

Kraków, 30.12.2021 r.

Prof. dr hab. inż. Wojciech Nowak

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica

Wydział Energetyki i Paliw

Al. A. Mickiewicza 30

30-059 Kraków

wnowak@agh.edu.pl

Tel: 604410913

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Teresy Kurek

**„System generujący prognozy zapotrzebowania na ciepło dla Warszawskiej
Sieci Ciepłowniczej”**

Wstęp

Recenzję rozprawy doktorskiej opracowano na podstawie decyzji Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej, pismo RND-IŚGiE-/138/2021.

Zasadność tematyki

Optymalne zarządzanie ciepłem, w tym prognozowanie jego zapotrzebowania, ma zasadnicze znaczenie dla rozwoju zrównoważonych systemów ciepłowniczych. Dokładna prognoza zapotrzebowania na ciepło umożliwia efektywne planowanie i eksploatację zarówno produkcji, jak i dystrybucji ciepła. Jest również niezbędne do optymalizacji i planowania produkcji oraz wykorzystania jednostek magazynowania ciepła.

Zarządzanie sieciami wymaga optymalnego sterowania urządzeniami, co można osiągnąć poprzez sterowanie predykcyjne, w którym prognozy pogody i inne informacje są wykorzystywane do przewidywania wydajności systemu z wyprzedzeniem (np. kilku godzin). Pozwala to na podjęcia odpowiednich działań poprawiających istotnie efektywność systemu, ale przede wszystkim daje możliwość przewidywania awarii sieci. Operatorzy sieci

ciepłowniczych mogą dzięki temu eksploatować swoją sieć bardziej wydajnie i niezawodnie, posiadając dokładną prognozę zapotrzebowania na ciepło. W rezultacie zwiększa się bezpieczeństwo dostaw, a jednocześnie obniża się koszty.

Kluczową ideą w tym podejściu jest zapewnienie różnych parametrów odbiorców ciepła jako danych wejściowych dla sztucznej sieci neuronowej i nauczenie modelu w oparciu o duże grupy symulowanych odbiorców. Proste modele (takie jak regresja liniowa jako funkcja temperatury powietrza zewnętrznego) są powszechnie wykorzystywane, ale mogą one nie być wystarczająco dokładne, zwłaszcza w przypadku prognoz długoterminowych. Modele oparte na uczeniu maszynowym stanowią niewykorzystaną jak dotąd możliwość predykcji sieci ciepłowniczej, gdyż są bardziej dokładne i uwzględniają czynniki, które niekoniecznie są mierzone. Wprawdzie wykorzystanie algorytmów uczenia maszynowego do przewidywania zapotrzebowania na ciepło było już przedmiotem analiz, ale dostępna literatura w tym temacie jest nadal niewystarczająca.

Głównym celem badawczym przedłożonej do oceny rozprawie doktorskiej było opracowanie systemu generującego prognozy zapotrzebowania na ciepło dla warszawskiej sieci ciepłowniczej. Zaproponowany system stanowi autonomiczną warstwę systemu wsparcia decyzji, którego głównym celem jest optymalizacja pracy sieci ciepłowniczej. Generowane prognozy stanowią informację wejściową do optymalizatora pracy sieci ciepłowniczej.

Stąd tematyka rozprawy doktorskiej wiąże się bezpośrednio z nowymi trendami poszukiwania i implementacji takich systemów. Problem naukowy został postawiony poprawnie oraz rozwinięty za pośrednictwem sformułowanych tez rozprawy. Cel jak i zakres pracy adekwatnie wynikają z przeprowadzonej analizy literatury przedmiotu oraz postawionego problemu przez Autorkę.

Układ pracy

Praca podzielona jest na osiem rozdziałów i liczy 155 stron. Bibliografia zawiera 81 pozycji. W pierwszym rozdziale przedstawiono wprowadzenie oraz podano cele i omówiono zakres pracy. W rozdziale drugim przedstawiono wybrane metody prognozowania szeregów czasowych. Metody te wykorzystane zostały w procesie doboru oraz trenowania modeli prognostycznych będących podstawą proponowanego systemu. Przedstawiono również

wskaźniki jakości prognoz celem ewaluacja tworzonych modeli oraz porównanie uzyskanych wyników z wynikami prezentowanymi w literaturze naukowej.

W rozdziale 3 omówiono aspekty prognozowania specyficzne dla modelowania zapotrzebowania na ciepło oraz przedstawiono przegląd literatury dotyczący prognozowania zapotrzebowania na ciepło dla sieci ciepłowniczych. Bazując na danych telemetrycznych w rozdziale 4 przedstawiono metodologię budowy systemów bazujących na technikach uczenia maszynowego. W rozdziale 5 przedstawiono podstawowe informacje dotyczące warszawskiej sieci ciepłowniczej.

W rozdziale 6 przedstawiono poszczególne etapy tworzenia systemu SPROG. Przedstawiono wyniki modeli prognostycznych dla zbiorów danych testowych oraz porównano je z wynikami prezentowanymi w literaturze.

