

MODEL MATEMATYCZNY TURBOZESPOŁU PAROWEGO DLA SYMULATORA BLOKU ENERGETYCZNEGO WYBRANE ZAGADNIENIA

KRZYSZTOF BADYDA, GRZEGORZ NIEWIŃSKI

Institut Techniki Ciepłej, Politechnika Warszawska
e-mail: badyda@itc.pw.edu.pl, grzeniew@itc.pw.edu.pl

Streszczenie. Instrumenty numerycznej analizy dynamiki stanów przejściowych stwarzają nowe możliwości w projektowaniu, doborze układów automatyki i sterowania w instalacjach energetycznych oraz szkolenia personelu ruchowego. W artykule przedstawiono wyniki prac nad modelem matematycznym turbozespołu parowego dla symulatora bloku energetycznego dużej mocy. Przedstawiono wybrane rezultaty numerycznej symulacji procesu zmiany obciążenia na przykładzie turbiny parowej 13K215 z układem regeneracji.

1. WSTĘP

W obecnym stuleciu energetyka zawodowa stanęła przed ogromnym wyzwaniem. Z jednej strony istnieje coraz większy nacisk na zmniejszenie szkodliwego wpływu energetyki na otaczające nas środowisko naturalne, a z drugiej wymóg zapewnienia niezawodności, optymalizacji i bezpieczeństwa eksploatacji urządzeń oraz dostarczania taniej energii elektrycznej. Pomocne w realizacji tych dwóch sprzecznych ze sobą celów, oprócz zmiany technologii konwersji energii, w klasycznej energetyce, może być modelowanie matematyczne jako metoda dążąca do optymalizacji procesu.

Prowadzenie prac eksperymentalnych z wykorzystaniem rzeczywistych obiektów jest kosztowne, wiąże się z dużym ryzykiem uszkodzeń badanych obiektów, a czasami jest wręcz niemożliwe. Z tego względu, mimo licznych realizowanych prac badawczych, własności instalacji energetycznych – szczególnie stanów nieustalonych – należą do najslabiej rozpoznanych. Możliwość poprawy tej sytuacji powstanie dzięki upowszechnieniu symulacji komputerowej jako narzędzia służącego do badania własności dynamicznych nowo projektowanych i eksploatowanych urządzeń i instalacji przemysłowych, w tym energetycznych.

Symulator rozumiany jest tu jako urządzenie (program komputerowy), będące modelem wybranego obiektu rzeczywistego, odtwarzające jego (zazwyczaj tylko wybrane) własności. Za pomocą symulatora można zatem prowadzić badania eksperymentalne z pominięciem wykorzystania obiektu rzeczywistego. Prace nad programami symulującymi numerycznie ruch bloków energetycznych były i są prowadzone przez liczne ośrodki. Ponieważ jednak uzyskiwane wyniki mają duże znaczenie, nie są one zwykle publikowane, a na rynku oferowane są jedynie gotowe programy komercyjne.

W artykule przedstawione zostały wyniki prac związanych z modelowaniem matematycznym instalacji energetycznych na przykładzie turbozespołu parowego, wykorzystane do budowy symulatora bloku energetycznego o mocy 200 MW. W dostępnych publikacjach prezentowane są modele turbiny parowej (bez układu regeneracji) [9], [10], natomiast brak jest informacji o kompleksowych modelach matematycznych instalacji turbozespołu parowego dużej mocy, opartego na zasadach zachowania masy i energii, a nie na zależnościach empirycznych.

2. MODEL TURBOZESPOŁU PAROWEGO

W obecnej dobie rozwoju technik obliczeniowych, w badaniach zjawisk ciepło-przepływowych instalacji energetycznych powinno się odchodzić od stosowania wyłącznie modeli opartych na założeniach empirycznych i doświadczalnych [5], [10]. Jednocześnie spośród metod modelowania, opartych na równaniach bilansowych, podejściem, umożliwiającym badanie dynamik turbozespołu, jest podejście dyskretne (bezwymiarowe), zakładające stosowanie modeli o stałych skupionych.

