

## Recenzja

Rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Ewy Dobkiewicz-Wieczorek

„Optymalizacja pracy skraplaczy turbinowych  
w pełnym paśmie regulacji obciążenia”.

W oparciu o pismo Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach z dnia 11.10.2022 została opracowana niniejsza recenzja pracy doktorskiej Pani mgr inż. Ewy Dobkiewicz-Wieczorek pt. „Optymalizacja pracy skraplaczy turbinowych w pełnym paśmie regulacji obciążenia”.

Praca przedstawia analizę sprawności netto bloków energetycznych kondensacyjnych i upustowo-kondensacyjnych przez zmiany w układzie chłodzenia skraplaczy głównych. Zawiera siedem rozdziałów w których opisano kolejne kroki optymalizacji układów chłodzenia skraplaczy. Sama praca jest zapisana na 126 stronach, a łącznie z załącznikami ma 159 stron. W pracy przywołano 76 pozycji literatury głównie z lat po roku 2000.

Główną tezą pracy jest twierdzenie, że różne sposoby połączenia skraplaczy oraz wprowadzenie układów regulacji ilości wody chłodzącej skraplacze prowadzi do podniesienia sprawności netto bloków oraz do zysków ekonomicznych.

Jako cele w pracy wyznaczono:

1. Porównanie metod obliczeń ciśnienia pracy skraplaczy.
2. Budowę algorytmów obliczeń bilansowych bloków turbo parowych.
3. Obliczenia bilansów cieplnych dla różnych konfiguracji układów chłodzenia.
4. Optymalizację przez zastosowanie układu regulacji ilości wody chłodzącej.
5. Budowa oprogramowania dla optymalizacji ilości wody chłodzącej dla aktualnego i prognozowanego stanu obciążenia bloku.

W przeglądzie literatury zwrócono uwagę na prace analizujące wpływ metod

połączenia skraplaczy w układach z wieloma częściami NP turbiny na sprawność netto bloku oraz prace analizujące zmianę ilości wody chłodzącej na sprawność całego obiegu.

W punkcie drugim pracy przedstawiono użyte w pracy metody obliczeń ciśnienia w skraplaczu. Głównym problemem tutaj jest wyznaczenie współczynnika wymiany ciepła  $k$ . Wykorzystano trzy metody dla określenia tej wartości, metodę równań kryterialnych, metodę HEI oraz standardu ASME. Poszczególne metody obliczeń zostały zaprezentowane w tym punkcie. Dla zmiennych obciążeń turbiny zaproponowano korektę sprawności izentropowej części NP turbiny w funkcji mocy. Drugim elementem jest korekta spiętrzenia temperatur w stanach odbiegających od nominalnego obciążenia opartą o dane z literatury. Obliczenia ciśnienia w skraplaczu dokonano dla trzech bloków tutaj dla bloku 460 MW, 120 MW i 65 MW. Wykonano je bez oraz z uwzględnieniem korekt dla sprawności i spiętrzenia. Wyniki obliczeń zostały porównane z pomiarami ciśnień w skraplaczach. Korekta sprawności części NP została opisana wielomianem piątego stopnia, natomiast korektę spiętrzenia temperatur przedstawiono jako funkcję kwadratową. Wyniki obliczeń pozwoliły na ocenę błędu w stosunku do pomiarów ciśnienia w skraplaczach na rzeczywistych obiektach oraz zasadność stosowania poszczególnych korekt.

Ten punkt pracy uważam za bardzo cenny gdyż pozwala on ocenić która z metod obliczeń ciśnienia w skraplaczu daje najbliższe wyniki w stosunku do pomiarów. Dodatkowo podano wielkość błędów dla poszczególnych metod obliczeniowych, pozwala to ocenić niepewność z jaką możemy oceniać wyniki obliczeń. Najlepszą okazała się metoda HEI, która została wybrana do dalszych obliczeń. W tym porównaniu metoda równań kryterialnych dawała dwukrotnie większy błąd niż metoda HEI natomiast dla metody ASME ten błąd pomiędzy wynikami obliczeń a pomiarem był znacznie większy.

