

Dr hab. inż. Dariusz Gawin, prof. nadzw. PŁ  
Politechnika Łódzka  
Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska  
Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych  
Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź.

Łódź, 9 listopada 2010 roku.

***Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Tomasza Walczaka  
„Wykorzystanie masy termicznej budynku przy sterowaniu jego systemem ogrzewczym”***

**1. Podstawa opracowania recenzji**

Podstawą opracowania recenzji jest Uchwała Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk z dnia 30 września 2010 r. oraz pismo Sekretarza Rady Naukowej Instytutu Pana Doc. dr hab. Kazimierza Piechóra z dnia 5 października 2010 r.

**2. Przedmiot oceny**

Przedmiotem oceny jest rozprawa doktorska opracowana przez Pana mgr inż. Tomasza Walczaka z Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie. Promotorem pracy jest Pani Prof. dr hab. Elżbieta Kossecka z IPPT PAN w Warszawie. Praca liczy 142 strony i zawiera 96 rysunków, 6 tablic oraz 100 pozycji literaturowych zestawionych w porządku alfabetycznym na końcu pracy (z czego 83 angielskojęzycznych).

**3. Ogólna ocena rozprawy, ocena trafności doboru jej tematu i tytułu, sformułowania tezy, jej układu i doboru źródeł**

Recenzowana praca ma charakter teoretyczny. Autor podejmuje w niej niezwykle aktualną i ważną praktycznie problematykę zarządzania energią w budynku, przy czym jego badania, w mojej ocenie, mają charakter nowatorski. W szczególności dotyczą one zastosowania metod sztucznej inteligencji do sterowania systemem ogrzewczym budynku w taki sposób, aby efektywnie wykorzystać jego masę termiczną w celu zmniejszenia kosztów elektrycznego ogrzewania podłogowego obiektu, przy zachowaniu odpowiednich warunków cieplno-wilgotnościowych i dobrej jakości powietrza w jego pomieszczeniach. Podobna tematyka była już podejmowana przez innych badaczy w kraju i zagranicą, ale główny nacisk kładli oni albo na zagadnienia związane z wykorzystaniem masy termicznej budynku, albo na zastosowanie metod sztucznej inteligencji do sterowania jego instalacjami: ogrzewczą, wentylacyjną/klimatyzacyjną i/lub przygotowania ciepłej wody użytkowej; natomiast recenzowana dysertacja łączy w sobie obydwie te elementy. Nieliczne prace, dotyczące oszczędności energii dzięki okresowemu obniżaniu temperatury we wszystkich lub części pomieszczeń budynku, miały najczęściej charakter studium konkretnych przypadków, opartych zwykle na tradycyjnych strategiach regulacji instalacji ogrzewczej, a nie systematycznej analizy zagadnienia, uwzględniającej zastosowanie „inteligentnych” układów sterowania tą instalacją, jak ma to miejsce w przypadku recenzowanej rozprawy doktorskiej.

Na podkreślenie zasługuje fakt, że przeprowadzone analizy energetyczno-ekonomiczne mają bardzo silny związek z praktyką, gdyż bazują one na typowych dla naszego kraju warunkach klimatycznych i charakterystykach konstrukcyjno-materiałowych budynków oraz cenach energii elektrycznej obowiązujących aktualnie w Polsce. Dlatego uważam, że tematyka pracy została dobrana trafnie oraz stanowi ona oryginalny i ciekawy problem badawczy, o co nie jest łatwo w przypadku już nieco „wyeksploatowanej” problematyki oszczędności energii w budynku. Tytuł rozprawy odpowiada jej treści, choć moim zdaniem, można było mocniej w nim podkreślić, że intencją Autora było zbadanie efektywności zastosowania metod sztucznej inteligencji do sterowania systemem ogrzewczym budynku.

Autor we wstępie podaje główne cele rozprawy i formułuje cztery tezy, z których dwie pierwsze są jednak dość oczywiste, więc stwierdzenie ich słuszności nie wymagało w zasadzie przeprowadzenia żadnych dodatkowych analiz. Natomiast dwie ostatnie tezy uważam za dość ciekawe i nietrywialne.

