

Modernizacje turbogeneratorów serii TWW realizowane przez EthosEnergy Poland S.A.

Streszczenie. W eksploatacji turbogeneratorów zachodzi szereg zjawisk fizycznych prowadzących do pogarszania ich stanu technicznego (np. procesy starzeniowe i zmęczeniowe materiałów konstrukcyjnych) i w efekcie zwiększania ryzyka eksploatacyjnego, które są szczególnie nasilone w okresie eksploatacji zaawansowanej, gdy turbogenerator zbliża się do końca zaprojektowanego czasu życia. Aby turbogenerator mógł dalej spełniać aktualne wysokie wymagania eksploatacyjne, rozwiązaniem może być jego modernizacja. W artykule zaprezentowano wybrane zagadnienia techniczne z zakresu modernizacji turbogeneratorów serii TWW (z chłodzeniem wodorowo-wodnym, np. TWW-200-2, TWW-200-2A, TWW-320-2Y3, TWW-500-2), wdrożone przez EthosEnergy Poland S.A. w turbogeneratorach eksploatowanych w Polsce i za granicą. Modernizacja turbogeneratorów serii TWW jest sprawą istotną, gdyż stanowią one podstawowe jednostki wytwórcze nie tylko polskiego systemu elektroenergetycznego. W artykule przedstawiono udoskonalenia modernizacyjne wybranych węzłów konstrukcyjnych, które umożliwiają podwyższenie mocy znamionowej i wydajności turbogeneratorów, zwiększenie ich trwałości i niezawodności eksploatacyjnej, jak również znaczącą poprawę poziomu ich bezpieczeństwa eksploatacyjnego. Przedstawione zmiany modernizacyjne zostały opracowane w oparciu o liczne analizy, optymalizacje techniczne i dotyczą całego turbogeneratora, tj. jego stojana, wirnika, systemu chłodzenia jak również innych strategicznych komponentów. Wszystkie prezentowane rozwiązania charakteryzują się zastosowaniem wysokiej jakości nowoczesnych materiałów. Wyniki badań i pomiarów zmodernizowanych turbogeneratorów w eksploatacji potwierdziły poprawność i słuszność przyjętych założeń konstrukcyjnych.

Abstract. Operational phenomena occurring in turbogenerators like deteriorations, ageing and fatigue processes increase operational risk, especially when turbogenerators approach their expected life-time, then an upgrade/modernization of the turbogenerators may become necessary in order to meet the nowadays operational requirements. The paper presents some selected technical designs used in modernized TWW-series turbogenerators (with hydrogen-water cooling, on the example of turbogenerators type TWW-200-2, TWW-200-2A, TWW-320-2Y3, TWW-500-2), successfully implemented by EthosEnergy Poland S.A. in many turbogenerators operated in Poland and abroad. Modernization of TWW-series turbogenerators is important subject, because the turbogenerators are fundamental power units in electric power systems in Poland and some other countries. The paper presents some modernizing improvements of selected designing and constructional areas, which enable to upgrade the turbogenerator nominal power, to rise its operational efficiency, reliability, safety and extend the turbogenerator life-time. The presented modernizing solutions and modifications were developed based on extensive engineering analyses and optimizations and they are applicable to the whole turbogenerator, i.e. its stator, rotor, cooling/ventilation system as well as other strategic components. All the solutions are characterized by application of high-quality modern materials. Tests and diagnostics results of the modernized turbogenerators in operation have confirmed the correctness and accuracy of the predicted modernizing expectations. **(Modernizations of TWW-series turbogenerators implemented by EthosEnergy Poland S.A.)**

Słowa kluczowe: turbogenerator TWW, modernizacja, podwyższenie mocy, nowe rozwiązania konstrukcyjne, stojan, wirnik

Keywords: TWW turbogenerator, modernization, power upgrade, new designing solutions, stator, rotor

Wprowadzenie

Turbogeneratory serii TWW były produkowane od lat 60-tych ubiegłego wieku przez Elektrosiłę (Rosja). Producentem turbogeneratora TWW-200-2 na licencji Elektrosiły był również Dörmel (Polska).

Pierwszym produkowanym turbogeneratorem serii TWW był TWW-200-2 o mocy 200 MW, który został przez Elektrosilę zmodernizowany i oznaczony TWW-200-2A. Kolejnymi turbogeneratorami tej serii były TWW-320-2 o mocy 310 MW i TWW-500-2 o mocy 500 MW. Turbogeneratory powyższe są chłodzone wodorem, ich wirniki posiadają bezpośredni zabierakowy system chłodzenia, a uzwojenia stojanów są chłodzone bezpośrednio wodą.

Wieloletnia eksploatacja turbogeneratorów TWW w zmiennych warunkach obciążenia wykazała pewne niedoskonałości niektórych węzłów konstrukcyjnych. Do ich najistotniejszych uszkodzeń eksploatacyjnych należały:

- uszkodzenia elektryczne (spowodowane przepływem prądu, działaniem napięcia pracy, przepięciami),
- uszkodzenia termiczne (spowodowane działaniem nadmiernej temperatury),

- uszkodzenia termo-mechaniczne (spowodowane cyklicznymi zmianami temperatury, np. uzwojeń),
- uszkodzenia mechaniczne (spowodowane działaniem sił elektrodynamicznych i drganiami, np. rdzenia, uzwojeń).

Do najczęstszych uszkodzeń stojanów należało m.in. pękanie górnych belek zawieszenia rdzenia w korpusie, osłabienie poziomu sprasowania rdzenia i związane z tym uszkodzenia (zwarcia) blach zębów pakietów skrajnych, jak również różnego rodzaju uszkodzenia uzwojenia. W wirnikach najwięcej uszkodzeń związanych było z uzwojeniem, kołpakami i pierścieniami ślizgowymi.

Potrzeba podwyższenia generowanej mocy jak również wyeliminowania niedoskonałości niektórych węzłów konstrukcyjnych stanowiły bezpośrednią przyczynę prowadzonych modernizacji turbogeneratorów. Na bazie własnych doświadczeń jak również rozwiązań technicznych opracowanych we współpracy z Westinghouse, Firma EthosEnergy Poland S.A. opracowała, wdrożyła i zweryfikowała w eksploatacji zakres modernizacji turbogeneratorów TWW, który obejmuje m.in. zmiany konstrukcyjne wirnika, uzwojenia stojana, rdzenia stojana wraz z systemem jego prasowania i zawieszenia, korpusu oraz uszczelnień wodorowych.

W części dalszej przedstawiono zmodernizowane rozwiązania wybranych węzłów konstrukcyjnych, które mają zastosowanie we wszystkich turbogeneratorach serii TWW.

Modernizacja wirników turbogeneratorów

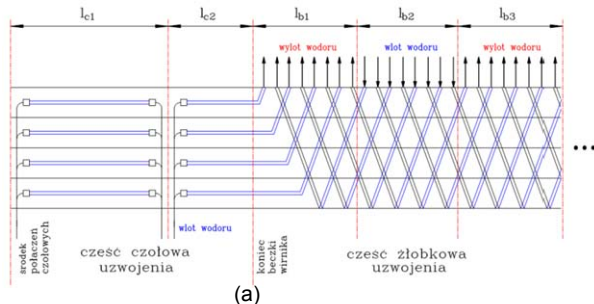
W turbogeneratorach serii TWW elementami najbardziej obciążonymi cieplnie są ich wirniki. W celu podwyższenia mocy znamionowej tych turbogeneratorów konieczna jest modernizacja ich wirników (przede wszystkim uzwojeń). Modernizacja generalnie polega na zwiększeniu liczby zwojów uzwojenia wzbudzenia zachowując zabierakowy system chłodzenia lub zmieniając go na system osiowo-promieniowy. Obie wersje modernizacyjne zaprezentowano w części dalszej.

