

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. **Bartłomiej Ziętka** pt.

Metody analizy danych z systemów o architekturze internetu rzeczy i przetwarzania w chmurze na potrzeby monitorowania procesów technologicznych pozyskiwania rudy miedzi

Promotor:
prof. dr hab. inż. **Radosław Zimroz**
Promotor pomocniczy:
dr hab. inż. **Jacek Wodecki**

1. Wstęp

Recenzję rozprawy doktorskiej pod wyżej wymienionym tytułem opracowano na podstawie zlecenia prof. dr hab. inż. Roberta Króla, przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, Politechniki Wrocławskiej z dn. 26.06.2025.

Rozprawa została napisana w języku angielskim ze streszczeniem w języku polskim. Praca liczy 190 stron numerowanych, składa się z 9 rozdziałów i zawiera wykaz bibliograficzny liczący 247 pozycji. Zawiera też wykaz rysunków, tabel i zastosowanych skrótów.

Celem rozprawy było opracowanie metod analizy danych na potrzeby monitorowania procesów przemysłowych. Doktorant zidentyfikował sześć obszarów, w których opisał metody pomiaru danych (często zrealizowane przez niego samego), a następnie zaproponował metody ich analizy. Uzyskane dane pomiarowe oraz wyniki analiz są następnie przekazywane do chmury obliczeniowej. Zasadniczym obszarem zastosowania opracowanego rozwiązania jest przemysł wydobywczy, a szczególnie górnictwo rud miedzi.

Praca została przeze mnie rozpatrywana jako osiągnięcie w dyscyplinie naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka.

2. Treść rozprawy

Rozprawa składa się z 9 rozdziałów oraz bibliografii, liczącej 247 pozycji. Praca zawiera też wykaz rysunków, tabel i zastosowanych skrótów.

Rozdział 1 jest krótkim wprowadzeniem w tematykę procesów technologicznych w górnictwie. Poza samymi procesami, Doktorant opisał dotychczasowe osiągnięcia we wprowadzaniu systemów monitorowania maszyn górniczych. W końcowej części rozdziału skrótowo przedstawiono zawartość poszczególnych rozdziałów pracy.

Rozdział 2 wymieniono procesy technologiczne, które zostały wybrane jako przedmiot badań Doktoranta. Są to kolejno: wiercenie, kotwienie, monitorowanie i analiza maszyn elektrycznych, pomiar stężenia gazów, roboty inspekcyjne i cyberbezpieczeństwo. Metody analizy danych dotyczące poszczególnych procesów są następnie omawiane i analizowane w zaproponowanej kolejności w dalszych rozdziałach pracy. Po tej części Autor sformułował problem badawczy oraz cel pracy. Pierwszy cel pracy określa jej zasadniczą wartość. Jest on natury ogólnej i przedstawia – warto zaznaczyć – poprawnie, korzyści z wdrażania metod IoT. Podobnie oceniam cele trzeci i czwarty. Natomiast drugi cel pracy nie jest hipotezą, tylko zdaniem oznajmującym, jakie zadanie wykonał Doktorant. Trudno go więc traktować jako cel pracy.

Rozdział 3 prezentuje obecny stan wiedzy w obszarze wybranych procesów technologicznych. Autor obszernie cytuje i omawia zasadnicze tezy ponad 100 publikacji naukowych. Świadczy to o jego dużym wkładzie pracy i dobrej orientacji w opisywanej dziedzinie.

Rozdział 4 rozpoczyna zasadniczą część rozprawy doktorskiej. Rozpoczyna się on od opisu maszyn, które realizują procesy technologiczne wybrane w rozdziale 2. Są to więc: wozy wierzące i kotwiące, systemy zasilania, zagrożenia z powodu siarkowodoru i tlenu węgla, roboty inspekcyjne oraz infrastruktura sieciowa i związane z nią zagrożenia z zakresu cyberbezpieczeństwa. Poszczególne tematy są prezentowane łącznie z ilustracjami, schematami oraz z parametrami technicznymi. Doktorant przytacza również liczne źródła literaturowe.

Rozdział 5 przedstawia przeprowadzone pomiary. Obejmuje więc opracowane bądź zastosowane przez mgr Ziętka metody pomiarowe, ale również przygotowane plany pomiarowe. Przedstawione są dalsze opisy procesów technologicznych, łącznie z ich ograniczeniami i wymaganiami (np. wymiary korytarzy i parametry wozów kotwiących). Przedstawiono sposób montażu układów pomiarowych i omówiono uzyskiwane dane. Istotną częścią rozdziału jest rozdział 5.3, w którym Doktorant przedstawia systemy pomiarowe, z których kilka opracował samodzielnie. Opisuje ich strukturę, parametry techniczne i algorytmy działania. Warto podkreślić, że jest to również istotna część dorobku Doktoranta, a pomiary często miały charakter pionierski.