Układ i kompozycję pracy uważam za poprawne i dość logicznie wynikające z jej tematu. Po wprowadzeniu do problematyki zarządzania energią w budynku, szczegółowo omówiono algorytmy działania sztucznych sieci neuronowych w zastosowaniu do krótkoterminowego prognozowania pogody oraz jako „inteligentnego termostatu” sterującego instalacją grzewczą budynku. Następnie opisano uproszczony model matematyczny wymiany ciepła w jednoizbowym budynku i metodę jego numerycznego rozwiązania, które zostały wykorzystane w badaniach symulacyjnych Doktoranta. W piątym, najważniejszym rozdziale pracy przedstawiono i przeanalizowano wyniki eksperymentów numerycznych, dotyczących zużycia energii i kosztów ogrzewania modelowego jednoizbowego budynku, przy trzech jego układach konstrukcyjno-materiałowych, różniących się „masą termiczną” (pojemnością cieplną), przy zastosowaniu sześciu tradycyjnych strategii nadążno-programowalnych sterowania instalacją elektrycznego ogrzewania podłogowego oraz z wykorzystaniem zaproponowanego przez Autora „inteligentnego termostatu”. W podsumowaniu pracy przedstawiono pięć wniosków o charakterze ogólnym oraz trzy zalecenia projektowe dotyczące podłogowej instalacji grzewczej, a także podsumowano efektywność zastosowania metod sztucznej inteligencji do sterowania ogrzewaniem podłogowym oraz wskazano kierunki dalszych badań w tej problematyce.

Literatura wykorzystana w rozprawie jest, moim zdaniem, wystarczająca i została dobrana bardzo trafnie; obejmuje ona sto pozycji, głównie angielskojęzycznych, w tym szereg prac z ostatnich 2-3 lat. Na podkreślenie zasługuje fakt, że zacytowano większość najważniejszych prac dotyczących zastosowania sztucznych sieci neuronowych do sterowania różnego typu instalacjami grzewczymi budynku.

#### **4. Charakterystyka treści rozprawy i jej ocena merytoryczna**

Recenzowana rozprawa doktorska składa się z sześciu rozdziałów oraz spisu literatury, obejmującego 100 pozycji zestawionych w porządku alfabetycznym na końcu pracy (83 z nich napisanych jest w języku angielskim). Sześć z tych prac jest autorstwa Doktoranta, który jest także współautorem kolejnych sześciu publikacji, napisanych wspólnie z Promotorem dysertacji.

W rozdziale pierwszym Autor omawia metody zarządzania energią w budynku, w aspekcie jej oszczędzania i obniżenia kosztów ogrzewania, przy równoczesnym zapewnieniu odpowiednich warunków komfortu cieplnego w pomieszczeniach. W przypadku ogrzewania podłogowego, obniżenie kosztu zużywanej energii elektrycznej można osiągnąć w szczególności przez maksymalne wykorzystanie jej tańszej taryfy, tj. niższej ceny w określonych porach dnia i nocy. Wymaga to stosowania odpowiedniej strategii sterowania instalacją grzewczą, uwzględniającej dynamikę procesów wymiany ciepła w masywnych przegrodach budynku. Wykorzystanie metod sztucznej inteligencji pozwala dodatkowo na ciągle modyfikowanie reakcji wyjściowych systemu, przy zmiennych oddziaływaniach ze strony otoczenia, które mają charakter stochastyczny. Na zakończenie tego rozdziału Doktorant przedstawia tezy i cel swojej pracy oraz krótko omawia jej zawartość.

W rozdziale drugim przedstawiono sieć neuronową, mającą stanowić element systemu sterowania instalacją grzewczą, którego zadaniem jest wypracowanie krótkoterminowej prognozy parametrów pogody, wpływających bezpośrednio na zapotrzebowanie energetyczne budynku. Do treningu sieci neuronowej o wstecznej propagacji błędów wykorzystano dziesięcioletnie godzinne dane pogodowe IMGW dla Warszawy, natomiast do testowania poprawności wyników, w zakresie prognozowania wartości zmiennych pogodowych, wykorzystano dane Typowego Roku Meteorologicznego dla Warszawy. Prognozy obejmowały wartości średniej temperatury powietrza, średniej prędkości wiatru i średniej sumy promieniowania słonecznego za kolejne 6

godzin. Najlepsze rezultaty uzyskano dla temperatury powietrza, nieco gorsze dla prędkości wiatru. Dobrych wyników nie dały próby prognozowania sum promieniowania słonecznego, które ulegają bardzo dużym wahaniom losowym, słabo skorelowanym z wahaniami innych zmiennych pogodowych. Pewnym mankamentem tego rozdziału jest bardzo lakoniczny opis eksperymentów numerycznych Doktoranta, który składa się jedynie z przedstawienia finalnych wyników i architektury najlepszej sieci neuronowej, bez opisu „drogi”, która do nich doprowadziła.

