

RECENZJA

rozprawy doktorskiej „Efektywne sterowanie cyklem istnienia wybranego obiektu technicznego energetyki odnawialnej”

Podstawa opracowania recenzji

Recenzję sporządzono na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Bydgoskiej Nr 2/NB.520.13.2025 z dnia 11.12.2025 r.

I. Informacje ogólne

Rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Cierlickiego pt. „Efektywne sterowanie cyklem istnienia wybranego obiektu technicznego energetyki odnawialnej” została opracowana i wydana w Bydgoszczy w 2025 roku. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Izabela Piasecka, prof. uczelni, natomiast funkcję promotora pomocniczego pełniła dr hab. inż. Patrycja Bałdowska-Witos, prof. uczelni.

Praca ma formę zwartego opracowania i obejmuje 268 stron tekstu merytorycznego (307 stron z załącznikami). Została przygotowana jako klasyczna rozprawa doktorska i podzielona jest na sześć zasadniczych rozdziałów. Uzupełnienie całości stanowią: spis treści, wykaz najważniejszych skrótów, symboli i jednostek, obszerna bibliografia, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz załączniki.

Rozprawa zawiera czytelny i konsekwentnie opracowany wykaz skrótów, oznaczeń oraz symboli, co w istotny sposób ułatwia odbiór pracy, zwłaszcza w kontekście rozbudowanej części metodycznej i analitycznej. Wykaz literatury obejmuje kilkaset pozycji (ponad 250), w tym liczne publikacje anglojęzyczne, akty prawne oraz normy, co świadczy o bardzo dobrym rozeznanie Autora w aktualnym stanie wiedzy i techniki.

Zakres tematyczny rozprawy obejmuje problematykę cyklu istnienia obiektów technicznych energetyki odnawialnej, ze szczególnym uwzględnieniem elektrowni fotowoltaicznych wykonanych w różnych technologiach. Autor podejmuje zagadnienia istotne zarówno z punktu widzenia inżynierii mechanicznej, jak i inżynierii środowiska oraz energetyki, koncentrując się na możliwościach sterowania cyklem istnienia obiektów technicznych w kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym i zasad zrównoważonego rozwoju. Praca obejmuje szerokie spektrum zagadnień – od ujęcia teoretycznego cyklu istnienia, poprzez aspekty projektowania, eksploatacji i zagospodarowania użytkowego, aż po ilościowe analizy środowiskowe realizowane z wykorzystaniem metodologii LCA.

Podsumowując część wstępną recenzji należy stwierdzić, że przyjęta tematyka rozprawy jest wysoce aktualna i istotna poznawczo, a podjęcie badań w tym obszarze stanowi wartościowy wkład w rozwój nauk inżynieryjno-technicznych, zwłaszcza w dyscyplinie inżynierii mechanicznej, w obszarze projektowania, oceny i doskonalenia obiektów technicznych energetyki odnawialnej.

II. Ocena formalna rozprawy

Rozprawa doktorska została opracowana w formie zwartego opracowania i podzielona jest na sześć zasadniczych rozdziałów, poprzedzonych wprowadzeniem oraz uzupełnionych podsumowaniem

i wnioskami końcowymi. Układ pracy jest logiczny i przejrzysty, a kolejność rozdziałów odpowiada klasycznemu schematowi rozprawy doktorskiej w naukach inżyniersko-technicznych.

Rozdział pierwszy pełni funkcję wprowadzającą. Przedstawiono w nim genezę podjętej tematyki oraz uzasadniono wybór problematyki badawczej. Autor nakreśla tło naukowe i aplikacyjne rozprawy, wskazując na aktualność zagadnień związanych z cyklem istnienia obiektów technicznych energetyki odnawialnej, ze szczególnym uwzględnieniem elektrowni fotowoltaicznych. Rozdział ten zawiera również określenie zakresu pracy oraz jej struktury.

