



Gdańsk 02.05.2019

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała Leśko
wykonana na zlecenie Dziekana Wydziału Mechanicznego, Energetyki i Lotnictwa
Politechniki Warszawskiej (pismo MEiL 326/2019 z dn. 07.03.2019)**

1. Wstęp.

Opiniowana praca pt. „A method for operational optimisation in a district heating system with simultaneous use of different solutions for thermal energy storage” została wykonana pod kierunkiem dr. hab. inż. Wojciecha Bujalskiego, prof. nadzw. PW. Promotorem pomocniczym pracy jest dr Kamil Futyma. Rozprawa liczy 168 stron, napisana jest w języku angielskim, zawiera 8 rozdziałów (wg spisu treści) poprzedzonych abstraktem, streszczeniem w języku polskim, spisem treści, wykazem oznaczeń i skrótów oraz podziękowaniem. Spis literatury zawiera 57 pozycji.

2. Charakterystyka i ocena rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska poświęcona jest techniczno-ekonomicznej optymalizacji pracy systemu ciepłowniczego. Podstawowym badanym obiektem jest pewien duży system ciepłowniczy zasilany z elektrociepłowni. Główny obszar zainteresowania Autora rozciąga się na wykorzystanie magazynów ciepła w postaci zbiorników wodnych, ciepła zakumulowanego w rurociągach i inercji cieplnej budynków.

Na wstępie obszernej pracy w rozdziale 1 (z uwagi na rozbieżność pomiędzy numeracją rozdziałów w spisie treści i w tekście pracy, w niniejszej recenzji będziemy odwoływać się do numeracji ze spisu treści), Autor wprowadza czytelnika w problematykę prowadzenia złożonych systemów elektrociepłowni w celu zapewnienia maksymalnego efektu finansowego związanego z produkcją energii elektrycznej i energii cieplnej oraz w celu zaspokojenia bieżącego zapotrzebowania na ciepło. Koncentruje się przy tym na możliwości wykorzystania zbiorników ciepła oraz wykorzystania inercji sieci ciepłowniczej i budynków. Rozważa zmienność cen na rynku energii elektrycznej.

W rozdziale 2 przedstawiono motywację podjęcia tematyki badawczej, którą jest rosnące zapotrzebowanie na odpowiednie zarządzanie systemami elektrociepłowni oraz konieczność stworzenia narzędzi numerycznych wspomagających zarządzanie, a uwzględniających pewne elementy i możliwości systemu, brakujące w oprogramowaniu komercyjnym, w tym niektóre rodzaje magazynów ciepła oraz możliwości wykorzystania inercji cieplnej układu. Jako podstawowe cele pracy określono:

- opracowanie modeli matematycznych przepływu ciepła w elementach systemu elektrociepłowni, oraz
- opracowanie założeń i metody optymalizacji pracy elektrociepłowni,

- praktyczną optymalizację wybranego systemu ciepłowniczego.

W końcowej części rozdziału pojawia się teza pracy mówiąca, że możliwe jest opracowanie algorytmu globalnej optymalizacji pracy elektrociepłowni z uwzględnieniem wszystkich rozważanych sposobów magazynowania ciepła i zarządzania zasobami.

Realizacja postawionych celów jest zadaniem badawczym o wyjątkowo dużym stopniu trudności. Wymaga szerokiego multi-dyscyplinarnego spojrzenia na pracę i zarządzanie zasobami elektrociepłowni. Wymaga od Doktoranta biegłego posługiwania się aparatem obliczeniowym z zakresu wymiany ciepła, stanów energetycznych urządzeń siłowni z turbinami przeciwprężnymi / upustowo-przeciwprężnymi / upustowo-kondensacyjnymi, znajomości rynków energii i metod analizy ekonomicznej oraz metod optymalizacji funkcji celu w zakresie rozwiązywania problemów techniczno-ekonomicznych. Stworzone w trakcie pracy nad rozprawą narzędzia staną się niewątpliwie przedmiotem zainteresowania ze strony operatorów systemów ciepłowniczych.

Rozdział 3 poświęcono przeglądowi literatury. Autor jest dobrze zorientowany w literaturze przedmiotu. Wśród cytowanych pozycji znajdują się ważniejsze prace z zakresu modelowania siłowni CHP, optymalizacji ich pracy, optymalizacji sieci ciepłowniczych, wykorzystania magazynów ciepła i inercji cieplnej sieci. Ważną konkluzją z przeglądu literatury jest brak pozycji ujmujących całościowo wszystkie zagadnienia, które Autor chciałby rozważyć.

