

Nowe życie pracujących turbogeneratorów

Streszczenie. Na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej od 25. lat prowadzone są wielokierunkowe badania naukowe mające na celu opracowanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych turbogeneratorów wdrażanych przy rewitalizacji starych bloków energetycznych. Turbogeneratory po modernizacji mają moce zwiększone nawet o 20%, zaś rewers techniczny wzrasta od około 200 do nawet 350 tysięcy godzin. Opracowane innowacyjne rozwiązania zastosowano w turbogeneratorach pracujących w elektrowniach w Polsce oraz w wielu krajach Europy i Azji.

Abstract. For 25 past years, multi-directional research aimed at elaborating new constructional designs of turbogenerators which might be implemented during revitalization of old power units has been ongoing in the Faculty of Electrical Engineering of Silesian University of Technology. After modernization, turbogenerator power may be increased by even 20%, while its service life is increased from c. 200 to even 350 thousand hours. The elaborated innovative designs have been applied in turbogenerators operating in Polish power plants as well as power plants in European Union and Asian states. (**Revitalization of operating turbogenerators**).

Słowa kluczowe: modernizacja bloków energetycznych, projektowanie generatorów synchronicznych, doskonalenie konstrukcji turbogeneratorów, wzrost mocy wytwórczych.

Keywords: modernization of power units, synchronous generator design, perfecting turbogenerator construction, increase of produced power.

Wstęp

Transformacja gospodarcza w Polsce zapoczątkowana w 1991 r. spowodowała duże zmiany również w elektroenergetyce. Ciągłe wzrastające zapotrzebowanie na energię elektryczną zmusza dostawców do poszukiwania różnych sposobów wzrostu mocy wytwórczych przy jednoczesnej poprawie efektywności wytwarzania energii elektrycznej [1, 2].

Jedną z metod realizacji tych wymagań jest rozwój energetyki wykorzystującej odnawialne źródła energii. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że ciągle znaczna część energii elektrycznej zarówno w Polsce, jak i na świecie jest wytwarzana przez turbogeneratory. Dla przykładu, w TAURON Wytwarzanie S.A. całkowita moc elektryczna zainstalowana wynosi 4506 MW, z czego aż 4426 MW (98,2%) przypada na jednostki wytwórcze konwencjonalne, a jedynie 80 MW (1,8%) przypada na odnawialne źródła energii - na podstawie danych zamieszczonych na oficjalnej stronie internetowej koncernu.

Biorąc pod uwagę przedstawione fakty widać, jak istotne znaczenie dla elektroenergetyki mają podjęte na szeroką skalę modernizacje starych bloków z turbogeneratorami w celu podwyższenia mocy oraz poprawy niezawodności pracy. Wymagają one wprowadzenia wielu zmian konstrukcyjnych, przy czym najtrudniejsze problemy techniczne występują przy modernizacji turbogeneratorów.

Dostrzegając nowe wezwania stojące przed koncernami elektroenergetycznymi oraz zakładami produkującymi i remontującymi maszyny elektryczne, w 1991 roku ówczesny dyrektor Instytutu Maszyn i Urządzeń Elektrycznych Politechniki Śląskiej prof. dr hab. inż. Władysław Paszek powołał zespół wykonujący nieprzerwanie od 25. lat badania naukowe nad doskonaleniem konstrukcji turbogeneratorów. Rozwinięto w tym czasie współpracę z wieloma zakładami poszukującymi wsparcia naukowego, w szczególności zaś z wchodzącą bardzo pręźnie na rynek światowy firmą EthosEnergy Poland S.A. w Lublińcu. Opracowane innowacyjne rozwiązania elementów konstrukcyjnych turbogeneratorów umożliwiły nie tylko znaczne podwyższenie mocy (w niektórych przypadkach przekraczające 20%), ale również zwiększenie rewersu technicznego oraz poprawę efektywności wytwarzania energii elektrycznej.

Zwiększenie mocy turbogeneratora poprzez modernizację obniża również koszty wytwarzania energii elektrycznej. Dodatkowo, wprowadzone nowe rozwiązania wyeliminowały wiele powtarzających się uszkodzeń

turbogeneratorów powodujących duże straty wywołane przestojami awaryjnymi i remontami.

