

Gliwice, 30.05.2023 r.

Dr hab. inż. Jacek Kalina, Prof. Pol. Śl.
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Katedra Techniki Ciepłej
ul. Konarskiego 22, pok. 213, 44-100 Gliwice
tel. +48 32 237 24 27
e-mail: jacek.kalina@polsl.pl
identyfikator ORCID: 0000-0001-5153-0974

Recenzja rozprawy doktorskiej autorstwa mgr. inż. Michała Guzka zatytułowanej:
„System optymalizacji pracy Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej”

1. Podstawa wykonania recenzji

Niniejsza recenzja została wykonana na podstawie decyzji Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej z dnia 18.04.2023 r. oraz pisma o sygnaturze RND-IŚGiE/40/2023 z dnia 25.04.2023 r. podpisanego przez Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka prof. dr hab. inż. Tomasza Wiśniewskiego.

2. Zawartość pracy

Do recenzji przedstawiono rozprawę doktorską w formie publikacji zwartej. Treść pracy podzielono na 6 ponumerowanych rozdziałów, dodatek A oraz wykaz literatury i opatrzone streszczeniami w języku polskim i angielskim. Na wykaz literatury składają się 74 pozycje autorów krajowych i zagranicznych. Praca liczy 147 stron formatu 162 x 235 mm.

3. Przedmiot rozprawy

Praca dotyczy optymalizacji parametrów pracy rozległego systemu ciepłowniczego, w którego skład wchodzi cztery źródła ciepła dużej mocy oraz sieć ciepłownicza o układzie pierścieniowym. Przedmiotem pracy jest opracowanie narzędzia informatycznego, które pozwoliłoby na optymalizację pracy sieci ciepłowniczej w sensie minimalizacji kosztu ciepła, wody uzupełniającej oraz energii elektrycznej zużywanej na pompowanie wody. Zadanie optymalizacji dotyczy systemu o określonej (istniejącej) strukturze technologicznej zaprojektowanego dla ustalonych danych znamionowych. Przedmiotem optymalizacji są zatem bieżące nastawy parametrów operacyjnych w horyzoncie czasu 18 do 120, które w codziennej praktyce eksploatacyjnej są dokonywane przez operatora sieci ciepłowniczej / systemu dystrybucyjnego ciepła. Opracowane przez doktoranta narzędzie ma z założenia efektywnie wspomagać operatora prowadząc do obniżenia kosztów ciepła przy jednoczesnym zachowaniu bezpieczeństwa pracy sieci ciepłowniczej.



4. Zasadność podjęcia tematu

Miejskie systemy ciepłownicze stanowią bardzo ważny element krajowego systemu energetycznego. Głównymi problemami z jakim obecnie spotykają się przedsiębiorstwa ciepłownicze to zapewnienie ciągłości dostaw przy jednoczesnym zapewnieniu konkurencyjnego poziomu kosztów w warunkach zmieniającego się rynku energii i zaawansowanych działań związanych z globalną transformacją energetyczną na rzecz klimatu. W tym kontekście podjęcie tematyki rozprawy uważam za w pełni zasadne, ważne i aktualne w świetle znacznego zainteresowania nią ze strony przedsiębiorstw ciepłowniczych.

Obecne doświadczenia pokazują, że optymalizacja ruchu sieci ciepłowniczych nie jest zadaniem trywialnym. W wielu przedsiębiorstwach krajowych sieci ciepłownicze prowadzone są ręcznie przez operatorów. W niektórych podejmuje się działania związane z wdrażaniem narzędzi informatycznych wspomagających pracę operatorów. Zwykle są to symulatory ciepłownicze pozwalające na weryfikację pewnych decyzji ruchowych. Praktycznie w żadnym przedsiębiorstwie sterowanie pracą sieci nie odbywa się w sposób w pełni automatyczny. Wynika to z braku odpowiednich systemów pomiarowych, braku w sieciach elementów wykonawczych automatyki, braku odpowiedniego oprogramowania czy wreszcie z tak trywialnych przyczyn jak brak wiarygodnej inwentaryzacji istniejącej infrastruktury i zasobów. Na tle kraju, warszawska sieć ciepłownicza jest systemem jednym najbardziej zaawansowanych. Pomimo tego, podobnie jak ma to miejsce w innych przedsiębiorstwach, w aspekcie optymalnego sterowania wciąż znajduje się ona w fazie uczenia się. Praca doktoranta z całą pewnością wprowadza tu pewną wartość dodaną i przyczynia się do poprawy stanu wiedzy w zakresie optymalizacji rozległych sieci ciepłowniczych.

5. Teza i zakres rozprawy

Opiniowana praca ma charakter analizy teoretycznej oraz eksperymentalnej (w sensie testów prowadzonych na rzeczywistej sieci ciepłowniczej) prowadzącej do optymalnego wyboru wartości kluczowych parametrów pracy rozległej sieci ciepłowniczej z wieloma źródłami ciepła. W tym celu doktorant przeprowadził odpowiednie analizy, zbudował algorytmy i narzędzia informatyczne oraz przeprowadził testy powdrożeniowe w rzeczywistych warunkach funkcjonowania przedsiębiorstwa ciepłowniczego. Podstawowym kryterium przyjmowanym przez doktoranta do weryfikacji poprawności działania narzędzi obliczeniowych jest bezpieczeństwo działania sieci ciepłowniczej.

