

Dr hab. inż. Marcin Trojan, prof. PK
Katedra Procesów Ciepłych, Ochrony Powietrza i
Utylizacji Odpadów
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki

Kraków, 20.06.2023 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Guzka

pt. „System optymalizacji pracy Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej”

1. Podstawa opracowania

Recenzję opracowano w oparciu o uchwałę Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej z dnia 18 kwietnia 2023 roku.

2. Informacje ogólne

Oceniana rozprawa doktorska wykonana została na Politechnice Warszawskiej w Dyscyplinie Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka pod kierunkiem Pana dr hab. inż. Wojciecha Bujalskiego, prof. uczelni, pełniącego w przewodzie doktorskim obowiązki promotora. Promotorem pomocniczym był dr inż. Konrad Wojdan.

Praca doktorska liczy łącznie 147 stron tekstu zasadniczego i zawiera 6 rozdziałów (str. 9-138), które poprzedza streszczenie w języku polskim (str.3), streszczenie w języku angielskim (str. 5) oraz spis treści (str. 7-8), kończy natomiast Dodatek A: Wkład autora i osób trzecich w stworzeniu systemu optymalizacyjnego (str. 139-140) oraz wykaz literatury (str. 141-147), zawierający 74 pozycje reprezentatywne dla tematu dysertacji.

3. Ocena tematyki pracy

Rozprawa doktorska powstała w ramach doktoratu wdrożeniowego i dotyczy optymalizacji pracy Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej stanowiącej dużą sieć o znacznych opóźnieniach transportowych i

układzie pierścieniowym. Ma to bardzo istotne znaczenie, ponieważ optymalizacja pracy sieci umożliwia zaplanowanie pracy dostępnych źródeł ciepła. Ponadto rosnące zapotrzebowanie na energię w świecie oraz szkodliwe skutki jej wytwarzania skłaniają do poszukiwania oszczędności energii w celu zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego.

W rozprawie Autor podjął próbę opracowania algorytmu doboru źródeł ciepła. Do stworzenia modelu sieci ciepłowniczej użył metod uczenia maszynowego. Opracowany system (optymalizator) został wdrożony przez firmę Veolia Energia Warszawa wraz ze spółką Transition Technologies i stanowi istotny element systemu wsparcia decyzji (podpowieź dla dyspozytora).

Z uwagi na złożoność zagadnienia wynikającą z konieczności uwzględnienia dynamiki sieci w opracowanych modelach podjęta tematyka jest trudna i wymagająca skomplikowanych badań. Biorąc pod uwagę fakt, że dotychczasowa wiedza dotycząca problemów optymalizacyjnych dotyczy głównie projektowania systemów ciepłowniczych, a bieżąca optymalizacja pracy systemu ciepłowniczego skupia się na małych sieciach (z pominięciem dynamiki pracy sieci), należy stwierdzić, że **tematyka pracy doktorskiej mgr inż. Michała Guzka jest ważna i aktualna**. Aktualność podjętej tematyki potwierdza również duża ilość publikacji naukowych z ostatnich lat cytowanych w pracy.

4. Cel i zakres pracy

Celem pracy było opracowanie systemu optymalizującego pracę dużej, pierścieniowej sieci ciepłowniczej z punktu widzenia dystrybutora ciepła oraz udowodnienie tezy w brzmieniu: „Możliwe jest stworzenie systemu optymalizującego dużą, pierścieniową sieć ciepłowniczą, który bez modelu fizycznego sieci i przy zastosowaniu ogólnodostępnych maszyn obliczeniowych będzie mógł wyliczyć optymalne parametry zadane na horyzoncie 48 godzin, podczas gdy czas obliczeń w najbardziej skomplikowanych przypadkach nie przekroczy jednej godziny, a dokładność będzie na tyle wysoka, że jej zwiększenie nie spowodowałoby istotnego polepszenia wartości biznesowej Systemu (tj. użyteczności systemu dla poprawy pracy sieci z punktu widzenia jej właściciela).”

Udowodnienie tak postawionej tezy Autor uzyskał poprzez realizację założonego planu pracy, obejmującego:

- zdefiniowanie zadania optymalizacji i opis zastosowanych algorytmów do jego rozwiązania
- budowę modelu sieci ciepłowniczej
- stworzenie i konfigurację optymalizatora
- testy opracowanego optymalizatora
- obliczenie efektów ekonomicznych.



5. Szczegółowa charakterystyka pracy

Rozdział pierwszy obejmuje Wprowadzenie i cztery podrozdziały. We Wprowadzeniu Doktorant dokonał krótkiej charakterystyki podjętej tematyki, z uwzględnieniem opisu Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej.

