

Prof. dr hab. inż. Bohdan Węglowski
Politechnika Krakowska
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Katedra Energetyki
Al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków

Kraków 07.02.2022r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej

Pani mgr inż. Teresy Kurek

pt.: System generujący prognozy zapotrzebowania na ciepło dla Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej

Recenzja opracowana na podstawie decyzji Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska i Energetyki Politechniki Warszawskiej (pismo nr RND-IŚGiE/138/2021)

1. Ocena zasadności podjęcia tematu

Praca z dziedziny nauk inżyniersko-technicznych, mieszcząca się w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka, poświęcona jest opracowaniu podstaw teoretycznych i realizacji systemu prognozującego (SPROG) zapotrzebowanie na ciepło dla miasta Warszawa.

Temat dysertacji jest jak najbardziej aktualny i dobrze wpisujący się w ogólnoswiatową tendencję do poszukiwania efektywnych sposobów nie tylko produkcji ale też oszczędzania energii, zarówno elektrycznej jak i cieplnej. W chwili obecnej ciepłownictwo krajowe czeka szereg wyzwań związanych z odchodzeniem od paliw kopalnych, wprowadzaniu obostrzeń (Dyrektywa RED II) i dodatkowych obowiązków wynikających z dyrektyw IED, ETS, MPC oraz rozwoju technologii wykorzystujących OZE, zmieniających krajowy rynek ciepła. Wszystkie te czynniki kształtujące modele rynku ciepła systemowego, wpływające na obszary wytwarzania, przesyłu i dystrybucji ciepła mają wspólny mianownik jakim jest prawidłowe szacowanie zapotrzebowania na ciepło wraz z predykcją tego zapotrzebowania.

Systemy prognozowania zapotrzebowania na ciepło pozwalają na efektywne gospodarowanie źródłami energii, co w przypadku dużych sieci ciepłowniczych takich jak system ciepłowniczy Veolia Energia Warszawa dostarczającą ciepło systemowe i ciepłą wodę użytkową do 80% budynków w Warszawie jest niezwykle ważne, zwłaszcza że system ciepłowniczy zasilany jest z czterech źródeł tj. z Elektrociepłowni Siekierki, Elektrociepłowni Żerań, Ciepłowni Wola i Ciepłowni Kawęczyn. Dokładne analizy zapotrzebowania na ciepło pozwalają również na taką modernizację i zmiany źródeł produkcji ciepła na ekologiczne aby w pełni pokryć zapotrzebowanie na ciepło i ograniczyć emisję.

Uważam, że podjęcie się przez Panią mgr inż. Teresę Kurek opracowania systemu prognozującego zapotrzebowanie na ciepło dla miejskiej sieci ciepłej jest jak najbardziej uzasadnione i aktualne.

2. Przegląd rozprawy

Opiniowana rozprawa doktorska Pani mgr inż. Teresy Kurek napisana została na 149 stronach wydania książkowego formatu C5 i wydana w formie zeszytu Politechniki Warszawskiej Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa (2021r).

Składa się z 8 rozdziałów numerowanych, krótkich streszczeń w języku angielskim i polskim oraz spisu treści umieszczonych na początku rozprawy. Na końcu pracy umieszczono Dodatek A zawierający wkład osób trzecich w rozwój systemu prognostycznego oraz bibliografię zawierającą 80 pozycji literaturowych. W pracy zamieszczono 63 rysunki oraz 27 tabel.

3. Szczegółowe omówienie rozprawy

W rozdziale 1 będącym wprowadzeniem, Autorka scharakteryzowała sieci ciepłownicze skupiając się na scenariuszach transformacji sieci ciepłowniczych zawartych w Heat Roadmap Europe 4 (HRE4) wymagających precyzyjnych średnio i krótkoterminowych prognoz zapotrzebowania na ciepło warunkujących poprawę planowania i eksploatacji systemów ciepłowniczych. Określiła także cel pracy, którym było opracowanie systemu generującego prognozy zapotrzebowania na ciepło (SPROG) dla warszawskiej sieci ciepłowniczej (WSC) stanowiącego autonomiczną warstwę systemu wsparcia decyzji (SWD) oraz podała główne tezy pracy.