Wykonano dwa bilanse obiegów cieplnych turbin. Pierwszy dotyczył turbiny kondensacyjnej o mocy 910 MW, a drugi maszyny upustowo-kondensacyjnej o mocy 50 MW. W obu przypadkach przedstawiono schematy obiegów cieplnych oraz układ równań opisujących bilanse masowych natężeń przepływu i bilanse energii. Podano również równania opisujące zmiany ciśnień w obiegu dla nienominalnych stanów obciążeń. Mówiąc o bilansach obiegów cieplnych równania rozbito na trzy oddzielne

etapy to znaczy bilanse mas, bilanse energii oraz na końcu obliczany jest rozkład ciśnień i w efekcie ciśnienie pary płynącej do skraplacza. Tak powstał algorytm obliczania całego obiegu. Uważam, że takie rozbieżności równań na trzy oddzielne etapy zaciemnia obraz procesu bilansowania i utrudnia śledzenie poprawności całego procesu. Lepszym rozwiązaniem może być budowanie opisu bilansowego maszyny przez opis każdego elementu składowego obiegu osobno. Oczywiście wtedy mam sytuację, gdzie trzy równania bilansowe tutaj, bilansu masowych natężeń przepływu, bilansu energii oraz rozkładu ciśnień dotyczą jednego elementu. To pozwala potem utworzyć układ równań całego obiegu. Wyniki obliczeń bilansowych dla bloku 910 MW były porównywane z obliczeniami projektowymi natomiast dla bloku kondensacyjno-upustowego z pomiarami gwarancyjnymi oraz eksploatacyjnymi.

Przystępując do obliczeń układów chłodzenia skraplaczy turbin przyjęto kilka wariantów analizowanego układu. Dla obiegu cieplnego z trzema częściami NP turbiny występują trzy oddzielne skraplacze (turbina o mocy 910 MW). Każdy jest połączony osobno z wylotem części niskoprężnej turbiny. Dla trzech skraplaczy istnieją cztery warianty połączenia układu chłodzenia. Pierwszym jest układ równoległy to znaczy woda chłodząca jest rozdzielana na trzy strumienie, każdy strumień przepływa przez jeden skraplacz. Drugim wariantem jest połączenie szeregowe co oznacza, że woda chłodząca przepływa kolejno przez trzy skraplacze. Trzecią wersją jest układ równoległo-szeregowy gdzie dwa skraplacze są połączone równoległe natomiast trzeci skraplacz jest w stosunku do nich połączony szeregowo. Ostatnią wersją jest układ szeregowo-równoległy gdzie najpierw jest jeden skraplacz połączony do wody chłodzącej a następnie woda chłodząca płynie do dwóch połączonych równoległe skraplaczy. Tu uwaga, w konstrukcjach obiegów mogą wystąpić jeden, dwa, trzy a nawet cztery skraplacze. Te ostatnie występują w dużych układach jądrowych. Wtedy liczba możliwych połączeń znacznie wzrasta. Dla dwóch skraplaczy są możliwe tylko połączenie szeregowe lub połączenie równoległe. W pracy analizowano tylko układ z jednym skraplaczem i z trzema skraplaczami. W obliczeniach uwzględniono ograniczenia dla pracy chłodni kominowych które określają minimalny i maksymalny przepływ wody ze względu na prawidłową pracę chłodni kominowej.

Dla obiegu z turbiną kondensacyjno-upustową mamy układ z czterocełkową chłodnią wentylatorową. To daje cztery przedziały przepływu wody chłodzącej, a więc

większą elastyczność zmian masowego natężenia przepływu wody chłodzącej skraplacze niż w przypadku chłodni kominowej jak to ma miejsce dla bloku kondensacyjnego. W oparciu o dane projektowe wyznaczono charakterystyki wysokości podnoszenia pomp w funkcji objętościowego natężenia przepływu wody chłodzącej skraplacze. Podobnie wyznaczono charakterystyki dla bloku kondensacyjnego. Wyznaczone charakterystyki pozwalają określić opory przepływu dla zmiennych ilości wody chłodzącej skraplacze i wyznaczyć punkt współpracy z pompami wody chłodzącej, co w efekcie jest niezbędne dla określenia mocy zapotrzebowanej przez pompy. Jak zwrócono uwagę dla obiegu kondensacyjnego największe opory przepływu daje połączenie szeregowe skraplaczy.

