

## **REWITALIZACJA TURBOGENERATORÓW KLASY 200 MW w aspekcie transformacji polskiej elektroenergetyki**

Krok R.\*

**Wprowadzenie:** Konieczna transformacja polskiego systemu elektroenergetycznego wymaga określenia sposobu jego funkcjonowania w okresie przejściowym, którego czas trwania szacuje się na około 15 lat. Obecnie dominująca część mocy jest wytwarzana przez bloki węglowe, zaś docelowo będzie generowana przez odnawialne źródła energii (OZE). Ze względów zarówno ekonomicznych, jak i technicznych najlepszym rozwiązaniem będzie dalsza eksploatacja zrewitalizowanych bloków klasy 200 MW. Takie rozwiązanie jest najtańsze. Bardzo ważne jest także to, że know-how jest ciągle w posiadaniu polskich firm i specjalistów.

**Słowa kluczowe:** rewitalizacja bloków, transformacja elektroenergetyki, projektowanie turbogeneratorów.

Polski system elektroenergetyczny będzie podlegał w nadchodzących latach głębokiej transformacji. Efektem wprowadzanych zmian będzie między innymi stopniowe zmniejszanie mocy wytwarzanej przez bloki węglowe przy jednoczesnym wzroście mocy generowanej przez OZE. Konieczne jest zatem znalezienie optymalnych rozwiązań funkcjonowania systemu elektroenergetycznego w okresie przejściowym.

Najtańszym sposobem jest wykorzystanie w okresie transformacji systemu elektroenergetycznego dużego potencjału produkcyjnego 44 bloków 200 MW [1]. Operator oczekuje możliwości dysponowania w okresie najbliższych ok. 15 lat blokami o odpowiednio dużym wolumenie produkcyjnym oraz niskich kosztach produkcji przystosowanych do pracy regulacyjnej. Oczekiwaniom tym są wstanie sprostać zmodernizowane bloki 200 MW, natomiast nie zapewniają tego duże bloki na parametry nadkrytyczne.

Badania związane z rewitalizacją bloków 200 MW skupiają się obecnie praktycznie jedynie na urządzeniach ciepłno-mechanicznych. Efektem jest opracowanie rozwiązań rewitalizacji (modernizacji) kotłów oraz turbin parowych zapewniających zmniejszenie emisji dwutlenku węgla i innych szkodliwych substancji, zwiększenie sprawności energetycznej, podwyższenie mocy oraz umożliwienie pracy regulacyjnej. Pomijane jest całkowicie źródło energii elektrycznej, którym jest turbogenerator. Bloki 200 MW nie spełnią pokładanych w nich oczekiwań, jeżeli przy ich rewitalizacji nie zostanie przeprowadzona również modernizacja turbogeneratorów.

Od wielu lat na Wydziale Elektrycznym Politechniki Śląskiej we współpracy z EthosEnergy Poland S.A. w Lublińcu prowadzone są prace badawcze, których celem jest opracowanie nowych rozwiązań głównych węzłów konstrukcyjnych turbogeneratorów [2]. Wdrożone dotychczas do produkcji rozwiązania umożliwiły podwyższenie mocy turbogeneratorów o 20% z jednoczesnym dostosowaniem do pracy regulacyjnej. W raporcie przedstawiono przykładowe wykonane modernizacje turbogeneratorów. Na bazie zdobytych doświadczeń przygotowano propozycje zmian umożliwiających dalsze podwyższenie mocy turbogeneratora do 250 MW.