W rozdziale drugim zaprezentowano analizę aktualnego stanu wiedzy i techniki, obejmującą zagadnienia cyklu istnienia obiektów technicznych, projektowania, wytwarzania, eksploatacji oraz zagospodarowania poużytkowego, w odniesieniu do odnawialnych źródeł energii. Szczegółowo omówiono również pojęcia jakości, efektywności, destrukcyjności, zdatności, funkcjonalności i użyteczności obiektów technicznych. Rozdział ten ma charakter teoretyczno-przeglądowy i stanowi podstawę do dalszych rozważań metodycznych i badawczych.

Rozdział trzeci poświęcono sformułowaniu celu rozprawy, problemu badawczego oraz hipotezy badawczej. Określono również zadania szczegółowe, których realizacja umożliwia osiągnięcie założonego celu oraz weryfikację postawionej hipotezy. Rozdział ten stanowi formalne przejście od części przeglądowej do autorskiej części metodycznej.

W rozdziale czwartym przedstawiono aspekty metodologiczne pracy. Autor opisuje obiekt i przedmiot badań, plan oraz program badań, a także szczegółowe założenia metodyczne opracowanej procedury oceny możliwości sterowania cyklem istnienia obiektów technicznych energetyki odnawialnej. Omówiono podstawy metody LCA, zakres i cel analiz, zasady analizy zbioru wejść i wyjść, ocenę wpływu cyklu istnienia, zastosowane modele (IMPACT World+, IPCC, CED) oraz analizę Monte Carlo. Rozdział ten jest spójny i poprawnie wprowadza czytelnika w dalszą część badawczą.

Rozdział piąty stanowi najobszerniejszą część rozprawy i zawiera wyniki badań uzyskane w wyniku zastosowania opracowanej procedury badawczej. Przedstawiono w nim szczegółowe analizy cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznych opartych na modułach monokrystalicznych, polikrystalicznych, amorficznych oraz perowskitowych. Wyniki zaprezentowano z wykorzystaniem poszczególnych modeli LCA, z uwzględnieniem etapów charakteryzowania, normalizowania oraz grupowania i ważenia. W dalszej części rozdziału zaprezentowano wyniki analizy Monte Carlo oraz przedstawiono autorskie wskaźniki zrównoważonej efektywności energetycznej, ekonomicznej i ekologicznej, a także współczynnik wydłużenia cyklu istnienia.

Rozdział szósty zawiera podsumowanie przeprowadzonych badań oraz wnioski końcowe. Autor syntetyzuje uzyskane rezultaty, wskazuje ich znaczenie poznawcze i aplikacyjne oraz formułuje zalecenia dotyczące efektywnego sterowania cyklem istnienia obiektów technicznych energetyki odnawialnej.

W końcowej części rozprawy zamieszczono obszerny wykaz cytowanej literatury, obejmujący liczne pozycje krajowe i zagraniczne, w tym aktualne artykuły naukowe, normy oraz akty prawne. Na uwagę zasługuje także czytelny wykaz skrótów, symboli i jednostek, który ułatwia odbiór pracy, zwłaszcza w kontekście rozbudowanych analiz metodycznych i wynikowych.

Stronę formalną rozprawy oceniam bardzo wysoko. Autor wykazuje dużą dbałość o precyzję sformułowań oraz konsekwencję w stosowaniu terminologii specjalistycznej z zakresu inżynierii mechanicznej, energetyki odnawialnej, oceny cyklu istnienia oraz ochrony środowiska. Układ pracy jest przejrzysty, a narracja logiczna i spójna.

Nieliczne uwagi natury formalnej przedstawiono poniżej:

1. W rozdziale wprowadzającym zawarto punkt dotyczący zakresu pracy, który w istocie pełni funkcję streszczenia dalszej części rozprawy. Z punktu widzenia kompozycji dysertacji

element ten jest zbędny, gdyż zakres i struktura pracy wynikają jednoznacznie z układu rozdziałów.

