

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Rafała Owczarczaka
pt „Wykorzystywanie harvestingu energii w podnoszeniu efektywności energetycznej
budynków z systemem zarządzania BMS i autonomicznym zasilaniu współpracujących z nim
zdalnych układów czujnikowych”
napisanej pod kierunkiem naukowym dr. hab. inż. Pawła Żyłki i opiekuna mgr. Ireneusza
Wąsowicza,

Podstawą formalną do sporządzenia poniższej recenzji stanowi uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne nr 837/36/RDND02/2021-2024 z dnia 26 lutego 2024 r. Recenzja składa się z pięciu części: I – doboru problematyki badawczej i tematu rozprawy, II - omówienie składowych rozprawy, III – oceny struktury i redakcji pracy, IV – wkład naukowy i osiągnięcia rozprawy oraz V – konkluzje i ocena końcowa dla Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Wrocławskiej. Praca była wspierana i współfinansowana przez program „Doktorat wdrożeniowy” finansowany przez Ministerstwo Edukacji i Nauki, grant nr DWD/3/9/2019.

I. Dobór problematyki badawczej i tematu rozprawy

Cele koncepcji, założeń badawczych i wdrożeniowych pracy doktorskiej mgr. inż. Rafała Owczarczaka są interesujące i ważne, zarówno z punktu widzenia teorii, jak i praktyki odzyskiwania energii z otoczenia zwanego harvestingiem energii oraz prowadzonej polityki zrównoważonego rozwoju w obszarze poszanowania energii w Unii Europejskiej. Przedstawione w pracy doktorskiej tezy stanowią podstawę problematyki badawczej, której dobór jest trafny co najmniej z kilku powodów. Po pierwsze, problem badawczy jest bardzo aktualny w szczególności, iż kryzys energetyczny jaki dotknął kraje Europy uzmysłowił społeczeństwu konieczność oszczędzania energii, jak i ograniczania produkcji energii ze źródeł wysokoemisyjnych. Po drugie Autor wskazał na problem poszukiwania źródeł energii w tych miejscach, gdzie wydaje się to być mało atrakcyjne w skali jednostkowej, jednak jego podejście zmienia się na korzyść, gdy przeliczymy potencjał owego mikroźródła w skali makro. Po trzecie wykorzystywanie harvestingu energii w podnoszeniu efektywności energetycznej budynków z systemem zarządzania BMS i autonomicznym zasilaniu współpracujących z nim zdalnych układów czujnikowych wpisuje się na wytyczne dyrektywy z 2024 roku w sprawie charakterystyki energetycznej budynków (EPBD) uchwalonej przez Radę Unii Europejskiej, która zawiera nowe przepisy, mające na celu zmniejszenie zużycia energii i emisyjności budynków w całej UE.

Zdefiniowanie problemu naukowego wybranego przez Doktoranta spełnia oczekiwania i wymogi stawiane w tym względzie dysertacjom doktorskim o charakterze wdrożeniowym. Wybrana przez mgr. inż. Rafała Owczarczaka problematyka jest interesująca i ważna z poznawczego, naukowego i pragmatycznego punktu widzenia. Przedmiotem rozprawy są



istotne problemy naukowo - badawczo - wdrożeniowe, których rozwiązanie stanowi podstawę do uzyskania stopnia naukowego doktora. Identyfikacja i sposób analizy zdefiniowanych problemów badawczych potwierdza merytoryczne przygotowanie Doktoranta do podejmowania wyzwań w jego dyscyplinie naukowej. W literaturze przedmiotu zauważalna jest luka badawcza w opracowaniach poruszających problematykę aspektów wdrożeniowych związanych z harvestingiem i autonomicznymi bezprzewodowymi układami czujnikowymi. **Podsumowując powyższe spostrzeżenia dotyczące doboru problematyki, tematu i celu badawczego monografii należy uznać je za właściwe, zarówno z punktu widzenia przepisów prawa, teorii, jak i praktyki wskazanej dyscypliny naukowej.**

II. Omówienie składowych recenzowanej rozprawy

Przedmiotem rozważań podjętych w dysertacji było wykorzystanie harvestingu energii w podnoszeniu efektywności energetycznej budynków z systemem zarządzania BMS i autonomicznym zasilaniu współpracujących z nim zdalnych układów czujnikowych. Systemy harvestingowe energii to rozwiązania przekształcające energię dostępną w środowisku na energię elektryczną, przy czym odbywa się to w bezpośrednim otoczeniu zasilanego w ten sposób urządzenia.