Obliczenia obiegu cieplnego z różnymi wariantami połączeń skraplaczy dla obiegu kondensacyjnego wskazują że najlepszym rozwiązaniem w tym przypadku jest szeregowe połączenia skraplaczy co daje największy przyrost sprawności brutto bloku około 0,18 w warunkach nominalnych. Dla całego obszaru obciążeń od 40 – 100% mocy połączenie szeregowe skraplaczy pozwalało uzyskiwać największe przyrosty sprawności brutto. Istotnym tutaj problemem jest sprawność kolejnych części NP turbiny które przy zmiennych warunkach chłodzenia poszczególnych skraplaczy (dla połączenia szeregowego) będzie dawać zmienne ciśnienie na wylocie turbiny. To w efekcie spowoduje pracę przy nienominalnych stanach części NP turbiny. Tutaj powstaje pytanie jak duże odchylenia sprawności części NP będą w efekcie powodowały sadek sprawności brutto bloku.

Dla sprawności netto, a więc z uwzględnieniem mocy koniecznej do napędu pomp wody chłodzącej skraplacze, zyski sprawnościowe mają inny charakter niż dla sprawności brutto. Wszystkie wartości odnoszono do sprawności netto dla połączenia równoległego skraplaczy. W tym miejscu najlepsze okazały się połączenia mieszane szeregowo-równoległe oraz równoległe-szeregowe. Ważne że dla połączenia szeregowego poniżej 70% mocy sprawność netto jest mniejsza niż dla połączenia równoległego. Jest to wynikiem dużych oporów hydraulicznych dla połączenia szeregowego, a co za tym idzie dużej mocy potrzebnej do napędu pomp.

W pracy przeanalizowano dodatkowo zachowanie się bloków oraz sprawności netto dla zmiennych przepływów wody chłodzącej w skraplaczach. Wprowadzenie obejścia wody chłodzącej w skraplaczach połączonych szeregowo daje pozytywny

efekt i poprawę sprawności dla stanów obciążeń częściowych. Efektem zmniejszenia ilości wody płynącej przez skraplacze jest dla układów szeregowego i mieszanych poprawa sprawności bloku co pozwala wygenerować dodatkowo około 2MW mocy w porównaniu do połączenia równoległego skraplaczy. Dla optymalnych ilości wody chłodzącej skraplacze w zakresie moc od 40-100% można uzyskać przyrost sprawności rzędu 0.5 pp co jest ważną wartością z punktu widzenia dodatkowej mocy oraz efektów ekonomicznych. Nakładając ograniczenia na pracę chłodni kominowej określono maksymalne zyski sprawnościowe na poziomie około 0.2 pp.

Dla bloku kondensacyjno-upustowego wykonano analizę z uwzględnieniem zmiany ilości wody chłodzącej skraplacz. W tym bloku mamy jeden skraplacz dlatego zmiana ilości wody chłodzącej jest regulowana obrotami pompy. Poprawa sprawności netto w tym przypadku dotyczy stanów obciążeń częściowych. Uwzględniając ograniczenia w pracy chłodni wentylatorowych i pracy pomp zyski sprawności netto są rzędu 0.2 pp.

W punkcie 6 pracy zaproponowano zastosowanie algorytmów genetycznych dla poszukiwania optymalnego przepływu wody chłodzącej dla danego punktu pracy bloku. Celem tego algorytmu jest maksymalizacja sprawności netto obiegu cieplnego. Uwzględniono tu wybór liczby pomp pracujących w danych warunkach dla realizacji zadania maksymalizacji sprawności netto bloku. Program jest pomocą dla operatora bloku podając wartości oraz wykresy dla takich parametrów jak:

- przepływ wody chłodzącej skraplacze,
- wysokości podnoszenia pomp,
- obciążenia części NP turbiny,
- liczby pracujących pomp

w funkcji generowanej mocy elektrycznej i cieplnej turbozespołu.

Zastosowanie tego typu algorytmu pozwoliło na znaczne skrócenie czasu obliczeń co daje możliwość szybkiej reakcji operatora na zmienne warunki pracy skraplaczy.