Podrozdział 1.1 dotyczy celu i zakresu pracy doktorskiej. Jako główny cel Autor zdefiniował opracowanie systemu optymalizującego pracę dużej, pierścieniowej sieci ciepłowniczej z punktu widzenia dystrybutora ciepła. Dodatkowym celem pracy doktorskiej było udokumentowanie przeprowadzonych prac i przedstawienie metodologii budowy systemu optymalizującego sieć ciepłowniczą.

Teza pracy zawarta w podrozdziale 1.2 dobrze koreluje z przyjętymi celami.

Podrozdział 1.3 stanowi opis układu pracy doktorskiej.

Stan badań w zakresie optymalizacji pracy systemów ciepłowniczych przedstawiony został w podrozdziale 1.4, który dobrze wprowadza czytelnika w tematykę pracy dając ogólny pogląd na dotychczasowy stan zagadnienia. Cytowane pozycje literaturowe dobrane zostały w sposób prawidłowy. W zdecydowanej większości są to publikacje z ostatnich lat. Analiza dostępnej literatury potwierdza konieczność optymalizacji systemów ciepłowniczych. W chwili obecnej problemy optymalizacyjne dotyczą głównie projektowania systemów ciepłowniczych, a podjęte próby optymalizacji nie uwzględniają dynamiki pracy sieci. Żadne z opublikowanych rozwiązań nie daje możliwości optymalizacji pracy sieci ciepłowniczej w tak szerokim zakresie, jak opracowany w ramach pracy doktorskiej optymalizator.

Rozdział drugi zawiera sześć podrozdziałów i dotyczy określenia definicji zadania optymalizacyjnego poprzez podanie funkcji celu, ograniczeń i zmiennych decyzyjnych. Warunkiem poprawnego zdefiniowania zadania optymalizacyjnego jest rozpoznanie potrzeb użytkownika.

Podrozdział 2.1 zawiera szereg pytań stawianych docelowemu użytkownikowi, w celu zaplanowania optymalnych parametrów (temperatura i ciśnienie zasilania) dla źródeł wytwórczych oraz przepompowni w dużej sieci. Należy również pamiętać, że podstawowy okres planowania to 24 godziny, jednak ze względu na znaczne opóźnienia transportowe konieczny jest wydłużony (pięciodniowy) horyzont optymalizacji.

Podrozdział 2.2 zawiera opis algorytmu procesu optymalizacyjnego. Podrozdział rozpoczyna się od omówienia problematyki zagadnień optymalizacji i określenia głównych trudności w rozwiązywaniu zadań optymalizacyjnych. Wyznaczanie funkcji celu i ograniczeń optymalizatora może zostać dokonane w sposób analityczny lub symulacyjny. Autor przedstawił pozytyw i negatyw obydwu podejść. Z kolei do optymalnego sformułowania zadania optymalizacyjnego i solvera do jego rozwiązania można skorzystać z metod dokładnych, metod przybliżonych dedykowanych dla konkretnych problemów oraz algorytmów heurystycznych. Doktorant podzielił zadanie optymalizacyjne na dwa etapy pozwalające na uzyskanie optimum pomiędzy dokładnością rozwiązania a czasem jego znalezienia. Pierwszy etap to

tw. optymalizator bazowy, który rozwiązuje zadania optymalizacji dla ustalonego w każdej godzinie horyzontu optymalizacji zestawu pracujących źródeł ciepła. Drugi etap to algorytm optymalnego doboru pracujący źródeł.

Podrozdział 2.3 zawiera spis ważniejszych skrótów i oznaczeń w opisie zadania optymalizacyjnego. Wybrane zmienne decyzyjne i definicje ograniczeń dla optymalizatora bazowego stanowią zakres podrozdziału 2.4. Jako zmienne decyzyjne zadania optymalizacji wybrano parametry, o których może decydować dyspozytor sieci. W celu umożliwienia realizacji między innymi faktycznych ograniczeń biznesowych, czy limitów technicznych kontraktowych zaimplementowane zostały ograniczenia dotyczące źródeł, przepompowni, węzłów i komór, przy czym optymalizator wykorzystuje jedynie takie ograniczenia, na które jakkolwiek zmienna decyzyjna procesu optymalizacji ma wpływ.

W podrozdziale 2.5 zdefiniowana została funkcja celu i ograniczenia miękkie dla optymalizatora bazowego. Funkcja celu określa wartość, którą chcemy minimalizować i kryterium optymalizacji stanowi z reguły kryterium ekonomiczne. Doktorant zaproponował wskaźnik jakości będący sumą kosztowej części funkcji celu oraz części funkcji celu związanej z racjonalizacją wyników optymalizacji.