Podstawy teoretyczne doboru rozwiązań zadań prognostycznych przedstawione zostały w drugim rozdziale dysertacji. Zwięźle omówione zostały teorie i modele szeregów czasowych powiązanych z metodami prognozowania oraz weryfikację prognoz i ocenę ich jakości.

Przeгляд literaturowy metod wyznaczania zapotrzebowania na ciepło zawiera rozdział , który kończą wnioski głównie dotyczące braku w literaturze kompleksowości badań ujmujących sezony przejściowe oraz brak badań dla dużych sieci ciepłowniczych, co potwierdza zasadność tematyki badań podjętych przez Autorkę rozprawy.

W rozdziale 4 przedstawiono metodologię budowy systemów bazujących na technikach uczenia maszynowego wykorzystujące zaimplementowane algorytmy do prognozowania. Dokładniej omówione zostały procesy modelowania z uwzględnieniem przetwarzania danych, trenowania, walidacji modeli oraz ich implementacji i monitorowanie jakości predykcji modelu.

Podstawowe informacje dotyczące Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej gdzie opracowany system był implementowany przedstawiono w rozdziale 5.

W obszernym, bo liczącym 57 stron rozdziale 6 dokładnie został przedstawiony system SPROG, będący podstawą Systemu Wsparcia Decyzji w warszawskiej sieci ciepłowniczej zarządzanej przez Veolia Energia Warszawa S.A. Przedstawiono główne założenia systemu oraz poszczególne etapy tworzenia systemu z jego głównymi modułami i algorytmami. Scharakteryzowano dane pogodowe dla miasta Warszawy oraz dane pomiarowe z węzłów ciepłych, metody ich walidacji wraz z dynamicznym skalowaniem brakujących pomiarów. Ważną częścią jest podrozdział 6.2.12 dotyczący doboru najlepszego modelu prognostycznego dla całej sieci. Autorka przebadła kilkanaście modeli predykcyjnych. W rozprawie dokładnie omówione zostały dwa, te które charakteryzują się najlepszą dokładnością predykcji, tj. sztuczną sieć neuronową (SSN) jako połączenie modelu z autoregresją i bez autoregresji oraz

regresję grzbietową (RR) – model z autoregresją i bez autoregresji uzupełniony o funkcję rozmycia dla sezonu przejściowego. Dla wydzielonych 55 obszarów sieci zastosowane zostały indywidualne modele predykcji w zależności od sezonu, tj. modele RR z autoregresją i bez autoregresji dla sezonów zima i lato oraz modeli rozmytych dla sezonów przejściowych. Rozdział kończą zestawienia tabelaryczne wyników dla sieci, indywidualne wyniki modeli dla obszarów sieci oraz graficzne przedstawienie prognoz zapotrzebowania na ciepło dla wybranych obszarów dla sezonu zimowego, letniego i przejściowego.

Kolejnym znaczącym rozdziałem dysertacji jest rozdział 7 w którym opisane zostało wdrożenie systemu SPROG prognozującego zapotrzebowanie na ciepło dla całej sieci ciepłowniczej oraz obszarów wydzielonych, do Systemu Wspomagania Decyzji (SWD) w Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej. W rozdziale tym zamieszczona została również analiza wyników dwuletniej pracy wdrożonego systemu, pokazane zostały wyniki w zestawieniu tabelarycznym a porównanie prognoz z rzeczywistym zapotrzebowaniem na ciepło dla horyzontu 24 godzin dla wybranych reprezentatywnych miesięcy, w formie wykresów.

Pracę kończy rozdział 8 będący podsumowaniem części teoretycznej i wdrożeniowej. Ponadto znajduje się dodatek z udziałem wkładu osób trzecich w rozwój systemu prognostycznego oraz bibliografia z której korzystała doktorantka.