Modernizacja wirnika z zachowaniem zabierakowego systemu chłodzenia

Modernizacja wirnika z zachowaniem zabierakowego systemu chłodzenia (rys.1) polega na zwiększeniu liczby zwojów uzwojenia wzbudzenia poprzez zastąpienie wstawek izolacyjnych na dnie żłobków (rys.2) dodatkowymi profilowanymi prętami miedzianymi oraz zastosowaniu materiałów o wyższej klasie izolacji (F).



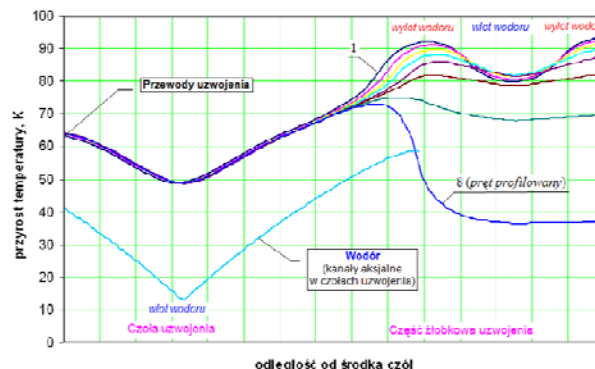
Rys.1. Przykład zmodernizowanego wirnika turbogenerators TWW-200-2 z zabierakowym systemem chłodzenia



Rys.2. Schemat rozmieszczenia kanałów wentylacyjnych w uzwojeniu wzbudzenia z zabierakowym systemem chłodzenia (a) oraz przekrój poprzeczny żłobka wirnika (b)

Schemat rozmieszczenia kanałów wentylacyjnych w uzwojeniu wzbudzenia z zabierakowym systemem

chłodzenia zaprezentowano na rysunku 2a. Przekrój poprzeczny żłobka wirnika pokazano na rysunku 2b. Przykład rozkładu przyrostów temperatury na długości prętów uzwojenia wzbudzenia po modernizacji wirnika przedstawiono na rysunku 3.

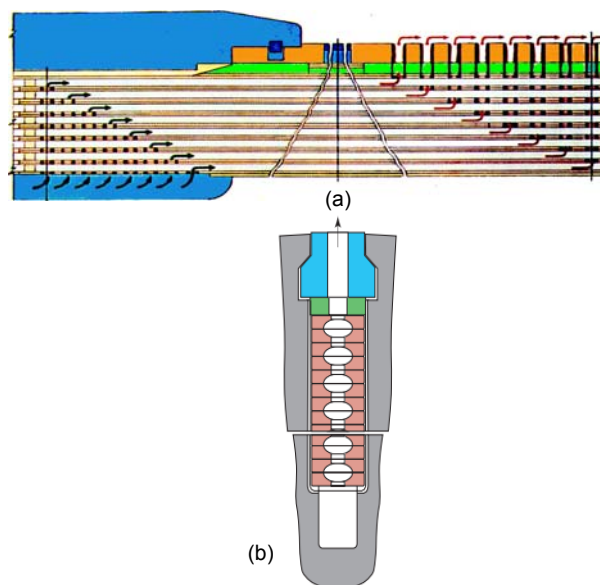


Rys.3. Przykładowy rozkład przyrostów temperatury na długości prętów uzwojenia wzbudzenia z zabierakowym systemem chłodzenia, po modernizacji

Modernizację wirników z zachowaniem zabierakowego systemu chłodzenia zastosowano w turbogeneratorach TWW-200-2, TWW-200-2A, TWW-320-2Y3 i TWW-500-2. Osiągnięty w wyniku modernizacji wzrost mocy tych turbogeneratorów przedstawiono w tabeli 1.



Rys.4. Przykład modernizowanego wirnika turbogenerators TWW-200-2 z osiowo-promieniowym systemem chłodzenia

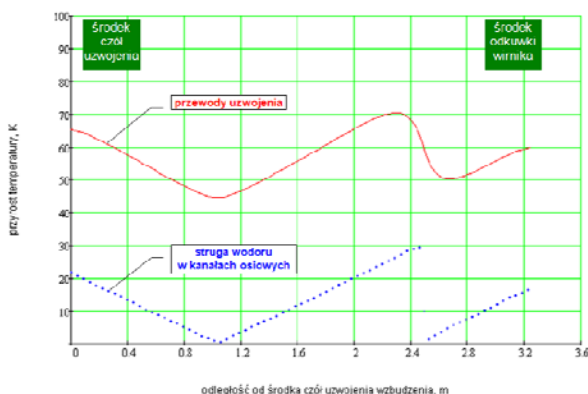


Rys.5. Schemat układu chłodzenia zmodernizowanego wirnika turbogenerators TWW-200-2 w systemie osiowo-promieniowym (a) oraz przekrój poprzeczny żłobka wirnika po modernizacji (b)

Modernizacja wirnika ze zmianą systemu chłodzenia na osiowo-promieniowy

W wersji modernizacyjnej wirnika ze zmienionym systemem chłodzenia (rys.4) uzwojenie wzbudzenia jest chłodzone w układzie osiowo-promieniowym, z sześcioma strefami wentylacyjnymi (rys.5). W rozwiązaniu tym część zimnego gazu opuszczającego chłodnicę kierowana jest do wirnika. Zimny gaz na końcach wirnika jest kierowany kanałami osiowymi pod kołpaki, a następnie rozdzielany na trzy strefy. W pierwszej strefie przepływający gaz chłodzi czoła uzwojeń, natomiast w drugiej i trzeciej - chłodzi część prostą uzwojenia. Otwory wlotowe strefy pierwszej i drugiej znajdują się w części czołowej uzwojenia, a strefy trzeciej - w kanałach wentylacyjnych pod każdą z cewek uzwojenia.

Schemat układu chłodzenia wirnika po zmianie systemu zabierakowego na osiowo-promieniowy zaprezentowano na rys. 5a. Przekrój poprzeczny żłóbka wirnika po modernizacji pokazano na rys. 5b. Rozkład przyrostów temperatury w uzwojeniu wzbudzenia przedstawiono na rysunku 6.



Rys.6. Rozkład przyrostów temperatury na długości prętów uzwojenia wzbudzenia oraz w strugach chłodzącego wodoru zmodernizowanego wirnika turbogeneratora TWW-200-2 z osiowo-promieniowym systemem chłodzenia

Modernizacje wirników ze zmianą zabierakowego systemu chłodzenia na osiowo-promieniowy zastosowano w turbogeneratorach TWW-200-2 i TWW-200-2A. Osiągnięty w wyniku modernizacji wzrost mocy tych turbogeneratorów przedstawiono w tabeli 1.

Modernizacja kołpaków wirnika

Kołpaki wirników są elementami strategicznymi z punktu widzenia bezpieczeństwa eksploatacji nie tylko turbogeneratorów, ale również całych bloków energetycznych. Należą one do głównych elementów odpowiadających za najpoważniejsze eksploatacyjne awarie bloków energetycznych.

Kołpaki są elementami zabezpieczającymi połączenia czołowe uzwojeń wirników przed skutkami oddziaływania sił odśrodkowych i elektrodynamicznych występujących w czasie eksploatacji (tj. chronią przed odkształceniami). Kołpaki są najbardziej mechanicznie wyłożonymi elementami konstrukcyjnymi turbogeneratorów, narażonymi na rozerwanie. W czasie pracy muszą zrównoważyć siły odśrodkowe od ich masy własnej oraz masy połączeń czołowych uzwojenia wirnika wraz z elementami usztywniającymi i izolacyjnymi. Ponadto w kołpakach występują naprężenia spowodowane połączeniami odkształceniowymi, tj. skurczowym osadzeniem ich na beczce wirnika i pierścieniu centrującym (lub oporowym), które działają również w stanie postoju wirnika.