Doktorant sformułował pojedynczą tezę pracy w której zakłada możliwość stworzenia narzędzia pozwalającego na optymalizację dużej sieci ciepłowniczej bez jej modelu fizycznego. Stwierdza również że dokładność obliczeń prowadzonych z użyciem takiego narzędzia będzie na tyle wysoka, że jej zwiększenie nie spowodowałoby istotnego polepszenia wartości biznesowej systemu. Przy czym przez wartość biznesową systemu doktorant rozumie użyteczność systemu dla poprawy pracy sieci z punktu widzenia jej właściciela.

W ocenie recenzenta teza nie została sformułowana wystarczająco precyzyjnie co utrudnia jej pełne zrozumienie. Dotyczy to przede wszystkim założeń dotyczących jakości wyników. Spodziewać się można, że „wartość biznesowa” będzie wyrażana w jednostkach monetarnych natomiast tłumaczące ją słowo „użyteczność” to cecha, którą trudno wyrazić w jednostkach miary. Pełne zrozumienie tezy jest możliwe dopiero po zapoznaniu się postacią funkcji celu w sformułowanym zadaniu optymalizacyjnym, jaką jest minimum całkowitych kosztów ciepła doprowadzonego do sieci ciepłowniczej, jego dystrybucji i wody uzupełniającej.

Teza poprawnie wskazuje na najbardziej istotny element pracy jakim jest brak fizykalnego modelu sieci, co odpowiada modelowi identyfikacyjnemu typu „czarna skrzynka”.

Praca szczegółowo omawia problemy występujące przy modelowaniu dużych sieci ciepłowniczych o układzie pierścieniowym z wieloma źródłami ciepła. Oparta jest w dużej mierze na praktyce eksploatacyjnej. Zbudowany model identyfikacyjny wytrenowano na danych pomiarowych warszawskiej sieci ciepłowniczej oraz danych wygenerowanych w symulatorze sieci. Z uwagi na zastosowane podejście (model identyfikacyjny) oraz ograniczoną ilość dostępnych danych, zawiera ona liczne uproszczenia. Na przykład w zakresie informacji o stanie armatury.

Główną treść pracy podzielono na sześć rozdziałów. Rozdział pierwszy jest rozdziałem wprowadzającym. W sposób skrótowy przedstawiono w nim obiekt badań (warszawską sieć ciepłowniczą), przedstawiono cel i zakres pracy, tezę pracy oraz dokonano przeglądu literatury. W rozdziale drugim zdefiniowano zadanie optymalizacyjne. W rozdziale trzecim omówiono opracowany model sieci ciepłowniczej. W rozdziale czwartym przedstawiono prace związane z implementacją opracowanego narzędzia informatycznego. W rozdziale piątym omówiono zastosowaną metodologię testowania narzędzia informatycznego oraz przedstawiono wyniki obliczeń. Rozdział szósty jest podsumowaniem, które „udało się” doktorantowi zmieścić na 1,5 strony opracowania.

6. Ocena oryginalności pracy

Opiniowana rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Guzka stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego z zakresu optymalizacji systemów rozległych. Doktorant uzyskał wyniki w znacznej mierze na drodze rozważań i prac własnych oraz obecnie dostępnej wiedzy literaturowej.

Większość osiągnięć wykazanych przez doktoranta to osiągnięcia oryginalne, niepublikowane wcześniej w literaturze przedmiotu. W podrozdziale 1.4 w sposób syntetyczny przedstawiono wyniki studiów literaturowych oraz określono charakterystykę opracowanego narzędzia na tle obecnej wiedzy. Doktorant prawidłowo zidentyfikował potrzebę uzupełnienia wiedzy literaturowej o wyniki i wnioski z prac dotyczących rozległych systemów ciepłowniczych z wieloma źródłami ciepła. Poprawnie przedstawiono wartość dodaną pracy na tle literatury. Poprawnie też stwierdzono, że opracowane rozwiązanie ma charakter unikatowy.

Doktorant wykazał się kreatywnością oraz dużą samodzielnością w rozwiązaniu postawionego problemu, a przedstawiona rozprawa potwierdza jego ogólną wiedzę teoretyczną oraz umiejętność prowadzenia pracy naukowej w zakresie nauk technicznych.

Według doktoranta oryginalne elementy pracy to:

- algorytmy optymalizacji oparte o modele identyfikacyjne i uczenie maszynowe;
- algorytm wyboru źródeł ciepła do zasilania sieci;
- uwzględnienie stanu pomiarowego sieci w chwili rozpoczęcia optymalizacji;
- optymalizacja dużego systemu ciepłowniczego;
- wdrożenie i praktyczna weryfikacja modelu i narzędzi obliczeniowych.