Rozdział 6 jest zasadniczą częścią pracy i przedstawia opracowane przez Autora metody przetwarzania danych. Metody znacznie się różnią w zależności od obszaru zastosowania. Z uwagi na to, że są to dane z obiektów rzeczywistych, zawierają one dużo szumów oraz obserwacji odstających (ang. outliers), jak również zawierają dane rejestrowane podczas trybów pracy, które nie są przedmiotem badań, jak np. postojów albo pomocniczych operacji technologicznych. Konieczne było więc również opracowanie metod preprocessingu danych.

Rozdział 7 jest najobszerniejszą częścią rozprawy i przedstawia uzyskane wyniki. Zamieszczono w nim liczne wykresy, które ilustrują uzyskane wyniki. Są to zarówno surowe dane pomiarowe w postaci przebiegów czasowych, jak wyniki przetwarzania. Doktorant przedstawił również wyniki działania zautomatyzowanych procedur klasyfikacji danych, które określają stan pracy monitorowanej maszyny.

Rozdział 8 jest próbą odpowiedzi na pytanie, jak opracowane metody mogą być zaimplementowane i wdrożone w środowisku chmurowym. Architektura obejmuje poszczególne poziomy, tj. czujniki, koncentratory (ang. edge), infrastrukturę chmury oraz aspekty cyberbezpieczeństwa. Mimo, że temat rozdziału nie wynika bezpośrednio z tytułu pracy, jest on z nim mocno powiązany i stanowi logiczny krok w procesie wdrażania metod analizy danych do praktyki zakładu przemysłowego. Konieczne jest zapewnienie skalowalności systemu, jak również jego spójność z wymaganiami i normami systemów

informatycznych zakładu. W mojej opinii, Autor wykazał się dobrą znajomością omawianej dziedziny.

Rozdział 9 jest krótki i podsumowuje wykonane zadania. Następnie Doktorant proponuje zakres dalszych prac badawczych i wdrożeniowych. Te drugie mają się koncentrować na podniesieniu poziomu gotowości technologicznej. Jest to propozycja logiczna z punktu widzenia przedsiębiorstwa, które dąży do uzyskania zwrotu z inwestycji w prace badawcze i wdrożeniowe.

Rozprawę uzupełnia spis literatury oraz streszczenia w językach angielskim i polskim..

3. Analiza krytyczna

3.1. Aktualność tematu rozprawy

Zasadniczym tematem rozprawy jest „opracowanie metod analizy danych z systemów o architekturze internetu rzeczy i przetwarzania chmurowego na potrzeby monitorowania procesów technologicznych pozyskiwania rud miedzi”. Rozprawa traktuje również o zagadnieniach prototypowania układów pomiarowych na potrzeby wykorzystania w środowisku górnictwa.

Górnictwo jest obszarem nieodłącznym od rozwoju cywilizacji technicznej i musi być nieustannie rozwijane. W szczególności górnictwo rud miedzi ma kluczowe znaczenie dla gospodarki ze względu na wszechstronne zastosowanie tego metalu. Miedź jest niezbędnym surowcem w przemyśle energetycznym, elektronicznym, budownictwie oraz motoryzacji. W miarę globalnej transformacji energetycznej i rozwoju technologii, popyt na miedź stale rośnie, gdyż jest ona kluczowym komponentem w produkcji paneli fotowoltaicznych, turbin wiatrowych, samochodów elektrycznych oraz infrastruktury ładowania. Ponadto, z rudy miedzi odzyskiwane są również inne cenne metale, takie jak srebro, złoto, czy ren, co dodatkowo zwiększa wartość wydobycia.

Doktorant słusznie wskazał na trend rosnącej automatyzacji procesów technologicznych. Technologie IoT i chmury obliczeniowej mogą w dużym stopniu wspomóc działalność przemysłu wydobywczego. Korzyściami są przede wszystkim zwiększona niezawodność (a więc dyspozycyjność) oraz lepsze bezpieczeństwo pracy. Przekładają się one na zmniejszenie kosztów operacyjnych i lepsze wyniki ekonomiczne zakładów przemysłowych.