2. Objętość rozprawy jest znaczna, a niektóre fragmenty – w szczególności rozdział dotyczący analizy stanu wiedzy – mają miejscami charakter podręcznikowy. Możliwe byłoby ograniczenie części opisowych na rzecz bardziej syntetycznego ujęcia zagadnień kluczowych z punktu widzenia celu pracy.
3. W pracy brakuje wyraźnych podsumowań po zakończeniu poszczególnych rozdziałów merytorycznych, co utrudnia szybkie uchwycenie najważniejszych ustaleń częściowych oraz ich związku z głównym celem rozprawy.
4. Rozdział końcowy zawierający podsumowanie i wnioski jest bardzo obszerny, a znaczna liczba wniosków szczegółowych utrudnia wyodrębnienie kluczowych osiągnięć Autora. Zasadne byłoby uporządkowanie tej części poprzez wyraźne rozdzielenie wniosków ogólnych, metodycznych, aplikacyjnych oraz perspektywicznych.
5. W rozprawie występują fragmenty tzw. „tekstu wiszącego”, tj. nienumerowane partie tekstu umieszczone pomiędzy kolejnymi poziomami struktury rozdziałów. Przy stosowaniu wielopoziomowej numeracji cyfrowej po tytule rozdziału powinien bezpośrednio następować tytuł podrozdziału, bez dodatkowych, nienumerowanych wprowadzeń. Jeżeli tego typu teksty pełnią istotną funkcję merytoryczną (np. wprowadzającą lub syntetyzującą), zasadne byłoby ich formalne wyodrębnienie poprzez nadanie numeru i tytułu; w przeciwnym razie powinny zostać ograniczone lub usunięte.
6. W podpisach pod rysunkami i tabelami opracowanymi samodzielnie przez Autora pojawiają się dopiski „opracowanie własne”, które są zbędne, gdyż brak odwołania do źródła jednoznacznie wskazuje na autorstwo tych elementów.

Wskazane uwagi formalne mają charakter drugorzędny i nie wpływają na ogólną, pozytywną ocenę rozprawy. Z formalnego punktu widzenia praca została przygotowana poprawnie i spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

III. Ocena merytoryczna rozprawy

Opiniowaną rozprawę doktorską oceniam bardzo wysoko pod względem merytorycznym, zarówno ze względu na aktualność i znaczenie podjętej problematyki dla rozwoju energetyki odnawialnej, jak i – co należy szczególnie podkreślić – ze względu na oryginalny sposób ujęcia zagadnienia sterowania cyklem istnienia obiektów technicznych. Zrealizowany przez Doktoranta proces badawczy należy uznać za złożony i wymagający, a jego wykonanie wymagało bardzo dobrej znajomości metod oceny cyklu istnienia, umiejętności pracy z rozbudowanymi zbiorami danych oraz zdolności do krytycznej interpretacji wyników.

Przeprowadzone badania obejmują kompleksową ocenę cyklu istnienia elektrowni fotowoltaicznych wykonanych w różnych technologiach, tj. opartych na modułach monokrystalicznych, polikrystalicznych, amorficznych oraz perowskitowych. Analizy przeprowadzono dla pełnego cyklu istnienia obiektów, obejmującego etapy pozyskania surowców, produkcji, eksploatacji oraz zagospodarowania poużytkowego. Badania wykonano z zastosowaniem uznanej metodyki LCA, z wykorzystaniem kilku modeli oceny wpływu (IMPACT World+, IPCC oraz Cumulative Energy Demand), co umożliwiło wieloaspektową analizę oddziaływań środowiskowych, energetycznych i pośrednio ekonomicznych.

W ramach pracy dokonano porównań scenariuszy zagospodarowania poużytkowego elektrowni fotowoltaicznych, obejmujących recykling oraz składowanie, co pozwoliło na ocenę wpływu przyjętych rozwiązań na możliwość wydłużania cyklu istnienia obiektów technicznych. Istotnym elementem pracy są również analizy niepewności przeprowadzone z wykorzystaniem metody Monte Carlo, które zwiększają wiarygodność uzyskanych wyników i świadczą o dojrzałości metodologicznej Autora.