W ocenie recenzenta doktorant poprawnie zidentyfikował oryginalne elementy pracy. Podkreślić przy tym należy, że problematyka, którą podjął doktorant, a w szczególności zagadnienie modelowania sieci ciepłowniczych w oparciu o modele identyfikacyjne są stosunkowo rzadko podejmowane przez inne ośrodki i podmioty przemysłowe, co wynika z licznych trudności, które doktorant wyczerpująco przedstawił w treści pracy. Przykładem przedsiębiorstwa, które podjęło podobne wyzwanie jest francuska firma DCBrain (start-up InnoEnergy) wdrażająca narzędzi sztucznej inteligencji do zarządzania sieciami ciepłowniczymi.

Z uwagi na rozległość sieci, liczebność źródeł ciepła i mnogość armatury sieciowej, w modelu sieci zaproponowano szereg uproszczeń, jak np. typowe przypadki ustawień armatury odcinającej. W większości przypadków uproszczenia zostały zaproponowane przez doktoranta i stanowiły rozwiązania oryginalne.

Ciekawym i oryginalnym podejściem jest prowadzenie wykorzystanie obliczeń symulacyjnych z wykorzystaniem oprogramowania Termis do wygenerowania brakujących danych pomiarowych, lub inaczej mówiąc do tzw. wirtualnego eksperymentu identyfikacyjnego. Z drugiej strony, nie jest to jednak w pełni w zgodzie z tezą pracy, która mówi o optymalizacji bez wykorzystania modelu fizycznego sieci.

Potwierdzeniem oryginalnych osiągnięć doktoranta jest zauważalny całkowity dorobek bibliometryczny. Obejmuje on 4 publikacje indeksowane w bazie Scopus, dla których aktualny indeks H wynosi 3 a całkowita liczba cytowań 27. Dwie z publikacji ukazały się w czasopiśmie Energy, zaś kolejne dwie w recenzowanych materiałach konferencyjnych. W ocenie Recenzenta jest to dorobek dobry na obecnym etapie rozwoju naukowego doktoranta, szczególnie, że jest on pracownikiem przemysłu.

Należy jednak podkreślić, że produkt będący przedmiotem wdrożenia jest wynikiem pracy zespołowej. W jego tworzeniu doktorant pełnił rolę głównego wykonawcy. Jego wkład został przedstawiony w Dodatku A do głównej treści pracy. Przedstawiony wkład własny autora w pokrywa się z zawartością pracy i może być rozpatrywany jako wyodrębnione osiągnięcie autora. W szczególności dotyczy to formułowania założeń, budowy modelu sieci ciepłowniczej, zdefiniowania zadania optymalizacyjnego, testów oprogramowania, oraz formułowania wniosków końcowych i rekomendacji.

7. Wartości użytkowe pracy

Praca ma charakter wysoce użyteczny a jej celem jest rozwiązanie problemu praktycznego, jakim jest sterowanie pracą sieci ciepłowniczej i minimalizacja kosztu dostaw ciepła do odbiorców.

Praca została zrealizowana w ramach programu Doktorat wdrożeniowy i zgodnie z jego warunkami zakończyła się wdrożeniem w przedsiębiorstwie ciepłowniczym. Obecnie

opracowane narzędzie jest wykorzystywane jako system wspomagania decyzji operatora sieci ciepłowniczej. Opracowane narzędzie oraz forma jego wykorzystania mają dużą wartość użytkową z uwagi na poprawę efektywności energetycznej, ekologicznej i ekonomicznej pracy sieci ciepłowniczej. W tekście pracy doktorant podkreśla wynikające z wdrożenia obniżenie emisji dwutlenku węgla o 30 000 ton na rok.

Silnym elementem pracy jest wdrożenie systemu eksperckiego generującego podpowiedzi dla operatora warszawskiej sieci ciepłowniczej, oraz długi okres testowania oprogramowania. Dzięki niemu uzyskano wiele cennych informacji, które mogą zostać wykorzystane przy rozwoju tego typu narzędzi, jak również dla wdrożeń produktów komercyjnych.

Wartościowym, użytkowym elementem pracy jest przedstawiona w podrozdziale 2.1 ankieta użytkownika. Ma ona o tyle istotne znaczenie, że w dużych systemach ciepłowniczych takich jak warszawski, często ma miejsce rozdział własności źródeł ciepła i sieci pomiędzy różne przedsiębiorstwa energetyczne. Niestety, po przedstawieniu zagadnień poruszonych w ankiecie, doktorant nie dokonuje syntetycznego omówienia kluczowych wyników i nie przedstawia w sposób zwarty założeń przyjętych do budowy systemu optymalizacyjnego. Zamiast tego odsyła do kolejnych rozdziałów, gdzie część informacji jest rozproszona w tekście, a niektóre założenia są przyjmowane bez przekonującego uzasadnienia.

8. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Pomimo ogólnego pozytywnego odbioru pracy, znajdują się w niej elementy, które w mojej ocenie, ogólnie mówiąc nie są idealne oraz takie, które wymagają dyskusji i dalszych wyjaśnień. Poniżej przedstawiam moje szczegółowe uwagi krytyczne i dyskusyjne do treści rozprawy.