W rozdziale 4 opisano metody modelowania elementów systemów ciepłowniczych. W obliczeniach mocy cieplnej i temperatury powrotnej dla poszczególnych podstacji sieci ciepłowniczey przyjęto liniową zależność od temperatur mediów. W przykładach obliczeniowych porównano wartości modelowe wyznaczone dla kilku podstacji z danymi eksperymentalnymi. Dokładność wyników zależy od obciążenia podstacji, przy czym jak pokazano nie zawsze można przyjąć dalsze uproszczające założenia odnośnie temperatur mediów. Ponadto wyznaczono stałą czasową związaną z inercją cieplną budynku. Przedstawiono model cieplny rurociągu ciepłowniczego oraz sposoby obliczania inercji cieplnej rurociągu. Zilustrowano propagację kilku wariantów impulsu przegrzania medium w sieci ciepłowniczey.

Rozdział 4 jest bardzo obszerny, dobrze zredagowany i zawiera dużo ciekawych informacji. Napisany jest przy użyciu poprawnej terminologii. Opracowanie graficzne rysunków i tabel w zasadzie nie budzi zastrzeżeń. Można dopatrzeć się jednak kilku nieścisłości:

- równ. 21 dotyczy strumienia ciepła oddanego do gruntu, podczas gdy oznaczenie sugeruje co innego,
- oznaczenia wartości wlotowych i wylotowych parametrów przepływu na rys. 17 są niekonsekwentne – m_{in} , $T_{incoming}$, m_{out} , $T_{outgoing}$. W równ. 33 i dalszych występują natomiast wielkości T_{coming} , T_{going} ,
- przyjmuje się założenie, że ciepło właściwe c_T jest funkcją słabo zmienną, w końcu zmienność tę pomija się przechodząc do równ. 35 i dalszych, stąd stosowanie tak złożonej symboliki jak np. $c_{Tgoing(\tau)}$ wydaje się zbędne.

W rozdziale 4 ponadto przedstawiono model cieplny ciepłowni oraz siłowni CHP. W rozważanym zakresie pracy siłowni CHP przyjęto liniową zależność pomiędzy mocą elektryczną a mocą cieplną (dostarczoną do układu) dla turbiny upustowo-przeciwprężnej, co z pewnością jest założeniem upraszczającym (założenie zależności liniowej dotyczy także turbiny upustowo-kondensacyjnej, patrz. rozdz. 6, gdzie postać równ. 51 jest korygowana poprzez równ. 73 z uwzględnieniem mocy chłodzącej kondensatora). Weryfikacja tego

modelu przy pomocy danych eksperymentalnych wypada pomyślnie, bardziej pomyślnie niż dla modelu pod nazwą „topology approach”, tab. 2. W końcowej fazie rozdziału znajduje się model i bilans cieplny zbiornika ciepła. W odniesieniu do tej części pracy nasuwa się kilka uwag o charakterze dyskusyjnym:

- pełna ocena wyników w tab. 2 przez potencjalnego czytelnika jest utrudniona z uwagi na brak informacji z jakiego bloku pochodzą te dane, i fakt, że osie wykresów nie zawierają skali,
- model określony jako „topology approach” jest opisany w pracy bardzo enigmatycznie,
- uwagi do oznaczeń wielkości charakteryzujących przepływ ciepła w zasobniku są tu podobne jak poprzednio dla przypadku modelu cieplnego rurociągu.

Rozdział 5 dotyczy technicznych aspektów magazynowania ciepła. Podstawowym zadaniem różnych form magazynów ciepła jest redukcja mocy urządzeń szczytowych, przy jednoczesnym zagwarantowaniu komfortu cieplnego odbiorców w połączeniu z osiągnięciem korzyści ekonomicznych. Główny nacisk kładzie się na magazynowanie ciepła w zasobnikach, rurociągach powrotnych oraz w budynkach, choć w przypadku budynków zarządzanie energią cieplną ma na celu tylko (i aż) wykorzystanie inercji cieplnej budynku. Jak na razie dedykowane instalacje magazynowania ciepła w budynkach, np. w fundamentach są nieliczne w skali światowej, raczej niedostępne jeszcze w naszym kraju. Przedstawione wykresy ilustrują możliwości zarządzania energią cieplną poprzez odpowiednią korekcję profilu temperatury zewnętrznej, co prowadzi do znacznych zmian w przepływie mediów.

W rozdziale 6 przeprowadzono optymalizację dużego systemu ciepłowniczego z wykorzystaniem oprogramowania komercyjnego. Obiektem optymalizacji była sieć ciepłownicza w Poznaniu zasilana z siłowni CHP Karolin, na którą składają się

- duo blok BC50 z dwoma kotłami OP140 oraz turbiną upustowo-przeciwprężną 13UP65,
- blok BC100 z kotłem OP430 oraz turbiną upustowo-ciepłowniczą 13UC105,
- blok BK100 z kotłem OP430 oraz turbiną upustowo-kondensacyjną 13UC105K.,
- grupa kotłów szczytowych,
- grupa wodnych zasobników ciepła.