W rozdziale trzecim omówiono kolejny element systemu sterowania instalacją grzewczą budynku, którym jest samoucząca się sieć neuronowa, tzw. agent uczący się ze wzmocnieniem. Jego zadaniem ma być podejmowanie decyzji o włączeniu lub wyłączeniu systemu grzewczego, na podstawie aktualnych warunków pogodowych, temperatury wewnętrznej oraz krótkoterminowej prognozy pogody „podawanej” przez klasyczną sieć neuronową. Jest to realizacja tzw. uczenia się ze wzmocnieniem. Poprzez połączenie tej sieci z klasyczną siecią neuronową, omówioną w poprzednim rozdziale, zbudowano system, nazywany przez Doktoranta „inteligentnym termostatem”, który automatycznie dostosowuje się do zmian środowiska wewnątrz i na zewnątrz budynku oraz do zmiennego w ciągu doby kosztu zakupu energii elektrycznej. Szczegółowo omówiono algorytm działania sieci neuronowych typu „agent uczący się ze wzmocnieniem”, jej architekturę oraz zasady konstruowania systemu. Na podkreślenie zasługuje fakt bardzo trafnego i ciekawego podsumowania literatury, dotyczącej tych dość złożonych zagadnień.

W rozdziale czwartym Autor omówił, opracowany przez siebie, symulator procesów wymiany ciepła dla prostego, jednoizbowego modelu budynku z ogrzewaniem podłogowym, który odwzorowuje jego dynamiczne własności cieplne. Niestacjonarny przepływ ciepła przez masywne elementy budynku jest modelowany w uproszczony sposób, przy zastosowaniu schematu Cranka-Nicolsona metody różnic skończonych, który zapewnia stabilność rozwiązania numerycznego. Przyjęto własności termiczne ścian i okien oraz parametry systemu wentylacyjnego, z odzyskiem ciepła, jak dla budynku energooszczędnego. Rozpatrzono trzy typy konstrukcji, określanych jako „ciężka”, „średnio-ciężka” i „lekka”, różniących się rozwiązaniami materiałowymi ścian i sufitu. Na podkreślenie zasługuje fakt samodzielnego opracowania przez Doktoranta programu komputerowego, który wykonuje obliczenia zgodnie z opracowanym przez Niego algorytmem. Brak jest jednak informacji, czy poprawność działania tego programu została zweryfikowana przez porównanie z wynikami uzyskanymi za pomocą jakiegoś innego oprogramowania, służącego do tego celu, jak np. TRNSYS, Energy Plus czy ESP-r. Bardzo proszę Doktoranta o przedstawienie takich danych podczas publicznej obrony jego pracy.

W piątym, najważniejszym rozdziale dysertacji, przeprowadzono eksperymenty numeryczne, mające na celu weryfikację opracowanego modelu matematycznego wymiany ciepła w budynku i możliwości systemu sterowania jego instalacją grzewczą. Wykonano szereg obliczeń testowych, których celem było wskazanie optymalnych wartości parametrów wprowadzanych do stosowanych algorytmów, przetestowanie modelu dla różnych horyzontów czasowych prognozowania parametrów pogody oraz wskazanie najlepszego obszaru zastosowań opracowanego systemu sterowania. Symulacje wykonano przy wykorzystaniu godzinnych danych pogodowych Typowego Roku Meteorologicznego dla Warszawy. Ceny energii elektrycznej przyjęto według cennika firmy PGE z początku roku 2010.

W pierwszym etapie swoich badań Doktorant poszukiwał obszaru, w którym zastosowanie metod sztucznej inteligencji może przyczynić się do obniżenia kosztów ogrzewania. W tym celu przeanalizował wyniki otrzymane przy zastosowaniu prostych strategii nadażno-programalnych sterowania elektrycznym ogrzewaniem podłogowym. Rozpatrzył On sześć takich strategii, różniących się zadanym dobowym przebiegiem temperatury w pomieszczeniu. Strategie te zostały wybrane w taki sposób, że ich efektem było wymuszanie włączania ogrzewania w okresie obowiązywania tańszej taryfy opłat za energię elektryczną i obniżanie tempera-