---

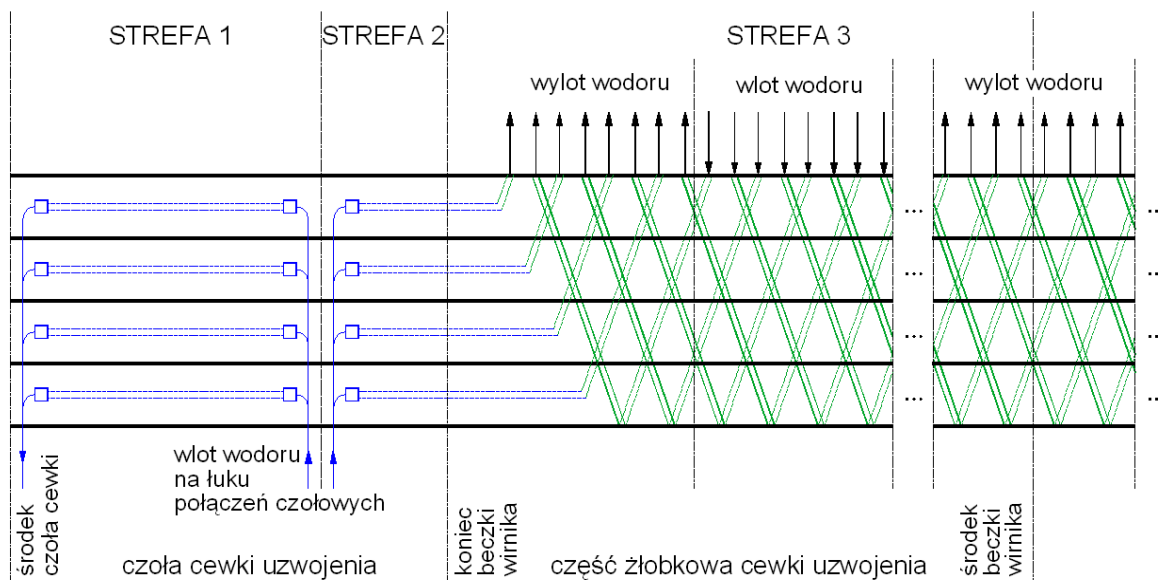
\* Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, dr hab. inż. Roman Krok, prof. PŚ (Kierownik Zakładu Maszyn Elektrycznych i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie Instytutu Elektrotechniki i Informatyki). [RAPORT] jest rozszerzoną wersją artykułu zamieszczonego w Acta Energetica, nr 1, 2017, s. 15-23. [RAPORT] został po raz pierwszy przedstawiony na Konferencji Aktualne Problemy w Elektroenergetyce APE'17 zorganizowanej przez Katedrę Elektroenergetyki Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, Jastrzębia Góra, 7-9 czerwca 2017.

## 1. Modernizacja turbogenerators TWW-200 z zachowaniem zabierakowego systemu chłodzenia w wirniku

Opisane rozwiązanie modernizacji turbogenerators w celu podwyższenia mocy i dostosowania do pracy regulacyjnej wymaga zmiany konstrukcji wielu elementów oraz zastosowania nowych materiałów. Najtrudniejszym zagadnieniem jest zaproponowanie zmian umożliwiających zwiększenie prądu stojana oraz przepływu wzbudzenia przy zachowaniu temperatury elementów na poziomie nieprzekraczającym wartości dopuszczalnej.

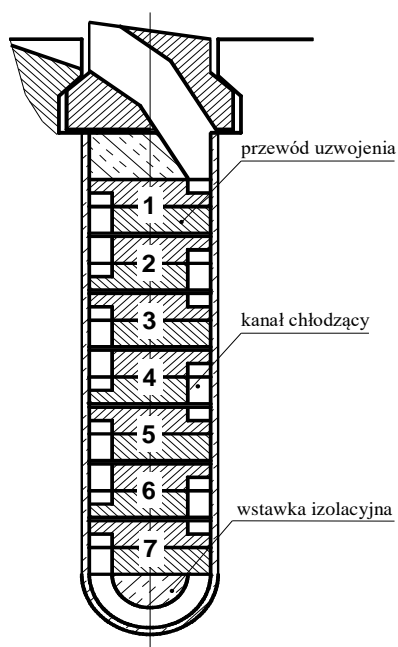
W turbogeneratorach typu TWW-200 uzwojenie stojana jest chłodzone bezpośrednio destylatem. Pomiary cieplne wykazały stosunkowo małe przyrosty temperatury uzwojenia stojana turbogenerators. Z wykonanych obliczeń wynika, że podwyższenie mocy turbogenerators nawet do 230 MW nie wymaga zmiany uzwojenia stojana. Uzwojenie wzbudzenia w znamionowym stanie pracy turbogenerators jest praktycznie w pełni wykorzystane pod względem cieplnym. Uzyskanie wzrostu przepływu wzbudzenia w celu zwiększenia mocy turbogenerators do 230 MW przy zachowaniu znamionowego współczynnika mocy wymaga zmiany konstrukcji uzwojenia wzbudzenia.

