



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

DZIEDZINA: NAUKI INŻYNIERYJNO-TECHNICZNE

DYSCYPLINA AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA
I TECHNOLOGIE KOSMICZNE

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

*Standaryzacja i optymalizacja zarządzania zespołem
rozproszonych heterogenicznych nieruchomości
komercyjnych*

Autor: mgr inż. Kazimierz Kawa

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Edyta Kucharska, prof. AGH

Promotor pomocniczy: dr inż. Waldemar Bauer

Praca wykonana: Akademia Górniczo - Hutnicza im. Stanisława Staszica
w Krakowie,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej

Kraków 2025

Praca doktorska została zrealizowana w ramach **doktoratu wdrożeniowego**, we współpracy z TAURON Dystrybucja S.A., która zarządza portfelem blisko 200 zespołów nieruchomości komercyjnych. Wyniki badań zostały zastosowane w praktyce w ramach pilotażowego wdrożenia rozwiązań predykcyjnych i wspomagania decyzji w jednej z wybranych lokalizacji firmy.

1. Cel i zakres pracy

Celem niniejszej rozprawy doktorskiej była analiza możliwości zastosowania nowoczesnych metod predykcyjnych oraz systemów wspomagania decyzji (SWD) w zarządzaniu zespołami rozproszonych, heterogenicznych nieruchomości komercyjnych. Praca koncentruje się na opracowaniu narzędzi umożliwiających optymalizację kosztów eksploatacyjnych, prognozowanie zużycia mediów oraz przewidywanie ryzyka awarii systemów technicznych – w szczególności systemów HVAC i zabezpieczeń – w budynkach różniących się przeznaczeniem, konstrukcją i stopniem zaawansowania technologicznego.

Zakres pracy obejmował:

- przegląd literatury w zakresie systemów wspomagania decyzji oraz konserwacji predykcyjnej,
- analizę specyfiki zarządzania nieruchomościami komercyjnymi o niejednorodnej infrastrukturze,
- opracowanie metodologii doboru danych niezbędnych do predykcji zużycia energii, wody i awarii urządzeń,
- opracowanie i implementację modeli predykcyjnych z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego,
- przygotowanie i przetestowanie narzędzia informatycznego wspierającego proces zarządzania nieruchomościami,
- wdrożenie rozwiązania pilotażowego i ocenę jego skuteczności operacyjnej.

Praca ma charakter aplikacyjny, ukierunkowany na rozwiązywanie realnych problemów eksploatacyjnych i zarządczych w dużych organizacjach utrzymujących portfele nieruchomości.

2. Stan wiedzy i uzasadnienie podjęcia tematu badawczego

W dobie cyfryzacji i rosnących wymagań w zakresie efektywności energetycznej oraz kosztowej, zarządzanie nieruchomościami komercyjnymi staje się coraz bardziej złożonym wyzwaniem. Szczególnym problemem pozostaje utrzymanie zespołów nieruchomości o zróżnicowanej infrastrukturze technicznej, rozmieszczonych geograficznie, nierzadko różniących się funkcją, wiekiem, standardem wyposażenia czy poziomem integracji systemów automatyki budynkowej.

Literatura naukowa dostarcza szerokiego spektrum badań nad predykcją zużycia energii, prognozowaniem awarii czy optymalizacją utrzymania infrastruktury technicznej. Jednak większość z nich koncentruje się na budynkach homogenicznych – nowoczesnych, jednolitych pod względem technologii i funkcji. Znacznie mniej uwagi poświęcono środowiskom heterogenicznym, w których zastosowanie zestandaryzowanych rozwiązań analitycznych i decyzyjnych napotyka istotne bariery.

Zarządzanie heterogenicznymi zespołami nieruchomości wymaga narzędzi zdolnych do:

- przetwarzania różnorodnych danych pochodzących z systemów automatyki, zabezpieczeń technicznych, liczników mediów czy środowisk telemetrycznych,
- adaptacji modeli predykcyjnych do warunków lokalnych (np. mikroklimatu czy konstrukcji budynku),
- wspierania administratorów w czasie rzeczywistym w podejmowaniu decyzji eksploatacyjnych i inwestycyjnych,
- integracji z istniejącą infrastrukturą techniczną i informatyczną.