Podstawowym założeniem takiego podejścia jest podział obiektu na elementy, w których zachodzą procesy decydujące o zachowaniu się instalacji i uśrednieniu parametrów stanu czynnika roboczego najczęściej w środkowym punkcie takiego elementu.

W turbozespole parowym są elementy o różnych zdolnościach akumulacyjnych. W wyniku tego występują silnie zróżnicowane stałe czasowe, charakteryzujące zachodzące w nich procesy nieustalone. W szczególności można wyodrębnić te elementy, w których stałe czasowe procesów są znacząco różne od stałej czasowej turbozespołu parowego, rozpatrywanego jako całość ($T_i \ll T_t \ll T_i$). Procesy rozprężania, dławienia i zamiany energii pary wodnej na pracę w grupach stopni, dławnicach czy zaworach charakteryzują się małą stałą czasową i mogą być traktowane jako chwilowy ciąg stanów ustalonych. Natomiast procesy związane z akumulacją ciepła w materiałach konstrukcyjnych turbozespołu charakteryzują się dużą bezwładnością, co stwarza możliwość modelowania ich quasi-stacjonarnie [1], [10].

Na drodze analizy typowego układu turbozespołu parowego można wyróżnić dwie klasy modeli, zgodnie z wcześniej przyjętymi ustaleniami:

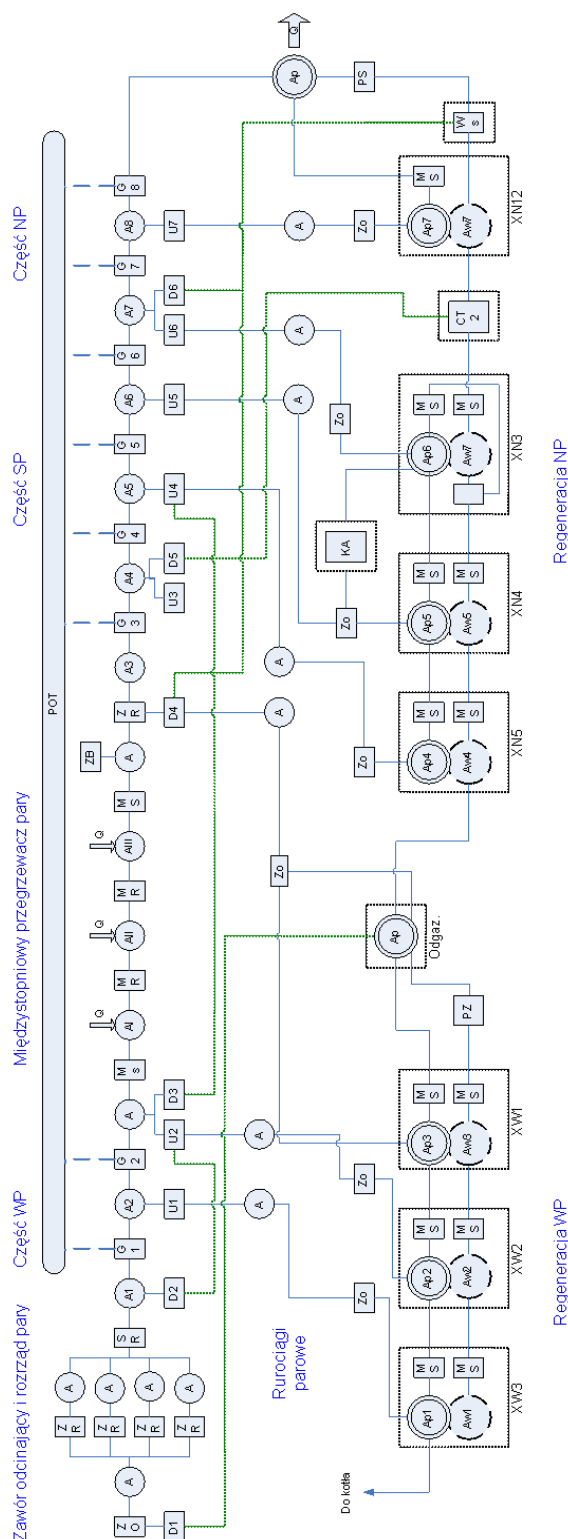
- elementy maszyn i urządzeń energetycznych, które mają zdolności akumulacyjne masy bądź energii czynnika roboczego modelowane dynamicznie (np. komory upustowe i przestrzenie akumulacyjne w układzie przepływowym turbiny, modele rurociągów parowych i wymienników regeneracyjnych)
- elementy, w których stała czasowa procesu akumulacji jest znacząco różna od stałej czasowej turbozespołu lub takie, które nie mają zdolności akumulacyjnych masy i energii, modelowane statycznie, za pomocą charakterystyk (np. model pompy skroplin i wody zasilającej, stopnia regulacyjnego i grup stopni nieregulowanych, dławnicy labiryntowej, zaworów, straty ciśnienia i wtrysku wody w międzystopniowym przegrzewaczu pary)