Podrozdział 2.6 dotyczy doboru źródeł szczytowych. W oparciu o przyjęte założenia zaproponowany został algorytm doboru źródeł składający się z szeregu iteracji dobierających zestaw źródeł w danej godzinie, dla którego koszt realizacji jest najmniejszy.

Rozdział trzeci zawiera 14 podrozdziałów dotyczących opisu modelu sieci ciepłowniczej, stanowiącego zależności pomiędzy zmiennymi decyzyjnymi a innymi parametrami, które podlegają ograniczeniom.

Podrozdział 3.1 zawiera zestawienie i opis cech budowanego modelu. Najważniejszą cechą zbudowanego przez Doktoranta modelu jest wykorzystanie danych historycznych i metod data science, zamiast podejścia polegającego na wyjściu od równań opisujących prawa fizyki. Z kolei jednym z najistotniejszych ograniczeń w budowaniu modelu, wymuszonym koniecznością zapewnienia odpowiedniej szybkości obliczeń, jest wymagana niska złożoność zależności. Ograniczenie to powoduje, że wszystkie powstałe modele są liniowe względem zmiennych decyzyjnych. Doktorant określił wielkości, jakie muszą być wyliczane przez model/niezależne modele, aby zadanie optymalizacyjne zostało rozwiązane. W przypadku dużej sieci ciepłowniczej koniecznym może być stworzenie setek tysięcy indywidualnych modeli, wobec czego zredukowano zadanie optymalizacji nie sprawdzając parametrów we wszystkich możliwych punktach systemu. Omówiono także trudności, jakie pojawiają się w optymalizacji pierścieniowej sieci ciepłowniczej, w której kilka źródeł pracuje na połączonej sieci otwartej. Określony został katalog zmiennych wejściowych, które mogą być rozpatrywane, w skład którego wchodzi zmienne decyzyjne i zmienne inne niż decyzyjne. Zmienne decyzyjne mają charakter liniowy i zapewniają sprzężenie zwrotne dla optymalizatora informując, jak

podejmowane przez niego decyzje wpływają na funkcję celu i ograniczenia. Zmienne inne niż decyzyjne stanowią parametry niosące dodatkowe informacje, od których model nie musi być liniowo zależny.

W podrozdziale 3.2 omówiono źródła danych do tworzenia modeli. Wykorzystano przede wszystkim dane historyczne (za okres 3 lat z godzinną rozdzielczością) zarchiwizowane w systemie PI Osisoft.

Surowe dane pobrane z systemu PIOsisoft musiały zostać zagregowane. W podrozdziale 3.3 opisany został proces agregacji danych oraz reguły ich walidacji, które przede wszystkim polegały na odfiltrowaniu danych przekraczających ustalone przez Doktoranta wartości progowe.

W ramach przeprowadzonych prac wygenerowano modele liniowe przy użyciu regresji parametrycznej. Proces ich automatycznego tworzenia wyłącznie z danych historycznych opisany został w podrozdziale 3.4. Jednak ze względu na brak uwzględnienia ograniczeń na podstawowe zasady fizyki w optymalizacji modele te nie sprawdziły się i nie były używane.

Podrozdział 3.5 zawiera opis struktury modeli finalnych, użytych w optymalizacji. Dla większości modeli Doktorant posiłkował się eksperymentami w symulatorze hydraulicznym Termis, które stanowiły źródło danych bez zakłóceń.

W podrozdziale 3.6 umieszczono opis odnoszący się do wszystkich przypadków użycia symulatora hydraulicznego z uwzględnieniem stanu otwarcia armatury. Doktorant przyjął, że parametry zamodelowane w sieci magistralne w Termis będą uznawane za równe parametrom w rzeczywistych węzłach krytycznych (dokonano mapowania węzłów i komór krytycznych), co nie wpływa istotnie na jakość modelu. Sieć ciepłownicza jest układem dynamicznym, w którym występują opóźnienia transportowe. Bazując wyłącznie na danych historycznych nie udało się Doktorantowi zidentyfikować wszystkich opóźnień, dlatego przyjęto opóźnienia transportowe dla niektórych z modeli na podstawie obliczeń z Termis. W celu poprawy jakości modelu sieci przy użyciu Termis Doktorant określił, które węzły mogą być zasilane z których źródeł. Dla każdego zestawu pracujących źródeł przeprowadzono eksperymenty dla różnych obciążeń sieci.

Opis modelu przepływu w źródłach i przepompowniach podzielony został na dwie części. Podrozdział 3.7 zawiera opis elementów modelu przepływu wykonanego w Termis, którego zadaniem jest określenie przepływu w źródłach i przepompowniach na podstawie prognozowanego zapotrzebowania na ciepło i zmiennych decyzyjnych optymalizatora.