Brakuje również kompleksowych badań dotyczących możliwości ograniczenia liczby zbieranych danych bez utraty dokładności predykcji, co jest istotne z punktu widzenia kosztów wdrożeń i interoperacyjności systemów w starszych budynkach.

Tematyka niniejszej rozprawy doktorskiej bezpośrednio odpowiada na te wyzwania, wpisując się w potrzeby przemysłu, reprezentowanego w tym przypadku przez TAURON Dystrybucja S.A., operatora zarządzającego rozproszonym portfelem nieruchomości. Przedsiębiorstwo to, pomimo wdrożonych struktur administracyjnych, poszukiwało rozwiązań umożliwiających dalszą automatyzację procesów zarządczych i optymalizację kosztów eksploatacji budynków.

Podjęcie badań w tym zakresie znajduje również pełne uzasadnienie w świetle polityk publicznych, takich jak Europejski Zielony Ład czy dyrektywy dotyczące efektywności energetycznej budynków (EPBD), które promują digitalizację, optymalizację zużycia energii i rozwój inteligentnych systemów zarządzania w infrastrukturze budowlanej.

3. Opis zastosowanych metod badawczych

Realizacja celów rozprawy wymagała zastosowania interdyscyplinarnego podejścia badawczego, łączącego metody inżynierii systemów, automatyki budynkowej, analizy danych oraz uczenia maszynowego. Poniżej opisano główne obszary metodologiczne wykorzystane w pracy.

3.1. Analiza systemów zarządzania nieruchomościami

Na etapie wstępnym dokonano przeglądu i klasyfikacji istniejących systemów wspomagania decyzji (SWD), ze szczególnym uwzględnieniem ich komponentów, funkcjonalności i możliwości integracyjnych z systemami klasy BMS oraz platformami do zarządzania energią i konserwacją.

3.2. Eksploracja danych i przygotowanie zbiorów do modelowania

Dane wykorzystywane w badaniach pochodziły z wybranych nieruchomości zarządzanych przez TAURON Dystrybucja S.A. i obejmowały m.in. odczyty z liczników mediów (energia elektryczna, woda), dane środowiskowe, parametry pracy urządzeń HVAC, zapisy zdarzeń z systemów zabezpieczeń technicznych oraz dane pogodowe. Wykonana została wstępna analiza danych wejściowych i ich obróbka niezbędna do wykonania badań.

3.3. Budowa modeli predykcyjnych

W ramach części eksperymentalnej opracowano i porównano skuteczność wybranych algorytmów predykcyjnych dla wybranych nieheterogenicznych nieruchomości TAURON Dystrybucja S.A. Modele oceniano pod względem dokładności predykcji, stabilności oraz łatwości integracji z systemami zarządczymi.

Ustalono modele właściwe do użycia:

- **ARIMA** – w zakresie dla prognozowania szeregów czasowych, m.in. temperatury i zużycia energii,
- **Gradient Boosting Machines (GBM)** – w zakresie predykcji uszkodzeń,
- **Regresja liniowa** – do przyrostowego prognozowania zużycia wody,
- **Random Forest (RF)** – w zakresie prognozowania temperatury zewnętrznej.

3.4. Walidacja rozwiązań w środowisku przemysłowym

Badania przeprowadzono na rzeczywistych danych z nieruchomości o różnym stopniu złożoności infrastruktury. Weryfikowano:

- skuteczność modeli w kontekście różnych typów budynków,
- skalowalność rozwiązania,
- łatwość wdrożenia w organizacji,
- potencjał oszczędności kosztowych.

3.5. Projektowanie narzędzia wspomagającego decyzje

Na potrzeby badań opracowano narzędzie informatyczne wspierające proces analizy i predykcji. Narzędzie to:

- umożliwia gromadzenie danych z różnych źródeł,
- integruje wyniki modeli predykcyjnych,
- pozwala na dynamiczne wizualizacje (dashboards),
- dostarcza administratorom rekomendacji opartych na analizie danych.

Zadbano o modularność rozwiązania oraz możliwość jego rozbudowy w kolejnych lokalizacjach.

3.6. Badanie możliwości uzyskania oszczędności kosztów zużyciem narzędzia do telesterowania węzłami cieplnymi

Na potrzeby badania w zakresie określenia możliwości uzyskania oszczędności w zużyciu energii cieplnej poprzez telesterowanie węzłami cieplnymi - wykorzystano gotowe rozwiązanie sterujące. Poprzez audyt potrzeb użytkowników budynków, wykorzystanie narzędzia sterującego opracowano sposób sterowania węzłami cieplnymi przynoszący oszczędności w zużyciu energii cieplnej.