W rozdziale 7 przeanalizowano wyniki wdrożeń SPROG w warszawskiej sieci ciepłowniczej. Wyniki te potwierdziły założone cele rozprawy. W rozdziale 8 podsumowano dotychczasowe rozwiązania.

Elementy nowości naukowej rozprawy doktorskiej

- Najważniejszym osiągnięciem naukowym przedstawionym w rozprawie doktorskiej pt. „System generujący prognozy zapotrzebowania na ciepło dla Warszawskiej Sieci Ciepłowniczej” jest stworzenie modeli prognostycznych prognozujących zapotrzebowanie na ciepło dla sieci ciepłowniczej, do której przyłączonych jest ponad 16 tysięcy węzłów cieplnych.
- Istotnym elementem powyższego osiągnięcia jest skala odbiorców przyłączonych do sieci oraz zmiana metody wyznaczania zapotrzebowania na ciepło w sieci. W pracy wykorzystane zostały dane pomiarowe rejestrowane przez system telemetrii bezpośrednio w węzłach cieplnych w kontraście do popularnej metodologii wykorzystania danych pomiarowych na wyjściu ze źródeł ciepła. Zmiana ta, pozwalająca na precyzyjne prognozowanie zapotrzebowania na ciepło przez odbiorców sieci z pominięciem strat przesyłu ciepła, jest jednym z kluczowych elementów koniecznych do poprawy planowania i eksploatacji systemu ciepłowniczego IV generacji.
- Na zaznaczenie zasługuje również fakt że stworzone modele prognostyczne wyznaczają prognozy dla każdego momentu w roku, tj. sezonu grzewczego, letniego

oraz przejściowego. W literaturze naukowej brak jest badań przedstawiających uzyskane wyniki prognozowania dla tak szerokiego zakresu: badania skupione są na sezonie grzewczym z pominięciem sezonu letniego oraz przejściowego, podczas gdy sezony te stanowią równie istotny okres z punktu widzenia ekonomicznej optymalizacji pracy sieci ciepłowniczej. Podejście to jest innowacyjne i nie zostało wcześniej opracowane.

- Stworzone modele prognostyczne, zgodnie z ideą doktoratu wdrożeniowego, stanowią podstawę 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..

Stworzenie systemu oraz modeli prognostycznych wymagało implementacji nowatorskich rozwiązań takich jak:

1. Stworzenie idei listy bazowej pozwalającej na wyznaczanie zapotrzebowania na ciepło w sieci, gdzie liczba odbiorców końcowych jest zmienna w czasie. Problem ten nie występuje w przypadku, gdy wykorzystywane są dane pomiarowe na wyjściu ze źródeł ciepła.
2. Stworzenia algorytmu walidacji oraz agregacji danych pomiarowych. Algorytm ten odpowiedzialny za wyznaczanie całkowitego zapotrzebowania na ciepło pozwala efektywnie oraz precyzyjnie skalować brakujące pomiary. Ponadto kombinacja idei listy bazowej oraz algorytmu skalującego brakujące pomiary pozwala na szacowanie zapotrzebowania na ciepło dla aktualnej, zmiennej w czasie, liczby odbiorców końcowych.
3. Stworzenie modelu prognostycznego wraz z unikalną grupą cech wejściowych będących kombinacją danych pogodowych, ich przesunięć w czasie, historycznych wartości zapotrzebowania na ciepło oraz cech pogodowych. Unikalna jest również postać modelu prognostycznego będąca kombinacją dwóch modeli sztucznych sieci neuronowych: sztucznej sieci neuronowej z autoregresyjnym wejściem oraz sztucznej sieci neuronowej bez autoregresyjnego wejścia.
4. Algorytm wyznaczania przedziałów ufności prognozy, dla zadanego poziomu ufności, oparty na analizie statystycznej błędów prognozy dla zbiorów danych testowych.
5. Algorytm wyznaczania zapotrzebowania na ciepło w czasie rzeczywistym uwzględniający możliwość wystąpienia braków wartości pomiarowych z systemu telemetrii zawierających wartość konsumpcji ciepła przez odbiorców końcowych.

Na podkreślenie zasługuje również fakt, iż przedstawiona w rozprawie analiza potwierdza uzyskanie analogicznych wyników po wdrożeniu systemu w warszawskiej sieci ciepłowniczej dla okresu: styczeń 2019 – luty 2021. Uzyskane wyniki potwierdzają jakość prognoz oraz przedziałów ufności dla każdego z sezonów. W mojej ocenie oceniana rozprawa doktorska ma bardzo duże walory praktyczne. Dodatkową korzyścią dla środowiska jest to, że emisje CO₂ można również często zmniejszyć dzięki dokładniejszej prognozie, a tym samym bardziej efektywnemu planowaniu i eksploatacji aktywów produkcyjnych i sieci dystrybucji ciepła.

System zaproponowany przez Autorkę ma również inne kluczowe korzyści praktyczne, m.in.:

- automatycznie i dokładnie prognozuje zapotrzebowanie na ciepło w sieciach ciepłowniczych i może być wykorzystany w innych sieciach ciepłowniczych,
- zwiększa bezpieczeństwo dostaw dla odbiorców ciepła,
- wysoka elastyczność. Możliwość konfiguracji do różnych konfiguracji sieci z zależnościami i bez zależności między sieciami;
- zapewnia doskonałą dokładność prognozowania w porównaniu z konkurencyjnymi technologiami.