Budowa i opis poszczególnych elementów, a także ogólna postać i metody rozwiązania zero-wymiarowego modelu turbozespołu parowego, opisano szerzej w pozycjach literaturowych [1], [2], [9].

Uzupełnienie modelu elementów instalacji energetycznej, jako całościowego modelu turbozespołu parowego stanowią charakterystyki własności termodynamicznych czynnika roboczego.

Podstawowymi zaletami modelowania „0-D”, w porównaniu z modelami wymiarowymi, są przede wszystkim prostota, naturalność, mniejsza pracochłonność oraz krótkie czasy obliczeń symulacyjnych.

Przykładowy schemat zastępczy turbiny parowej 13K215 z układem regeneracji, sporządzony według przyjętej koncepcji modelowania dynamiki zjawisk zachodzących w instalacjach energetycznych, został przedstawiony na rys.1.



Rys.1. Schemat zastępczy turbiny parowej 13K215 z układem regeneracji

3. WYNIKI SYMULACJI

Analizę dynamiki stanów nieustalonych przeprowadzono za pomocą autorskiego programu komputerowego. Program napisany został w języku FORTRAN, który do tej pory uważany jest za najlepszy do rozwiązywania skomplikowanych zagadnień numerycznych (w tym całkowania układów równań różniczkowych). Modułowa budowa modelu turbospółu parowego, a co za tym idzie i samego symulatora, umożliwia w prosty sposób jego rozbudowę o dodatkowe elementy, które w obecnym opisie matematycznym nie zostały uwzględnione, lub zastosowanie innych, bardziej wydajnych procedur numerycznych.

3.1 Zmiana obciążenia turbospółu parowego

Zmniejszenie obciążenia bloku energetycznego jest typowym zakłóceniem jego aktualnych warunków pracy, niebędącym przy tym stanem awaryjnym.

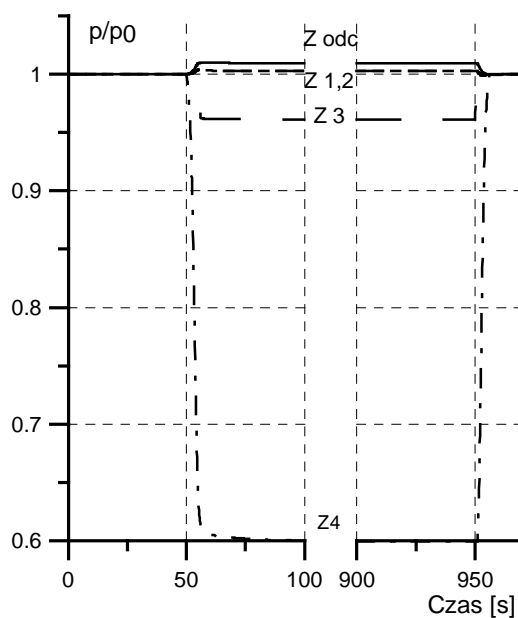
Jako stan początkowy procesu symulacji zostały wybrane szczególne warunki pracy – stan znamionowy. W 50. sekundzie symulacji wprowadzono zakłócenie. Zmniejszenie obciążenia wprowadzone zostało w formie zamknięcia czwartego zaworu rozrządu i zmniejszenie stopnia otwarcia trzeciego zaworu o 25%. W celu lepszego pokazania penetracji zakłóceń rozchodzących się w układzie przepływowym całego turbospółu (łącznie z układem regeneracji) w zaprezentowanym zakłóceniu przyjęto szybki proces zamykania i otwierania zaworów rozrządu. (ok. 5 sek. na całkowite zamknięcie zaworu). Po upływie 15 minut wprowadzono zakłócenie odwrotne w celu powrotu do warunków pracy z początku symulacji. W trakcie symulacji założono idealną regulację zmiany prędkości obrotowej wału na poziomie 3000 obr/min.