Treść rozprawy, zawarta na 221 stronach, obejmuje opis struktury pracy, wstęp, trzynaście rozdziałów merytorycznych i podsumowanie. Charakter uzupełniający pełnią: spis rysunków, tabel i bibliografia. Praca składa się z dwóch części. W pierwszej zawarto rozważania teoretyczne o systemie BMS, o efektywności energetycznej, o harvestingu energii w budynkach, o normie dotyczącej efektywności energetycznej, jako źródle zasad i standardów dotyczących efektywności energetycznej wspieranej systemem BMS oraz przegląd literatury tematu i plan badań (rozdziały 1-4). Druga część pracy (rozdziały 5-13) posiada charakter empiryczny weryfikujący założone tezy i cele badawcze. W pracy wykorzystano takie narzędzia i techniki badawcze jak: analiza stanu literatury, studium przypadków, obserwację uczestniczącą, obliczenia, symulacje, badania laboratoryjne i prace przemysłowe – prototypowanie. Praca zawiera następujące przykłady prac badawczych i wdrożeniowych:

- zaprojektowanie i zastosowanie harvestingu energii w kuźni aluminium,
- poprawę efektywności energetycznej budynku z wykorzystaniem systemu BMS i harvestingu energii cieplnej ze sprężarek,
- harvestingu energii w skali mikro,
- obliczeniu zapotrzebowania na energię w bezprzewodowej platformie czujnikowej LoRa, harvestingu energii z wykorzystaniem przewodności cieplnej okna i systemu Lora,
- analizie i ocenie efektywności energetycznej wewnątrzbudynkowych źródeł odpadowej energii cieplnej na potrzeby bezbaterijnego zasilania bezprzewodowych platform czujnikowych,
- harvestingu energii zasilania platform czujnikowych z wykorzystaniem odpadowej energii cieplnej w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych,
- projektu i opisu budowy harvestera energii mechanicznej – przetwornicy DC-DC.



Poniżej zawarto omówienie i ocenę poszczególnych rozdziałów i elementów składowych dysertacji.

W wstępie dysertacji Doktorant wskazał na tło i uzasadnienie wybranego tematu pracy doktorskiej, dotyczącego próby rozwiązania problemów dotyczących konsumpcji energii na potrzeby utrzymania i funkcjonowania budynków. Podkreślił we wstępie istotną rolę automatyki budynkowej i systemie BMS w procesie podnoszenia efektywności energetycznej budynków. Jako podstawowe narzędzia badawcze Doktorant wskazał analizę literatury, studium przypadku, obserwacje uczestniczącą, eksperyment badawczy prowadzony na bazie autorskiego systemu BMS wyróżniającego się wysoką efektywnością algorytmów sterowania integrowanymi urządzeniami automatyki budynkowej. Doktorant wskazuje na istotną i przyszłościową rolę rozwiązań bezprzewodowych usprawniających pracę systemów BMS. Doktorant sformułował prawidłowo dwie tezy badawcze, do których udowodnienia wykorzystał ww. narzędzia i techniki oraz ocenę zapotrzebowania energetycznego, analizę poprawy efektywności energetycznej, analizie potencjalnych źródeł odpadowej energii wewnątrz budynków, prototypowaniu, uruchomieniu harwesterów energii w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych oraz analizie opracowań bezbateryjnych.

Rozdział drugi zawiera podstawy teoretyczne będące bazą, na której Doktorant tworzy swoje rozwiązania. Za kluczową bazę formalną uznaje przepisy prawne dotyczące efektywności energetycznej budynków wsparte systemami BMS, które to inicjują zmianę w podejściu do projektowania i budowy obiektów z instalacjami. Doktorant zidentyfikował wymagania, czynniki wpływu systemów automatyki i sterowania na efektywność energetyczną budynku. Ponadto wskazał cztery sposoby realizacji automatyzacji oraz sterowania instalacjami technicznymi w budynkach oraz cztery klasy wpływu funkcji automatyzacji i sterowania na efektywność energetyczną budynków komercyjnych i mieszkalnych.