tury w nocy. Wyniki symulacji zaprezentowano w postaci zbiorczych tabel i wykresów. W tabelach zestawiono ilości energii zużywanej w okresach tańszej i droższej taryfy podczas sezonu grzewczego, ich całkowite koszty, średnie temperatury panujące w pomieszczeniu w ciągu dnia i nocy oraz średnie odchylenia od temperatury zadanej. Na wykresach, obejmujących dwa kolejne, wybrane dni sezonu grzewczego, które reprezentowały „stabilną pogodę środka zimy” i „zmienną pogodę jesieni”, pokazano równoczesne przebiegi temperatury otoczenia, natężenia promieniowania słonecznego, temperatury w różnych punktach podłogi grzewczej oraz działania systemu ogrzewania (włączony/wyłączony). Wykonano też histogramy odchylenia temperatury od przebiegów zadanych dla poszczególnych strategii ogrzewania. Otrzymane wyniki zostały szczegółowo przeanalizowane. Przeprowadzone symulacje prowadzą do wniosku, że sterowanie ogrzewaniem, wymuszające wykorzystanie tańszej taryfy energii elektrycznej, pozwala na dość znaczne obniżenie całkowitego kosztu tej energii, przy stosunkowo nieznacznym wzroście jej zużycia. Dodatkowo Pan mgr inż. Walczak wykonał serie symulacji, których celem było zbadanie wpływu grubości warstwy wylewki betonowej w podłodze, pokrywającej elektryczną instalację ogrzewczą, oraz mocy tej instalacji na koszt ogrzewania. Wskazują one, że wykorzystanie tańszej taryfy energii elektrycznej wymaga instalowania mocy większej niż to wynika z zaleceń normowych. Zastosowanie zbyt grubej wylewki przyczynia się zaś do wzrostu średniej temperatury w budynku i wzrostu kosztu ogrzewania.

W końcowej części rozdziału piątego przeprowadzono eksperymenty numeryczne z użyciem tzw. „inteligentnego termostatu” (tj. wykorzystującego metody sztucznej inteligencji), dla tych samych typów konstrukcji budynku oraz serii grubości betonowej wylewki i mocy instalacji. Proces uczenia systemu obejmował 250 rocznych cykli, przy wykorzystaniu danych pogodowych Typowego Roku Meteorologicznego dla Warszawy. Przy konstruowaniu systemu uczącego się „inteligentnego sterownika” określano przestrzeń stanów, akcje oraz wzmocnienie, tzn. algorytmy kar i ich wagi. Kary odnosiły się do zużycia energii oraz odstępstw od założonej temperatury komfortu. Otrzymane wyniki symulacji wskazują, że przy zastosowaniu najlepszych z tradycyjnych strategii nadażno-programowanych, analizowanych w początkowej części rozdziału, wykorzystane zostały w znacznym stopniu możliwości obniżenia kosztu zużywanej energii poprzez wymuszanie włączania ogrzewania w okresie tańszej taryfy. Zastosowanie „inteligentnego sterownika” stwarzało pewne dodatkowe możliwości oszczędzania energii i ograniczania jej kosztu, dzięki wykorzystaniu masy termicznej i związanej z nią bezwładności cieplnej masywnej podłogi grzewczej, poprzez włączanie i wyłączanie ogrzewania w innym czasie niż robi to układ nadażny, z reguły wcześniej. Istotną kilkuprocentową poprawę wyników, w stosunku do tradycyjnego sterowania nadażnego, uzyskano jedynie w przypadku lekkiej konstrukcji budynku. W początkowym okresie uczenia koszt energii w kolejnych latach był stosunkowo wysoki i podlegał znacznym losowym wahaniom, ale stopniowo zmniejszał się i w wyraźny sposób stabilizował. Autor nie podjął próby wyjaśnienia, dlaczego podobnego zmniejszenia kosztów ogrzewania nie uzyskano dla budynków o „ciężkiej” i „średnio-ciężkiej” konstrukcji. Proszę, aby problem ten został przedyskutowany przez Niego podczas publicznej obrony pracy. Komentarz do wyników symulacji, przedstawionych na Rysunkach 5.48 – 5.53, ograniczający się do jednego krótkiego zdania do każdego rysunku, uważam za przesadnie lakoniczny.