Symulator hydrauliczny nie jest w pełni zgodny z rzeczywistością ponieważ sieć nieustannie się zmienia, a walidacja modelu hydraulicznego nastąpiła w bliżej nie określonym czasie. Z tego powodu w podrozdziale 3.8 zawarto opis korekty modelu poprzez zamodelowanie reszt modelu eksperymentalnego przy wykorzystaniu danych historycznych i nowych zmiennych wejściowych. Dodatkowo, w celu uwzględnienia dynamiki sieci, w opracowanym modelu zastosowano wejścia opóźnione. Opóźnienia dobrano na podstawie danych rzeczywistych. Ważnym etapem był również wybór postaci członu modelu zależnego od zapotrzebowania na ciepło.

Podrozdział 3.9 zawiera opis modelu ciśnienia zasilania w węzłach krytycznych, komorach i przepompowniach. Omówiono postać modelu i proces przygotowania eksperymentów w symulatorze.

Jako zmienne wejściowe do modelu przyjęto sumaryczny przepływ w węzłach u odbiorców, ciśnienie zasilania w każdym ze źródeł, przyrost ciśnienia w przepompowniach po stronie zasilającej oraz stan armatury. Modele liniowe stworzono na podstawie wyników uzyskanych z eksperymentów w Termis. W kolejnym etapie (podrozdział 3.10) Doktorant opracował model ciśnienia powrotu. Na podstawie wyników symulacji opracowany został fragment modelu stanowiący zależność ciśnienia powrotu od wysokości podnoszenia przepompowni. Model następnie rozbudowano w oparciu o dane historyczne o model reszt, który zastąpił stałe występujące we wcześniej opracowanym fragmencie modelu.

Podrozdział 3.11 stanowi opis modelu temperatury i przepływu w węzłach. Model temperatury wody zasilającej stworzono częściowo na podstawie danych eksperymentalnych, częściowo na podstawie danych historycznych. Wykorzystano te same wyniki symulacji, co dla modeli przepływu w źródłach ciepła.

W optymalizacji wykorzystywano również inne modele, które krótko omówione zostały w podrozdziale 3.12 (model temperatury powrotu danych historycznych, model kosztów przygotowania wody uzupełniającej).

Podrozdział 3.13 to podsumowanie przygotowanego modelu, który sformułowany został przez Doktoranta w prosty sposób matematyczny. Umożliwia to jego wykorzystanie w optymalizacji pracy sieci ciepłowniczej. Wejściami do modelu jest 215 wielkości, a cały model sieci to około 20000 współczynników.

Ostatni podrozdział (3.14) dotyczy prognozowania zapotrzebowania na ciepło. Moduł ten opracowany został w ramach innej pracy doktorskiej i wyniki jego pracy są wykorzystywane przez Doktoranta w swoich badaniach.

Rozdział czwarty zawiera pięć podrozdziałów i dotyczy implementacji systemu optymalizacyjnego w Systemie Wsparcia Decyzji (SWD).

Podrozdział 4.1 zawiera charakterystykę aplikacji przygotowanej w języku C++ i skompilowanej do formatu „.exe” oraz opis struktury bazy danych w SQLite. Omówiono także sposób inicjalizacji zmiennych decyzyjnych optymalizatora.

Model sieci ciepłowniczej nie został zintegrowany z SWD. Podrozdział 4.2 zawiera informacje dotyczące przygotowania i uruchomienia modelu.

W podrozdziale 4.3 omówiono optymalizator z punktu widzenia użytkownika. W pierwszej kolejności przedstawiono narzędzie do przygotowania konfiguracji optymalizacji. Następnie Doktorant opisał wykonywane przez optymalizator obliczenia w trzech wariantach dla 48 lub 120 godzin: wariant optymalny, bezpieczny i techniczny. Należy zwrócić uwagę, że optymalizator może być także wykorzystany do sprawdzenia scenariuszy proponowanych przez użytkownika (symulacje). Wyniki symulacji przeprowadzonych w optymalizatorze mogą być także wysyłane do Termis w celu porównania wyników z modelem uproszczonego (optymalizator) z wynikami pełnego symulatora

hydraulicznego. Uzyskiwane wyniki prezentowane są przede wszystkim w postaci tabel. Wybrane wyniki optymalizacji mogą zostać zatwierdzone jako scenariusz do realizacji.

Podrozdział 4.4 przedstawia optymalizator z punktu widzenia backendu. System Wsparcia Decyzji opiera się o backend napisany w języku Python z Django i bazę SQL. Uruchamianiem optymalizatora zarządza Rundeck.