Wyniki symulacji przedstawiono na rysunkach 2 – 11, w formie bezwymiarowej, gdzie stanem odniesienia jest stan znamionowy. Na rys.12 ukazano charakterystyki zmian podstawowych parametrów cechujących turbospół (temperatura wody na wejściu do kotła, moc, sprawność i strumień masy pary pobieranej przez turbospół). Na rys.13 pokazano przebieg zmian ciśnienia pary wodnej w upustach nieregulowanych.

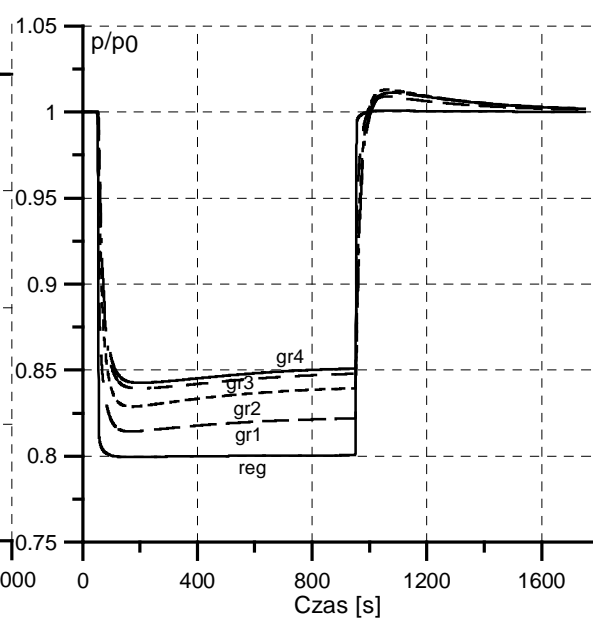
4 PODSUMOWANIE

Wydaje się, że autorom udało się poprawnie zamodelować procesy ciepłno-przepływowe zachodzące w turbospole, o czym świadczą otrzymane wyniki zmian parametrów termodynamicznych w stanach nieustalonych. Wyniki zaprezentowane w pracy zgodne są z ogólną teoretyczną wiedzą w tym zakresie. Przedstawiona na rys.13 zmiana ciśnienia pary w upuście ma identyczny charakter z przebiegami zmian spotykanymi w literaturze [4] i [6]. Pozostałe zaprezentowane przebiegi zmian ciśnienia, strumienia masy czy entalpii mają oczekiwany charakter, jednakże ze względu na brak kompletnych danych z rzeczywistego obiektu (ze względu na trudności dokonania pomiarów niektórych wielkości oraz sposób ich archiwizacji) niemożliwa jest ich pełna weryfikacja.

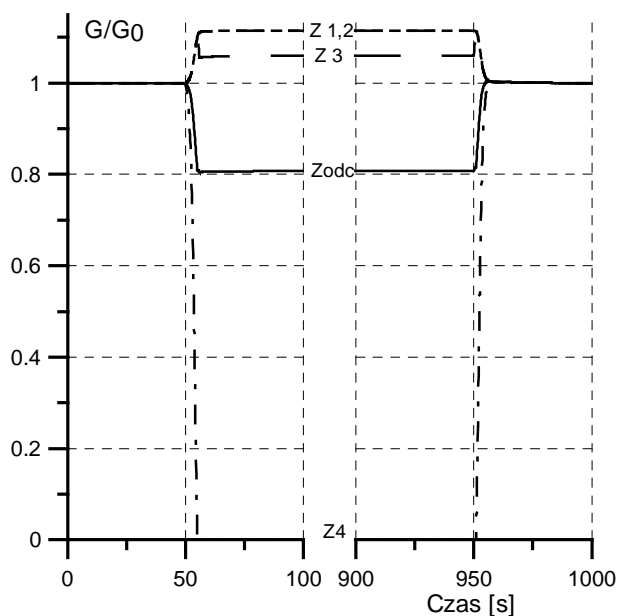
Dodatkowo analiza wyników symulacji wykazała konieczność rozbudowy modelu i uwzględnienia wszystkich czynników wpływających na pracę turbospółu parowego, a z drugiej strony zastosowania bardziej wydajnych algorytmów rozwiązywania złożonych, sztywnych układów równań różniczkowych.