Na rys. 1 przedstawiono sieć kanałów dla zabierakowego systemu chłodzenia uzwojenia wzbudzenia turbogenerators TWW-200. W przewodach w czołach cewek uzwojenia wzbudzenia znajdują się kanały osiowe przez które przepływają dwie strugi wodoru. Jedna wpływa do kanałów osiowych w przewodach otworami usytuowanymi na łuku czoł cewek, zaś wypływa otworami wylotowymi w środku czoł. Druga wpływa oddzielnymi otworami znajdującymi się na łuku czoł cewek, przepływa kanałami osiowymi w przewodach w kierunku beczki wirnika, a następnie wypływa kanałami promieniowo-osiovymi i otworami w klinach zabierakowych w pierwszej strefie wylotowej.



Rys. 1. Sieć kanałów chłodzących w uzwojeniu wzbudzenia turbogenerators dla systemu zabierakowego

Uzwojenie wzbudzenia w części żłobkowej chłodzone jest strugami wodoru przepływającymi w kanałach promieniowo-osiowych znajdujących się na powierzchni bocznej przewodów (rys. 2). Wodór jest pobierany i wyprowadzany do szczeliny stojan-wirnik za pomocą klinów zabierakowych usytuowanych naprzemiennie w kierunku natarcia oraz przeciwnym (rys. 3).



**Rys. 2. Przekrój poprzeczny żłobka wirnika turbogenerators TWW-200**



**Rys. 3. Wirnik turbogenerators z zabierakowymi klinami żłobkowymi i nowym wentylatorem osadzonym na wale**

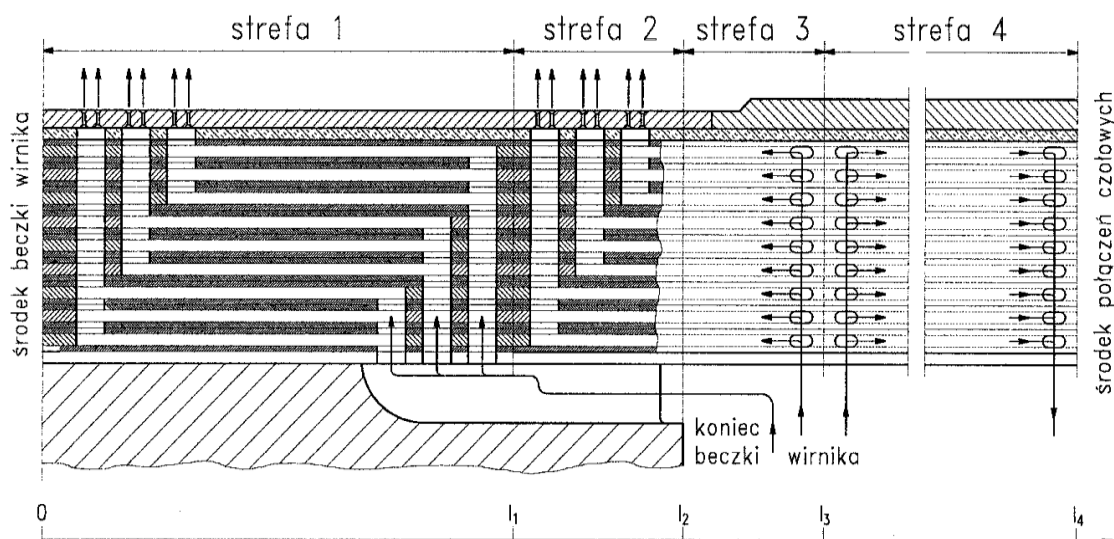
Zwiększenie przepływu uzwojenia wzbudzenia konieczne przy podwyższeniu mocy turbogeneratorsa do 230 MW uzyskano poprzez zastąpienie wstawek izolacyjnych umieszczonych na dnie żłobków wirnika (rys. 2) profilowanymi przewodami o takim samym kształcie [3]. Tym sposobem zwiększono liczbę zwojów w każdej cewce uzwojenia wzbudzenia o 1, co umożliwia wzrost przepływu wzbudzenia bez zmiany prądu wzbudzenia. W konsekwencji przyrost temperatury uzwojenia wzbudzenia przy obciążeniu turbogeneratorsa mocą 230 MW i znamionowym współczynnikiem mocy jest praktycznie taki sam, jak w turbogeneratorsie fabrycznym obciążonym mocą 200 MW.