Podsumowanie implementacji optymalizatora zawarte zostało w podrozdziale 4.5. Zaimplementowany optymalizator zawiera około 1000 zmiennych decyzyjnych, 20000 ograniczeń i 2000 indywidualnych modeli w modelu sieci ciepłowniczej, który obejmuje dwie ciepłownie kogeneracyjne oraz dwie ciepłownie szczytowe, około 10300 węzłów cieplnych, 3 przepompownie i kilkadziesiąt pierścieni w sieci.

Rozdział piąty zawiera cztery podrozdziały, w których opisane zostały testy optymalizatora oraz uzyskane wyniki.

Metodologia testowania optymalizatora omówiona została w pierwszym podrozdziale. Określenie sposobu prowadzenia testów stanowi bardzo ważną część przeprowadzonych prac, ponieważ ich celem jest weryfikacja poprawności działania systemu. W trakcie badań okazało się, że uzyskanie zbieżności obliczeń i znalezienie globalnego minimum funkcji celu nie zawsze oznacza, że otrzymane wyniki są poprawne (czysto matematyczne potwierdzenie poprawności wyników nie jest wystarczające). Doktorant opisał w podrozdziale 5.1 możliwe sposoby uzyskania dodatkowego sprawdzenia wyników. Przede wszystkim podawanie dyspozytorowi sieci wygenerowanych przez optymalizator scenariuszy pracy w celu ich akceptacji wydaje się być rozsądną metodą oceny poprawności działania systemu (ocena w oparciu o doświadczenie dyspozytora). Inną metodą może być przeprowadzenie optymalizacji testowych w okresach historycznych. Kolejną metodą przetestowania poprawności optymalizacji jest uzyskanie wyników podobnych do decyzji podejmowanych przez dyspozytora sieci lub porównanie wyników pracy optymalizatora z wynikami innego, sprawdzonego wcześniej optymalizatora. Doktorant wykorzystał wszystkie w/w metody w celu weryfikacji poprawności działania przygotowanego narzędzia.

Podrozdział 5.2 to zestawienie i charakterystyka kryteriów oceny poprawności obliczeń. Jako kryteria obiektywne wskazano ograniczenia twarde oraz bilans strat ciepła. Podstawowym kryterium poprawności obliczeń jest znalezienie rozwiązania dopuszczalnego, spełniającego wszelkie ograniczenia. Scenariusze z przekroczonymi ograniczeniami twardymi nie powinny podlegać ocenie. W przypadku bilansu strat ciepła, szacowanego dwoma sposobami, wyznaczana jest różnica pomiędzy uzyskanymi wartościami, która podlegała kontroli (zbyt duża alarmowała o nieprawidłowościach). Do kryteriów subiektywnych zaliczone zostały przede wszystkim ograniczenia miękkie, które „zachęcają” optymalizator, by wartości ograniczenia nie ruszać. Ocenie eksperckiej powinna podlegać wielkość naruszenia tego ograniczenia. Dodatkowo opracowanych zostało 16 innych kryteriów subiektywnych.

W dalszej części pracy doktorskiej (podrozdział 5.3) dokonano analizy wybranych scenariuszy optymalizacji pracy sieci w ciągu roku. Jako bazowy, stanowiący punkt odniesienia, przyjęto scenariusz zimowy optymalizujący pracę sieci przy temperaturze otoczenia 0°C i zapotrzebowaniu odbiorców około połowy zapotrzebowania maksymalnego. Dokonano analizy między innymi takich parametrów, jak: prognozowane zapotrzebowanie na ciepło odbiorców, temperatura zasilania źródeł, temperatura zasilania źródeł szczytowych, przepływ w źródłach, temperatura zasilania i ciśnienie dyspozycyjne w komorach krytycznych, temperatura zasilania i ciśnienie dyspozycyjne w węzłach krytycznych, wartość przepływu i godzinowych ograniczeń dla przepływu w źródłach, wartość temperatury zasilania i ograniczenia na chwilowa odchyłkę tej wartości dla wybranych węzłów krytycznych, wartość ciśnienia dyspozycyjnego i jego ograniczeń dla wybranych węzłów cieplnych, wartość ciśnienia zasilania źródeł, itp. Przedstawione wyniki pokazują, że sezon przejściowy stanowi największe wyzwanie w planowaniu pracy sieci.

Podrozdział 5.4 zawiera charakterystykę innych, nie wykorzystywanych w dotychczasowych analizach wskaźników. Omówiono, w jaki sposób różne typy ograniczeń wpływają na kształt wyników. Efektem pracy optymalizatora są modyfikacje temperatury wody zasilającej podawanej przez źródła. W pracy doktorskiej przedstawiono zmiany średniej temperatury zasilania w elektrociepłowniach (źródłach) zawarte w wygenerowanych scenariuszach, odniesione do danych historycznych. Kolejnym zauważalnym efektem działania optymalizatora jest skrócenie czasu pracy szczytowych źródeł ciepła. Wynika to z faktu, że koszt zakupu energii w tych źródłach jest wyższy, co oddziałuje na optymalizator. Ponadto, działanie optymalizatora pokazało, że dla przyjętych ograniczeń i wskaźników kosztowych Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej przy wysokich obciążeniach sieci, optymalnym działaniem jest skracanie czasu pracy źródeł szczytowych, kosztem zwiększenia nakładów na eksploatację przepompowni i podniesieniem temperatury zasilania.