- 1) Dla ułatwienia pełnego zrozumienia treści w pracy w początkowej jej części powinien znaleźć się opis działania sieci (np. wyciąg z instrukcji eksploatacji) i opis działania rynku ciepła w Warszawie. Bez tych informacji trudne jest pełne zrozumienie wprowadzanych przez doktoranta ograniczeń w modelu optymalizacyjnym. Opis sieci i sposobu jej eksploatacji przedstawiony w rozdziale 1 jest lakoniczny.
- 2) Nie jest jasne co oznacza słowo „system” w tytule pracy. Przez system zwykle rozumie się zespół komponentów funkcjonalnych, które łącznie tworzą pewną strukturę o określonej funkcjonalności. W pracy nie określono w sposób precyzyjny jakie komponenty wchodzi w skład zbudowanego systemu. Zarówno w streszczeniu pracy jak i w jej treści doktorant używa określenia „optymalizator”. Nie jest jasne, czy rzeczony „optymalizator” jest tożsamy z „systemem optymalizacji”.
- 3) Autor nie odnosi się do faktu, że modele identyfikacyjne typu „czarna skrzynka” są obarczone „błędem” stanu zastanego. Oznacza to, że do kalibracji modelu oraz określenia wartości liczbowych współczynników w zaproponowanych równaniach wykorzystano wartości pochodzące z pomiarów, które są wynikiem obecnej praktyki eksploatacyjnej. Model taki zatem będzie generował wyniki w zakresie poszczególnych nastaw zbliżone do obecnych, które niekoniecznie są optymalne. W znacznym stopniu generowane rozwiązanie bazuje na obecnym sposobie prowadzenia sieci ciepłowniczej, którego optymalności w sposób jawny nie zweryfikowano w sensie kryterium minimum zdefiniowanej funkcji celu.
- 4) Nie jest jasne na ile opracowany model i narzędzie będą przydatne w przyszłości w kontekście wdrażania odnawialnych źródeł energii i ciepła odpadowego, które wg

propozycji zmian dyrektywy EED (Energy Efficiency Directive) po roku 2050 mają być jedynymi źródłami ciepła w efektywnych systemach ciepłowniczych. W pracy autor nie przedstawia na ile opracowane narzędzie jest elastyczne i czy pozwala analizować zmiany w strukturze sieci oraz źródeł ciepła.

- 5) Na stronie 10 doktorant pisze „Wiele zagadnień optymalizacji przenika zarówno sieć jak i wytwarzanie, a punkt przecięcia odcięcia obszaru w procesie optymalizacji jest często przesuwany.” Zdanie to jest niezrozumiałe. Czy oznacza ono, że optymalizator generuje również sygnały nastaw dla źródeł ciepła? Nie wynika to bezpośrednio z treści pracy, gdyż technologia źródeł ciepła nie jest w niej omawiana.
- 6) Spis ważniejszych skrótów i oznaczeń pojawia się na stronie 28 jako podrozdział 2.3. Jest to układ nietypowy i utrudnia czytanie pracy w zakresie definiowanego modelu.
- 7) Tytuł podrozdziału 1.2 (Tezy pracy) powinien brzmieć Teza pracy, jako że przedstawiono wyłącznie jedną tezę.
- 8) Istotnym elementem opracowanego narzędzia jest prognoza zapotrzebowania ciepła. Nie jest jasne czy generowana przez system optymalizacji prognoza dotyczy zapotrzebowania na ciepło u odbiorców czy zapotrzebowania na ciepło loco źródła (wejścia do sieci).
- 9) Na stronie 23 doktorant pisze o analitycznym sposobie rozwiązania. Nie jest zrozumiałe co doktorant miał na myśli pod pojęciem „sposobu analitycznego”. Z dalszej części tekstu można wywnioskować, że chodzi o opracowanie modelu identyfikacyjnego regresyjnego typu „czarna skrzynka”. Podobnie nie jest w pełni zrozumiałe co doktorant nazywa metodą symulacyjną. Można jedynie domniemać, że chodzi o model fizyczny sieci ciepłowniczej.
- 10) Na str. 23 nie wyróżniono podejścia bazującego na modelu „szarej skrzynki” (ang. Grey box) tj. modelu fizycznym sieci skalibrowanym danymi pomiarowymi i uzupełnionym równaniami parametrycznymi (identyfikacyjnymi) niektórych komponentów. Dlaczego?
- 11) Na stronie 24 doktorant pisze „Czy z wykorzystaniem algorytmów optymalizacyjnych czy też nie, polega przecież na ciągłej optymalizacji...” Ruch sieci na podstawie doświadczeń operatora zwykle nie jest zoptymalizowany. Operatorzy wykorzystują akumulacyjność i bezwładność sieci, która zapewnia bezpieczeństwo pracy sieci niweluje błędy nastaw. Zwykle podstawowym kryterium jest zapewnienie dostawy ciepła i temperatury nośnika zgodnej z umową wiążącą dostawcę i odbiorcę. Często sieci są przegrzewane a źródła włączane i wyłączane w sposób daleki od optymalnego. Stąd właśnie wynika potrzeba wdrażania narzędzi wspomagających operatora. Ich potrzeba będzie rosła wraz z postępującymi zmianami w sektorze ciepłowniczym, takimi jak wdrażanie rozproszonych źródeł OZE i ciepła odpadowego, magazynów ciepła a także wprowadzanie taryf dynamicznych i działań typu odpowiedź strony popytowej (DSR).
- 12) Sposób rozwiązania zadania opisany na stronie 25 nazwany przez doktoranta „Architekturą optymalizatora” to w praktyce optymalizacji dekompozycja zadania optymalizacyjnego do zadania hierarchicznego. W tym kontekście warstwy podrzędna i nadrzędna są w pracy rozważane odwrotnie niż wynikałoby to z powszechnej praktyki. W optymalizacji hierarchicznej w pierwszej kolejności określane powinny być źródła (warstwa podrzędna) gdyż muszą być one znane w warstwie nadrzędnej w chwili optymalizacji systemu. Ponadto, z treści pracy wynika, że hierarchia modelu jest w zasadzie trójpoziomowa: 1) wybór źródeł, 2) wybór ustawień armatury, 3) wybór zmiennych decyzyjnych systemowych. Wynika to z faktu, że ustawienia armatury wyłączono ze zbioru zmiennych decyzyjnych.
- 13) Sformułowanie na str. 25: „Niniejsza rozprawa z dużym prawdopodobieństwem wykazuje...” sugeruje, że doktorant nie jest pewny wyników swojej pracy i nie jest w stanie przedstawić dowodu na poprawność przedstawianych wyników.