Wybrany temat pracy uważam za aktualny i ciekawy. Zagadnienie maksymalizacji produkcji energii elektrycznej, a więc optymalizacji sprawności netto bloków energetycznych jest istotny z punktu widzenia minimalizacji ilości paliwa koniecznego dla pracy całego bloku. Zbudowanie programu, który będzie wspomagał eksploatację bloku daje możliwość zastosowania wyników pracy w rzeczywistych obiektach. W analizie bloku kondensacyjnego jak i bloku kondensacyjno-upustowego mało uwagi poświęcono temperaturze otoczenia, która ma wpływ na pracę chłodni kominowej oraz chłodni wentylatorowej, co w efekcie decyduje o temperaturze wody na wlocie do skraplaczy. Ten element uważam za brak w pracy. Drugim elementem jest brak informacji o formach regulacji mocy turbiny, a to w istotny sposób wpływa na koniec procesu rozprężania w turbinie i w efekcie na próżnię w skraplaczu. Rodzaj regulacji mocy turbiny może mieć wpływ na uzyskane wyniki. Trzecim problemem jaki uważam za istotny jest uwzględnienia zmian sprawności części NP turbiny. W pracy przedstawiono zmianę sprawności części NP tylko w funkcji jej obciążenia.

Jeżeli uwzględnić zmiany temperatury wody chłodzącej na dolocie do skraplacza, to dla tego samego stanu obciążenia części NP turbiny (mocy realizowanej przez część NP) możemy mieć różne ciśnienia w kondensatorze. Sprawność części NP jest silnie zależna nie tylko od stanu obciążenia ale także od ciśnienia na wylocie z turbiny.

Jak już wspominałem jednym z bardzo cennych elementów pracy jest weryfikacja metod obliczeń ciśnienia w skraplaczu. Porównanie trzech metod obliczeniowych oraz porównanie ich z pomiarami pozwoliło określić najlepszą metodę dla oceny ciśnienia w skraplaczu. Ważna jest ocena błędów dla poszczególnych metod co umożliwia oszacowanie niepewności obliczeń.

Od strony redakcyjnej praca nie budzi zastrzeżeń jest napisana językiem przejrzystym z dużą ilością wykresów i tabel oraz załączników. Tutaj kilka uwag szczegółowych. Wzór (2.8) opisujący sprawność izentropową turbiny – wartości  $i_{s\_NP}$  i wartości  $i_s$ ,  $i_{s\_0}$  nie są rozróżnialne, opisy indeksów na początku pracy sugerują, że wszystkie parametry dotyczą tylko pary wylotowej z turbiny. Strona 38 wiersz 7 od góry jest „puntu pracy” a chyba powinno być „punktu pracy”. W równaniu (3.1) brakuje mi elementu „ $m_{42i42}$ ”. Strona 43, 3 wiersz od dołu jest „opisanych tabeli” chyba powinno być „opisanych w tabeli”.

Dla bloku kondensacyjno-upustowego na stronie 49 w równaniu (3.23) podano wielkość  $r_1$ . Nie jest jednak ona zdefiniowana. Podobnie w równaniu (3,23a) jest podana wielkość  $r_1$  bez definicji. W równaniu (3.22) podana jest wielkość  $i_{199}$ . Tej wielkości na schemacie obiegu nie ma. W tabeli 3.4 dla punktu 114 na schemacie podano tylko wielkość  $m_{14}$ . Jednak w równaniach (3.17-3.25) dodatkowo jest uwzględniona w bilansach wielkość  $m_{50}$ . Na stronie 56 dla zmian entalpii używane jest oznaczenie „i” a czasami „h”. W tabelach A.2a, A.2b, A.2c oraz w tabelach B.1.3, B2.3 ciśnienia  $p_g$  oraz  $p_{s\_NP}$  podano w MPa. To chyba jest błąd.

Uwzględniając wszystkie uwagi merytoryczne oraz zauważone uwagi szczegółowe uważam, że praca Pani mgr inż. Ewy Dobkiewicz-Wieczorek p.t. „Optymalizacja pracy skraplaczy turbinowych w pełnym paśmie regulacji obciążenia” spełnia warunki prac doktorskich. W związku z tym zgodnie z ustawą z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki wnoszę o dopuszczenie pracy do publicznej obrony.



Prof. dr hab. inż. Piotr Krzyślak