4. Uwagi dyskusyjne i dostrzeżone nieścisłości:

1. Autorka pisze (str. 94 wiersz 6 od dołu): W rozprawie przedstawione zostaną dwa modele:
 - model, który uzyskał najlepszą dokładność predykcji, tj. SSN (połączenie modelu z autoregresją oraz bez autoregresji),
 - model mniej wymagający obliczeniowo, który uzyskał dobre dokładności predykcji dla sezonu letniego oraz zimowego, tj. regresja grzbietowa (połączenie modelu z autoregresją oraz bez autoregresji).

Po czym na stronie 97 czytamy: „Z uwagi na bardzo słabą dokładność modeli RR w obszarze sezonu przejściowego, prognozę zapotrzebowania na ciepło w tymże okresie wyznaczono przez rozmywanie wyników prognozy z wykorzystaniem modelu dla sezonu letniego oraz zimowego.”

2. Rezygnację z zastosowania modelu SSN (str. 112), „Model sztucznej sieci neuronowej został pominięty ze względu na czasochłonne trenowanie modelu, tj. 1 godzinę na model i porównywalne wyniki uzyskane we wstępnej analizie” można było uzasadnić pokazując ich porównanie.
3. Podobnie można było obliczenia wg różnych modeli RR, SSN pokazać na wykresach. Np. dane z Tabeli 6.11 i Tabeli 6.17 tj. dokładność prognoz dla całej sieci z wykorzystaniem odpowiednio modelu RR bez autoregresji i modelu SSN bez autoregresji, z podziałem na miesiące. Podobnie dla podziału na sezony tj. tabele 6.9 i 6.16.
4. Str. 116 i 117, w tabeli 6.22 brak jest obszarów 18, 25, 28 i 29. Większego znaczenia to nie ma, jednak dla porządku można było napisać z jakich powodów zostały pominięte, np. z powodu braku danych etc.
5. W nieopisanej tabeli na str. 23 podany został wzór na sigmoidalną funkcję unipolarną. Zwykle funkcję taką, przyjmując konwencję zapisu z dysertacji, podaje się za pomocą wzoru $h_{\theta}(x) = \frac{1}{1 + e^{-\theta x}}$, $\theta > 0$, gdzie x - argument (wejście) funkcji a θ - parametr określający kształt funkcji aktywacji domyślnie równy 1. Co zatem oznacza potęgę T?

6. Opracowany system prognostyczny, będący podstawą do prawidłowego funkcjonowania Systemu Wspomagania Decyzji (SWD), wdrożony został pod koniec 2018r. Czy były prowadzone oszacowania jak wpływa wdrożony system od strony ekonomicznej na poprawę funkcjonowania Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej.
7. Czy wprowadzony system prognostyczny, zwłaszcza dla wydzielonych obszarów, jest na tyle elastyczny aby prawidłowo diagnozować i przewidywać zapotrzebowanie na energię ciepłą w sytuacjach dużych zmian po stronie odbiorców ciepła. Mam na myśli budowę nowych bloków podłączonych do WSC oraz (o czym się mówi coraz więcej) tworzenie lokalnych dystryktów energetycznie niezależnych z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii wykorzystujących pompy ciepła i magazyny ciepła.

W recenzowanej rozprawie Pani mgr inż. Teresy Kurek zauważyłem szereg uchybień o charakterze edytorskim, których nie ustrzegła się Autorka:

1. Str. 21, w objaśnieniach do wzoru 2.3 jest: wector; powinno być: wektor
2. Str. 31, w tytule rozdziału jest: ciepło; powinno być ciepło
3. Str. 32 wiersz 2 od góry: m_1 - masa wody powrotnej z sieci.; powinno być: m_2 - masa wody powrotnej z sieci.
4. Str. 38, wiersz 2 od dołu: gy; powinno być: gdy
5. Str. 50, wiersz 5 od dołu: leakage; powinno być: leakage
6. Str. 53, wiersz 7 od góry: wkolejnych; powinno być: w kolejnych
7. Str. 54, wiersz 12 od dołu: leppsza; powinno być: lepsza
8. Str. 55, wiersz 1 od dołu: 4.11;model; powinno być: 4.11; model
9. Str. 64, wiersz 4 od dołu: 4przed; powinno być: 4, przed
10. Str. 71, wiersz 5 od dołu: przedsatwione; powinno być: przedstawione
11. Str. 75, tabela 6.4: $m\backslash s$, $W\backslash m^2$; powinno być: m/s , W/m^2
12. Str. 90, wiersz 9 od dołu: dokładność; powinno być dokładność
13. Str. 90, wiersz 1 od dołu, pomijając literówkę „różniani”, to 6.10 nie jest równaniem a zatem zdanie to mogłoby brzmieć: Przykładowo dla parametru *zapotrzebowanie na ciepło*, fragment danych przedstawiono za pomocą macierzy 6.10.
14. Str. 92, wiersz 7 od góry: tak,że; powinno być: tak, że
15. Str. 92, wiersz 11 od dołu: proc.wszystkich; powinno być: proc. wszystkich
16. Str. 103, na rysunku 6.22 poucinane są opisy osi odciętych
17. Str. 112, wiersz 1 od góry: modleu; powinno być: modelu
18. Str. 124, wiersz 6 od dołu: wsteczcie; powinno być: wstecznie
19. Str. 130, w podpisie pod rysunkiem 7.6 i 7.7 jest: Maj- wrzesień 2019 oraz 2020 roku. Sugeruje to cały okres od maja do września 2019 i 2020 roku, podczas gdy pokazane zostały tylko maj i wrzesień. Powinno być: Maj i wrzesień 2019 oraz 2020 roku. Podobnie jest w przypadku rysunku 7.7, gdzie w podpisie powinno być: Kwiecień i październik 2019 oraz 2020 roku.

Ponadto Autorka w tekście używa zamiennie nazw w j. angielskim i w j. polskim a czasem mieszanych np. ridge regression (str.113), regresja grzbietowa (str.94,112) i regresja ridge (str.20). Nie jest to błąd, bo wiadomo jaka jest etymologia tych nazw. Ale dla porządku można było zdecydować się na jedną z nich czyli angielską lub polską.

5. Ocena nowości w pracy

1. Dużym wyzwaniem było opracowanie systemu predykcji zapotrzebowania na energię ciepłą dla tak dużej sieci ciepłowniczej jaka jest w Warszawie (ponad 1800 km rur na

- obszarze o powierzchni ok. 190 km², ok. 16.7 tys. węzłów cieplnych w ok. 19 tys. budynkach), którego skutecznie podjęła się Autorka dysertacji.
2. Analiza wieloletnich danych pomiarowych pozyskanych z systemu telemetrycznego w który wyposażona jest warszawska sieć ciepłownicza. Duże znaczenie ma wykorzystanie danych z węzłów ciepłowniczych będących źródłem rzeczywistego zapotrzebowania odbiorców na ciepło.
 3. Opracowanie algorytmów walidacji danych pomiarowych, algorytmów agregacji danych i bardzo ważny algorytm dynamicznego uzupełniania danych oraz koncepcji listy bazowej umożliwiającej skalowanie wyników prognoz na zmienną w czasie liczbę odbiorców.
 4. Uzyskanie wysokiej jakości opracowanych modeli prognostycznych będących kombinacją sztucznych sieci neuronowych z autoregresją dla pierwszych 24 godzin horyzontu predykcji oraz bez autoregresji dla kolejnych godzin predykcji pozwala na modernizację algorytmów optymalizacji pracy sieci ciepłowniczej.
 5. Opracowanie indywidualnych modeli dla wydzielonych obszarów sieci ciepłowniczej bazującej na modelu regresji grzbietowej (z autoregresją i bez autoregresji) dla sezonów letniego i zimowego oraz modelu dla sezonu przejściowego (z funkcją rozmycia wyników prognoz).
 6. Implementacja opracowanego systemu prognostycznego do Systemu Wsparcia Decyzji (SWD) w warszawskiej sieci ciepłowniczej.

