



Recenzja
pracy doktorskiej mgr inż. Grzegorza Szapajki
pt. „Modelowanie empiryczne obiegu parowego
dla zaawansowanych systemów kontroli eksploatacji”

Ocena doboru tematu

Współczesne systemy monitoringu i archiwizacji pomiarów bloków energetycznych stwarzają w połączeniu z techniką cyfrową zupełnie nowe możliwości organizacji systemów kontroli eksploatacji. Dotyczy to zarówno rozszerzenia tradycyjnych metod walidacji pomiarów o zaawansowaną walidację opartą o zasady rachunku wyrównawczego, jak i włączenia do systemu kontroli modeli matematycznych bloków energetycznych. Z punktu widzenia praktycznej przydatności najbardziej oczekiwane są systemy kontroli eksploatacji bloków energetycznych oparte o symulacyjne modele analityczno-empiryczne. Temu problemowi poświęcona jest recenzowana praca doktorska, przy czym główną uwagę zwrócono na modelowanie empiryczne obiegu parowego udoskonalając w ten sposób dotychczasowe rozwiązania zaawansowanych systemów kontroli eksploatacji opracowane w Instytucie Techniki Ciepłej Politechniki Śląskiej. Wybór tematu pracy doktorskiej uważam za trafny zarówno z punktu widzenia poznawczego, jak i utylitarne.

Uwagi merytoryczne o charakterze ogólnym.

Celem recenzowanej rozprawy doktorskiej było opracowanie udoskonalonego w stosunku do dotychczasowych rozwiązań modelu teoretyczno-empirycznego bloku energetycznego dla zaawansowanego systemu kontroli eksploatacji. Część teoretyczną modelu stanowią równania bilansowe wynikające z praw zachowania ilości substancji i energii. Do części empirycznej należą: modelowanie linii rozprężania w turbinie w oparciu o równanie przelotności i równanie na sprawność przemiany, modelowanie wymienników ciepła, w tym skraplacza oraz stopnia suchości pary wylotowej z turbiny. Wybrano dwuetapową metodę postępowania. W pierwszym etapie modelowano empirycznie oddzielnie linię rozprężania i wymienniki regeneracyjne a następnie w drugim etapie łączono modelowanie linii rozprężania dla grupy stopni i modele wymienników regeneracyjnych zasilanych z tej grupy stopni. Zamysł był bardziej ambitny polegający na przeprowadzeniu obliczeń dla wszystkich grup stopni turbiny i wszystkich wymienników regeneracyjnych łącznie. Ograniczenia programu EES pokrzyżowały te plany.

O ile bloki kondensacyjne są często przedmiotem modelowania matematycznego, o czym świadczy gruntowny przegląd stanu wiedzy zamieszczony w pracy to nie można tego powiedzieć o blokach ciepłowniczych. I w tym widzę także zasługę Autora pracy. Zdobywał on pierwsze szlify w tym temacie w ramach pracy magisterskiej, nagrodzonej zresztą w konkursie SIMP. Model symulacyjny obiegu parowego bloku ciepłowniczego zbudowano na wzór modelu bloku kondensacyjnego. Ten model byłby bogatszy gdyby oprócz wskaźnika jednostkowego zużycia ciepła i jednostkowego zużycia energii chemicznej na produkcję elektryczności w trybie kondensacyjnym wprowadzono analizę wskaźników charakterystycznych dla układu skojarzonego (sprawności cząstkowe, PES).

Wysoko oceniam metodykę i algorytmy obliczeń odchyień eksploatacyjnych wskaźnika jednostkowego zużycia ciepła i energii chemicznej paliwa w oparciu o model symulacyjny bloku oraz krzywe korekcyjne turbiny i charakterystykę energetyczną kotła.

Uwagi szczegółowe o charakterze merytorycznym uszeregowane według kolejności stron.

Sformułowanie na stronie 25 mówiące, że w Polsce są aktualnie stosowane dwie metody podziału paliwa w elektrociepłowniach: fizyczna i elektrowni równoważnej nie jest ścisłe. Wprawdzie pokutuje jeszcze stara norma, która sankcjonuje metodę fizyczną, ale odkąd duńscy eksperci z dziedziny ciepłownictwa, odkryli nam powtórnie na początku lat 90-tych metodę elektrowni równoważnej (nazywaną przez nich metodą unikniętych nakładów) metoda ta została przyjęta do praktyki przemysłowej i zalecana jest przez URE. Żałuję, że Autor rozprawy nie kontynuował przy okazji analizy wskaźników bloku ciepłowniczego dyskusji nad podziałem energii chemicznej paliwa pomiędzy ciepło, energię elektryczną skojarzoną i energię elektryczną wytwarzaną w kondensacji. Usprawiedliwia Go podjęty temat rozprawy „Modelowanie empiryczne obiegu parowego”, którego rozwiązanie nie wymagało rozstrzygnięcia problemu podziału paliwa między produkty użyteczne procesu skojarzonego.