Pod względem merytorycznym i metodycznym rozprawa jest spójna z przyjętym celem oraz sformułowaną hipotezą badawczą. Zakres przeprowadzonych analiz pozwala na jej weryfikację, a uzyskane wyniki są logicznie interpretowane i prowadzą do sformułowania jednoznacznych wniosków. Całość świadczy o wysokim poziomie wiedzy teoretycznej Doktoranta oraz bardzo dobrym opanowaniu nowoczesnych narzędzi badawczych stosowanych w inżynierii mechanicznej i energetyce odnawialnej.

Na szczególne wyróżnienie zasługują następujące elementy pracy:

1. Bardzo dobra dyscyplina w formułowaniu myśli oraz konsekwentne, precyzyjne stosowanie terminologii specjalistycznej związanej z cyklem istnienia obiektów technicznych i oceną środowiskową.
2. Kompleksowe usystematyzowanie zagadnień związanych z cyklem istnienia obiektów technicznych energetyki odnawialnej, z uwzględnieniem faz projektowania, wytwarzania, eksploatacji oraz zagospodarowania użytkowego.
3. Poprawne i zgodne z obowiązującymi normami zastosowanie metodyki LCA, w tym właściwe zdefiniowanie celu i zakresu analiz oraz granic systemu.
4. Wykorzystanie kilku modeli oceny wpływu (IMPACT World+, IPCC, CED), co pozwoliło na wielokryterialną ocenę analizowanych obiektów.
5. Przeprowadzenie bardzo obszernych i oryginalnych badań porównawczych czterech generacji technologii fotowoltaicznych w ujęciu cyklu istnienia.
6. Uwzględnienie różnych scenariuszy zagospodarowania użytkowego elektrowni fotowoltaicznych oraz ich wpływu na efektywność środowiskową i energetyczną.
7. Zastosowanie analizy niepewności metodą Monte Carlo, co zwiększa wiarygodność oraz transparentność uzyskanych wyników.
8. Opracowanie autorskich wskaźników zrównoważonej efektywności energetycznej, ekonomicznej i ekologicznej, a także współczynnika wydłużenia cyklu istnienia, stanowiących istotny element oryginalnego wkładu naukowego Doktoranta.
9. Sformułowanie logicznych, spójnych i merytorycznie uzasadnionych wniosków końcowych, potwierdzających weryfikację hipotezy badawczej.
10. Wskazanie potencjalnych kierunków dalszych badań, związanych z doskonaleniem procedur sterowania cyklem istnienia obiektów technicznych energetyki odnawialnej.

Nieliczne uwagi krytyczne, w części o charakterze dyskusyjnym, a także kwestie wymagające dodatkowego doprecyzowania przedstawiono poniżej:

1. W pracy zabrakło pogłębionej analizy wpływu przyjętych wag i procedury agregacji w autorskich wskaźnikach zrównoważonej efektywności; zagadnienie to wymagałoby szerszego uzasadnienia teoretycznego.
2. W części interpretacyjnej wyników mogłoby pojawić się więcej syntetycznych zestawień porównawczych, ułatwiających jednoznaczną ocenę przewag poszczególnych technologii.
3. Warto byłoby wyraźniej odnieść pojęcie „sterowania cyklem istnienia” do potencjalnych zastosowań praktycznych, np. w procesach decyzyjnych producentów lub operatorów instalacji fotowoltaicznych.
4. W pracy można byłoby szerzej odnieść się do ograniczeń zastosowanej metodyki LCA, w szczególności do wpływu przyjętych założeń modelowych oraz granic systemu na końcowe wartości uzyskiwanych wyników. Pogłębiona dyskusja w tym zakresie zwiększyłaby transparentność i interpretowalność przeprowadzonych analiz.
5. Rozważania zawarte w rozprawie koncentrują się na elektrowniach fotowoltaicznych; interesującym uzupełnieniem pracy byłoby porównawcze odniesienie zaproponowanej procedury do innych obiektów energetyki odnawialnej, takich jak elektrownie wiatrowe lub systemy magazynowania energii, co pozwoliłoby lepiej ocenić jej uniwersalność.