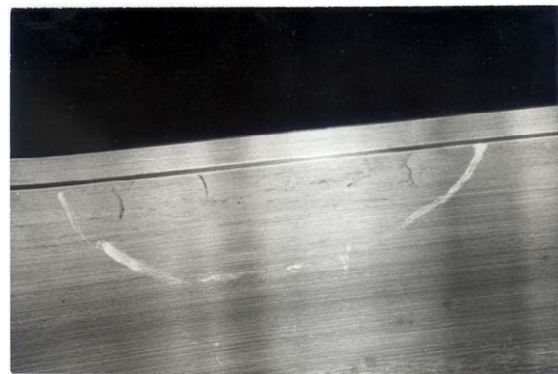
Wirniki turbogeneratorów serii TWW posiadają kołpaki mocowane dwustronnie (TWW-200-2) lub jednostronnie (TWW-200-2A, TWW-320-2Y3, TWW-500-2). W kołpakach mocowanych dwustronnie w czasie eksploatacji występują

dodatkowe naprężenia przemiennie-kierunkowe wynikające z ugięć wału, zwłaszcza w płaszczyźnie biegunów, które powodują między innymi uszkodzenia zębów beczki wirnika. Na rysunku 7 pokazano przykładowe uszkodzenie zębów beczki wirnika, na rysunku 8 – przykładowe uszkodzenie kołpaka.

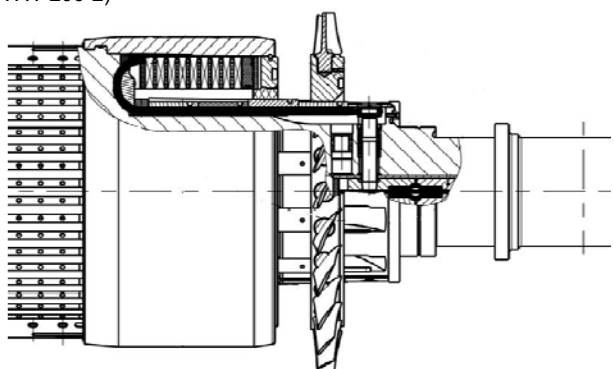
Zmodernizowane kołpaki są konstruowane jako mocowane jednostronnie, z zabezpieczeniem typu bagnetowego (rys.9). W przeszłości kołpaki wykonywano ze stali G18H3 lub G18H5, natomiast obecnie są wykonywane ze stali G18H18 (18Mn18Cr) cechującej się wysoką odpornością na korozję naprężeniową.



Rys.7. Przykład uszkodzenia zębów beczki wirnika w miejscu mocowania kołpaka (turbogenerator TWW-200-2)



Rys.8. Przykład uszkodzenia kołpaka wirnika (turbogenerator TWW-200-2)

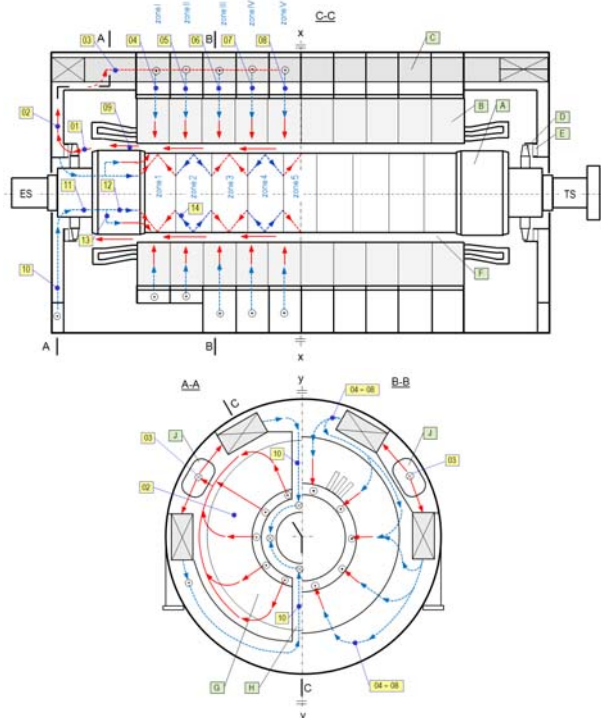


Rys.9. Fragment wirnika TWW-200-2 po modernizacji, z widocznym zamontowanym kołpakiem i wentylatorem

Modernizacja systemu wentylacji turbogeneratorsa

System wentylacji turbogeneratorsa powinien zapewnić równomierne chłodzenie stojana i wirnika, jednak wyniki badań eksploatacyjnych czasami wykazują potrzebę przeprowadzenia modernizacji tego układu. W modernizacji turbogeneratorów serii TWW do optymalizacji układu wentylacyjnego rdzenia stojana oraz wirnika zastosowano trójwymiarową numeryczną analizę mechaniki płynów (CFD)

- computational fluid dynamics). W celu zapewnienia optymalnego chłodzenia, oryginalny prosty układ wentylacyjny został udoskonalony poprzez wprowadzenie zmian konstrukcyjnych wentylatorów i zastosowanie dodatkowych elementów intensyfikujących przepływ. W procesie modernizacji tego układu wykorzystano również badania modelowe, które kalibrowane były w oparciu o wyniki pomiarów ciśnień, temperatur i prędkości przepływu gazu chłodzącego w kanałach wentylacyjnych. Schemat układu wentylacyjno-przepływowego rdzenia stojana i wirnika turbogeneratora TWW-200-2/2A przedstawiono na rysunku 10.



Rys.10. Układ wentylacyjno-przepływowy turbogeneratora TWW-200-2/2A

Modernizacja wentylatorów wirnika

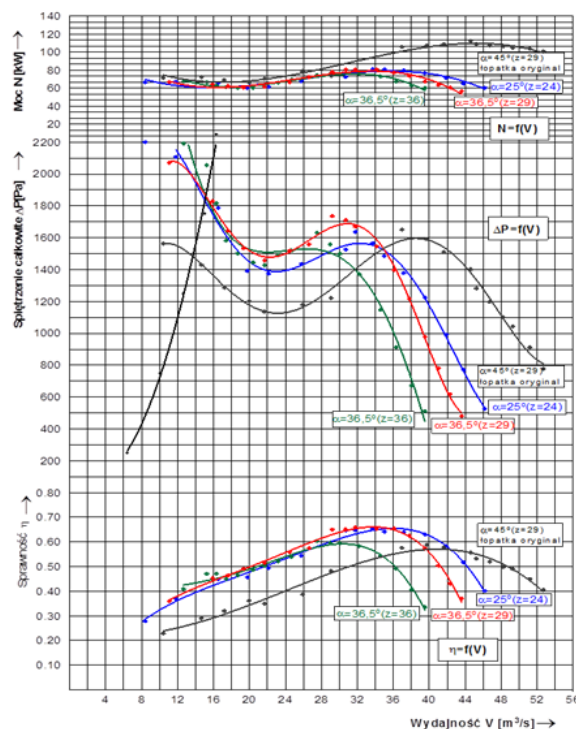
W turbogeneratorach serii TWW jako czynnik chłodzący stosowany jest wodór, który przepływa w obiegu zamkniętym. Przepływ wodoru wewnątrz turbogeneratora jest wymuszany za pomocą wentylatorów wirnika. W turbogeneratorach serii TWW stosowane są wentylatory osiowe ssące (za wyjątkiem turbogeneratora TWW-500-2 z wentylatorami promieniowymi).