- 14) Na jakiej podstawie zdecydowano się że na poziomie „optymalizatora bazowego” będzie rozwiązywane zadanie programowania kwadratowego? Czy doktorant jest w stanie przedstawić jakieś referencje literaturowe w tym zakresie?
- 15) Doktorant proponuje optymalizację z funkcją kary za przekroczenie ograniczeń miękkich? Nie jest jasne na jakiej podstawie przyjmowano wartości kar.
- 16) Str. 35 ograniczenie Z4. Powinna to być moc źródła. Moc dyspozycyjna jest górnym ograniczeniem. Podobnie Z5 jest ograniczeniem mocy źródła.
- 17) Z czego wynika ograniczenie Z6?
- 18) Czy ograniczenie Z7 nie powinno wynikać z modelu hydraulicznego sieci?
- 19) Liczne ograniczenia w zadaniu optymalizacyjnym wynikają z dotychczasowego sposobu prowadzenia sieci ciepłowniczej. Zatem opracowane narzędzie będzie te ograniczenia uwzględniać dalej. Nie da się zweryfikować czy sieć prowadzona jest optymalnie. Do zmian ograniczeń ciśnienia i temperatury konieczne są bądź testy ruchowe bądź obliczenia symulacyjne. W dalszej części pracy doktorant twierdzi, że takie testy prowadził jednakże w pracy nie omówił ich wyników. Czy sformułowane ograniczenia uwzględniają wyniki symulacji sieci?
- 20) Z dodatkowych informacji o ograniczeniach podanych na str. 40 wynika, że optymalizator nie działa w chwili, gdy w momencie uruchomienia nie są spełnione ograniczenia. Czyli działanie optymalizatora jest zależne od stanu sieci, przez co ma on ograniczoną funkcjonalność. Czy są prowadzone prace nad wyeliminowaniem tego problemu? Czy, jako że optymalizacja jest prowadzona w horyzoncie czasowym 48 do 120 godzin, optymalizator nie może wyznaczać optymalnej ścieżki dojścia do pożądanych parametrów w węzłach odległych. Można sobie wyobrazić, że kosztowa funkcja celu może być minimalizowana niezależnie od początkowego stanu sieci.
- 21) Str. 41 punkt 2.5. „Funkcja celu określa...” Nie zawsze w optymalizacji prowadzimy minimalizację. Czy autor brał pod uwagę maksymalizację dochodu rozumianego jako różnica między przychodem i kosztem? Może to mieć znaczenie np. w przypadku wprowadzania taryf dynamicznych dla odbiorców ciepła.
- 22) W punkcie 2.5 nie znalazł się typowy zapis matematyczny zadania optymalizacji w postaci $F \rightarrow \min$ lub $\min F$. Nie zapisano ostatecznej postaci funkcji celu a jedynie przedstawiono równania na jej składowe (wzory 2.5.1 do 2.5.9). Można się jedynie domyślać, że przedstawione składowe należy zsumować.
- 23) W zaproponowanym modelu w sposób jawny nie występują straty ciepła z sieci ciepłowniczej. Nie jest również jasne, czy jest wyznaczana ilość ciepła dostarczanego do odbiorców końcowych. W pracy nie pojawiają się odpowiednie równania bilansowe, a wielkości związane z odbiorem ciepła w węzłach ciepłowniczych występują jedynie w ograniczeniach nierównościowych. Przy jednoczesnym braku informacji o tym której pozycji bilansu sieci dotyczy generowana prognoza, przedstawiony model matematyczny nie jest w pełni czytelny.
- 24) Str. 42. Co autor rozumie pod pojęciem „wyników bliższych intencji użytkownika”? Stwierdzenie to stawia w wątpliwość obiektywność opracowanej metodologii i narzędzia.
- 25) Str. 43. Równanie 2.5.8. Określenie „kara kwadratowa” jest niejasne. Kara jednostkowa „k” występuje w równaniu w pierwszej potęgze i nie jest podana jej jednostka. W równaniu 2.5.7 jest ona mnożona przez czynnik liniowy, w równaniu 2.5.8 przez kwadratowy. Wynika stąd, że jednostka powinna być inna, jak również wartość kary jednostkowej k. Ponadto zmiennej określającej karę całkowitą nie wprowadzono.
- 26) Strona 44. Założenie 5. Z czego wynika założenie, że czas odstawienia źródła wynosi 0? W jaki sposób zatem obniżana jest moc źródeł, które charakteryzują się znaczną bezwładnością?