Należy podkreślić, że 83% scenariuszy wygenerowanych przez opracowany przez Doktoranta optymalizator było możliwych do wdrożenia według opinii analityków pracujących na co dzień z systemem ciepłowniczym.

Rozdział szósty zawiera formalne podsumowanie pracy, osiągnięcia celów i dowiedzenia tezy pracy. Doktorant przedstawił również wnioski i zalecenia dotyczące ewentualnych przyszłych modyfikacji, czy rozszerzenia opisanych badań.

6. Ocena pracy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska stanowi interesującą pracę o bardzo dobrym poziomie merytorycznym i dużym znaczeniu w kontekście poszerzenia wiedzy na temat możliwości optymalizacji pracy dużych sieci ciepłowniczych. Rozprawa doktorska powstała w ramach doktoratu wdrożeniowego i stanowi opis metodologii budowy systemu optymalizującego sieć ciepłowniczą. Opracowany



optymalizator został zaimplementowany w Systemie Wsparcia Decyzji Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej.

6.1 Główne osiągnięcia Autora

Z ważniejszych osiągnięć Autora warto wskazać:

- Opracowanie unikatowego rozwiązania w postaci optymalizatora pracy dużej sieci ciepłowniczej o znacznych opóźnieniach transportowych i układzie pierścieniowym oraz dużej liczbie węzłów umożliwiające zaplanowanie pracy źródeł ciepła przy uwzględnieniu rzeczywistych (zmierzonych) parametrów pracy sieci przed startem optymalizacji stanowi najważniejsze osiągnięcie Doktoranta, wieńczące całość jego działalności.
- Opracowanie modelu sieci ciepłowniczej (bez wykorzystania równań opisujących prawa fizyki) przy użyciu metod uczenia maszynowego stanowi ważne osiągnięcie, mające wkład w wypracowaniu efektu końcowego, jakim było stworzenie optymalizatora pracy sieci ciepłowniczej. Opracowana metoda może być w przyszłości wykorzystywana do szybkiego budowania modeli zasilających podobne optymalizatory systemów ciepłowniczych działające z punktu widzenia dystrybutora ciepła.
- Opracowanie algorytmu doboru źródeł ciepła opartego na podziale zagadnienia optymalizacji na dwie części – pierwsza bez zmiennych całkowitoliczbowych, druga z takimi zmiennymi.
- Przetestowanie optymalizatora i udowodnienie jego skuteczności. Trudne zadanie, z uwagi na przyjęte założenia i uproszczenia w procesie optymalizacyjnym w celu zapewnienia możliwości rozwiązania zadania. Wieloetapowy proces testowania wymagał dokładnego zaplanowania i doboru odpowiednich metod, a przeprowadzone analizy wyników wymagały dużej wiedzy eksperckiej i doświadczenia. Poprawność działania optymalizatora została udowodniona.
- Implementacja opracowanego narzędzia w Systemie Wsparcia Decyzji (SWD). Optymalizator jest wykorzystywany w codziennym zarządzaniu Warszawską Siecią Ciepłowniczą, co sprawia że jest narzędziem użytecznym biznesowo.

6.2 Uwagi krytyczne

Praca przygotowana została prawidłowo, cel i teza pracy są jasne, tok prac zmierzających do ich udowodnienia są czytelne i prawidłowe, jednakże w trakcie szczegółowej lektury rozprawy doktorskiej można znaleźć elementy mogące wymagać dodatkowego wyjaśnienia lub dyskusji. Poniższe uwagi krytyczne nie umniejszają mojej dobrej ocenie merytorycznej oceny rozprawy.

- Zastosowany horyzont czasowy w systemie optymalizacyjnym był 48 godzinny lub 120 godzinny. Prognoza pogody nie stanowi co prawda wejścia do programu, ale prognozowane zapotrzebowanie na ciepło jest mocno zależne od prognozy pogody. Będzie miało to wpływ na

pracę opracowanego narzędzia.. W przypadku prognozy pogody, a tym samym zapotrzebowania na ciepło dla najbliższych 48 godzin prawdopodobieństwo ich wystąpienia będzie stosunkowo wysokie. W przypadku prognozy na najbliższe 5 dni już tak nie będzie. Jak dokładność prognoz wpływa na pracę optymalizatora? Czy określono błędy w otrzymanych scenariuszach?