Rys.11. Widok nowego wentylatora osiowego wirnika (turbogenerators TWW-200-2A)

Modernizacji poddane zostały wentylatory osiowe wirników turbogeneratorów TWW-200-2, TWW-200-2A

i TWW-320-2Y3 (które są identyczne). Wentylatory oryginalne posiadają łopatki ustawione na stałe, tj. o stałym kącie ich ustawienia w piaście wentylatora. Wentylatory zmodernizowane zaprojektowano jako nastawne, tzn. o zmiennym kącie ustawienia łopatek w piaście wentylatora (rys.11). Nowe wentylatory posiadają łopatki o nowym kształcie, większej powierzchni i innych kątach natarcia w porównaniu do rozwiązania oryginalnego. Nowa konstrukcja wentylatorów wpłynęła na znaczne zwiększenie ich wydajności jak również poprawę pozostałych parametrów, co zaprezentowano na rysunku 12.



Rys.12. Krzywe charakteryzujące nowy wentylator osiowy turbogeneratorów serii TWW, dla różnych kątów ustawienia i liczby łopatek, w porównaniu do wentylatora oryginalnego

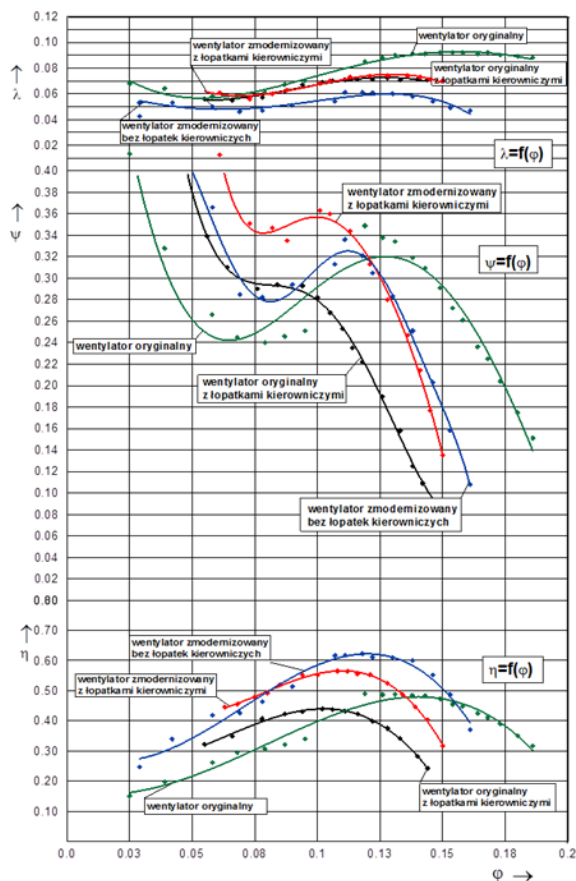


Rys.13. Widok kierownicy z tylnymi łopatkami kierowniczymi (turbogenerators TWW-200-2)

Modernizacja kierownic gazu

Wentylatory osiowe stosowane w wersji oryginalnej turbogeneratorów serii TWW pracują w układzie ssącym i współpracują z bezłopatkowymi kierownicami gazu. Przetłaczany czynnik chłodzący wypływający z takiej kierownicy posiada pewną energię kinetyczną, która stanowi stratę wylotową wentylatora. Poprzez zamianę tejże energii na ciśnienie statyczne można uzyskać zwiększenie ciśnienia całkowitego wytwarzanego przez wentylator.

Zamiana energii kinetycznej czynnika wpływającego z kierownicy na energię statyczną (ciśnienie) jest możliwa poprzez zastosowanie w kierownicy odpowiednio wyprofilowanych łopatek kierowniczych usytuowanych bezpośrednio za łopatkami wentylatora (powstaje wówczas tzw. kierownica z tylnymi łopatkami kierowniczymi). Modernizacje w takim zakresie były przeprowadzone w turbogeneratorach TWW-200-2 (rys.13) i TWW-200-2A. Na rysunku 14 zaprezentowano wyniki badań modelowych wentylatorów z tylnymi łopatkami kierowniczymi.



Rys.14. Krzywe wentylatora modelowego, w wersji zmodernizowanej i oryginalnej, w różnych konfiguracjach pracy (tj. z lub bez tylnych łopatek kierowniczych)

Zestawienie wdrożonych modernizacji wirników turbogeneratorów serii TWW

W turbogeneratorach serii TWW wirniki są elementami najbardziej obciążonymi cieplnie, ograniczającymi moc tych jednostek. Modernizacje turbogeneratorów, a przede wszystkim ich wirników (z wentylatorami i kierownicami) umożliwiają znaczne podwyższenie mocy znamionowej tych maszyn. Dodatkowo wprowadzone modernizacje stojanów (głównie uzwojenia i rdzenia) mają istotny wpływ na obniżenie przyrostów temperatur elementów aktywnych. Efekty wdrożonych modernizacji poszczególnych turbogeneratorów serii TWW zaprezentowano w tabeli 1.

W zależności od stawianych wymagań, w tym mocy znamionowej turbogeneraora po modernizacji, EthosEnergy Poland S.A. proponuje następujące warianty modernizacji ich wirników:

- modernizacja zabierakowego systemu chłodzenia (z dod. zwojem) - wariant umożliwia zwiększenie mocy turbogeneraora o ok. 10%,
- modernizacja zabierakowego systemu chłodzenia (z dod. zwojem) z nowymi wentylatorami - wariant umożliwia zwiększenie mocy turbogeneraora o ok. 15%,
- zmiana zabierakowego systemu chłodzenia na system osiowo-promieniowy (z dod. zwojem) - wariant umożliwia zwiększenie mocy turbogeneraora o ok. 15%,
- zmiana zabierakowego systemu chłodzenia na system osiowo-promieniowy (z dod. zwojem) i nowe wentylatory - wariant umożliwia zwiększenie mocy o ok. 20%.

Zaprezentowane projekty modernizacyjne zostały pozytywnie zweryfikowane w licznych testach fabrycznych i eksploatacyjnych. Można wspomnieć, że EthosEnergy Poland S.A. aktualnie realizuje projekt nowego turbogeneraora GHW 320 o mocy $S_N=320$ MVA, bazując na doświadczeniach zdobytych podczas modernizacji turbogeneratorów serii TWW.

Modernizacja stojanów turbogeneratorów

Stojany turbogeneratorów serii TWW po latach eksploatacji wykazują niedoskonałości niektórych węzłów konstrukcyjnych. W części dalszej przedstawiono kilka rozwiązań technicznych stosowanych w stojanach zarówno modernizowanych jak i nowo produkowanych, które znacznie poprawiają ich własności użytkowe (m.in. ich trwałość, niezawodność, bezawaryjność i bezpieczeństwo eksploatacji).

Tabela 1. Zestawienie wyników wdrożonych modernizacji dla poszczególnych turbogeneratorów serii TWW

Typ turbogeneraora	Przed modernizacją		Po modernizacji			
	Moc [MW]	Wsp. mocy	Moc [MW]	Wsp. mocy	System chłodz. wirnika	Wentylatory
TWW-200-2A	200	0,85	220	0,85	zabierakowy	oryginalne fabr.
	200	0,85	230	0,85	zabierakowy	nowe
TWW-200-2	200	0,85	230	0,85	osiowo-promieniowy	oryginalne fabr.
TWW-200-2A	200	0,85	240	0,85	osiowo-promieniowy	nowe
TWW-320-2Y3	310	0,9	325	0,9	zabierakowy	nowe
TWW-500-2	500	0,85	560	0,85	zabierakowy	oryginalne fabr.

Modernizacja uzwojenia stojana

EthosEnergy Poland S.A. produkuje uzwojenia stojanów (rys.15) w technologii ResinRich. Technologia ta pod względem własności izolacyjnych jest równorzędna technologiom Single VPI i Global VPI. Jej dodatkową zaletą jest możliwość wykonania szybkiej naprawy uzwojenia (wymiany uzwojenia lub pojedynczych jego prętów).