Uważam, że niezbędny jest komentarz do przyjętej postaci funkcji celu w procedurze wyznaczania współczynników empirycznych w równaniach przelotności i sprawności wewnętrznej (równania (3.68), (3.73), (3.79)), jak również dyskusja nad wartościami wag zastosowanych w tych równaniach. Przy okazji należało podać źródło empirycznego równania (3.69).

Zastosowanie metody efektywności cieplnej w celu modelowania wymienników ciepła jest podejściem często wykorzystywanym w badaniach obiegów cieplnych. W przytoczonej monografii [29], bazującej na literaturze źródłowej używane jest pojęcie efektywności cieplnej. Autor używa zamiennie terminów „wskaźnik wykorzystania wymiennika” i „wskaźnik obciążenia”.

W przypadku modelu skraplacza (punkt 3.3.4) zauważyłem kilka nieścisłości. Dla formalności należało dopisać, że $\dot{G}_{64} = \dot{G}_{61}$. Na rys. 3.11, na który jest powołanie w tym podrozdziale nie ma punktu o numerze 64. W równaniu (3.95) powinno być $\dot{G}_{64} i_{61}$ a nie $\dot{G}_{64} i_{64}$, ponieważ i_{64} to entalpia za wymiennikiem XN1. Co najwyżej $i_{61} = i_{63}$ jeżeli pominie się przyrost entalpii kondensatu w pompie. Strumień ciepła odprowadzanego w skraplaczu nie jest równy sumie entalpii kondensatu odprowadzanego ze skraplacza i podgrzanej wody chłodzącej. Jest to zapewne tylko kwestia oznaczeń a względny strumień strat ciepła do otoczenia ze skraplacza odniesiono do sumy wymienionych dwóch wartości entalpii.

Równanie (3.100) nie jest formalnie bilansem energii układu pompy i turbiny pomocniczej lecz zapisem równości mocy efektywnych obu urządzeń. Dlatego η_p nie oznacza sprawności całkowitej pompy ale jej sprawność efektywną. Równanie (3.100) jest oczywiście poprawnym elementem algorytmu.

Rozdział 5 dotyczący charakterystyki energetycznej kotła odbiega w swej objętości od pozostałych. Rozumiem, że temat rozprawy dotyczy obiegu parowego. Stąd kocioł został potraktowany skrótowo. Jednak przy badaniu odchyień eksploatacyjnych (Rozdział 8) sprawność energetyczna kotła jest przedmiotem analizy przy okazji badań wskaźnika jednostkowego zużycia energii chemicznej paliwa. Brakuje mi w podrozdziale 8.4. odniesienia do wyników badań nad sprawnością kotłów, które są w rozdziale 5. W rozdziale 5 Doktorant nie powołuje się na swoje publikacje, mimo że pozycje [65, 67, 68] są związane z tematyką rozdziału 5.

Entalpie właściwe pary i wody nie są wielkościami mierzonymi bezpośrednio. Niepewności standardowe entalpii obliczano na podstawie niepewności pomiarów bezpośrednich ciśnienia i temperatury. Brak w pracy wyjaśnienia jak sobie radzono z parą moką. Niepewności standardowe entalpii pary w przypadku bloku kondensacyjnego są o rząd wyższe w porównaniu z blokiem ciepłowniczym. Dlaczego? Jak oszacowano niepewności strat ciepła z rurociągów. Myślę, że dobrym zakończeniem dla rozdziału 6 byłoby porównanie niezgodności równań warunków przed i po uzgadnianiu a jeszcze korzystniejsze byłoby porównanie wskaźników (np. jednostkowego zużycia ciepła).

Uważam, że rozdział 7 powinien znaleźć się w załącznikach, ponieważ prawie 85% jego objętości zajmują wykresy krzywych korekcyjnych dla turbin, które pochodzą od wytwórcy.

