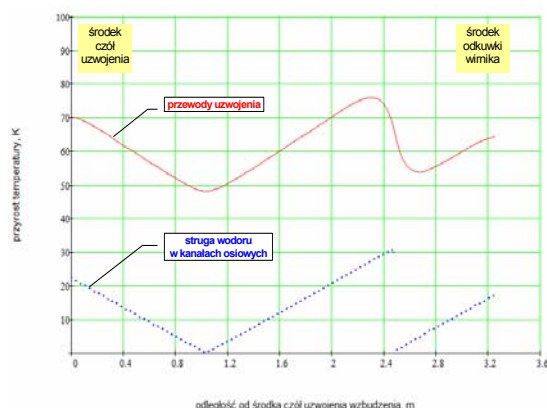
Za pomocą opracowanego programu komputerowego obliczono pole temperatury w uzwojeniu wzbudzenia w rozpatrywanym stanie pracy generatora. Na rys. 4 przykładowo zamieszczono obliczony rozkład przyrostu temperatury w przewodach zewnętrznej cewki uzwojenia wzbudzenia przy prądzie wzbudzenia $I_f=2900$ A.

Obliczone przyrosty temperatury w rozpatrywanym stanie pracy generatora wynoszą odpowiednio:

- średni uzwojenia wzbudzenia – 60,5 K,
- maksymalny uzwojenia wzbudzenia – 75,9 K,
- maksymalny wodoru na wylotach z kanałów wentylacyjnych uzwojenia wzbudzenia – 31,1 K.

Norma określa dopuszczalny średni przyrost temperatury uzwojenia wzbudzenia, który przy zastosowanej klasie ciepłoodporności układu izolacyjnego oraz liczbie stref wylotowych w wirniku generatora wynosi 70 K. Obliczony średni przyrost temperatury uzwojenia

wzbudzenia przy obciążeniu generatora mocą czynną $P=255$ MW i znamionowym współczynniku mocy $\cos\varphi_n=0,85$ ind. wynosi 60,5 K, a zatem jest o 9,5 K mniejszy od dopuszczalnego.



Rys.4. Rozkład przyrostu temperatury wzdłuż długości przewodów zewnetrznej cewki uzwojenia wzbudzenia oraz w strugach wodoru chłodzącego zmodernizowanego generatora TWW-240-2/mP przy obciążeniu mocą $P=255$ MW i $\cos\varphi_n=0,85$ ind. ($I=11000$ A, $I_t=2900$ A)

Wykorzystując wykonany program komputerowy obliczono rozkład przyrostu temperatury w prętach uzwojeniu stojana przy obciążeniu generatora mocą czynną podwyższoną do $P=255$ MW i znamionowym współczynniku mocy $\cos\varphi_n=0,85$ indukcyjny. Odpowiadający tym warunkom pracy generatora prąd stojana wynosi $I=11000$ A.

Dopuszczalna temperatura uzwojenia stojana zmodernizowanego generatora i chłodzącego je destylatu podana przez wytwórcę wynosi 85°C , co przy dopuszczalnej temperaturze zimnego destylatu 36°C oznacza, że dopuszczalny przyrost temperatury zarówno uzwojenia stojana, jak i destylatu wynosi 49 K. Obliczone przyrosty temperatury uzwojenia stojana zmodernizowanego generatora przy obciążeniu mocą $P=255$ MW i znamionowym współczynniku mocy $\cos\varphi_n=0,85$ ind. wynoszą odpowiednio:

- maksymalny przewodów elementarnych pełnych – 36,5 K,
- maksymalny przewodów elementarnych drążonych – 31,7 K,
- maksymalny destylatu na wylotach z prętów – 30,8 K.

Obliczony maksymalny przyrost temperatury uzwojenia stojana generatora (równy przyrostowi temperatury przewodów pełnych na wypływie destylatu z prętów) w rozpatrywanym stanie pracy generatora wynosi 36,5 K, a zatem jest o 12,5 K mniejszy od dopuszczalnego (49 K). Maksymalny przyrost temperatury destylatu na wypływie z prętów wynosi 30,8 K i jest o 18,2 K mniejszy od dopuszczalnego (49 K).

Dopuszczalna temperatura rdzenia stojana zmodernizowanego generatora podana przez wytwórcę wynosi 95°C , co przy dopuszczalnej temperaturze zimnego wodoru 40°C oznacza, że dopuszczalny przyrost temperatury rdzenia wynosi 55 K.