Jednym z nowych zagadnień jest poprawa konstrukcji turbogeneratorów w celu zapewnienia bezawaryjnej pracy przy ciągłych dużych zmianach obciążenia oraz częstych odstawieniach i załączenia do sieci. Tego typu reżim pracy turbogeneratorów występujący coraz częściej wywołuje powtarzające się uszkodzenia niektórych elementów - np. uzwojenia wzbudzenia.

W ostatnich latach pojawiło się zainteresowanie elektrowni modernizacjami hydrogeneratorów umożliwiającymi zwiększenie wytwarzanej mocy biernej indukcyjnej, na którą wzrasta zapotrzebowanie z powodu budowy nowych elektrowni wiatrowych.

Badania modelowe wykonywane przy opracowywaniu projektów modernizacji turbogeneratorów

Prace nad nowymi konstrukcjami turbogeneratorów umożliwiającymi podwyższenie mocy oraz poprawę niezawodności pracy wymagają w szczególności obliczenia pola temperatury dla oceny stanu cieplnego elementów i mediów chłodzących. Projektowanie wspomagają własne programy komputerowe wykonane na bazie autorskiej metody zmodyfikowanych sieci cieplnych [3]. Udoskonalona metoda sieci cieplnych bazująca na podziale różnicowym, w odróżnieniu od klasycznej [4, 5, 6], umożliwia odwzorowanie rozkładu temperatury w elementach turbogeneratora spowodowanego nagrzewaniem strug medium chłodzącego (powietrza, wodoru lub destylatu). Autorska metoda modelowania pola temperatury w turbogeneratorach stanowi konkurencję dla metody elementów skończonych [7]. Na przykładach wykazano, że umożliwia ona znacznie szybsze opracowanie modeli cieplnych i wykonanie obliczeń dla wielu różnych wariantów rozwiązań rozpatrywanych w fazie wykonywania projektu [3], a następnie przeprowadzenie analizy porównawczej na podstawie uzyskanych wyników. Zastosowanie metody zmodyfikowanych sieci cieplnych w wielu projektach modernizacji turbogeneratorów wynika z dużej dokładności odwzorowania rozkładu temperatury potwierdzonej licznymi pomiarami przeprowadzonymi na obiektach rzeczywistych.

Do obliczeń pola elektromagnetycznego oraz naprężeń mechanicznych wykorzystywane są komercyjne programy bazujące na metodzie elementów skończonych. W zależności od potrzeb tworzone są modele dwu- lub trójwymiarowe.

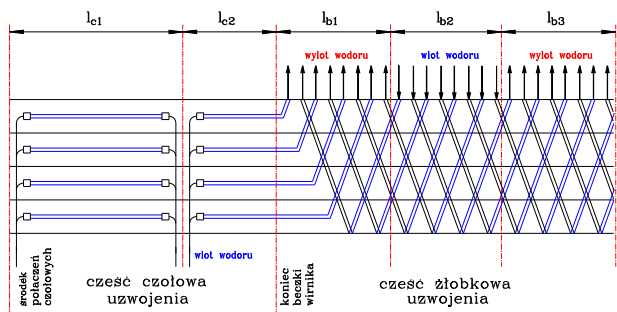
Przy projektowaniu nowych systemów chłodzenia stosowane są schematy zastępcze sieci wentylacyjnej. Niektóre badania wykonywane są na modelach fizycznych w tunelu aerodynamicznym - np. określanie optymalnego kąta natarcia nastawnych łopatek wentylatora wirnika turbogeneratora.