- Na stronie 11 znajduje się zdanie: „Celem badawczym pracy było opracowanie systemu optymalizującego pracę dużej, pierścieniowej sieci ciepłowniczej z punktu widzenia dystrybutora (a nie wytwórcy) ciepła.” Czym różnią się te dwa podejścia? Które parametry są istotne dla optymalizacji z punktu widzenia dystrybutora, a które z punktu widzenia wytwórcy?
- W pracy doktorskiej znajduje się informacja, że na wyniki optymalizacji mają wpływ jedynie koszt ciepła i koszt energii do zasilania pomp w przepompowniach (str. 42). Należy krótko wyjaśnić dlaczego pozostałe kosztowe składniki funkcji celu, czyli koszt przygotowania wody uzupełniającej i koszt podgrzania wody uzupełniającej, nie mają wpływu na wyniki optymalizacji. Po co je uwzględniać w funkcji celu, skoro nie mają wpływu na wynik optymalizacji?
- Na stronie 72 w punkcie „Trzecia iteracja obliczeń” znajduje się informacja, że odchyłka od ciśnienia zasilania przyjmuje różne wartości w zależności od sezonu. Napisano również, że te dane nie są wykorzystywane. Po co w takim razie są definiowane? Dlaczego nie są wykorzystywane?

6.3 Uwagi edytorskie

Rozprawa doktorska została dobrze skomponowana i napisana w sposób zrozumiały. Zastosowane słownictwo zostało poprawnie dobrane. Poniższe uwagi natury edytorsko-redakcyjnej nie mają żadnego negatywnego wpływu na wartość merytoryczną ocenianej pracy doktorskiej. Wskazanie tych uwag ma za zadanie pomóc w doskonaleniu warsztatu i może być przydatne w dalszej pracy naukowej Doktoranta przy pisaniu i redagowaniu publikacji.

- Pracę doktorską należy sprawdzić pod kątem interpunkcji (braki w wielu miejscach)
- Rysunek 2 na str. 46 nie jest czytelny.
- Zdanie na str. 14: „Dobór grubości izolacji i jej rodzaju dla istniejących i modernizowanych **siec** zaprezentowano w ...” należy poprawić na: : „Dobór grubości izolacji i jej rodzaju dla istniejących i modernizowanych **sieci** zaprezentowano w ...”
- Fragment zdania na str. 17: „jednak stosowane metody albo nie zostały w rzeczywistych systemach, ...” należy poprawić na: „jednak stosowane metody albo nie zostały **zastosowane** w rzeczywistych systemach, ...”

- Fragment zdania na str. 18: „Użycie nowatorskiej **metod** uczenia maszynowego...” należy poprawić na: „Użycie nowatorskiej **metody** uczenia maszynowego...”
- Fragment zdania na str. 24: „Jednym z algorytmów **przybliżony** jest też poszukiwanie...” należy zamienić na: „Jednym z algorytmów **przybliżonych** jest też poszukiwanie...”
- Fragment zdania na str. 24: „można się spodziewać okolicach wyjściowych parametrów sieci ciepłowniczej.” należy poprawić na: „można się spodziewać **w** okolicach wyjściowych parametrów sieci ciepłowniczej.”
- Fragment na str. 24: „**Dodania ograniczeń miękkich**. Ograniczenia (tzw. twarde) opisane w rozdziale 2.4 ...” należy poprawić na: „Ograniczenia (tzw. twarde) opisane w rozdziale 2.4 ...”
- Fragment zdania na str. 51: „Zużycie energii elektrycznej przez przepompownie to również **iloczynu** przepływu i różnicy ciśnienia...” należy poprawić na: Zużycie energii elektrycznej przez przepompownie to również **iloczyn** przepływu i różnicy ciśnienia...”
- Fragment zdania na str. 51: „**Wielkość**, jakie muszą być wyliczone przez model, ...” należy poprawić na: „**Wielkości**, jakie muszą być wyliczone przez model, ...”
- Fragment zdania na str. 54: „Zmiany hydrauliczne (zmiany pracy przepompowni **zainstalowany** w sieci, ...” należy poprawić na: „Zmiany hydrauliczne (zmiany pracy przepompowni **zainstalowanych** w sieci, ...”
- Usunąć fragment zdania w tekście na str. 54: „**Przykładowy wykres piezometryczny ciśnienia w.**”
- Fragment zdania na str. 55: „Na podstawie [15] można stwierdzić, że **wykładnika** ...” należy zmienić na: „Na podstawie [15] można stwierdzić, że **wykładnik** ...”
- Fragment zdania na str. 57: „**Je** wpływ rośnie dla temperatur zewnętrznych...” należy poprawić na: „**Jego** wpływ rośnie dla temperatur zewnętrznych...”
- Na str. 58 poprawić „**Zmienna** decyzyjne” na „**Zmienne** decyzyjne”
- Zdanie na str. 58: „Naturalnymi kandydatami **jest** zapotrzebowanie na ciepło i dane pogodowe.” poprawić na: „Naturalnymi kandydatami **są** zapotrzebowanie na ciepło i dane pogodowe.”
- Fragment zdania na str. 59: „Wybranych modelach finalnie znalazły się ...” poprawić na: „**W** wybranych modelach finalnie znalazły się ...”
- Fragment zdania na str. 62: „... takie eksperymenty **musiałoby** być jednak długotrwałe...” poprawić na: „... takie eksperymenty **musiałyby** być jednak długotrwałe...”
- Fragment zdania na str. 63: „Wszak model ma **modelować** ...” poprawić na: „Wszak model ma **symulować** ...”
- Fragment zdania na str. 66: „... nie udało się **ich** zidentyfikować wszystkich opóźnień.” należy poprawić na: „... nie udało się zidentyfikować wszystkich opóźnień.”
- Fragment zdania na str. 66: „**Jedyni** przyjęcie stałego opóźnienia transportowego ...” należy poprawić na: „**Jedynie** przyjęcie stałego opóźnienia transportowego ...”