Autor przeprowadził szeroką analizę literatury światowej w badanej dziedzinie. Znaczną część cytowanych przez Niego prac stanowią prace prowadzone przez inne ośrodki, publikowane w literaturze o zasięgu światowym. Zestawienie obejmuje zarówno pozycje klasyczne, jak i najnowsze artykuły w periodykach naukowych. Na podstawie doboru źródeł, ale i na podstawie zawartości samej rozprawy, wyraźnie widoczne jest zdobyte doświadczenie Doktoranta w rozwoju nowych technologii z zakresu IoT w zastosowaniach w obszarze górnictwa. Można to zauważyć w rozdziale 3, gdzie przedstawił on przekrój nowoczesnych technologii, ale również w kolejnych rozdziałach. Przy opisie kolejnych obszarów, omawiany jest obecny stan techniki oraz prowadzone kierunki badań. Potwierdza to doświadczenie Doktoranta zdobyte podczas realizacji pracy.

Tak więc w kontekście aktualnego stanu badań, problem badawczy, który doktorant podjął się rozwiązać w rozprawie doktorskiej, jest ważny i aktualny. Stanowi też znaczny postęp w

porównaniu do przywołanych wcześniej metod, w tym również obecnie stosowanych systemów monitorowania maszyn górniczych.

3.2. Uwagi ogólne

Pomimo ogólnie pozytywnej oceny pracy, mam jednak kilka uwag krytycznych, zarówno ogólnych, jak i szczegółowych.

W podsumowaniu rozprawy (rozdział 9) przedstawiono podsumowanie prac i wymieniono wnioski wypływające z badań. Nie przedstawiono jednak jasno, co jest indywidualnym wkładem Doktoranta.

Osobiście, zasadniczą trudnością, jaką miałem podczas lektury pracy był podział procesów na sześć obszarów, które nie są ze sobą bezpośrednio związane. W efekcie, praca ma charakter eklektyczny, a poszczególne zagadnienia są niejednokrotnie poruszane w sposób powierzchowny. Mam świadomość, że taki dobór tematów wynika z prac, w które zaangażowany był Doktorant. Z drugiej jednak strony, być może warto było się skoncentrować na jednej grupie, w skład której weszłaby mniejsza liczba obszarów, np. powiązanych przez sposób pomiaru i przedstawić ją w sposób wyczerpujący.

Z przywołanego powyżej doboru procesów wynikał układ pracy. Logice tego podziału była podporządkowana struktura kolejnych rozdziałów, od trzeciego do siódmego. W trakcie lektury, po jednym podrozdziale omawiającym aspekt jednego z obszarów pojawia się kolejny podrozdział, który zmienia obszar i kontekst omawianych problemów. Utrudnia to śledzenie toku rozumowania Doktoranta i nie przyczynia się do poprawy czytelności pracy.

Dodatkowo, dane pomiarowe zostały szerzej zaprezentowane dopiero w rozdziale siódmym. Gdyby Autor zamieścił nieco więcej opisów, a szczególnie wykresów prezentujących dane już od rozdziału piątego, bardzo pomogłoby to w recepcji pracy.

Wreszcie, cyberbezpieczeństwo w mojej ocenie nie mieści się w tytułowych „metodach analizy danych” i mogłoby być pominięte bez szkody, a nawet z korzyścią dla całości pracy. Trudno również rozpatrywać analizę ryzyk cyberbezpieczeństwa w kategorii wkładu w dyscyplinę Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, ale raczej informatyka bądź nauki o zarządzaniu.

W ramach problemów do dyskusji, proszę o wyjaśnienie następujących kwestii:

1. Proszę wymienić w punktach, które z osiągnięć opisanych w pracy są oryginalnymi i własnymi osiągnięciami Doktoranta.
2. Wyniki uzyskano dla konkretnych egzemplarzy maszyn górniczych. Czy i w jaki sposób opracowane metody mogą być zastosowane do danych z innych maszyn takiego samego typu?
3. Proszę podać, jak rozumiane jest pojęcie kalibracji, opisywane w rozdziale 5.2.4. Na ile jest ono zgodne ze standardami kalibracji i jakie dokładności oraz jakie korzyści uzyskano. Zakończenie rozdziału wspomina jedynie, że „the received sensor output is acceptable”.
4. W opisie jednostki akwizycji danych na str. 68 podano częstotliwość próbkowania „The signal is sampled with a frequency of approximately 2000 Hz”. Ponieważ jest to

parametr zasadniczy dla rzetelności dalszych analiz, proszę omówić dokładność tej częstotliwości i opisać z czego wynikają przywołane przybliżenia.