Przykłady modernizacji wirników w celu podwyższenia mocy turbogeneratora

W dużych turbogeneratorach często zastosowane jest bezpośrednie chłodzenie wodorem uzwojenia wirnika oraz bezpośrednie chłodzenie destylatem uzwojenia stojana. Pomiar ciepła turbogeneratorów z tak rozwiązany systemem chłodzenia zazwyczaj wykazują pełne wykorzystanie ciepła uzwojenia wirnika oraz częściowe uzwojenia stojana. W takich przypadkach istnieje możliwość zwiększenia prądu stojana, a w konsekwencji również mocy czynnej wydawanej przez turbogenerator do sieci, bez dokonywania zmian konstrukcyjnych w stojanie. Zazwyczaj jednak w projektach modernizacji turbogeneratorów w celu podwyższenia mocy zakłada się utrzymanie znamionowego współczynnika mocy, co wymaga dodatkowo zwiększenia przepływu wzbudzenia. Nie można tego dokonać bez zmiany konstrukcji oraz układu chłodzenia uzwojenia wzbudzenia turbogeneratorskiego.

W 1991 roku rozpoczęto prace nad modernizacją turbogeneratorskiego typu TWW-200-2(2A) zainstalowanego nie tylko w wielu elektrowniach w Polsce, ale również w innych krajach (np. Finlandii, Bułgarii).

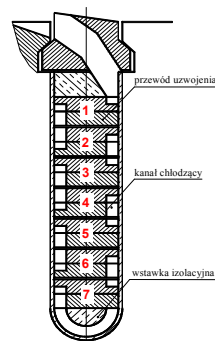
Najtrudniejszym problemem technicznym było dokonanie zmian umożliwiających wzrost przepływu wzbudzenia turbogeneratorskiego. Na rysunku 1 przedstawiono sieć wentylacyjną fabrycznego uzwojenia wzbudzenia [8], zaś na rysunku 2 przekrój żłóbka wirnika turbogeneratorskiego. Istotą tego rozwiązania jest zastosowanie profilowanych wstawek izolacyjnych na dnie żłobków wirnika w celu połączenia kanałów wentylacyjnych po prawej i lewej stronie przewodów uzwojenia. W zastosowanym nowym rozwiązaniu zastąpiono wstawki izolacyjne przewodami profilowanymi o takim samym kształcie. W efekcie wzrosła o jeden liczbę zwojów w każdej cewce uzwojenia wzbudzenia, a tym samym uzyskano wzrost przepływu bez zwiększania prądu wzbudzenia. Wdrożone innowacyjne rozwiązanie umożliwiło wzrost mocy turbogeneratorskiego do 220 MW przy zachowaniu znamionowego współczynnika mocy. Dodatkowo wykonano izolację uzwojenia wirnika w klasie F (w wersji fabrycznej klasa B) uzyskując przyrost temperatury uzwojenia wirnika po podwyższeniu mocy turbogeneratorskiego mniejszy od dopuszczalnego dla klasy B.



Rys.1. Zabierakowy system chłodzenia uzwojenia wzbudzenia turbogeneratorskiego

Przedstawione nowe rozwiązanie uzwojenia wzbudzenia zastosowano również w wirniku turbogeneratorskiego TWW-500-2 (rys. 3) w celu podwyższenia

mocy turbogeneratorskiego do 560 MW przy jednoczesnym zachowaniu współczynnika mocy.



Rys.2. Przekrój żłóbka wirnika turbogeneratorskiego z zabierakowym systemem chłodzenia uzwojenia wzbudzenia



Rys.3. Nowy wirnik turbogeneratorskiego TWW-500-2 wykonany w celu podwyższenia mocy turbogeneratorskiego do 560 MW

W celu dalszego zwiększenia przepływu wzbudzenia turbogeneratorskiego TWW-200-2(2A) opracowano nowe wentylatory wirnika o zwiększonej wydajności. Kształt i liczbę łopatek wentylatora dobrano poprzez badania symulacyjne, a następnie przeprowadzono badania modelowe w tunelu aerodynamicznym i wyznaczono optymalny kąt natarcia nastawnych łopatek wentylatora. Pomiar ciepła turbogeneratorskiego z nowym uzwojeniem wzbudzenia i nowymi wentylatorami wirnika wykazały możliwość obciążenia mocą 230 MW przy znamionowym współczynnika mocy. Zmierzone przyrosty średniej temperatury uzwojenia wzbudzenia w tym stanie pracy turbogeneratorskiego był mniejszy od dopuszczalnego dla izolacji klasy B, a w konsekwencji wykonanie izolacji w wirniku w klasie F zwiększyło jej żywotność.