- 27) Str 44. Założenie 6. Nie wyjaśniono z czego wynika przypisanie na stałe priorytetu źródłom ciepła i ich podział na źródła z o niższym i wyższym priorytecie.
- 28) Str 44 Założenie 9. Założenie, że operator nie ponosi kosztu odstawienia źródła nie jest przekonujące. Koszt ten, zgodnie z zasadami rachunkowości kosztów wystąpi w kosztach całkowitych (np. koszt paliwa) i obciąży wytwarzanie ciepła wprowadzonego do sieci (pojawi się niejawnie w cenie oferowanego ciepła).
- 29) Z czego wynika wymuszenie pracy źródeł? Ogranicza to elastyczność narzędzia w zakresie wyboru zmiennych decyzyjnych.
- 30) Str. 45. Pkt 2. Stwierdzenie „Wybieramy dostępne źródło szczytowe o najwyższym priorytecie. Jeżeli brak takiego źródła, to koniec tworzenia zbioru” jest niezrozumiałe. Kiedy może wystąpić taka sytuacja?
- 31) Punkt 3 algorytmu odsyła do punktu 7, w którym nie ma żadnego warunku a jedynie samo odniesienie do punktu 4. Z tego odniesienia wynika wprost, że jeżeli źródło szczytowe nie może pracować dalej w określonej godzinie to dodajemy do aktualnego zestawu, co jest niezrozumiałe. Skoro źródło nie może pracować nie powinno znaleźć się w zestawie.
- 32) Model sieci, Str. 49 akapit 2. Doktorant pisze, że budował model sieci na różne sposoby i o różnych podejściach do testowania. Jakie podejścia autor testował oraz jakie były wyniki tych testów? Szkoda, że w pracy nie znalazło się syntetyczne podsumowanie tych działań, ani nawet omówienie kluczowych wniosków, na podstawie których zdecydowano o ostatecznym wyborze podejścia.
- 33) Bardzo ograniczona, żeby nie powiedzieć skąpa, jest reprezentacja matematyczna modelu sieci. Przedstawiono jedynie równania parametryczne jedynie dla kilku kluczowych wielkości estymowanych. Znaczna część równań modelu nie została ujawniona.
- 34) W rozdziale 3.6 „Struktura finalnych modeli” doktorant nie wyjaśnia jaka jest struktura modelu. Rozdział zawiera jedynie opis tworzenia modelu na podstawie dostępnych danych. Nie pojawia się natomiast omówienie postaci modelu np. w postaci funkcji, warstw itp. Modele takie pojawiają się dopiero w rozdziale 3.7.
- 35) Wiele omawianych modeli posiada wyłącznie opis słowny. Brak jest w pracy opracowanych równań. Na przykład, w podrozdziale 3.11 zatytułowanym „Model temperatury” ostatecznie nie pokazano równania modelu.
- 36) Str. 91. Doktorant pisze: „W sumie model sieci to około 20000 współczynników” Jest to stwierdzenie nie do końca poprawne, gdyż na model składają się równania a nie współczynniki. Ile równań zawierał model sieci ?
- 37) Rozdział 3.1.1. Czy w każdym węźle krytycznym z 50 wytypowanych stosowano tę samą postać równania funkcji opisującej wielkość estymowaną? Jaka to była postać?
- 38) Praca zawiera wiele skrótów myślowych oraz stwierdzeń wynikających z faktów znanych jedynie doktorantowi. W wielu miejscach autor powołuje się na „wiedzę ekspercką partnera”.
- 39) W rozdziale 5 „Testowanie optymalizatora w wyniki” nie pokazano wartości funkcji celu. W zasadzie nie udowodniono, że opracowany model i algorytm rozwiązania zadania optymalizacyjnego prowadzą do wyznaczenia minimum funkcji celu. Zamiast tego pokazano przebiegi czasowe nastaw (zmiennych decyzyjnych) oraz wybranych parametrów sieci ciepłowniczej.
- 40) Na str. 95 doktorant pisze ...”pokazano również wyniki nieprawidłowe”. Dlaczego wyniki takie nie są automatycznie odrzucane?
- 41) Na jakiej podstawie doktorant twierdzi, że zostało znalezione globalne minimum funkcji celu. Jeżeli narzędzie generuje rozwiązania niepoprawne (nielogiczne lub nie nadające się do implementacji) oznacza to, że zadanie nie zostało w pełni zdefiniowane. Może to wynikać np. z braku odpowiednich ograniczeń lub nieodpowiedniego ich zdefiniowania,