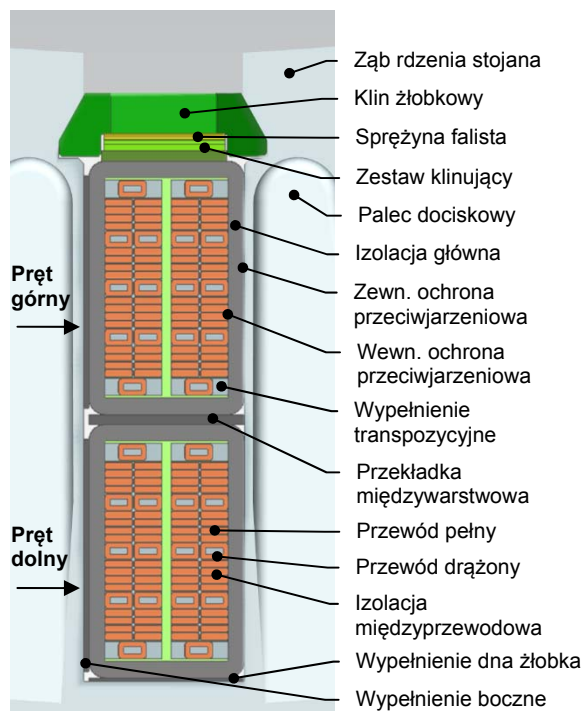
Izolację główną prętów uzwojenia stanowi taśma mikowa na nośniku szklanym, ciągła na całej ich długości, o klasie izolacji F (155°C). Uzwojenie posiada ochronę przeciwjarzeniową wewnętrzną oraz zewnętrzną w części prostej i czołowej.

Na rysunku 16 przedstawiono przykład zoptymalizowanego przekroju poprzecznego prętów uzwojenia w żłobku stojana, po modernizacji. Pręt uzwojenia zbudowany jest z przewodów miedzianych pełnych i drażnionych. Przewody pełne są pokryte emalią elektroizolacyjną i izolacją zewnętrzną z włókna szklano-poliestrowego, natomiast przewody drażnione mogą być izolowane taśmą mikową lub włóknem szklanym impregnowanym żywicą epoksydową.



Rys.15. Przykład uzwojonego stojana turbogeneratorskiego TWW-200-2

W celu zminimalizowania strat dodatkowych, pręty uzwojenia posiadają odpowiednie przepłyty Roebela (360 lub 540 stopni w części żłobkowej). Izolacja przewodów w miejscach transpozycji jest wzmocniona dodatkowymi przekładkami. Na przepłotach Roebela stosowana jest wewnętrzna ochrona przeciwwarzeniowa wykonana z materiału przewodzącego.



Rys.16. Przekrój prętów uzwojenia w żłobku stojana, po modernizacji (turbogenerator TWW-200-2)

Izolacja główna z taśmy mikowej jest nakładana za pomocą automatycznej maszyny izolującej, która umożliwia wykonanie izolacji ciągłej na całej długości prętów w części prostej i czołowej, które następnie są wspólnie prasowane. Pręty posiadają zewnętrzną ochronę przeciwwarzeniową wykonaną z taśmy przewodzącej w części żłobkowej i taśmy półprzewodzącej na częściach czołowych. Taśmy tworzą zewnętrzną powłokę odporną na uszkodzenia.

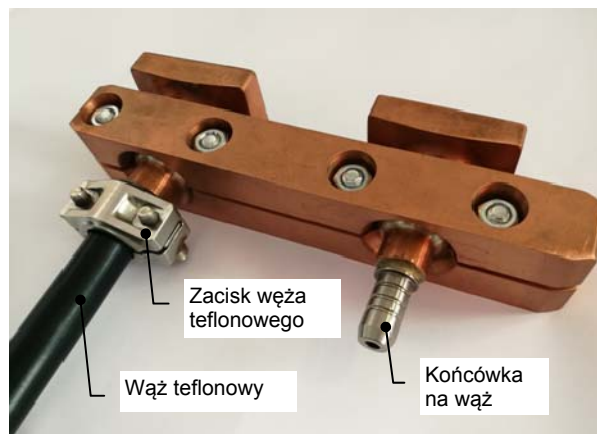
Pręty na końcach są łączone za pomocą łączników z tzw. komorami prądowo-wodnymi. Komora prądowo-wodna jest lutowana indukcyjnie do przewodów pręta spoiwem srebrnym. Po zainstalowaniu prętów w stojanie, ich części czołowe są mocowane do wsporników i pierścieni wsporczych.

Modernizacja połączeń prętów uzwojenia stojana

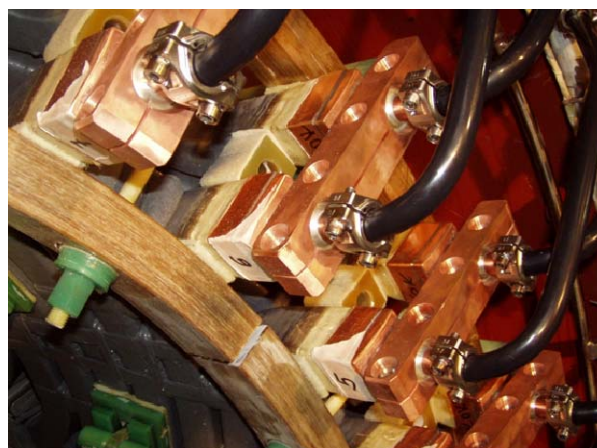
Połączenia prętów uzwojenia stojana (tj. dolnych z górnymi, fazowych z szynami prądowymi) odgrywają ważną rolę w bezawaryjności i niezawodności eksploatacji turbogeneratorów. Połączenia te, oprócz styku prądowego, powinny zapewnić szczelny przepływ wody pomiędzy prętami uzwojenia i kolektorami. W praktyce eksploatacyjnej problemy ze szczelnością nie rzadko stanowią przyczynę awarii.



Rys.17. Przykładowy przekrój końca pręta ze sferyczną nasadką prądową



Rys.18. Widok łącznika sferycznego z zaciskiem na wężyku teflonowym



Rys.19. Widok łączników sferycznych zainstalowanych na połączeniach czołowych uzwojenia stojana

Bardzo dobrym, sprawdzonym rozwiązaniem połączeń prętów są łączniki sferyczne (rys.17, 18, 19) wyposażone w łącznie prądowe i wodne, przeznaczone do turbogeneratorów dużej mocy, stosowane w stojanach zarówno modernizowanych jak i nowo produkowanych.

Łączniki sferyczne mają szereg zalet, m.in.:

- kompaktowa konstrukcja – dzięki zastosowaniu wspólnego połączenia prądowego i wodnego, konstrukcja jest mocna, sztywna, o małych wymiarach,
- szczelność połączenia – zastosowany proces lutowania pionowego zapewnia szczelność połączenia, chroni pręt przed penetracją wody chłodzącej do jego izolacji,
- brak naprężeń montażowych – łączniki sferyczne umożliwiają korygowanie niedokładności montażowych uzwojenia (są indywidualnie obrabiane i dopasowywane do każdego połączenia),
- bardzo dobry styk elektryczny – łącznik sferyczny z posrebrzonymi powierzchniami stykowymi zapewnia bardzo skuteczny, dobrze chłodzony styk elektryczny,
- pewność montażowa – stosowanie łączników sferycznych eliminuje proces lutowania podczas montażu prętów w stojanie (zwiększona niezawodność eksploatacji),
- niezawodne zaciski węzowe – w rozwiązaniu tym występują tylko dwa połączenia węzowe pomiędzy końcem pręta i kolektorem (tj. na każdym końcu węza teflonowego - rys.20).