Obliczono również maksymalny przyrost temperatury rdzenia stojana w rozpatrywanym stanie pracy generatora przy obciążeniu generatora mocą $P=255$ MW i znamionowym współczynniku mocy $\cos\varphi_n=0,85$ indukcyjny, który wynosi 13,5 K, a zatem jest o 41,5 K mniejszy od dopuszczalnego (55 K). Maksymalny przyrost temperatury rdzenia stojana zmodernizowanego generatora

w rozpatrywanym stanie pracy generatora jest z bardzo dużym zapasem mniejszy od dopuszczalnego, co jest spowodowane znacznym wzrostem prędkości wodoru w kanałach radialnych rdzenia, uzyskany w wyniku zamiany wentylatorów oryginalnych na nowe z tylnymi łopatkami kierowniczymi o znacznie większej wydajności.

Podsumowanie

W tabelach 2 oraz 3 porównano obliczone i dopuszczalne przyrosty temperatury poszczególnych elementów aktywnych zmodernizowanego generatora TWW-230/dw i TWW-240-2/mP oraz podano zapas, stanowiący różnicę tych wielkości. Rozpatrywane generatory różnią się konstrukcją wentylatorów. W obydwu generatorach zastosowano nowe wentylatory zaprojektowane w TurboCare Poland S.A. z tą jednak różnicą, że w generatorze TWW-230/dw nie zastosowano tylnych łopatek kierowniczych, zaś w generatorze TWW-240-2/mP zastosowano tego typu łopatki zwiększające dodatkowo wydajność wentylatorów.

Tabela 2 Porównanie obliczonych i dopuszczalnych przyrostów temperatury elementów aktywnych zmodernizowanego generatora TWW-230/dw z nowymi wentylatorami wirnika bez tylnych łopatek kierowniczych obciążonego mocą $P=245$ MW przy $\cos\varphi_n=0,85$ ind.

przyrost temperatury	obliczony K	dopuszczalny K	zapas K
średni uzwojenia wzbudzenia	70,0	70	0
maksymalny uzwojenia stojana	36,4	49	12,6
maksymalny rdzenia stojana	50,5	55	4,5

Tabela 3 Porównanie obliczonych i dopuszczalnych przyrostów temperatury elementów aktywnych zmodernizowanego generatora TWW-240-2/mP z nowymi wentylatorami wirnika z tylnymi łopatkami kierowniczymi obciążonego mocą $P=255$ MW przy $\cos\varphi_n=0,85$ ind.

przyrost temperatury	obliczony K	dopuszczalny K	zapas K
średni uzwojenia wzbudzenia	60,5	70	9,5
maksymalny uzwojenia stojana	36,5	49	12,5
maksymalny rdzenia stojana	13,5	55	41,5

Z porównania obliczonych i dopuszczalnych przyrostów temperatury elementów aktywnych generatora TWW-230/dw wynika, że przy obciążeniu mocą $P=245$ MW i znamionowym współczynniku mocy $\cos\varphi_n=0,85$ ind. uzwojenie wzbudzenia jest w pełni wykorzystane cieplnie - jego średni przyrost temperatury jest równy dopuszczalnemu i wynosi 70 K, zaś pozostałe elementy aktywne nie są w pełni wykorzystane pod względem cieplnym. Wykorzystanie pod względem cieplnym uzwojenia wzbudzenia limituje zatem maksymalną moc czynną wydawaną przez generator przy znamionowym współczynniku mocy. Biorąc pod uwagę wyniki weryfikacji pomiarowej (maksymalny błąd odwzorowania przyrostu temperatury w zmodernizowanym generatorze przez utworzone modele cieplne wynosi 6,5 K) należy

bezpiecznie obniżyć wartość maksymalnej dopuszczalnej mocy wytwarzanej przez generator do $P=240$ MW przy znamionowym współczynniku mocy $\cos\varphi_n=0,85$ indukcyjny.

Z porównania obliczonych i dopuszczalnych przyrostów temperatury elementów aktywnych generatora TWW-240-2/mP wynika, że przy obciążeniu mocą $P=255$ MW i znamionowym współczynniku mocy $\cos\varphi_n=0,85$ ind. obliczone przyrosty temperatury elementów aktywnych są z bezpiecznym zapasem mniejsze od dopuszczalnych. Uzyskane zapasy przyrostu temperatury w elementach aktywnych generatora uznano za bezpieczne, ponieważ są one większe od błędu odwzorowania przyrostu temperatury przez modele, który jak wynika z przeprowadzonej weryfikacji pomiarowej modeli wynosi 6,5 K. Biorąc zatem pod uwagę uzyskane wyniki obliczeń cieplnych można stwierdzić, że zmodernizowany generator może wydawać do sieci moc $P=255$ MW przy znamionowym współczynniku mocy $\cos\varphi_n=0,85$ indukcyjny bez przekroczenia dopuszczalnych przyrostów temperatury elementów aktywnych.