lub z faktu, że wprowadzono zbyt daleko idące uproszczenia. Na stronie 136 doktorant powołuje się na dane niejawne, co nie jest przekonujące. Można przecież pokazać wyniki w formie zredukowanej, jak to zresztą autor czyni w odniesieniu do wielu wielkości przedstawianych w pracy, nie ujawniając bezwzględnych wartości liczbowych.

- 42) Zaproponowano trzy metody testowania narzędzia. Pierwsza metoda to metoda ekspercka, która ma polegać na ankietowaniu operatora i określeniu czy jego zdaniem wyniki są rozsądne czy też nie. Metoda druga polega na przeprowadzeniu obliczeń dla danych historycznych w tzw. „okresach testowych”. Metoda trzecia polega na stwierdzeniu poprawności działania w przypadku gdy narzędzie wygeneruje wyniki podobne do decyzji podejmowanych przez operatora sieci. Zaproponowane metody są poprawne jedynie dla stwierdzenia poprawności funkcjonowania sieci w sensie utrzymania jej parametrów ruchowych w polu tolerancji z uwagi na bezpieczeństwo zaopatrzenia odbiorców w ciepło. Wszystkie zaproponowane metody pozwalają na weryfikację czy wygenerowany zbiór zmiennych decyzyjnych dla danego horyzontu czasu spełnia ograniczenia modelu. Natomiast, żadna z zaproponowanych metod nie pozwala na stwierdzenie czy sieć działa w sposób optymalny w sensie kosztu zasilania odbiorców w ciepło. Doktorant nie udowadnia, że w przedstawionych scenariuszach koszt zaopatrzenia jest minimalny, czy sieć nie jest zbyt mocno przegrzewana, czy straty ciepła są na poziomie minimalnym, itp.
- 43) Doktorant stwierdza na str. 102., że wyniki optymalizatora i innego symulatora hydraulicznego sieci są podobne, jednakże weryfikacja taka nie została przedstawiona w pracy. Ponadto doktorant stwierdza, że wyniki nie mogą zostać przedstawione ze względu na stosunek własności użytych narzędzi, co ponownie nie jest przekonujące.
- 44) Na str. 105 doktorant pisze: „Granica dopuszczalnego rozwiązania nie jest sztywna i podlega ocenie eksperckiej”. Czy w narzędziu zaszyto system ekspercki czy też odbywa się to „ręcznie”?
- 45) Str. 105. Kryteria subiektywne. Wskazują one na zachowanie obecnego sposobu ruchu sieci i utrwalenie nawyków operatorów. Czy nie było możliwe testowe wdrożenie scenariuszy, które wydawały się operatorowi podejrzane? Szczególnie, że kryteria oceny oparto o podobieństwo kluczowych parametrów modelu do danych historycznych.
- 46) Skoro optymalizator prowadzi do wyników zbliżonych do tych, jakie generuje narzędzie obecnie używane przez operatora, jakie jest uzasadnienie wysiłku włożonego w budowę optymalizatora? Zbieżność wyników może być rezultatem wykorzystania symulatora hydraulicznego sieci do wygenerowania danych do „trenowania” modelu w algorytmie uczenia maszynowego.
- 47) Słuszność postawionej w pracy tezy w zasadzie nie została w sposób przekonujący udowodniona. Wynika to z faktu, że „wartość biznesowa systemu” nie została w pracy omówiona. Wprawdzie doktorant twierdzi, że poprawa pracy sieci miała miejsce, to jednak nie zostało to poparte odpowiednim dowodem. Doktorant tłumaczy to poufnością danych.

9. Uwagi redakcyjne

Przedstawiona do oceny praca została napisana w języku polskim. Ogólnie język i układ pracy są poprawne a treść zrozumiała. Niemniej w treści występują drobne, aczkolwiek liczne potknięcia w zakresie używanych sformułowań, pisowni i gramatyki. Zauważono również pewne niedociągnięcia w zakresie redakcji tekstu. Szczegółowe uwagi przedstawiają się one następująco:

- Praca została zrealizowana w ramach programu Doktorat wdrożeniowy. Brak odpowiedniej informacji o tym na stronie tytułowej lub innym wyróżnionym miejscu. Informacja taka pojawia się dopiero w tekście rozdziału 1.
- Praca zawiera pewną ilość literówek. Nie mają one jednak większego wpływu na zrozumiałość tekstu.
- Na str. 10, w punkcie „stosowane słownictwo” doktorant ogranicza się do wytłumaczenia jedynie dwóch pojęć wykorzystywanych w tekście. Natomiast liczba pojęć wymagających wyjaśnienia jest większa. Na przykład wyjaśnienia wymaga pojęcie „wartość biznesowa systemu” użyte w tezie pracy.
- W tekście pojawia się słownictwo nie występujące w języku polskim. Przykładami mogą być: „presety”, „enkodowanie”, „backend” czy „rundeck”. Pochodzą one z gwary programistów i nie są odpowiednio wyjaśnione w tekście.
- W tekście znajdują się liczne punkty przedstawione wytłuszczonym drukiem (np. „Problematyka zagadnień optymalizacji” (str. 23 w podrozdziale 2.2). Punkty te powinny być podrozdziałami pracy i być wykazane w spisie treści.
- Na stronie 22, w drugim akapicie doktorant pisze: „Rozważmy dostępne podejścia do rozwiązania zadania optymalizacji sieci.” Niestety w tym miejscu pracy zadanie nie zostało jeszcze w pełni zdefiniowane w sensie funkcji celu i ograniczeń.
- Funkcja celu jest definiowana na końcu rozdziału w punkcie 2.5 po opisie ograniczeń i opisie zmiennych decyzyjnych. Jest to układ nietypowy (odwrócony).
- Sformułowanie „podejście do wyznaczania funkcji celu i ograniczeń optymalizatora” nie jest poprawne, gdyż zarówno funkcja celu jak i ograniczenia są w modelu zadawane (nie wyznaczane) jako kryteria wejściowe.
- Określenie „ciśnienie podnoszenia” jest nietypowe. Zwykle używa się terminu ciśnienie a wielkość wyraża w jednostkach ciśnienia lub wysokość podnoszenia, którą wyraża się w jednostkach odległości.
- Równania i nierówności ograniczeń od str 35 do str 40 nie są numerowane. Numeracja równań w pracy rozpoczyna się od równania 2.5.1 na stronie 41.
- Str. 50, rys 54. Brak jednostek na osiach wykresu. Podobna sytuacja występuje wielokrotnie w pracy. Rys. 18. Brak jednostek na osi rzędnych. Poprawny opis to „Moc zredukowana” lub „Moc względna”. Względem jakiej wielkości normalizowano te parametry?
- Rys. 19. W górnej części brak jednostki, w dolnej pojawia się oC, chociaż wartości wyglądają na względne.
- Na wielu rysunkach osie wyskalowane są w przedziale 0 – 1, co nie odpowiada ich opisowi. Powinien on zawierać informację, że wielkość jest zredukowana lub znormalizowana. Przy braku takiej informacji w opisie czytelnik oczekuje jednostek naturalnych.
- Równania modelu ciśnień na stronie 86 nie są numerowane.

10. Ostateczna ocena pracy

Ostatecznie rozprawę doktorską mgr inż. Michała Guzka oceniam jako dobrą. Doktorant postawił sobie bardzo ambitny cel opracowania metodologii oraz budowy i wdrożenia narzędzi informatycznych wspomagających operatora w zakresie optymalizacji ruchu rozległej sieci ciepłowniczej z wieloma źródłami ciepła. Rozwiązanie postawionego zadania wymagało ogromnego nakładu pracy i znacznej wiedzy zarówno teoretycznej jak i inżynierskiej. Uważam, że cel ten został osiągnięty w stopniu wystarczającym, pozostawiając jednak znaczne pole do rozszerzenia zakresu dalszych badań teoretycznych, badań rozwojowych i badań przemysłowych. Niemniej uważam, że przeprowadzone przez doktoranta analizy i prace są interesujące oraz ważne z punktu widzenia poznawczego, oraz stanowią ważny punkt wyjścia do dalszych prac mających na celu usprawnienia opracowanych narzędzi.

Po uwzględnieniu wkładu pracy doktoranta, oryginalności założeń oraz sposobu rozwiązania postawionego problemu a także silnych i słabych stron przedstawionego opracowania oceniam pracę pozytywnie. W moim przekonaniu praca może zostać przyjęta jako ukończona rozprawa doktorska. Przedstawione uwagi krytyczne nie podważają ogólnej wartości rozprawy, a ich celem jest przeprowadzenie dyskusji z Autorem. Umiejętność prowadzenia dyskusji naukowej oraz zajmowania stanowiska wobec uwag krytycznych jest ważna w kontekście prowadzenia samodzielnej pracy naukowej. Wyrażam nadzieję, że wykaże takową umiejętność i pomyślnie przejdzie publiczną obronę rozprawy.

11. Wniosek końcowy

W mojej ocenie rozprawa doktorska mgr inż. Michała Guzka w pełni spełnia wymagania określone w Art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, z późniejszymi zmianami. W szczególności rozprawa doktorska:

- w stopniu wystarczającym prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie Inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej,
- w stopniu wystarczającym stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego,
- w stopniu bardzo dobrym stanowi oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej.

Na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie doktoranta do kolejnych etapów przewodu doktorskiego.

Dr hab. inż. Jacek Kalina, Prof. Pol. Śl.