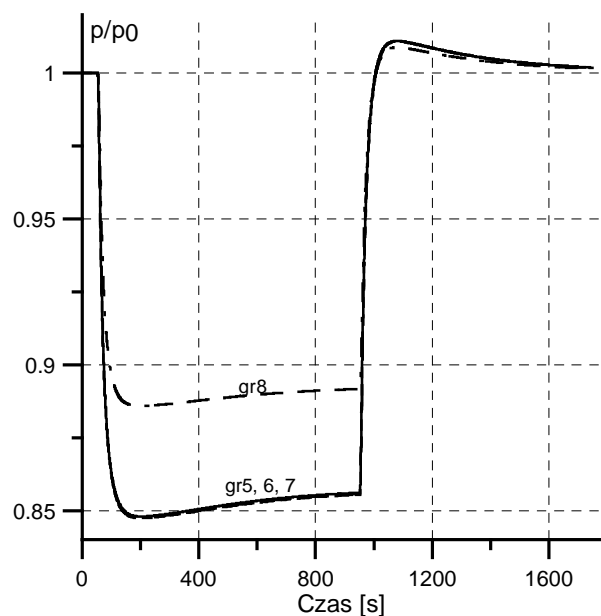
Rys.2. Ciśnienie pary za rozrzędem pary i zaworem odcinającym (Z1-Z4 zawory rozrzędu pary, Z_{odc} – zawór odcinający)



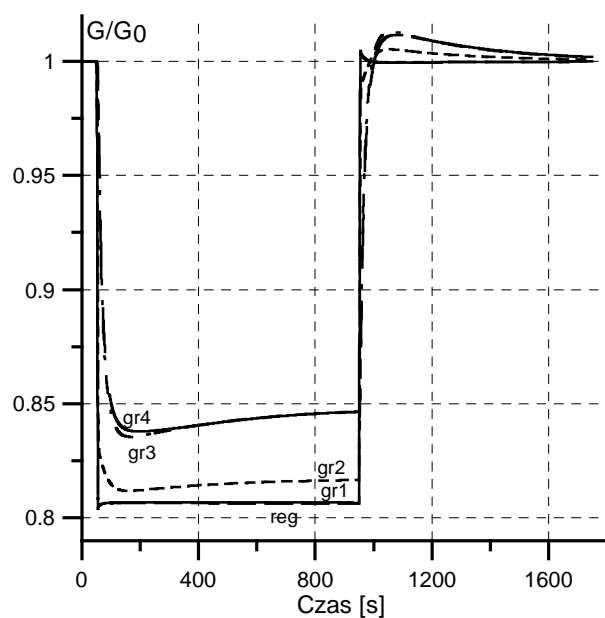
Rys.4. Ciśnienie pary w turbinie (Reg – za stopniem regulacyjnym, gr1-gr4 za odpowiednią grupą stopni nieregulowanych)