Zastosowano solver MILP (mixed integer linear programming), funkcję celu zdefiniowano na bazie maksymalnego efektu ekonomicznego obejmującego wszystkie dochody za energię (łącznie z zielonymi certyfikatami za energię elektryczną z biomasy dla OP140) oraz wchodzące w grę koszty (paliwo, emisje, koszty operacyjne, koszty uruchomień i wyłączeń). Prowadzono optymalizację z ograniczeniami (więzami nałożonymi m.in. na maksymalne wartości produkcji i obciążeń poszczególnych urządzeń) dla zadanego (przewidywanego) profilu temperatury zewnętrznej, zapotrzebowania na ciepło i zmienności cen. W konkretnym rozważanym przypadku bloki BC50 i BC100 pracują w pełnej kogeneracji, blok BC50 głównie w podstawie, blok BC100 podążając za zapotrzebowaniem na ciepło. Najbardziej zmienne, co można przewidzieć jest obciążenie bloku BK100, z pracą w trybie kondensacyjnym w okresach najwyższych cen za energię elektryczną. Proces wspomagany jest aktywnym użytkowaniem (ładowaniem / rozładowaniem) zasobników ciepła.

Ważnym rezultatem badań prowadzonych w tej części rozdziału jest wskazanie braków i ograniczeń metod stosowanych w oprogramowaniu komercyjnym, co posłużyło do sformułowania własnego algorytmu i narzędzia optymalizacyjnego w następnym podrozdziale rozdz. 6. Do głównych wartości dodanych opracowanego własnego algorytmu w porównaniu z oprogramowaniem komercyjnym należy zaliczyć przede wszystkim

uwzględnienie wszystkich rozważanych rodzajów magazynów ciepła oraz zarządzanie stroną popytową poprzez wykorzystanie inercji cieplnej układu. Przedstawiono szereg przykładów praktycznej optymalizacji układu ciepłowniczego przy rozdzielnym i jednoczesnym zarządzaniu różnymi formami magazynów ciepła w oparciu o własny algorytm.

Dużym walorem rozprawy jest rozdział 7 zawierający dobrze zredagowane podsumowanie skupiające się na otrzymanych wynikach pracy i oryginalnych elementach badań. Zarówno w tym rozdziale, jak i w całej pracy przewija się miejscami pojęcie globalnej optymalizacji. Opracowany przez autora algorytm pretenduje do roli narzędzia rozwiązującego problem globalnej optymalizacji. Osiągnięcie ekstremum globalnego funkcji celu jest możliwe w zagadnieniach MILP w rozsądnym czasie rzeczywistym.

Praca jest zredagowana bardzo starannie, napisana doskonałą angielszczyzną. Rysunki, tabele zostały opracowane z właściwą pieczołowitością. Tekst wolny jest od literówek. W obszernych dysertacjach zwykle jednak znajduje się pewną liczbę błędów i nieścisłości. W recenzowanej pracy jest ich stosunkowo mało, ale warto je poprawić przez przystąpieniem do publikacji w renomowanym czasopiśmie:

- można zauważyć parę „połkniętych” rodzajników lub przedimków, które łatwo uzupełnić przy uważnym powtórny czytaniu pracy,
- wyrażenia typu „...of the unit number j”, „...for the substation number j” mogą brzmieć niejednoznacznie poprzez skojarzenie wyrazu “number” z liczbą (w sensie mnogości); lepiej będzie „...of the unit j” lub “...for the substation of number j”
- wyrażenie „...heat conducted to the surrounding air”, np. str. 14, może brzmieć nieprecyzyjnie, gdyż głównym mechanizmem przekazywania ciepła do otaczającego gazu jest zwykle konwekcja,
- dla skrótów BPKD, PSE należy podać tłumaczenie angielskie,
- rys. 61 należy powiększyć, np. do rozmiarów pasujących do układu wertykalnego na stronie.

3. Wniosek końcowy.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska charakteryzuje się wysokim poziomem naukowym. Problematyka pracy jest bardzo istotna z punktu widzenia zastosowania praktycznego. Do podstawowych walorów pracy należą samodzielne rozwiązanie niezwykle trudnego zagadnienia badawczego, oryginalność wyników oraz ich duża wartość użyteczna. Stworzone w trakcie pracy nad rozprawą narzędzia cieszą się zainteresowaniem ze strony operatorów systemów ciepłowniczych. Autor dostarcza algorytmu i narzędzia pozwalającego na maksymalizację efektu ekonomicznego pracy złożonego obiektu technicznego jakim jest sieć ciepłownicza zasilana z siłowni CHP.

Autor wykazał się ogromną wiedzą w zakresie ciepłownictwa. Posiada dar rzetelnego prezentowania i interpretacji wyników swojej pracy. Praca ma znaczne szanse na publikację / cykl publikacji w renomowanych czasopismach naukowych o zasięgu światowym. Zamieszczone w recenzji nieliczne uwagi krytyczne i zauważone nieścisłości nie podważają wysokiej oceny poziomu naukowego rozprawy. W konkluzji stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. M. Leško spełnia wymagania zapisane w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