- Fragment zdania na str. 67: „Jeśli testy optymalizatora **wykazałby**...” należy poprawić na: „Jeśli testy optymalizatora **wykazałyby**...”
- Fragment na str. 69: „Najpierw zadano na wejściu typowe przepływy i **sprawdzić**, jakie Termis obliczy ciśnienia zasilania. A następnie zadać obliczone przez Termis ciśnienia zasilania (wraz z siatką odchyłek od tych wartości) i na podstawie wyników zbudować model.” należy poprawić na: „Najpierw zadano na wejściu typowe przepływy i **sprawdzono**, jakie Termis obliczy ciśnienia zasilania. **Następnie zadano** obliczone przez Termis ciśnienia zasilania (wraz z siatką odchyłek od tych wartości) i na podstawie wyników **zbudowano** model.”
- Fragment zdania na str. 70: „... w źródłach są dwie wartości: **przepływu** na zasilaniu i na powrocie.” należy poprawić na: „... w źródłach są dwie wartości: **przepływ** na zasilaniu i na powrocie.”
- Fragment zdania na str. 71: „Tak więc **aby** po zmianie wartości ...” należy poprawić na: „Tak więc po zmianie wartości ...”
- Fragment zdania na str. 87: „Uzyskany finalnie **wyżej** model ciśnień...” należy poprawić na: „Uzyskany finalnie model ciśnień...”
- Fragment zdania na str. 87: „... była **ona** powiększona o moc strat ...” należy poprawić na: „... była powiększona o moc strat ...”
- Fragment zdania na str. 95: „**Wybrany** wyniki optymalizacji ...” należy poprawić na: „**Wybrane** wyniki optymalizacji ...”
- Fragment zdania na str. 103: „... dla dowolnego, **losowe** zestawu zmiennych decyzyjnych.” należy poprawić na: „... dla dowolnego, **losowego** zestawu zmiennych decyzyjnych.”
-

7. Wniosek końcowy

Oceniana rozprawa doktorska, mimo zauważonych usterek, może być bez wątpienia uznana za oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wykazuje odpowiednią wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Uważam, że podjęta przez Doktoranta tematyka badawcza jest trudna, ale ważna i istotna, przede wszystkim ze względu na powszechność wykorzystania sieci ciepłowniczych. Uzyskane przez Niego wyniki badań i implementacja opracowanego rozwiązania w systemie zarządzania siecią ciepłowniczą mają w moim przekonaniu dużą wartość zarówno merytoryczną, jak i praktyczną.

Reasumując, uważam, że **praca doktorska mgr inż. Michała Guzka w pełni spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim** określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku *Prawo o szkolnictwie Wyższym i Nauce* i **stawiam wniosek o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.**

Rozprawę doktorską mgr inż. Michała Guzka wyróżnia mnogość zastosowanych metod oraz ich doskonale wykorzystanie do osiągnięcia zaplanowanych celów. Najważniejszym osiągnięciem pracy jest gotowy unikatowy system pozwalający na optymalizację pracy dużej sieci ciepłowniczej oraz wykazanie poprawności jego funkcjonowania. Ważnym atutem jest również implementacja systemu i jego wykorzystanie w zarządzaniu Warszawską Siecią Ciepłowniczą.

Z powyższych powodów wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Guzka pt. „System optymalizacji pracy Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej”.

Marcin Drogosz