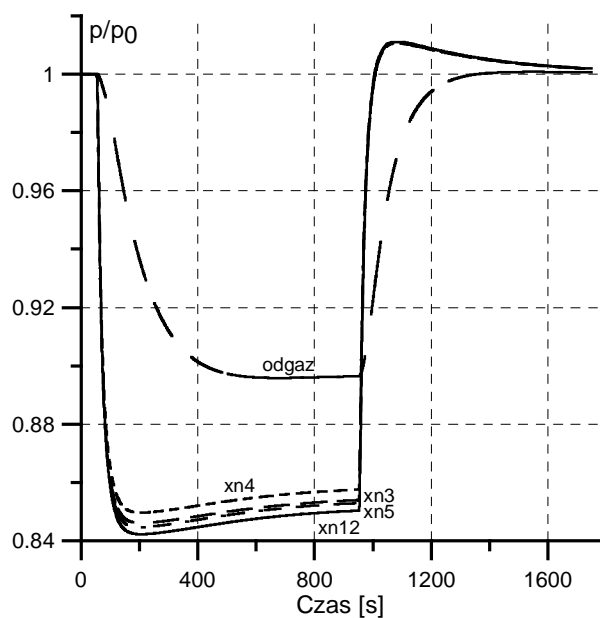
Rys.3. Strumień pary masy przepływający przez rozrzęd pary i zawór odcinający (oznaczenia zgodne z rys.2)



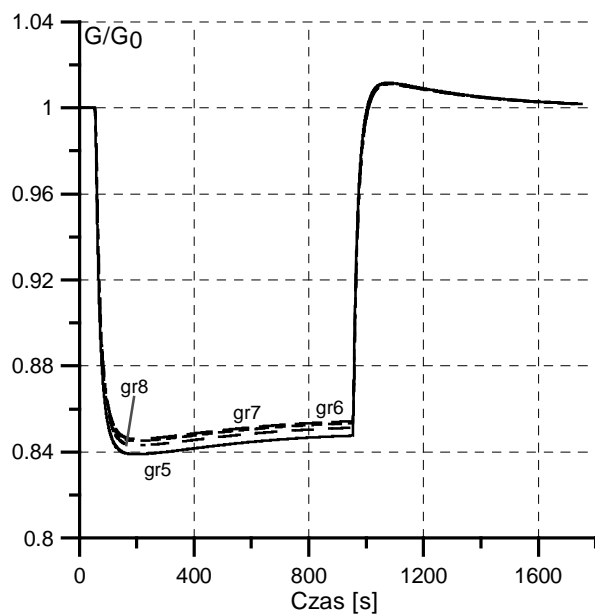
Rys.5. Ciśnienia pary w układzie przepływowym turbiny (gr5-gr8 -za odpowiednią grupą stopni)



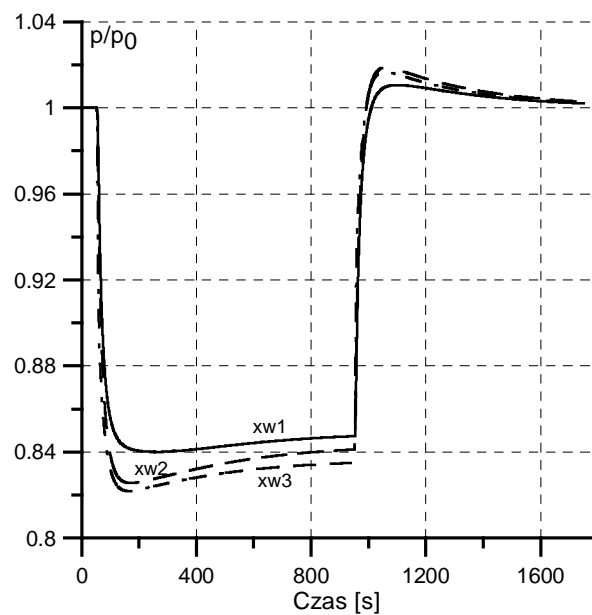
Rys.6. Strumień masy pary przepływ przez turbinę (oznaczenia zgodne z rys.4.)