4. Opis prowadzonych badań i uzyskanych wyników

4.1. Charakterystyka środowiska badawczego

Badania przeprowadzono na wybranym zestawie nieruchomości komercyjnych zarządzanych przez TAURON Dystrybucja S.A. Były to obiekty:

- o zróżnicowanym przeznaczeniu (biura, magazyny, infrastruktura techniczna),
- zlokalizowane w różnych regionach południowej Polski,
- różniące się wiekiem, konstrukcją i zastosowanymi technologiami.

W badaniach uwzględniono obiekty wyposażone w systemy automatyki budynkowej (w różnym stopniu), liczniki energii, systemy zabezpieczeń technicznych oraz urządzenia HVAC.

4.2. Wyniki w zakresie predykcji zużycia energii elektrycznej

W oparciu o dane z liczników energii elektrycznej zbudowano modele predykcyjne zużycia energii. Najlepsze wyniki osiągnął algorytm **Arima** z parametrami ($p=5$, $d=1$, $q=3$), którego dokładność (RMSE) była na poziomie 0,11, MSE wynosiło 0,01224, a MAE 0,09804.

Wysoka dokładność modelu, widoczna poprzez niskie wartości MSE i RMSE, pozwala na efektywne przewidywanie przyszłych wartości zużycia energii, co ma istotne znaczenie dla zarządzania zasobami energetycznymi. Jednocześnie, umiarkowana wartość MAE potwierdza praktyczną użyteczność modelu w realistycznych scenariuszach operacyjnych.

4.3. Wyniki w zakresie predykcji zużycia wody

Zbudowano model regresyjny dla danych o zużyciu wody, z którego wynikało, że przewidywanie tego parametru jest możliwe, jednak wymaga uwzględnienia wielu dodatkowych czynników eksploatacyjnych (np. harmonogramów pracy, liczby użytkowników). Uzyskano R^2 na poziomie 0,98 oraz MAE na poziomie 814, co stanowiło dobry punkt wyjścia dla dalszych dostosowań w celu optymalizacji prognoz.

4.4. Wyniki w zakresie predykcji uszkodzeń

W badaniach wykorzystano dane z systemów zabezpieczeń technicznych. Model predykcji został oparty na Random Forest, którego dokładność (RMSE) była poniżej 11, a R^2 wynosiło powyżej 0,82. Wynik R^2 wskazuje na to, że model skutecznie wyjaśnia znaczącą część wariacji danych, co świadczy o jego dobrej zdolności predykcyjnej.

4.5. Wyniki sterowania węzłami cieplnymi

W wyniku wdrożenia uzyskano następujące wnioski:

- ograniczenie zużycia energii cieplnej na zespołach budynków w zakresie od 12 -50% ,
- zmniejszenie mocy przyłączeniowych,
- potwierdzono poprzez analizę zużycia energii w różnych latach możliwości utrzymania ww. wyników przy zachowaniu właściwego komfortu cieplnego użytkowników.

4.6. Integracja wyników z systemem sterowania

Modele predykcyjne zostały zintegrowane z aplikacją, która umożliwia:

- wizualizację przewidywanych wartości w dashboard,
- generowanie alertów o ryzyku awarii,
- symulację kosztów eksploatacyjnych przy różnych scenariuszach działania systemu.

Integracja sterowania węzłami cieplnymi nie została zrealizowana, lecz jest możliwa do realizacji.

4.7. Efekty praktyczne wdrożenia

W wyniku wdrożenia prototypu w wybranej nieruchomości osiągnięto:

- spadek zużycia energii o w porównaniu z analogicznym okresem roku poprzedniego (w zakresie doświadczeń dotyczących węzłów cieplnych),
- możliwość skrócenia czasu reakcji na usterki techniczne,
- identyfikację obszarów możliwej redukcji kosztów eksploatacyjnych,
- poprawę jakości danych wykorzystywanych do decyzji administracyjnych.