Myślę, że w przypadku bloków ciepłowniczych obok oceny energochłonności wytwarzania elektryczności powinna być także analizowana energochłonność wytwarzania ciepła np. przy różnych udziałach członu kondensacyjnego w wytwarzaniu elektryczności. Proszę o wyjaśnienie sformułowania „Dla każdego obciążenia bloku można określić parametry eksploatacji, przy których występuje minimalne jednostkowe zużycie energii chemicznej paliw” i „Ten stan eksploatacji uznaje się za stan referencyjny...” w kontekście zdania „Charakterystykę referencyjną bloków energetycznych wyznacza się na podstawie pomiarów specjalnych, podczas których praca bloku przebiega w pobliżu stanów optymalnych”. Wydaje mi się, że zapis równania (8.4) powinno się było skrócić do ogólnego zapisu pochodnych w rozwinięciu w szereg Taylora, ponieważ w objaśnieniach powtarza się wzory szczegółowe wynikające z obliczania pochodnych. Objaśnienie za wzorem (8.7) nie odnosi się do tego wzoru. Brakuje zaś objaśnienia do tego wzoru. Zaproponowane podejście i algorytm obliczeń odchyłek eksploatacyjnych uznaję jako jedno z najważniejszych osiągnięć recenzowanej pracy doktorskiej.

Ważniejsze uwagi redakcyjne

Str. 13 – Powinno być: „Thermoflow oferuje dwie grupy produktów - ...”

Str. 37 – Raczej „jest mniejszy”.

Str. 49 – Raczej „za pomocą modelu bilansowego”.

Str. 52 – Powinno być „straty ciśnienia”.

Str. 54 – Termin „równanie przelotowości” jest też używany ale w pracy używa się „przelotności”.

Przemiana jest adiabatyczna a turbina może być kondensacyjna, przeciwpięzna, itp.

Str. 63 – Jest (3.16); ma być (3.15).

Str. 71 – Jest „wpływa”; ma być „wpływ”.

Str. 74 – Jest „punktu widzenia”; ma być „z punktu widzenia”.

Jest „przy pomocy analizy”; powinno być „za pomocą analizy”.

Str. 76 – Warto wyjaśnić, że „d” to dławica a „z” zawór.

Str. 78 – Brak konsekwencji – ciśnienie podane w barach.

Str. 79 – Jest „Ilość rurek”; powinno być „Liczba rurek”.

Nie „on jest” a „jest on”.

Str. 84 – W równaniu (4.10) zmienić kolejność – C_{1s} .

Jest „izobarami”; ma być „izobara”.

Str. 85 – Jest „równanie”; ma być „równania”.

- Str. 102 – W przedostatnim zdaniu niepotrzebne drugie „jest”.
- Str. 105 – Wprowadzenie może mieć swój numer.
- Str. 106 – Potrzebne odwołanie do literatury przy zalecaniu metody pośredniej.
- Str. 113 – Wprowadzenie może mieć swój numer.
- Str. 116 – ... sprawdzić rząd macierzy Jacobiego...
- Str. 121 – Jest „ciepłowniczego“; ma być „kondensacyjnego“.
- Str. 127 – Wprowadzenie może mieć swój numer. To samo strona 147.
Ciepłowniczy to także blok energetyczny. Powinno być w blokach kondensacyjnych i ciepłowniczych.
- Str. 148 – Zamiast „macierze kolumnowe” lepiej użyć terminu „wektory”, bez precyzowania kolumnowy czy wierszowy.
- Str. 149 – Jest q_{baz}^T ; ma być q_T^{baz} .
- Rys. 8.1-8.16 – Lepiej „w oparciu o obliczenia symulacyjne“ a jeżeli już to poprawnie „za pomocą modelu symulacyjnego”
- Str. 156 – ...krzywych korekcyjnych... - 2 wiersz od dołu.
- Str. 174 – Pozycja [67] to nie rozdział, a referat w zbiorze referatów.

Wniosek końcowy

Recenzowana praca doktorska wraz z czternastoma załącznikami stanowi udokumentowany materiał świadczący o wyjątkowym nakładzie pracy nad doskonaleniem zaawansowanych systemów kontroli eksploatacji bloków energetycznych. Praca wnosi nowe elementy do dotychczas opracowanych modeli. Należy do nich oprócz wzbogaconej części empirycznej modelu, metodyka obliczeń odchyłeń charakterystycznych wskaźników eksploatacyjnych bloków energetycznych. Recenzowaną pracę doktorską cechują zarówno walory poznawcze, jak i użyteczne. Według mojej opinii spełnia ona z nadmiarem wymagania stawiane pracom doktorskim z dziedziny nauk technicznych i zasługuje na wyróżnienie.

Andrzej Zieliński