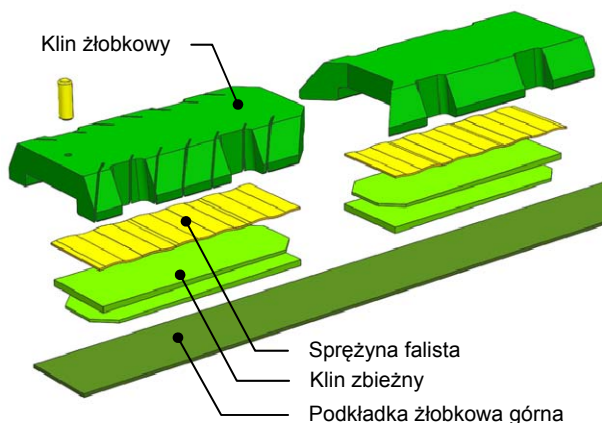


Rys.20. Widok połączeń czołowych uzwojenia stojana z łącznikami sferycznymi, węzami teflonowymi i kolektorem wodnym

Modernizacja systemu klinowania uzwojenia

System klinowania prętów uzwojenia w żłobkach rdzenia stojana ma istotny wpływ na bezawaryjną pracę turbogeneratora. Do jego głównych zadań należy zapewnienie równomiernego nacisku na całej długości prętów w żłobkach oraz eliminowanie luzów powstających podczas eksploatacji.

Zastosowanie rozwiązania z klinami zbieżnymi i izolacyjnymi sprężynami falistymi (rys.21) zapewnia bardzo dobre dopasowanie prętów do powierzchni żłobka w kierunku promieniowym oraz jednocześnie możliwość ich ruchu w kierunku osiowym.



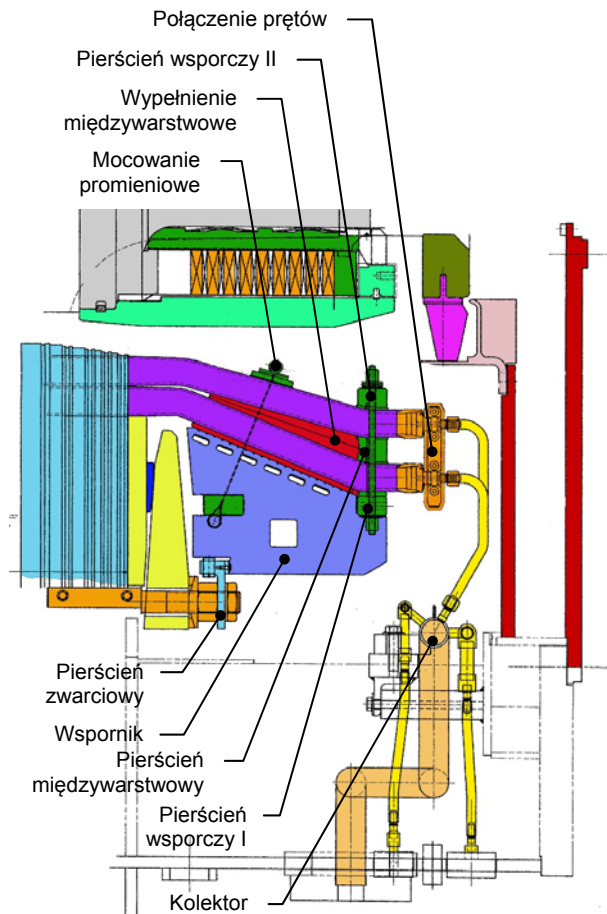
Rys.21. Widok elementów do klinowania prętów uzwojenia w żłobkach rdzenia stojana

Zaprezentowany system klinowania skutecznie zapobiega luzowaniu się elementów w żłobku oraz kompensuje położenie początkowe prętów i ich rozszerzalność cieplną w czasie eksploatacji. Rozwiązanie to znacznie wydłuża okresy czasu pomiędzy przeklinowaniami uzwojenia, a tym samym czas eksploatacji turbogeneratora.

Modernizacja zawieszenia połączeń czołowych

Geometria połączeń czołowych uzwojenia stojana jest zagadnieniem złożonym i wymaga odpowiedniej konstrukcji wsporczej. Konstrukcja ta ma istotny wpływ na prawidłową pracę turbogeneratora, zwłaszcza w stanach awaryjnych.

Na rysunku 22 zaprezentowano system zawieszenia połączeń czołowych stosowany obecnie w nowej linii stojanów produkowanych i modernizowanych przez EthosEnergy Poland S.A. Przedstawiona konstrukcja została opracowana do zastosowań w jednostkach średnich i dużych mocy, które wymagają od zawieszenia odpowiedniej sztywności, zależnie od rodzaju obciążeń. Jest oparta na technologii zapewniającej sztywność promieniową i jednocześnie elastyczność osiową (radial-rigid axial-free). Cechuje się dobrymi własnościami tłumiącymi, co ogranicza poziom drgań maszyny.



Rys.22. Konstrukcja zawieszenia połączeń czołowych uzwojenia stojana (sztywna promieniowo i elastyczna osiowo)

W przedstawionej konstrukcji połączenia czołowe są sztywno zamocowane do wsporników i pierścieni wsporczych. Jako wypełnienie międzywarstwowe stosowane są węże napełniane żywicą epoksydową, które doskonale dopasowują się do geometrii połączeń i po utwardzeniu zapewniają skuteczny element rozporowy.

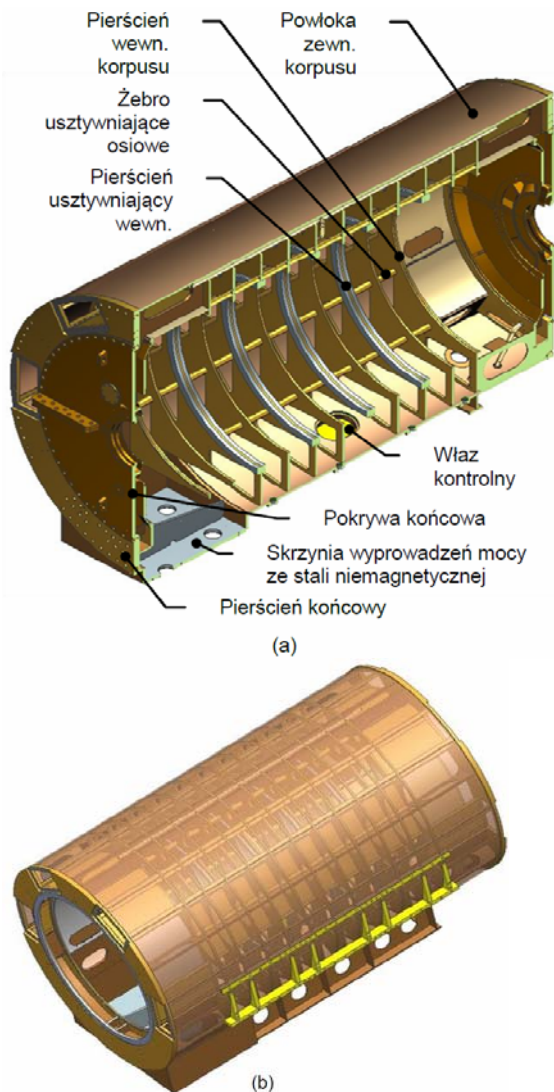
Przedstawiona konstrukcja zapewnia skuteczną konsolidację połączeń czołowych z elementami wsporczymi (powstaje struktura monolityczna), co zapobiega

miejscowym względnym ruchom tych elementów w czasie eksploatacji powodującym ich przyspieszone zużycie. Konstrukcja jest elastyczna w kierunku osiowym celem kompensowania rozszerzalności cieplnej uzwojenia względem rdzenia stojana, a jednocześnie sztywno podtrzymuje obciążenia promieniowe i styczne, które są szczególnie niebezpieczne w stanach zwarcia osiowych.