W kolejnym rozdziale Autor zawarł analizę zasobów literaturowych związanych z bezprzewodowymi czujnikami oraz opis idei harvestingu energii. Przedstawiono najczęściej stosowane aktualnie rozwiązania oraz ich wady i zalety. Wskazano i opisano również w formie schematów istotne z punktu widzenia dysertacji rozwiązania techniczne dotyczące zjawisk fizyko-chemicznych i elektrycznych w rozwiązaniach stosowanych wewnątrz budynków, w skali mikro i makro. Sformułowano również wnioski z badań literatury tematu. Nie zawarto wyników i analizy statystycznej wyszukiwań z naukowych baz wiedzy.

Rozdział czwarty zawiera ogólny plan badań wraz z objaśnieniem logicznych powiązań między poszczególnymi elementami dysertacji.

Rozdział piąty przedstawia studium przypadku kuźni aluminium w Rudzie Śląskiej, które zawiera charakterystykę zakładu, opis stanu pierwotnego kotłowni, opis koncepcji modernizacji kotłowni, szczegółowy opis opracowanego rozwiązania, badanie sprawności energetycznej układu, analizę danych pomiarowych kotłowni, obliczenia efektywności energetycznej układu, plany rozbudowy układu harvestingu energii oraz koncepcję systemu bezprzewodowego do potencjalnego zastosowania. W rozdziale tym zweryfikowano pozytywnie pierwszą z tez postawionych w dysertacji, że energia pozyskiwana z otoczenia (poprzez harvesting ciepła) umożliwi poprawę efektywności energetycznej budynków z systemem BMS. Wyznaczono również sprawność energetyczną układu i wykazano istotną redukcję zapotrzebowania energetycznego.



Rozdział szósty zawiera opisy i wyniki badań z kolejnego studium przypadku harvesting energii w fabryce AGD we Wrocławiu. Rozdział zawiera wstęp, opis charakterystyki zakładu, stan pierwotny zakładu, realizację systemu BMS, harvesting energii w formie odzysku ciepła odpadowego na cele grzewcze obiektu, obliczenia efektywności energetycznej obiektu przed i po instalacji systemu BMS. Zaprojektowane i wdrożone rozwiązanie pozwoliło istotnie zredukować zużycie gazu i energii o 3551 MWH w jednym sezonie grzewczym.

Rozdział siódmy opisuje w sposób syntetyczny harvesting energii w skali mikro, tj. w obszarach bezbaterijnego zasilania bazprzewodowego niskomocowych platform czujnikowych i energii mechanicznej dostępnej w budynkach. Rozdział ten stanowi niejako wstęp do dalszych prezentacji wyników prac badawczych i wdrożeń.

Rozdział ósmy zawiera informacje o zapotrzebowaniu energetycznym bezprzewodowej platformy czujnikowej LoRa, który został zidentyfikowany przy wykorzystaniu grantu badawczo-rozwojowego z programu Inteligentny Rozwój 2014-2020 we współpracy przedsiębiorstwa i Politechniki Wrocławskiej. Rozdział zawiera szczegółowy wstęp do problematyki zapotrzebowania energetycznego oraz schemat blokowy wraz ze zdjęciami wykonanej platformy czujnikowej. Ważnym elementem rozdziału są podrozdziały dotyczące pomiarów zapotrzebowania energetycznego referencyjnych platform czujnikowych LoRa wraz z licznymi egzemplifikacjami zdjęć i szczegółowych, rzetelnych obliczeń z procesu pomiarów oraz opis architektury komunikacji bezprzewodowej platform czujnikowych z wykorzystaniem komunikacji LoRa. Opiswane rozwiązanie cechuje się profesjonalnym doborem elementów składowych rozwiązania, porównywalnością oraz niskim kosztem pojedynczej transmisji i niską częstotliwością komunikacji, co ostatecznie przekłada się na niskie zapotrzebowanie energetyczne. Brak jest szczegółowych schematów rozwiązań.