5. Opis zastosowania wyników w praktyce

5.1. Zakres wdrożenia

Wdrożenie wyników badań obejmowało:

- instalację zestandaryzowanego modułu zbierającego dane z systemów HVAC, liczników energii i czujników środowiskowych (predykcja),
- integrację tych danych z narzędziem analityczno-predykcyjnym zbudowanym w ramach pracy (predykcja),
- wdrożenie narzędzia do sterowania węzłami cieplnymi oraz przeszkolenie administratorów w zakresie korzystania z narzędzia
- ocenę skuteczności narzędzi w warunkach rzeczywistych.

5.2. Efekty organizacyjne i operacyjne

Wdrożenie rozwiązania pozwoliło na:

- **centralizację danych eksploatacyjnych**, wcześniej rozproszonych w różnych systemach i lokalizacjach,
- **uproszczenie podejmowania decyzji zarządczych** dzięki dostępności modeli predykcyjnych i czytelnych dashboardów,
- **identyfikację nadmiarowych parametrów**, których rejestrowanie nie przekłada się na wzrost dokładności predykcji – co umożliwia optymalizację zakresu pomiarowego w przyszłych inwestycjach,
- **budowę uniwersalnego szablonu narzędzia**, który może być replikowany w kolejnych nieruchomościach.

5.3. Możliwość skalowania i dalszego rozwoju

Zaproponowane rozwiązanie cechuje się:

- **modularnością** – możliwość dostosowania do obiektów o różnym przeznaczeniu i poziomie zaawansowania technicznego,
- **otwartą architekturą** – możliwe opracowanie integracji z systemami BMS, ERP i innymi rozwiązaniami wspierającymi zarządzanie nieruchomościami,
- **możliwością dalszej automatyzacji** – poprzez dodanie elementów sztucznej inteligencji, prognoz finansowych czy dynamicznej optymalizacji zużycia mediów w czasie rzeczywistym.

6. Wnioski z pracy i oryginalny wkład autora

6.1. Wnioski z przeprowadzonych badań

1. **Zastosowanie metod predykcyjnych w zarządzaniu nieruchomościami komercyjnymi jest technicznie możliwe, ekonomicznie uzasadnione i operacyjnie skuteczne** – także w warunkach rozproszonych i heterogenicznych zasobów budynkowych.
2. **Predykcja zużycia energii, wody oraz ryzyka awarii systemów technicznych może być realizowana z wysoką dokładnością**, nawet w sytuacji ograniczonej liczby parametrów wejściowych, co otwiera drogę do efektywnego zarządzania danymi.
3. **Systemy wspomagania decyzji mogą integrować dane z wielu źródeł (BMS, liczniki, logi usterek, dane pogodowe) i przekładać je na realne działania zarządcze** – w tym zmiany ustawień, alarmy predykcyjne i analizy kosztowe.
4. **Integracja narzędzi predykcyjnych z telesterowaniem** umożliwia dynamiczną, zautomatyzowaną reakcję na zmieniające się warunki środowiskowe i eksploatacyjne – co zwiększa efektywność energetyczną i niezawodność systemów.
5. **Opracowane narzędzie może być z powodzeniem wdrażane w innych organizacjach** zarządzających zespołami nieruchomości, stanowiąc przykład skalowalnego rozwiązania dla branży zarządzania technicznego.

6.2. Oryginalny wkład autora

Autorski wkład mgr inż. Kazimierza Kawy w rozwój wiedzy naukowej i praktyki inżynierskiej obejmuje:

- **opracowanie metodyki selekcji danych predykcyjnych**, uwzględniającej ograniczenia systemów automatyki i różnorodność techniczną nieruchomości,
- **implementację i porównanie zaawansowanych modeli predykcyjnych**, z uwzględnieniem ich integracji z systemami BMS i DSS w warunkach przemysłowych,
- **zaprojektowanie i wykonanie narzędzia wspomagającego decyzje**, gotowego do zastosowania w przedsiębiorstwie energetycznym,
- **walidacja narzędzia w rzeczywistym środowisku organizacyjnym**, obejmującą nie tylko aspekty techniczne, ale również efekty organizacyjne i ekonomiczne,
- **przygotowanie standardu architektury wdrożeniowej**, umożliwiającej przeniesienie rozwiązania na inne obiekty i organizacje.

Praca łączy podejście naukowe z rozwiązaniem konkretnego problemu przemysłowego, wnosząc nową wartość zarówno do literatury przedmiotu, jak i praktyki zarządzania nieruchomościami komercyjnymi w erze cyfryzacji i automatyzacji.