Do konstrukcji wsporczej po stronie wzbudzenia (rys.23) zamocowane są szyny prądowe, które łączą uzwojenie stojana z izolatorami przepustowymi głównych wyprowadzeń.



Rys.23. Widok elementów zawieszenia połączeń czołowych z zamontowanymi szynami prądowymi, przed montażem w stojanie



Rys.24. Przykładowy widok korpusu, (a) – przekrój, (b) - widok zewnętrzny, po modernizacji (turbogenerator TWW-200-2)

Modernizacja korpusu stojana

Część zewnętrzną stojana turbogenerators stanowi monolityczny korpus (rys.24) wykonany przede wszystkim ze zwinętej blachy zewnętrznej, kołnierzy końcowych, pierścieni i żeber osiowych.

Komponenty korpusu są formowane z materiałów wielkogabarytowych celem ograniczenia do minimum procesu spawania, aby zapewnić konstrukcję odporną ciśnieniowo, bezpieczną pod kątem wybuchowym i gazoszczelności. Korpus zawiera szereg elementów konstrukcyjnych, jak np. do mocowania rdzenia i chłodziń, do montażu uszczelnień wodorowych, do podnoszenia i transportu, zawiera przegrody wentylacyjne, skrzynię wyprowadzeń mocy, stopy montażowe, przepusty wyprowadzeń aparatury pomiarowej, itp.

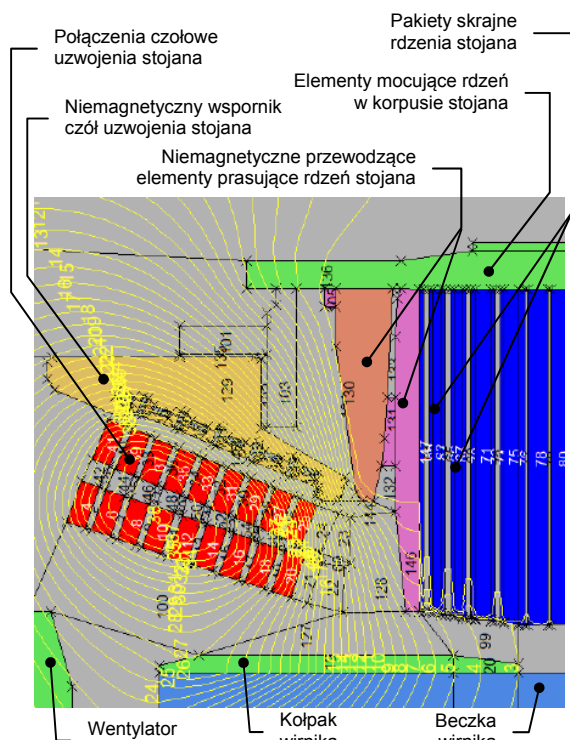
Wytrzymała konstrukcja korpusu stabilnie utrzymuje rdzeń magnetyczny wraz z uzwojeniem zarówno w czasie eksploatacji normalnej jak również w stanach niestabilnych i awaryjnych (zwarcia, wypadnięcie z synchronizmu). Celem ograniczenia dodatkowego nagrzewania, elementy sąsiadujące z wyprowadzeniami mocy są wykonane ze stali niemagnetycznej. Korpus jest tak zaprojektowany, aby maksymalnie ograniczyć transmitancję drgań z i do fundamentów. Korpusy są produkowane w procesach kwalifikowanych, przede wszystkim pod kątem jakości i procedur spawalniczych. EthosEnergy Poland S.A. jest certyfikowanym przez Siemens dostawcą korpusów, w tym do elektrowni jądrowych dla jednostek o mocy do 1200 MW.

Modernizacja rdzenia stojana

Sprawą kluczową dla prawidłowej, bezawaryjnej i długotrwałej pracy turbogenerators jest stopień sprasowania rdzenia stojana. W celu zapewnienia odpowiedniego sprasowania i sztywności rdzenia, jego pakiety w czasie montażu są prasowane ciepłowodacyjnie. Rdzeń zawiera promieniowe kanały wentylacyjne zapewniające skuteczne chłodzenie elementów aktywnych. Do jego budowy stosowane są dwa rodzaje blach elektrotechnicznych, tj. na część główną oraz na pakiety skrajne, pokryte powłoką lakieru elektroizolacyjnego klasy F. Konfiguracja ta stanowi kompromis pomiędzy parametrami magnetycznymi a stratami mocy w rdzeniu.

Ważnym elementem konstrukcji rdzenia stojana są pakiety skrajne blach, których przegrzewanie się podczas eksploatacji nierzadko stanowi przyczynę awarii turbogenerators. Pakiety skrajne są odpowiednio projektowane, by maksymalnie ograniczyć ich dodatkowe nagrzewanie. Należą do elementów strefy skrajnej turbogenerators, na które oddziałuje pole magnetyczne rozproszenia (rys.25). Strumień magnetyczny rozproszenia w tej strefie zawiera dominującą składową osiową, która wnikając prostopadle do powierzchni blach pakietów indukuje w nich dodatkowe prądy wirowe będące przyczyną ich podwyższonego nagrzewania. Na rysunku 26 pokazano przykładowy widok pakietów skrajnych, na rysunku 27 – przykład ich uszkodzeń.

Zmodernizowany stojan jest wyposażony w bezobsługowy system prasowania rdzenia dzięki zastosowaniu sprężystych prasujących płyt końcowych typu Belleville'a (rys.28), które zapewniają stałe siły prasujące rdzeń w czasie eksploatacji. Siły te są rozłożone na powierzchni rdzenia poprzez pierścienie osiowe i palce dociskowe. Prezentowana konstrukcja eliminuje powstawanie luzów między blachami w pakietach rdzenia wskutek zużywania się izolacji blach. Dodatkowo płyta prasująca Belleville'a ekranuje część skrajną rdzenia stojana, osłaniając go przed magnetycznym strumieniem rozproszenia.



Rys.25. Przykładowy rozkład linii ekwipotencjalnych strumienia magnetycznego rozproszenia w obszarze strefy skrajnej turbogeneratora



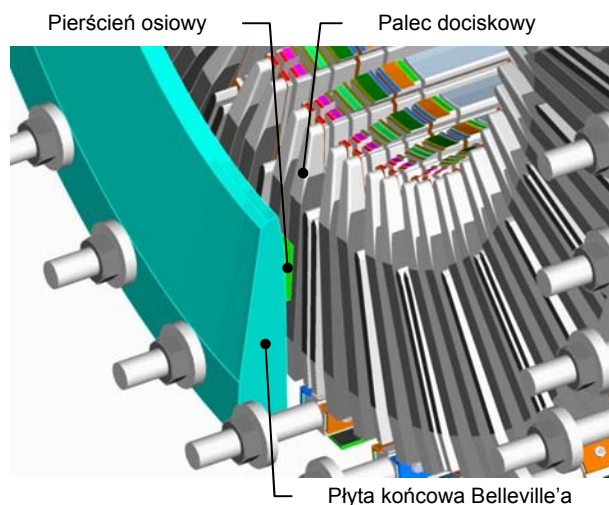
Rys.26. Widok pakietów skrajnych rdzenia stojana po demontażu uzwojenia (turbogenerator TWW-200-2A)