Poziom warsztatowy

Przedstawiona rozprawa napisana jest wynikiem bardzo trudnych i uciążliwych prac prognozujących zapotrzebowanie na ciepło dla sieci ciepłowniczej.

Autorka wykazała bardzo dobre przygotowanie w formułowaniu modelu prognostycznego z wykorzystaniem technik uczenia maszynowego.. Wynik prognozy zawiera również przedziały ufności prognozy dla poziomu ufności równego 90 proc. Wysoka jakość generowanych prognoz pozwoliła na wdrożenie systemu prognozowania w Systemie Wsparcia Decyzji (SWD).

W szczególności podkreślić należy na swobodę z jaką Autorka posługuje się stosowanymi pojęciami oraz zależnościami. Zarówno dobór tematyki jak i analizowanych źródeł uznać należy za prawidłowy. Praca posiada przejrzysty układ treści, konsekwentnie stosowane nazewnictwo oraz symbolikę.

Uwagi krytyczne

W trakcie czytania pracy nasunęły mi się pewne uwagi krytyczne, które nie mają jednak istotnego wpływu na wysoką wartość merytoryczną przedstawionej rozprawy, a dotyczą zagadnień omówionych poniżej.

1. W procesie prognozowania kluczowa jest wiarygodność danych pomiarowych. wnioski były wiarygodne, należy przeprowadzić analizę niepewności i błędów pomiaru parametrów sieci ciepłowniczej i odbiorców. Proszę o komentarz mając na uwadze dokładność urządzeń.
2. Ile wynoszą straty ciepła w systemie analizowanym przez Autorkę ?
3. O jakości algorytmów systemu uczenia maszynowego decyduje jakość danych wejściowych. Jaka mamy pewność, że system prognostyczny bazujący na wielkościach trudnych do prognozowania np. temperaturze zewnętrznej czy prędkości wiatru będzie wiarygodny ?
4. Przyczyną słabej wydajności w uczeniu maszynowym jest albo nadmierne dopasowanie, albo niedostateczne dopasowanie danych. Jak więc ograniczyć nadmierne dopasowanie bądź niedopasowanie ?
5. Zrozumienie dopasowania modelu jest ważne dla zrozumienia głównej przyczyny niskiej dokładności modelu. Przykłady niedotrenowania oraz przetrenowania zostały pokazane na Rys. 4.4. Jak ocenić czy model jest w stanie uchwycić relacji między przykładami wejściowymi, a wartościami docelowymi ?
6. Dokładność danych treningowych i testowych może być niska, ponieważ algorytm uczenia się nie miał wystarczającej ilości danych, z których mógłby się uczyć. Czy w związku z tym wymiana źródła ciepła nie spowoduje braku dostępu do danych wejściowych ?
7. Na ile proponowany model wpłynął na obniżenie kosztów dystrybucji ciepła ?

Wnioski końcowe

Reasumując można stwierdzić, iż tematyka rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Teresy Kurek pt. „System generujący prognozy zapotrzebowania na ciepło dla Warszawskiej Sieci

Ciepłowniczej” wiąże się bezpośrednio z koniecznością wprowadzenia nowego podejścia i narzędzi do generujący prognozy zapotrzebowania na ciepło.

Praca mieści się w dyscyplinie *inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka*.

Do najważniejszych walorów recenzowanej rozprawy zaliczam:

- poprawnie postawiony problem naukowy oraz rozwinięty za pośrednictwem sformułowanych tez rozprawy. Cel jak i zakres pracy adekwatnie wynikają z przeprowadzonej analizy literatury przedmiotu oraz postawionego problemu przez Autorkę,
- rozprawa doktorska zawiera rozwiązanie ważnego zadania naukowego jakim jest opracowanie system prognostycznego, który w przeciwieństwie do rozwiązań opisywanych w światowej literaturze naukowej, bazuje na danych pomiarowych indywidualnych odbiorców ciepła, tj. danych pomiarowych z węzłów ciepłych przyłączonych do warszawskiej sieci ciepłowniczej; stanowi to oryginalne osiągnięcie Autorki rozprawy doktorskiej,
- przeprowadzenie trudnych analiz na wysokim poziomie naukowym,
- umiejętność wdrożenia wyników badań naukowych w sektorze ciepłowniczym,
- poprawnie wybrano przedmiot analiz i metodykę, uzyskano ważne kompleksowe wyniki,
- Autorka wykazał się dużymi umiejętnościami i talentem w prowadzeniu optymalizacji pracy sieci ciepłowniczej.

Reasumując, stwierdzam że oceniona rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane przez obowiązującą ustawę o stopniach i tytułach naukowych. Wobec powyższego wnioskuję, by Wysoka Rada Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej dopuściła mgr inż. Teresę Kurek do dalszego etapu postępowania doktorskiego.