Rozdział dziewiąty opisuje zastosowanie autorskiego algorytmu Doktoranta w zakresie możliwości bezbaterijnego zasilania bezprzewodowych platform czujnikowych z wykorzystaniem przewodności cieplnej okna. W rozdziale zawarto wstęp teoretyczny do problematyki zasilania bezbaterijnego kontraktronów bezprzewodowych, opisu algorytmu sterowania komfortem cieplnym w pomieszczeniu biurowym z wykorzystaniem bezprzewodowych kontraktronów okiennych zasilanych bateryjnie oraz koncepcji harvestera energii cieplnej działającego w oparciu o bezbateryjne zasilanie bezprzewodowych kontraktronów okiennych, analizy wyników, szczegółowego opisu prowadzonych prac badawczych wraz z licznymi wykresami i schematem ultraniskonapięciowym rzetelnie wskazującym na prawidłowo dobrane parametry pomiaru. Istotną konstatacją tego rozdziału jest pozytywna weryfikacja drugiej tezy w dysertacji, że „energia pozyskiwana z otoczenia (poprzez harvesting energii) umożliwia również autonomiczne, bezbateryjne zasilanie zdalnych układów czujnikowych instalowanych w budynkach i współpracujących z systemem zarządzania budynkiem BMS. Sieć zasilanych w ten sposób zdalnych układów czujnikowych pozwala na poprawę efektywności energetycznej budynków zarządzanych systemem BMS”. Przeprowadzone prawidłowo badania i ich wyniki wskazują, na realną możliwość bezbaterijnego zasilania bezprzewodowych platform czujnikowych systemu BMS, a w konsekwencji znaczącej redukcji w budynku zużycia mediów niezbędnych do zapewnienia komfortu cieplnego osób w nim przebywających. Wyższą efektywność pozyskiwania energii (3,5 razy większa) wykazał układ harvestera energii wewnątrz budynku w stosunku do



harwestera zewnętrznego. Luką badawczą w badanym układzie był brak magazynu energii, którego działanie mogłoby wzbogacić wyniki badań.

W rozdziale dziesiątym Autor poddał analizie i ocenie efektywność energetyczną wewnątrzbudynkowych źródeł odpadowej energii cieplnej na potrzeby bezbaterijnego zasilania platform czujnikowych. Rozdział zawiera głównie opis sposobu pozyskiwania energii cieplnej z instalacji zimnej wody wykorzystując zjawisko Seebecka i termogeneratora wraz z charakterystyką przeprowadzonych pomiarów i badań. W rozdziale szczegółowo przedstawiono badanie krzywej mocy termogeneratora oraz badanie rzeczywistego potencjału energetycznego (temperatury obudowy wodomierza) w trakcie doby w warunkach letnich. Dodatkowo zbadano możliwość pozyskiwania energii cieplnej z wykorzystaniem belki rozdzielacza powrotu w instalacji CO. Przedstawione przez Doktoranta wyniki i wnioski z badań dowodzą możliwości całkowitego zastosowania bezbaterijnego zasilania dla bezprzewodowych urządzeń pomiarowych stosowanych w automatyce budynkowej z systemem BMS. W tym przypadku holistyczne podejście do problemu badawczego sugerowałoby objąć badaniami również czas warunków zimowych.

Rozdział jedenasty poświęcony jest badaniom harvestingowego zasilania platform czujnikowych LoRa z wykorzystaniem odpadowej energii cieplnej w warunkach laboratoryjnych. W tej części dysertacji zawarto opis budowy stanowiska pomiarowego z wykorzystaniem termogeneratora i niskonapięciowej przetwornicy DC-DC, dobór magazynu energii, badań dotyczących rodzaju oraz określenia optymalnej pojemności kondensatora elektrolitycznego jako magazynu energii elektrycznej układów harvestingowych energii albo superkondensatorów z podwójną warstwą ładunku (EDLC) lub hybrydowych Li-on. Wyniki badań potwierdziły w tym przypadku możliwość zasilania platform pomiarowych z użyciem opisanego harvestera energii cieplnej. Rozdział kończy się udaną próbą pomiaru rzeczywistej wartości konsumpcji energii elektrycznej podczas cyklu pomiarowo-nadawczego bezprzewodowej platformy czujnikowej w projektowanym układzie zasilania, która potwierdza słuszność technologiczną zastosowania superkondensatorowego magazynu energii w stanie pełnego naładowania.