Podwyższenie mocy turbogeneratorsa wymagało dodatkowo wprowadzenia szeregu zmian konstrukcyjnych. Najważniejsze z nich to przebudowa chłodnicy wodoru umieszczonej w korpusie oraz zmiana konstrukcji elementów skrajnych rdzenia stojana turbogeneratorsa.

## **2. Modernizacja turbogeneratorsa TWW-200 z zamianą w wirniku systemu chłodzenia z zabierakowego na osiowy**

Z wykonanych badań wynika, że podwyższenie mocy rozpatrywanego turbogeneratorsa z 200 do 240 MW przy zachowaniu znamionowego współczynnika mocy wymaga przede wszystkim zmiany układu chłodzenia w wirniku [4].

Na rys. 4 przedstawiono zastosowany nowy osiowy system chłodzenia przewodów uzwojenia wzbudzenia. Przepływ wodoru w kanałach chłodzących wymuszają dwa wentylatory osadzone na wale po obu stronach turbogeneratorsa wyposażone dodatkowo w tylne łopatki kierownicze. Układ wentylacji wirnika jest symetryczny względem płaszczyzny prostopadłej do osi wału przechodzącej przez środek beczki wirnika. W konsekwencji sieć kanałów wentylacyjnych w każdej ćwiartce cewki uzwojenia wzbudzenia jest taka sama. Zimny wodór jest wtłaczany pod kołpaki przez wentylatory, a następnie kanałami promieniowymi w przewodach na łukach połączeń czołowych wpływa do kanałów osiowych. Jedna struga wodoru przepływa kanałami osiowymi w przewodach w kierunku środka czoła cewki uzwojenia, a następnie wypływa otworami wylotowymi. Druga struga przepływa kanałami osiowymi w przewodach w kierunku beczki wirnika. W klinach żłobkowych oraz w przewodach w pewnej odległości od końca beczki wirnika znajdują się promieniowe kanały wylotowe, którymi wodór wypływa do szczeliny stojan-wirnik. Trzecia struga wodoru przepływa kanałami podżłobkowymi w beczce wirnika, a następnie wpływa kanałami promieniowymi do kanałów osiowych w przewodach uzwojenia. Struga ta wypływa do szczeliny stojan-wirnik w okolicy środka beczki wirnika promieniowymi kanałami w przewodach i klinach żłobkowych.