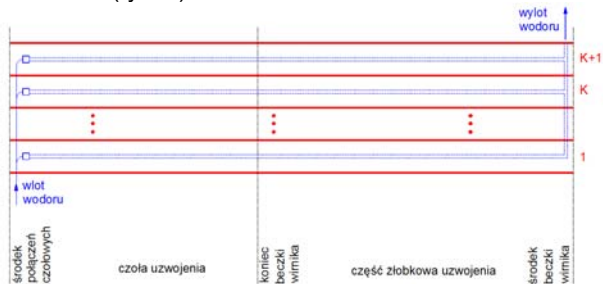
Uzwojenie wzbudzenia o zmodyfikowanej konstrukcji oraz nowe wentylatory zastosowano też przy modernizacji wirnika turbogeneratorskiego TWW-320-2Y3 (rys. 4) w celu podwyższenia mocy turbogeneratorskiego o 10%. Należy zaznaczyć, że zmodernizowany turbogeneratorski pracuje w elektrowni w Grecji, gdzie ze względu na warunki klimatyczne dopuszczalna temperatura zimnego wodoru wynosi 44°C, a zatem jest o 4°C wyższa niż w Polsce.



Rys.4. Zmodernizowany wirnik turbogeneratorskiego TWW-320-2Y3

Opracowano również projekt modernizacji turbogeneratorsa TGW-200 w celu podwyższenia mocy do 220 MW przy zachowaniu współczynnika mocy. W turbogeneratorsie tym uzwojenie wzbudzenia jest w pełni wykorzystane pod względem cieplnym. Konieczne było zatem wprowadzenie zmian znacznie poprawiających skuteczność chłodzenia uzwojenia wzbudzenia.

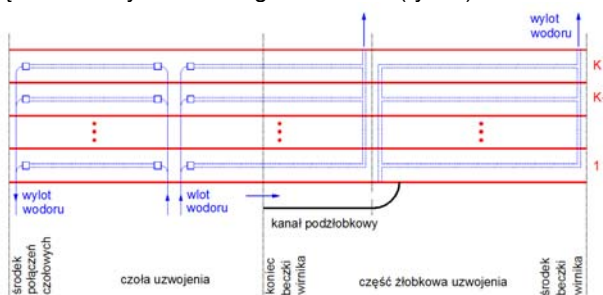
W wersji fabrycznej w wirniku turbogeneratorsa zastosowano osiowy system chłodzenia uzwojenia wzbudzenia (rys. 5).



Rys.5. System chłodzenia fabrycznego uzwojenia wzbudzenia turbogeneratorsa TGW-200

Wadą tego systemu chłodzenia jest duża długość kanałów chłodzących - wodór wlatuje do przewodów w środku czół cewek uzwojenia, a wylatuje w okolicy środka beczki wirnika. Powoduje to znaczne nagrzewanie strug wodoru, a w konsekwencji dużą nierównomierność rozkładu temperatury w przewodach oraz wysoką temperaturą maksymalną uzwojenia wzbudzenia.

W zmodernizowanym wirniku turbogeneratorsa poprawę skuteczności chłodzenia uzwojenia wzbudzenia uzyskano poprzez podział osiowych kanałów chłodzących na kilka części zasilanych równoległe wodorem (rys. 6).



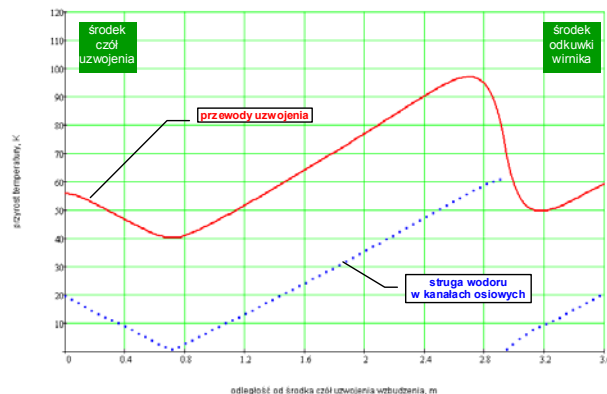
Rys.6. System chłodzenia uzwojenia wzbudzenia turbogeneratorsa TGW-200 po modernizacji