W rozdziale dwunastym Autor skoncentrował badania na zasilaniu platform czujnikowych BMS z odpadowej energii cieplnej z układu chłodzenia sprężarek w budynkach przemysłowych. Zastosowano metodę studium przypadku i obserwacji uczestniczącej przedsiębiorstwa z branży AGD z układem sprężarek. W rozdziale zawarto wstęp, opis badań w budynku przemysłowym i wnioski. W toku badań potwierdzono słuszność i możliwość praktycznej realizacji koncepcji samowystarczalnego, bezbaterijnego zasilania platformy czujnikowej realizującej pomiar temperatury otoczenia z zastosowaniem harvestera energii cieplnej i magazynu energii elektrycznej w formie kondensatora EDCL. Wyniki badań umożliwiły uzyskanie poziomu energii termogeneratora pozwalający skutecznie uzupełnić ilość energii skonsumowanej podczas jednego cyklu pomiaru nadawczego platformy czujnikowej opartej na BMS. Wyniki badań przedstawione w tym rozdziale potwierdziły słuszność drugiej tezy zawartej w recenzowanej dysertacji.

Z kolei w trzynastym rozdziale przedstawiono kolejny etap badań nad budową układu harvestera energii mechanicznej w formie przetwornicy DC-DC. Zastosowano metodę eksperymentu laboratoryjnego i studium przypadku przedsiębiorstwa KMB Grupa z Wrocławia oraz prace przemysłowe. W pierwszej części rozdziału wyeksponowano wstęp oraz badania laboratoryjne w celach: doboru przekładni generatora, optymalnego wyboru



przetwornicy napięcia i określenia wydajności harvestera energii mechanicznej i operacjonalizacji harvestingu energii mechanicznej do zasilania bezprzewodowego platformy czujnikowej LoRa oraz badań laboratoryjnych harvestingu energii mechanicznej układu samozamykacza drzwi. W drugiej części rozdziału przeprowadzono badania w warunkach rzeczywistych – przemysłowych. Wyniki obu części tj. badań laboratoryjnych i przemysłowych umożliwiły pozytywnie zweryfikować tezę o możliwości wykonania układu w mechanizmie klamki i samozamykacza do w pełni bezbateryjnego zasilania bezprzewodowych platform czujnikowych dostarczających danych do systemu BMS.

Rozdział czternasty posiada charakter podsumowania, w którym Doktorant odniósł się do weryfikacji przedstawionych tez w dysertacji wskazując na ich pozytywną weryfikację oraz przedstawił dalszy plan na rozwój bezprzewodowego systemu BMS z wykorzystaniem algorytmów sztucznej inteligencji będący jego autorską koncepcją.

Zamieszczony spis literatury zawiera 114 pozycji, głównie anglojęzycznych, które zostały właściwie dobrane do tematu i celów pracy oraz w przeważającej części są aktualne. W celach porządkowych należałoby spis rozdzielić na trzy części (czasopisma i monografie z numerami stron, strony internetowe z datami pobrania oraz linki do dokumentacji technicznych)

Podsumowując powyższy opis i ocenę poprawności elementów składowych recenzowanej rozprawy uznaję je za właściwe, zarówno z punktu widzenia przepisów, teorii, jak i praktyki wskazanej dyscypliny naukowej.

III. Ocena struktury i redakcji pracy

Recenzowana praca została napisana poprawnym językiem, a nieco dyskusyjne może wydawać się częste stosowanie w pracy dwóch określeń: „harvesting” oraz nazwa własna systemu BMS Chronomatic. Za pozytywne uznaję świadomość autora co do dyskusyjnego stosowania terminu „harvesting energii” jako procesu przekształcania energii dostępnej w otoczeniu na energię elektryczną. Z kolei używanie nazwy własnej interpretuję jako element procesu wdrożenia konkretno rozwiązaniami technologicznego.