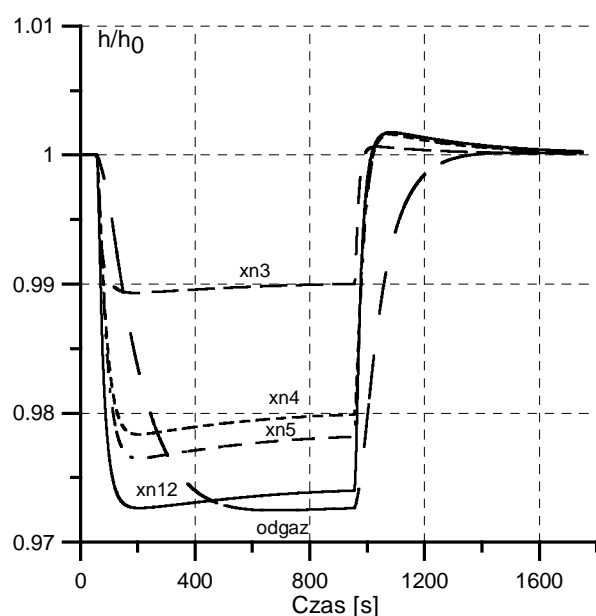
Rys.8. Ciśnienie panujące w wymiennikach regeneracyjnych części NP.(oznaczenia zgodne z rys.1.)



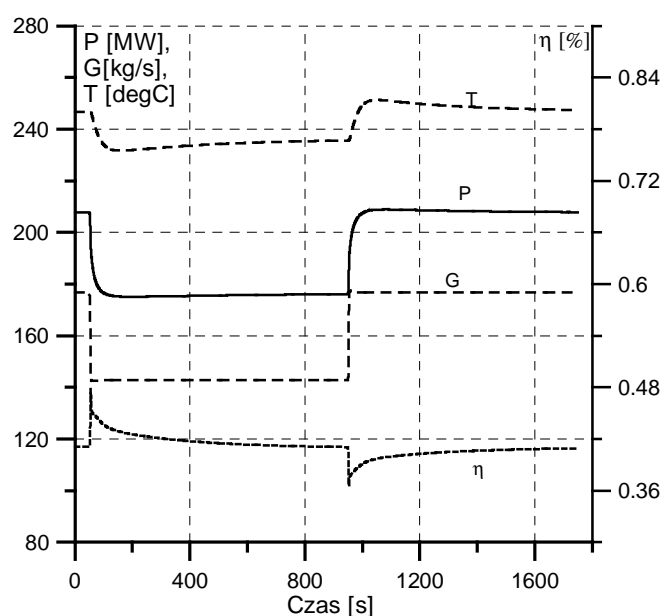
Rys.7. Strumień masy pary przepływ przez turbinę (oznaczenia zgodne z rys.5)



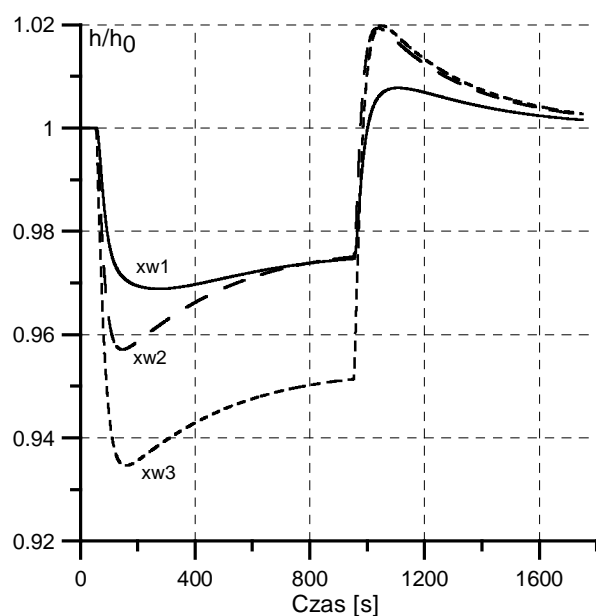
Rys.9. Ciśnienie panujące w wymiennikach regeneracyjnych części WP.(oznaczenia zgodne z rys.1.)