Dodatkowo, w celu poprawy skuteczności chłodzenia uzwojenia wzbudzenia w zmodernizowanym turbogeneratorsie zastosowano nowe wentylatory wirnika o wydajności zwiększonej o 15%. Projekt wentylatorów wykonano z wykorzystaniem modeli symulacyjnych, zaś założony wzrost wydajności potwierdzono badaniami modelowymi w tunelu aerodynamicznym.

W zmodernizowanym uzwojeniu wzbudzenia zastosowano cieńsze przekładki izolacyjne pomiędzy przewodami wykonane z nowej generacji materiałów elektroizolacyjnych. Tym sposobem uzyskano możliwość zwiększenia liczby przewodów w każdej cewce uzwojenia wzbudzenia o jeden. Rozwiązanie to znacznie zmniejsza przyrost gęstości prądu wzbudzenia wywołany koniecznym zwiększeniem przepływu wzbudzenia dla zapewnienia wymaganego wzrostu mocy turbogeneratorsa z jednoczesnym zachowaniem współczynnika mocy.

W celu oceny stopnia wykorzystania cieplnego zmodernizowanego uzwojenia wzbudzenia po

podwyższeniu mocy turbogeneratorsa TGW-200 do 220 MW przy znamionowym współczynnika mocy ($\cos \varphi_n = 0,85$ ind.) obliczono rozkład przyrostu temperatury w przewodach oraz strugach wodoru (rys. 7) za pomocą utworzonej zmodyfikowanej sieci cieplnej.



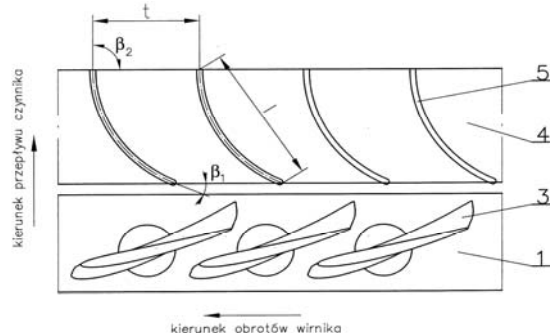
Rys.7. Rozkład przyrostu temperatury w cewkach zewnętrznych zmodernizowanego uzwojenia wzbudzenia turbogeneratorsa TGW-200 przy mocy podwyższonej do 220 MW

Obliczone przyrosty temperatury wynoszą odpowiednio:

- średni uzwojenia wzbudzenia – 61,0 K,
- maksymalny uzwojenia wzbudzenia – 97,2 K,
- maksymalny wodoru na wylotach z kanałów – 61,3 K.

Obliczony średni przyrost temperatury zmodernizowanego uzwojenia wzbudzenia przy obciążeniu turbogeneratorsa mocą czynną 220 MW i znamionowym współczynnika mocy $\cos \varphi_n = 0,85$ indukcyjny wynosi 61,0 K i jest o 9,0 K mniejszy od dopuszczalnego dla izolacji klasy B (70 K). Należy zaznaczyć, że izolacja zmodernizowanego uzwojenia wzbudzenia została wykonana w klasie F, co skutkuje znacznym zwiększeniem żywotności.

Modernizacja turbogeneratorsa TWW-200-2(2A) w celu podwyższenia mocy do 240 MW przy zachowaniu znamionowego współczynnika mocy wymagała wprowadzenia zmian we wszystkich głównych węzłach konstrukcyjnych [9]. W wirniku dokonano zamiany fabrycznego zabierakowego systemu chłodzenia na osiowy wielostrugowy (rys. 6) oraz zabudowano nowe wentylatory z dyfuzorami o zwiększonej wydajności (rys. 8). Zastosowano nowe uzwojenie stojana oraz zmodernizowano elementy skrajne rdzenia stojana. Zwiększono moc znamionową chłodziw wodoru.