**Rys. 4. Sieć kanałów chłodzących w uzwojeniu wzbudzenia turbogenerators dla systemu osiowego**

Bardzo ważną zmianą konstrukcyjną przyczyniającą się do znacznej poprawy chłodzenia elementów aktywnych turbogenerators jest wymiana oryginalnych wentylatorów wirnika na nowe (rys. 5) oraz dodatkowo zabudowanie w osłonach wentylatorów tylnych łopatek kierowniczych (rys. 6). Przeprowadzone modelowe badania porównawcze w tunelu aerodynamicznym wykazały wzrost wydajności nowego wentylatora z tylnymi łopatkami kierowniczymi o 24% w porównaniu do oryginalnego bez łopatek kierowniczych zastosowanego w turbogenerators fabrycznym.



**Rys. 5. Nowy wentylator zabudowany na wale wirnika**





**Rys. 6. Nowa osłona wentylatora wirnika z tylnymi łopatkami kierowniczymi**

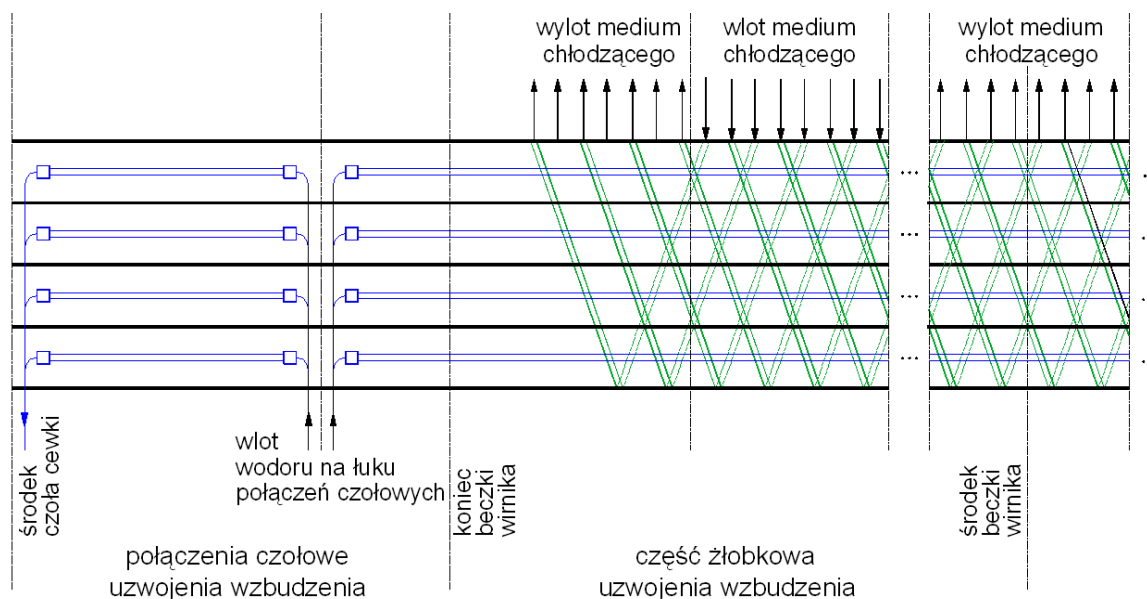
Zwiększenie mocy turbogenerators wymagało wprowadzenia wielu dodatkowych zmian, z których najważniejsze to: zbudowanie uzwojenia stojana z nowych prętów o zmniejszonych stratach, modernizacja chłodnicy wodoru w celu podwyższenia mocy oraz zmiana konstrukcji elementów skrajnych rdzenia stojana w celu utrzymania temperatury na poziomie nieprzekraczającym wartości dopuszczalnej.

### **3. Perspektywy dalszego podwyższenia mocy turbogeneratorów typu TWW-200**

Zainteresowanie elektrowni modernizacją turbogeneratorów o mocy 200 MW nie tylko w Polsce, ale również w krajach Unii Europejskiej (między innymi Bułgarii, Finlandii oraz Grecji) spowodowało prowadzenie dalszych badań w celu podwyższenia mocy ponad uzyskane obecnie 240 MW. Zaproponowane zmiany konstrukcyjne umożliwią w przyszłości podwyższenie mocy turbogenerators do 250 MW.