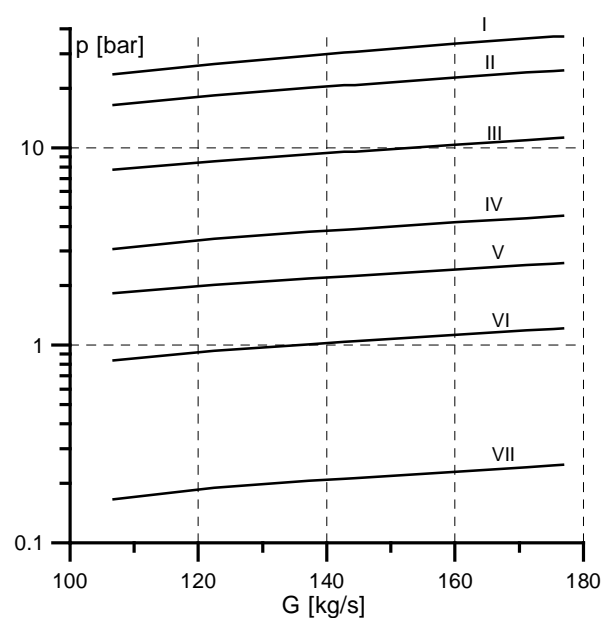
Rys.10. Entalpia wody zasilającej na wyjściu z wymienników reg. części NP. (oznaczenia zgodne z rys.1.)



Rys.12. Zmiana podstawowych parametrów turbozespołu (T – temp wody do kotła; P – moc, G – strumień masy pary na wlocie, η – sprawność turbozespołu)



Rys.11. Entalpia wody zasilającej na wyjściu z wymienników reg. części WP (oznaczenia zgodne z rys.1.).



Rys.13. Charakterystyka ciśnienia pary w upuście w zależności od ilości pary pobieranej przez turbozespół (I – VII numery upustów liczone od cz. WP)

LITERATURA

1. Badyda K.: Zagadnienia modelowania matematycznego instalacji energetycznych. Rozprawa habilitacyjna. Politechnika Warszawska 2001.
2. Badyda K., Niewiński G.: Model matematyczny układu regeneracji dla symulatora turbozespołu parowego. „Modelowanie Inżynierskie”, Tom 1, nr 32, Gliwice 2006, s. 17 – 24.
3. Flynn D.: Thermal power plant simulation and control. The IEE, London 2003.
4. Jesionek K., Wiewiórowska M., Woszczak K.: Modelowanie współpracy turbiny 13K215 z układem regeneracji. Zeszyty Naukowe Katedry Mechaniki Stosowanej z. 13. Politechnika Śląska, Gliwice 2000, s. 141-146
5. Kirpluk M.: Modelowanie matematyczne złożonych obiektów energetycznych do budowy symulatorów. VII Konferencja Problemy Badawcze Energetyki Ciepłej, Konferencje Politechniki Warszawskiej z.24, Warszawa 2005.
6. Laudyn D., Pawlik M., Strzelczyk F.: Elektrownie. Warszawa: WNT, 1990.
7. Lewandowski J., Miller A., Uzunow N., Świrski K.: Modelowanie matematyczne procesów cieplno-przepływowych w układach maszyn i urządzeń energetycznych. W: I konferencja „Problemy Badawcze Energetyki Ciepłej”, Warszawa 1993.
8. Paranjape R. D.: Modeling and control of a supercritical coal fired boiler. Dissertation Texas Tech University 1996.
9. Uzunow M.: Wpływ dyskretyzacji układu przepływowego turbiny parowej na wyniki symulacji procesów niustalonych. Praca doktorska. Politechnika Warszawska 2001.
10. Živković D.: Nonlinear mathematical model of the condensing steam turbine. FACTA UNIVERSITATIS, Series: Mechanical Engineering Vol.1, No 7, 2000, s. 871 – 878.
11. G. I. Doverman, I. I. Bukshtein, V.I. Gombolewski, G. V. Manucharova, V. A. Mironova.: Nonlinear mathematical model of a gas- and oil-fired 800MW Boiler-turbine unit. “Thermal Engineering” 1981, 28, No. 6, s. 322-326.

MATHEMATICAL MODEL OF A STEAM TURBINE FOR A POWER UNIT SIMULATOR - SELECTED ITEMS

Summary. The numerical analysis of dynamics properties creates new capabilities in designing and equipment automations and control selection in power installations as well as maintenance staff training. Results from development of mathematical model of a turbine system digital simulator are presented in the paper. An example of simulation results for load change of steam turbine with feed-water heating system are presented.