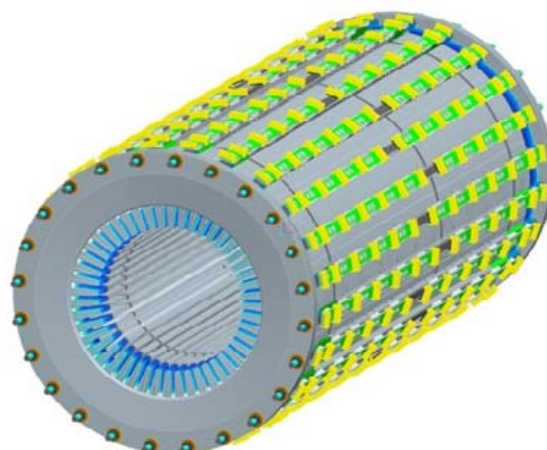
Rys.27. Widok uszkodzonych zębów pakietów skrajnych rdzenia stojana (turbogenerator TWW-200-2A)

Doświadczenia zdobyte w zakresie modernizacji turbogeneratorów serii TWW potwierdzają skuteczność przedstawionego rozwiązania. W rozwiązaniu oryginalnym

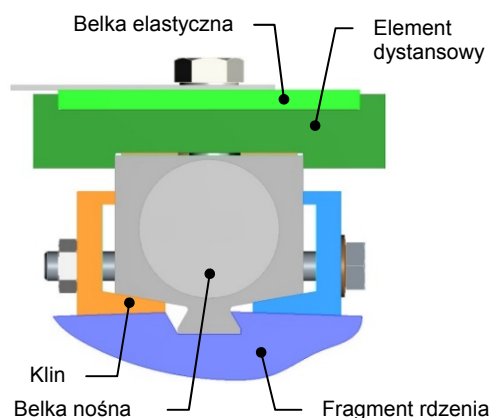
po kilku latach eksploatacji stwierdzano luzowanie się pakietów rdzenia oraz ich podwyższone drgania, co nie występuje po zastosowaniu sprężystych prasujących płyt końcowych Belleville'a.



Rys.28. Widok zmodernizowanego rdzenia stojana ze sprężystą prasującą płytą końcową typu Belleville'a



Rys.29. Widok zmodernizowanego zawieszenia rdzenia stojana w korpusie turbogeneratora, z płytą Belleville'a



Rys.30. Widok elementów zmodernizowanego systemu zawieszenia rdzenia stojana w korpusie turbogeneratora

Modernizacja systemu zawieszenia rdzenia

Zmienne pole magnetyczne wytwarza w stojanie turbogeneratorsa drgania o podwójnej częstotliwości (100 Hz), dając efekt eliptycznej deformacji rdzenia. Zbyt sztywne zawieszenie rdzenia stojana w korpusie turbogeneratorsa prowadzi do pęknięcia belek nośnych i elastycznych oraz tworzenia się luzów pomiędzy rdzeniem i belkami zawieszenia.

Zmodernizowane zawieszenie rdzenia stojana (rys.29) jest tak zaprojektowane, aby maksymalnie ograniczyć transmitancję drgań o częstotliwości 100 Hz na korpus.

Rdzeń jest zamontowany w korpusie za pomocą elementów łączących zapewniających elastyczność całego zawieszenia (rys.30). Na długości rdzenia stosowane są specjalne kliny ograniczające luzy w rowkach trapezowych pomiędzy rdzeniem i belkami nośnymi (na tzw. „jaskółczych ogonach”).

Podsumowanie

W artykule zaprezentowano kilka wybranych rozwiązań węzłów konstrukcyjnych stosowanych w turbogeneratorach modernizowanych jak również nowo produkowanych przez EthosEnergy Poland S.A. Zakres modernizacji każdego turbogeneratorsa uzależniony jest od stawianych wymagań i powinien być rozpatrywany indywidualnie, w zależności od typu maszyny, jej wielkości, konstrukcji, parametrów, stanu technicznego i warunków eksploatacji.

Zastosowanie zmodernizowanych rozwiązań znacząco poprawiło konstrukcję turbogeneratorów TWW, wyeliminowało szereg ich niedoskonałości konstrukcyjnych, zwiększyło ich trwałość, wydajność, bezawaryjność, niezawodność i czas eksploatacji. Modernizacje wirników i części aktywnych stojanów umożliwiły znaczne zwiększenie mocy znamionowej tych jednostek. Ich prosta i solidna konstrukcja gwarantuje wiele lat niezawodnej eksploatacji. Wszystkie przedstawione rozwiązania zostały pozytywnie zweryfikowane w badaniach diagnostycznych i praktyce eksploatacyjnej.

Zaprezentowane rozwiązania modernizacyjne mogą być stosowane również w turbogeneratorach oryginalnie produkowanych przez innych producentów.

EthosEnergy Poland S.A. modernizuje i produkuje turbogeneratory zgodnie z najnowszymi trendami technologicznymi i inżynierskimi, w zgodności z wymaganiami standardów EN 60034, ISO 9001, ISO 14001, OHSAS 18001. EthosEnergy Poland S.A. zapewnia pełny i szeroki zakres usług, od prac serwisowych i naprawczych do pełnych modernizacji, włącznie z produkcją nowych jednostek - w zależności od wymagań klienta.

Autorzy

dr inż. Dariusz Baron, EthosEnergy Poland S.A.,
tel. +48 34 3572214, dariusz.baron@ethosenergygroup.pl
dr inż. Rafał Maniara, EthosEnergy Poland S.A.,
tel. +48 34 3572471, rafal.maniara@ethosenergygroup.pl

LITERATURA

- [1] Adamek J., Krok R., Prysok E., Kardas D., Maniara R.: Wpływ modernizacji wentylatorów osiowych z tylnymi łopatkami kierowniczymi na wzrost mocy znamionowej generatorów typu TWW-230, Przegląd Elektrotechniczny nr 01/2014, str. 232-235
- [2] Baron D., Maniara R., Adamek J.: Modernizations of turbogenerators on the example of TWW-series turbogenerators, Power-Gen Europe, Milano, Italy, 21-23 June 2016
- [3] Baron D., Maniara R.: Large turbogenerators modernizations with efficiency improvements and life-time extension, Power-Gen Asia, Bangkok, Thailand, 19-21 September 2017
- [4] Baron D.: Badanie stanu technicznego kołpaków generatorów metodą spektroskopii impedancji, Rozprawa Doktorska, Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki Automatyki i Informatyki, Opole 2016, promotor – Prof. Z.H. Żurek, P.Śl.
- [5] Baron D.: Wdrożenie produkcji wirników generatorów - nowe perspektywy dla Energoserwis S.A., XVI Konferencja Energetyki – Wojanów 2009, Materiały konferencyjne, str. 235-245
- [6] Baron D.: Serwis turbogeneratorów na rynku południowo-azjatyckim, XV Konferencja Energetyki – Ryn 2007, Materiały konferencyjne, str. 80-90
- [7] Baron D.: Kontrola wizualna jako istotny element oceny stanu technicznego stojana turbogeneratorsa, XIII Konferencja Energetyki – Kliczków 2003, Materiały konferencyjne, str. 193-209
- [8] Maniara R., Kardas D.: Badania własności dynamicznych części uzwojenia stojana generatora, Mechanika, Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej nr 351/2014, Opole 2014
- [9] Maniara R., Kardas D.: Stator End-Winding Vibrations Modes, Maszyny Elektryczne, Zeszyty Problemowe 87/2010, Katowice 2010, str. 119-126
- [10] Żurek Z. H., Baron D.: Niestabilność eksploatacyjna parametrów magnetycznych i elektrycznych blach rdzenia stojana generatora TWW-200-2A, Przegląd Elektrotechniczny nr 01/2014, str. 221-223
- [11] Żurek Z. H., Baron D.: Badanie stabilności eksploatacyjnej parametrów magnetycznych i elektrycznych blach rdzenia stojana generatora typu TWW-200-2A, XVIII Konferencja Energetyki – Gnień 2013, Materiały konferencyjne, str. 284-289