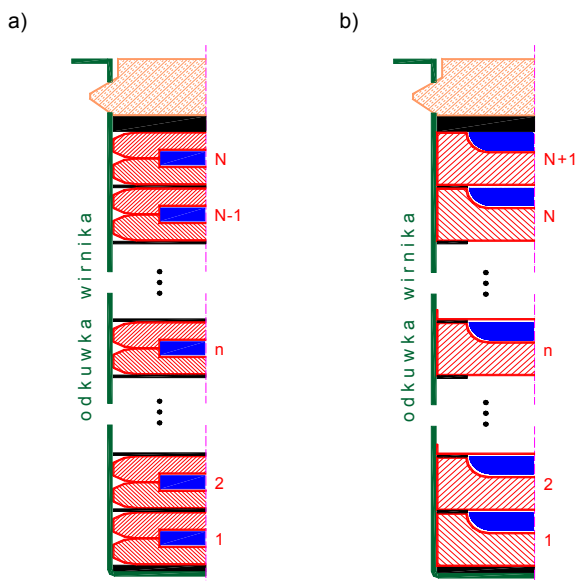
Rys.8. Rozwinięcie palisad łopatek nowego wentylatora i dyfuzora zmodernizowanego turbogeneratorsa TWW-200-2(2A)

Opracowany obecnie nowy system chłodzenia uzwojenia wzbudzenia turbogeneratorsa [10] otwiera możliwości dalszego zwiększenia gęstości prądu wzbudzenia, a w konsekwencji podwyższenia mocy turbogeneratorsa znacznie powyżej 20%.

Zmiany konstrukcji turbogeneratorów umożliwiające bezawaryjną pracę przy zmiennym obciążeniu

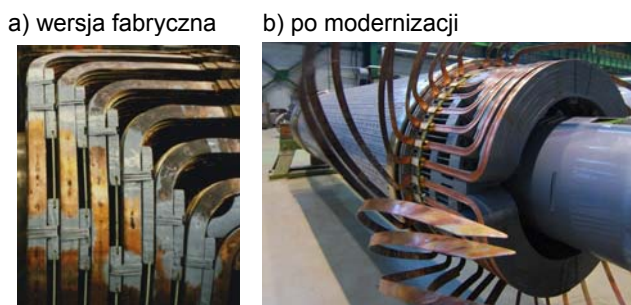
Przy oględzinach wirników turbogeneratorów pracujących przy zmiennym obciążeniu wykonywanych w zakładach remontowych często stwierdza się rozległe uszkodzenia uzwojenia wzbudzenia prowadzące nawet do zwarcia zwojowych [11].

Przykładem rozwiązania problemu powtarzających się uszkodzeń czoł uzwojenia wzbudzenia jest modernizacja turbogeneratorsa TGH-120. Na rysunku 9 widoczna jest wprowadzona zmiana kształtu przewodu w czołach uzwojenia wzbudzenia. Przewód zastosowany przy modernizacji w porównaniu do fabrycznego ma: zwiększoną prawie dwukrotnie wysokość (w celu zwiększenia sztywności), przyklejoną jednostronnie przekładkę izolacyjną o zmniejszonym współczynniku tarcia (umożliwia swobodną dylatację) oraz znacznie powiększoną powierzchnię oddawania ciepła do wodoru. Dodatkowo, w każdym żłobku wirnika zwiększono o jeden liczbę przewodów uzyskując wzrost przepływu wzbudzenia bez powiększania prądu wzbudzenia.



Rys.9. Przekrój żłobka wirnika turbogeneratorsa TGH-120 a) w wersji fabrycznej, b) po modernizacji

Na rysunku 10 przedstawiono zdjęcia czoł uzwojenia wzbudzenia turbogeneratorsa TGH-120 w wersji fabrycznej oraz po modernizacji wykonane przy przeglądzie okresowym. Należy zwrócić uwagę na fakt, że zmodernizowany turbogenerators pracował przy mocy podwyższonej do 130 MW.