Reasumując, wyposażenie zmodernizowanych wentylatorów dodatkowo w tylne łopatki kierownicze znacznie poprawia chłodzenie elementów aktywnych generatora, umożliwiając w konsekwencji podwyższenie jego mocy do $P=255$ MW (nie biorąc pod uwagę innych ograniczeń) przy znamionowym współczynniku mocy $\cos\varphi_n=0,85$ indukcyjny i zachowaniu bezpiecznego zapasu przyrostu temperatury w odniesieniu do dopuszczalnego we wszystkich elementach aktywnych generatora. W porównaniu zatem do zmodernizowanego generatora z nowymi wentylatorami wirnika bez tylnych łopatek kierowniczych maksymalna wytwarzana przez generator moc czynna przy znamionowym współczynniku mocy wzrosła aż o 10 MW.

LITERATURA

- [1] B. Eck: Ventilatoren. Springer – Verlag, Berlin 1972.
- [2] B. Eckert : Śrężarki osiowe i promieniowe – PWT, Warszawa 1959.

- [3] W. Bohl : Axialventilatoren. Berechnung und Entwurf von Ventilatoren. (im Buch „ Ventilatoren“. L. Bommers /J.Fricke/ K. Klaes (Hrsg.) Vulkan-Verlag, Essen –1994).
- [4] Carolus T.: „Ventilatoren. Aerodynamischer Entwurf, Konstruktion“. B.G, Teubner Verlag. Wiesbaden 2003.
- [5] W. Partyka, J. Mukosiej, J. Kosk, J. Szczypior, D. Skupieńska, S. Klimek - Politechnika Warszawska „Obliczenia wentylacyjne turbogeneratora TWW-230”. Praca niepublikowana, (opracowanie wykonane na zlecenie „ENERGOSERWIS” S.A Lubliniec) grudzień 1998 r.
- [6] S. Sieradzki, E. Prysok, J. Otte, J. Dziuba, J. Adamek. „Modernizacja wentylatorów do generatorów dużej mocy”. XV Konferencja Energetyki, Ryn 2007.
- [7] S. Sieradzki, E. Prysok, J. Otte, J. Dziuba, J. Adamek: „Badania optymalizacyjne osiowych wirników wentylatorów do generatorów dużej mocy” – Pol. Śl. „ VII Międzynarodowa Konferencja : Wentylatory i pompy przemysłowe”. Gliwice 2007.
- [8] S. Sieradzki, E. Prysok, J. Otte, J. Dziuba, J. Adamek „Nowa konstrukcja wentylatorów do generatorów dużej mocy”. Energetyka , wrzesień 2008.
- [9] S. Sieradzki, E. Prysok, J. Otte, J. Dziuba, J. Adamek. „Wentylator osiowy z tylnymi łopatkami kierowniczymi do generatorów. Energetyka”, wrzesień 2009.
- [10] R. Krok: „Sieci cieplne w modelowaniu pola temperatury w maszynach elektrycznych prądu przemennego”, Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.
- [11] R. Krok, M. Pasko: „Modernizacje turbogeneratorów zmniejszające koszty wytwarzania energii elektrycznej”, Przegląd Elektrotechniczny, R.88, NR 7a/2012.

Autorzy: inż. Jan Adamek, Turbocare Poland S.A. Lubliniec ul. Powstańców Śląskich 85, 42-701 Lubliniec, E-mail: Jan.adamek@turbocare.pl; dr hab. inż. Roman Krok, Politechnika Śląska w Gliwicach, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice; E-mail: roman.krok@polsl.pl; dr inż. Eugeniusz Prysok Politechnika Śląska w Gliwicach, ul. S.Konarskiego18, 44-100 Gliwice; E-mail: eugeniusz.p1@op.pl; dr inż. Damian Kardas, Turbocare Poland S.A. Lubliniec ul. Powstańców Śląskich 85, 42-701 Lubliniec, E-mail: damian.kardas@turbocare.pl; dr inż. Rafał Maniara, Turbocare Poland S.A. Lubliniec ul. Powstańców Śląskich 85, 42-701 Lubliniec, E-mail: rafal.maniara@turbocare.pl.