W rozdziale szóstym Doktorant podsumował główne wnioski ze swoich badań oraz przedstawił zalecenia projektowe, wskazujące na optymalne wartości grubości betonowej wylewki i stosunku mocy ogrzewania do mocy minimalnej, zapewniającej komfort cieplny przy temperaturze otoczenia  $-20^{\circ}\text{C}$ . Niestety, Autor nie wskazał jednoznacznie, czy tezy postawione przez Niego na początku pracy uważa on za prawdziwe, choć przedstawione wcześniej wnioski potwierdzają to jednoznacznie.

Powyższa uwaga krytyczna nie wpływa na moją, ogólnie bardzo pozytywną, ocenę pracy doktorskiej mgr inż. Tomasza Walczaka.

## 5. Uwagi szczegółowe

W niniejszej części recenzji zawarłem szereg uwag o bardziej szczegółowym charakterze, głównie zauważone przeze mnie nieścisłości i drobniejsze błędy merytoryczne.

Na stronie 63<sup>7</sup> popełniono błąd w oznaczeniu jednostki współczynnika strat ciepła – powinno być „W/K”, a nie „W/k”. Na stronie 64<sup>2</sup> dwukrotnie podano jednostkę krotności wymian powietrza – opisując ją pełnymi słowami, a następnie w skrócie. Autor stosuje też pewne określenia, które nie są poprawne w języku polskim, np. na stronie 65<sup>7</sup> pisze o "rocznych kosztach ogrzewania na poszczególnych taryfach”, zaś na stronie 83<sup>3</sup> „...ogrzewanie działa cały czas, „zaczając” również o tańszą taryfę...”. Na stronie 69<sup>4</sup> pisze, że „całkowite zużycie energii wyniosło 674,6 zł” – chodziło zapewne o koszt ogrzewania.

Rozprawa jest na ogół starannie zredagowana i napisana dobrą polszczyzną, choć w kilku miejscach autor nie ustrzegł się drobnych błędów stylistycznych, interpunkcyjnych i gramatycznych (zaznaczonych przez mnie w przesłanym mi egzemplarzu pracy). Nie podał on także w kilku miejscach odnośników do stosownych pozycji literatury (np. na str. 41<sub>15</sub>, 61<sup>2</sup>) wstawiając w nawiasach kwadratowych znak zapytania. Doktorant nie ustrzegł się też szeregu błędów literowych (zaznaczonych przeze mnie w tekście rozprawy), nieprecyzyjności i usterek językowych, z których część opisałem powyżej. Przed ewentualną publikacją pracy w języku polskim sugeruję usunięcie wspomnianych usterek językowych i stylistycznych.

## 6. Podsumowanie i wniosek końcowy

Doktorant sformułował i rozwiązał numerycznie równania uproszczonego modelu matematycznego wymiany ciepła w jednoizbowym budynku z ogrzewaniem podłogowym. Z powodzeniem zastosował sieć neuronową ze wsteczną propagacją błędów, o dobranej przez Niego architekturze, do krótkoterminowej predykcji parametrów pogody wpływających bezpośrednio na zapotrzebowanie energetyczne budynku. Zaproponował oryginalne zastosowanie sieci neuronowej typu „agent uczący się ze wzmocnieniem”, jako inteligentnego sterownika systemu elektrycznego ogrzewania podłogowego, który autonomicznie podejmuje decyzje o włączeniu lub wyłączeniu systemu grzewczego, na podstawie aktualnych, zmiennych w czasie warunków pogodowych, temperatury wewnętrznej oraz krótkoterminowej prognozy pogody podawanej przez połączoną z nim sieć neuronową, w taki sposób, aby minimalizować koszty ogrzewania. Wykonał symulacje numeryczne pracy tego sterownika w budynkach o różnych rozwiązaniach konstrukcyjno-materiałowych, uzyskując dodatkowe obniżenie kosztów ogrzewania, przy nieznacznym wzroście zużycia energii i zapewnienia warunków komfortu cieplnego w pomieszczeniach budynku.

Mgr inż. Walczak wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną z zakresu podstaw teoretycznych wymiany ciepła, zagadnień oszczędności energii w budynku, fizyki budowli, sztucznych sieci neuronowych i metod numerycznych. Moim zdaniem, jego rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie interdyscyplinarnego problemu naukowego, a także wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia przez Niego pracy naukowej.

W związku z tym stwierdzam, że moim zdaniem rozprawa doktorska Pana mgr inż. Tomasz Walczaka spełnia wymagania „ustawy z dnia 14 marca 2003 r o stopniach naukowych i tytułach naukowych oraz o stopniach i tytułach w zakresie sztuki” oraz wnioskuje o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.