Rys.10. Widok czoł uzwojenia wzbudzenia turbogeneratorsa TGH-120 po zdjęciu kołpaków

Podsumowanie

Na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej wykonano wiele prac badawczych mających na celu poprawę konstrukcji turbogeneratorsów oraz przystosowanie do nowych warunków pracy. Efektem współpracy z firmą EthosEnergy Poland S.A. przez 25 lat jest opracowanie wielu wdrożonych do produkcji projektów modernizacji turbogeneratorsów. Turbogeneratorsy, w których wprowadzono innowacyjne rozwiązania pracują nie tylko w wielu elektrowniach w Polsce, ale również w: Bośni i Hercegowinie, Bułgarii, Chinach, Finlandii, Grecji, Korei Południowej, Słowenii, na Ukrainie oraz w Uzbekistanie. Uzyskany wzrost mocy turbogeneratorsów w wyniku modernizacji został potwierdzony pomiarami cieplnymi, zaś wieloletnie bezawaryjne okresy eksploatacji wykazały wyeliminowanie wielu powtarzających się uszkodzeń.

Modernizacja turbogeneratorsów z podwyższeniem mocy jest sposobem na znaczny wzrost mocy wytwórczych w systemie elektroenergetycznym. Metoda ta jest ciągle mało doceniana w Polsce, pomimo przemawiających za nią racji ekonomicznych. Nie wymaga ona ponoszenia ogromnych kosztów budowy nowych elektrowni oraz związaną z tym rozbudową sieci przesyłowych.

Autorzy: dr hab. inż. Roman Krok, Politechnika Śląska, Instytut Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 10A, 44-100 Gliwice, E-mail: Roman.Krok@polsl.pl; prof. dr hab. inż. Marian Pasko, Politechnika Śląska, Instytut Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 10A, 44-100 Gliwice, E-mail: Marian.Pasko@polsl.pl.

LITERATURA

- [1] Tchórz J., Programy badawcze realizowane przez TAURON Wytwarzanie S.A., VIII Konferencja Naukowo-Techniczna Ochrona Środowiska w Energetyce, Katowice (2013)
- [2] www.gkpgg.pl/innowacje/obszary-innowacji/wytwarzanie
- [3] Krok R., Sieci ciepłe w modelowaniu pola temperatury w maszynach elektrycznych prądu przemiennego, *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, Monografia habilitacyjna, Gliwice (2010)
- [4] Latek W., Turbogeneratorsy, WNT, Warszawa (1973)
- [5] Rioul M., Development of thermohydraulic modelling for the determination of hot spots in the bars and the slot thermal image for the stator 900 MW turbogenerators, *International Conference on Electrical Machines ICEM 1995*, Paris, France, 437-441
- [6] Swift G., Molinski T.S., Lehn W., A fundamental approach to transformer thermal modeling – Part I: Theory and equivalent circuit, *IEEE Transactions on Power Delivery*, No 16 (2001), 171-175.
- [7] Rajagopal M.S., Seetharamu K.N., Aswatha Narayana P.A., Finite element analysis of radial cooled rotating electrical machines, *International Journal of Numerical Method for Heat & Fluid Flow*, Vol. 9, No 1 (1999), 18-38
- [8] Krok R., Miksiewicz R., Analysis of the thermal field in excitation winding of a synchronous generator with direct radial-axial cooling system made on the basis of a thermal resistance network, *International Conference on Electrical Machines ICEM 1996*, Vigo, Spain, 405-410
- [9] Krok R., Pasko M., The modernization of turbogenerators as a method of decreasing electrical energy production costs, *Technical Transactions, Cracow University of Technology Press*, Issue 1-E(8) (2015), 191-201
- [10] Adamek J., Krok R., Maniara R., Baron D., Patent na wynalazek pt. „Układ chłodzenia wirnika turbogeneratorsa”, *Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej*, zgłoszenie nr P.407695 (2016)
- [11] Sieradzki S., Adamek J., Kardas D., Kapinos J., Krok R., Patent na wynalazek pt. „Przewód uzwojenia wzbudzenia generatorsa”, *Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej*, nr 218474 (2014)