Z analizy wyników pomiarów oraz obliczeń zmodernizowanych turbogeneratorów o mocy 240 MW wynika, że dalszy wzrost mocy przy zachowaniu znamionowego współczynnika mocy wymaga przede wszystkim dalszej znacznej poprawy chłodzenia uzwojenia wzbudzenia.

Na rys. 7 przedstawiono opracowany nowy system chłodzenia uzwojenia wzbudzenia [5] możliwy do zastosowania między innymi w turbogeneratorach o mocy 200 MW. Istota tego rozwiązania hybrydowego polega na wprowadzeniu w najbardziej nagrzanej żłobkowej części uzwojenia wzbudzenia jednocześnie kanałów osiowych oraz promieniowo-osowych. Przepływ wodoru jest wymuszony w kanałach osiowych za pomocą wentylatorów usytuowanych na wale wirnika, zaś w kanałach promieniowo-osowych przez uformowane w kształcie zabieraków kliny żłobkowe.



**Rys. 7. Sieć kanałów chłodzących w uzwojeniu wzbudzenia turbogeneratorsa dla systemu hybrydowego**

Z wykonanych obliczeń wynika, że hybrydowy system chłodzenia uzwojenia wzbudzenia umożliwi podwyższenie mocy turbogeneratorsa do 250 MW przy zachowaniu znamionowego współczynnika mocy oraz znacznego zapasu temperatury uzwojenia wzbudzenia w odniesieniu do wartości dopuszczalnej.

#### 4. PODSUMOWANIE

Konieczne jest wypracowanie, przez polską elektroenergetykę, systemu badań na rzecz rewitalizacji bloków węglowych uwzględniającego zasadę niedozwolonej w UE pomocy publicznej.

Podwyższenie mocy 44 turbogeneratorsów z 200 do 250 MW powoduje wzrost mocy zainstalowanej w systemie elektroenergetycznym o 2,2 GW, co odpowiada mocy nowej bardzo dużej elektrowni.

Należy zwrócić uwagę na fakt, że z możliwości zwiększenia mocy wytwórczych w systemie poprzez modernizację bloków energetycznych elektrowni korzysta obecnie bardzo wiele krajów na świecie. Zmodernizowane przez EthosEnergy Poland S.A. w Lublińcu bloki energetyczne ze znacznie podwyższoną mocą pracują w elektrowniach w Polsce, w krajach Unii Europejskiej oraz Azji (między innymi w Chinach i Korei). Wprowadzone innowacyjne rozwiązania umożliwiają pracę regulacyjną turbogeneratorsów. Pomiary przeprowadzone przy uruchomieniu bloków oraz wieloletnie bezawaryjne okresy eksploatacji w pełni potwierdziły uzyskanie zakładanego w projekcie wzrostu mocy oraz dostosowanie turbogeneratorsów do pracy regulacyjnej.

## **Bibliografia**

- [1] Trzeszczyński J., Dalsza eksploatacja bloków klasy 200 MW - racjonalna strategia dla polskiej energetyki, *Energetyka*, maj 2017, s. 313-315.
- [2] Krok R., Marian P., Continuation of Prof. Władysław Latek's research - revitalization of old power units, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences*, Vol. 64, No. 4, 2016, s. 957-962.
- [3] Krok R., Sieci ciepłne w modelowaniu pola temperatury w maszynach elektrycznych prądu przemiennego, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Monografia habilitacyjna, Gliwice 2010.
- [4] Krok R., Pasko M., The modernization of turbogenerators as a method of decreasing electrical energy production costs, *Technical Transactions*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, z.1-E (8), 2015, s. 191-201, 2015.
- [5] Adamek J., Krok R., Maniara R., Baron D., Układ chłodzenia wirnika turbogeneratorsa, patent na wynalazek nr 224128 udzielony przez Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej w roku 2016.