5. Filtr cyfrowy, opisany w rozdziale 6.3 (str.84) przedstawiono przez podanie powszechnie znanego wzoru na transmitancję $H(z)$, ale bez żadnych konkretnych parametrów. W ten sposób przedstawione wyniki nie są powtarzalne ani weryfikowalne. Proszę podać parametry filtru i omówić ich dobór.

3.3. Uwagi szczegółowe

Uwagi szczegółowe odnoszą się do zauważonych w rozprawie błędów merytorycznych i edycyjnych. Do błędów tych należą:

- str. 19: w liście wypunktowanej wszystkie skróty (IaaS, PaaS, SaaS) rozwinięto jako Infrastructure as a Service,
- niektóre rysunki mają zbyt małą rozdzielczość i są nieczytelne (np. Fig.11)
- str. 67: podany zakres „ $\pm 65535 (2^{16}-1)$ ” jest niespójny z podaną powyżej informacją o przetworniku 16-bitowym, ponieważ dla zakresu ± 65535 wymagane jest 17 bitów

W pracy znalazły się też – niestety - błędy natury językowej, poniżej wymienię tylko niektóre:

- str.11: „prone-to-error”, podczas gdy chodzi o określenie przeciwne,
- str.33: „prosperous state”,
- str.33: „several trials are investigated to use an inspection robots”
- str.40: „the industry awareness is getting rising”
- str.46: „A table 5”
- str.61: „converter”
- str.71: “Owing to the fact”
- str.83: “are revealed”

Generalnie, w pracy jest dużo tego typu elementarnych błędów językowych. Czasami jest to błędne użycie przyimków bądź czasów, a czasami składni.

Szkoda, że Autor nie znalazł więcej czasu na korektę tych błędów, które utrudniają odbiór pracy, a których można było łatwo uniknąć. Można to było zrobić np. przez końcową weryfikację językowej warstwy pracy przez osobę płynnie władającą językiem angielskim.

4. Główne osiągnięcia rozprawy

Uważam, że najważniejszymi osiągnięciami rozprawy jest opracowanie metod analizy danych pomiarowych pozyskanych z wybranych procesów górnictwa rud miedzi, ale również zaproponowanie i wykonanie układów pomiarowych. Na osiągnięcie to składają się następujące elementy:

- opracowanie metody pomiaru i analizy danych do oceny trybu pracy wiertnicy, gdzie zastąpiono wykorzystanie czujnika ciśnienia czujnikami natężenia prądu, które są łatwe do instalacji bez konieczności ingerencji w mierzony układ,
- zastosowanie czujnika laserowego i metod analizy danych do monitorowania i oceny procesu kotwienia,
- wykrywanie trybu pracy maszyn na podstawie analizy natężenia prądu,
- ocena zagrożenia gazami toksycznymi przy użyciu prostych i tanich czujników z zastosowaniem procedur korelacji wskazań z systemami profesjonalnymi,
- integracja czujników LIDAR z systemem operacyjnym robota inspekcyjnego,
- propozycja architektury systemu chmurowego do wdrożenia i skalowania opracowanych technologii w uwarunkowaniach zakładu przemysłowego.

5. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Bartłomieja Ziętka poświęcona opracowaniu metod analizy danych na potrzeby monitorowania procesów przemysłowych w obszarze górnictwa rud miedzi stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Uważam, że Autor poprawnie sformułował zadanie naukowe i rozwiązał je. Ponadto praca wykazała ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka, szczególnie pod kątem monitorowania i diagnostyki maszyn z zastosowaniem technologii IoT oraz uczenia maszynowego. Wykazała też, że Kandydat posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Uważam, że – pomimo przedstawionych przeze mnie niedociągnięć – rozprawa zasługuje na ocenę pozytywną, a zaprezentowany sposób rozwiązania problemu naukowego jest poprawny. Uważam, że zalety merytoryczne rozprawy przeważają nad występującymi w niej błędami, zresztą głównie edytorskimi i językowymi.

W związku tym stwierdzam, że rozprawa mgr inż. Bartłomieja Ziętka pt. **„Metody analizy danych z systemów o architekturze internetu rzeczy i przetwarzania w chmurze na potrzeby monitorowania procesów technologicznych pozyskiwania rudy miedzi”** spełnia ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

prof. dr hab. inż. Tomasz Barszcz

Katedra Robotyki i Mechatroniki
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Akademia Górniczo Hutnicza im. St. Staszica
Al. Mickiewicza 30
30-059 Kraków