Czasami sformułowania użyte przez Autora mają charakter niedokończonych myśli lub też charakter potoczny np. kaloryfer.

W pracy występują nieliczne błędy językowe i stylistyczne oraz kilka interpunkcyjnych. Niektóre zdjęcia i rysunki są niewyraźne, co utrudnia odczytanie paramentów lub jednostek.

Struktura pracy mogłaby być zmieniona poprzez zintegrowanie kilkunastu krótkich rozdziałów np. 7, 12 z następującymi po nich rozdziałami, gdyż mają one charakter bardziej wstępów do obszerniejszych rozdziałów.

Podsumowując ocenę poprawności opisu prac badawczych i wdrożeniowych pragnę stwierdzić, że dysertacja charakteryzuje się **dobrym poziomem dojrzałości naukowej.**

IV. Wkład naukowy i osiągnięcia rozprawy

Za najważniejszy wkład naukowy i osiągnięcia rozprawy uważam:

- identyfikację innowacyjnych nisz badawczych w zakresie wykorzystania energii z otoczenia do wytworzenia energii elektrycznej w skali mikro i makro,
- operacjonalizację badań naukowych w zakresie mikro i makro instalacji gromadzących



energii z otoczenia w celu wytworzenia energii elektrycznej lub ciepłej,

- zaprojektowanie oraz wykonanie obliczeń i symulacji w celu udowodnienia założonych tez badawczych,
- opracowanie metodyki prowadzenia badań laboratoryjnych i przemysłowych oraz tworzenia prototypów układów odzyskiwania energii z bezpośredniego otoczenia,
- obliczenia, projektowanie i wykonanie prototypów w zakresie zasilania mikro urządzeń elektronicznych, posiadających komunikację bezprzewodową, pobierających energię z różnorodnych źródeł energii z odzysku,
- opracowanie kilku innowacyjnych koncepcji układu odzyskiwania energii w kilku zakładach przemysłowych w Polsce oraz ich wdrożenie, co stanowi potwierdzenie wdrożeniowego charakteru pracy doktorskiej,
- duży potencjał aplikacyjny opisywanych rozwiązań do budownictwa mieszkaniowego i przemysłowego oraz systemów wieloczynnikowego monitorowania środowiska pracy i życia,
- duży potencjał grantowy na poziomie regionalnym, krajowym i międzynarodowym w zakresie innowacji o charakterze biznesowym lub procesowym lub produktowym oraz podnoszenia efektywności ekonomicznej i teorii śladu środowiskowego.

V. Konkluzje recenzji i ocena końcowa

Opiniowana rozprawa doktorska stanowi oryginalną i wartościową pracę naukowo-badawczo-wdrożeniową dotyczącą rozwiązywania problemów naukowych, inżynierskich i gospodarczych. Przeprowadzona ocena pozwala stwierdzić i uznać, że rozprawa doktorska autorstwa mgr. inż. Rafała Owczarczaka pt. „Wykorzystywanie harvestingu energii w podnoszeniu efektywności energetycznej budynków z systemem zarządzania BMS i autonomicznym zasilaniu współpracujących z nim zdalnych układów czujnikowych” jest kompletnym i nowatorskim rozwiązaniem istotnych problemów naukowych i użytecznych wnosząc istotny wkład do dyscypliny naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

W świetle poczynionych ustaleń i ocen potwierdzam niniejszym predyspozycje i umiejętności mgr. inż. Rafała Owczarczaka do prowadzenia pracy naukowej i badawczej.

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska mgr. inż. Rafała Owczarczaka pt. „Wykorzystywanie harvestingu energii w podnoszeniu efektywności energetycznej budynków z systemem zarządzania BMS i autonomicznym zasilaniu współpracujących z nim zdalnych układów czujnikowych” spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim w zawartym w art. 187 ust. z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz.U.2023.0.742) i stawiam wniosek o przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