6. Wnioski końcowe

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pani mgr inż. Teresy Kurek pt. „System generujący prognozy zapotrzebowania na ciepło dla Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej” napisana została w sposób uporządkowany i logiczny a dokładne rozeznanie literaturowe oraz przekazana w niej bogata wiedza z zakresu zagadnień związanych z prognozowaniem szeregów czasowych budową modeli, analizą i przetwarzaniem danych czynią pracę wartościową, która wnosi duży wkład w rozwój systemów prognostycznych dla ciepłownictwa.

Dużym sukcesem jest opracowania efektywnego systemu generującego prognozy zapotrzebowania na ciepło dla tak rozbudowanej sieci jaką jest Warszawska Sieć Ciepłownicza, którego opracowane modele prognostyczne wyznaczają prognozy dla każdego momentu w roku, tj. sezonu grzewczego, letniego oraz przejściowego.

Bardzo cennym jest wdrożenie systemu generującego prognozy zapotrzebowania na ciepło wdrożonego, będąc jednocześnie częścią Systemu Wsparcia Decyzji stworzonego przez Transition Technologies S.A dla warszawskiej sieci ciepłowniczej zarządzanej przez Veolia Energia Warszawa S.A. Weryfikacja pracy systemu dokonana po przeanalizowaniu wyników z 2-letniej eksploatacji wykazała dużą dokładność modelu zapotrzebowania na ciepło dla całej sieci, jak i dla wydzielonych obszarów sieci ciepłowniczej.

Na uwagę zasługują walory merytoryczne pracy, które pokrywają się z wymienionymi w recenzji w punkcie dotyczącym nowości w pracy.

Warto również podkreślić bardzo duży zakres jaki obejmowało postawione w dysertacji zadanie. Doktorantka nie tylko bazowała na posiadanej wiedzy wzbogaconej o zamieszczone źródła literaturowe ale również z wiedzy i doświadczenia osób trzecich (wymienionych w dodatku A). Jest to potwierdzeniem dużego rozeznania ze strony doktorantki dotyczącego złożoności całości zagadnienia do rozwiązania, wszystkich jego aspektów i udowadnia duże umiejętności doktorantki do współpracy w celu osiągnięcia wyników na jak najwyższym poziomie.

Na podkreślenie zasługuje użyteczny charakter pracy. Efekty to nie tylko wdrożenie systemu do Systemu Wsparcia Decyzji w warszawskiej sieci ciepłowniczej ale również prawidłowo zdefiniowane zapotrzebowanie na ciepło dla sieci pozwala na poprawę eksploatacji bloków energetycznych pracujących w Elektrociepłowni Siekierki, Elektrociepłowni Żerań, Ciepłowni Wola i Ciepłowni Kawęczyn.

Praca z uwagi na tematykę z dziedziny nauk inżyniersko-technicznych, mieści się w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

Stwierdzam, pomimo poczynionych uwag które w części były uwagami porządkowymi, redakcyjnymi a w części uwagami dyskusyjnymi, że Pani mgr inż. Teresa Kurek w przedłożonej rozprawie doktorskiej poprawnie sformułowała, rozwiązała i opisała postawione sobie zadanie jakim było opracowanie nowatorskiej metody predykcji zapotrzebowania na ciepło dla sieci ciepłowniczej. Założony cel badawczy został osiągnięty na wysokim poziomie, udowadniając wszystkie tezy sformułowane w pierwszym rozdziale dysertacji.

Uważam, że rozprawa doktorska Pani mgr inż. Teresy Kurek spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w myśl obowiązującej ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (t.j. Dz. U. 2017, poz. 1789) i wobec powyższego, wnioskuję do Wysokiej Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka o dopuszczenie Pani mgr inż. Teresy Kurek do dalszego etapu w postępowaniu o nadanie tytułu doktora.