6. W niektórych fragmentach pracy można byłoby oczekiwać bardziej pogłębionej analizy wrażliwości wyników na zmiany kluczowych parametrów wejściowych, takich jak czas eksploatacji, intensywność użytkowania czy założenia dotyczące scenariuszy końca życia obiektu.
7. Część ekonomiczna rozprawy mogłaby zostać rozszerzona o analizę zmienności cen surowców i energii w dłuższej perspektywie czasowej, co zwiększyłoby realizm oraz aplikacyjny charakter uzyskanych wyników.
8. W pracy nie przedstawiono jednoznacznego uzasadnienia wyboru oprogramowania SimaPro jako narzędzia realizacji analiz LCA. Z punktu widzenia metodycznego zasadne byłoby odniesienie się do kryteriów tego wyboru oraz krótkie porównanie z innymi powszechnie stosowanymi narzędziami (np. GaBi, OpenLCA).
9. Z perspektywy inżynierii mechanicznej można byłoby szerzej odnieść się do zagadnień trwałości mechanicznej oraz niezawodności elementów instalacji fotowoltaicznych i ich wpływu na możliwość wydłużania cyklu istnienia obiektu technicznego.
10. Interesującym kierunkiem dalszych analiz byłoby uwzględnienie procesów modernizacji obiektu technicznego w trakcie jego eksploatacji, które w praktyce inżynierskiej często decydują o rzeczywistym czasie użytkowania systemu.
11. Z punktu widzenia aplikacyjnego warto byłoby rozbudować opis potencjalnych kierunków implementacji proponowanej procedury w praktyce projektowej i decyzyjnej przedsiębiorstw zajmujących się projektowaniem oraz eksploatacją instalacji fotowoltaicznych.

Powyższe uwagi nie podważają wysokiej wartości merytorycznej rozprawy i należy je traktować raczej jako wskazówki do dalszego rozwijania podjętej problematyki badawczej.

IV. Podsumowanie

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska dotyczy zagadnień o wysokim stopniu aktualności, związanych z oceną i doskonaleniem cyklu istnienia obiektów technicznych energetyki odnawialnej w kontekście zrównoważonego rozwoju oraz ochrony środowiska. Podjęta tematyka jest w pełni uzasadniona zarówno z punktu widzenia aktualnych potrzeb naukowych, jak i wyzwań praktycznych wynikających z dynamicznego rozwoju instalacji fotowoltaicznych. Z tego względu temat rozprawy należy uznać za trafny i dobrze osadzony w realiach współczesnej inżynierii.

Doktorant proponował i zrealizował rozbudowany oraz metodycznie poprawny program badań, którego wyniki zostały zaprezentowane w sposób przejrzysty, logiczny i niebudzący istotnych zastrzeżeń. Praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a jej treść pozostaje w ścisłym związku z aktualnym stanem wiedzy i praktyką inżynierską, w wielu aspektach je uzupełniając i rozwijając. Szczególnie wartościowe są autorskie propozycje wskaźników umożliwiających ocenę możliwości sterowania cyklem istnienia obiektów technicznych energetyki odnawialnej.

Całość rozprawy potwierdza, że Autor posiada gruntowną wiedzę teoretyczną oraz wykazuje umiejętność samodzielnego formułowania problemów badawczych i prowadzenia złożonych analiz naukowych z wykorzystaniem nowoczesnych metod badawczych. Przeprowadzone badania świadczą o dojrzałości naukowej Doktoranta oraz o jego kompetencjach w zakresie inżynierii mechanicznej, energetyki odnawialnej i oceny cyklu istnienia obiektów technicznych.

Podsumowując ocenę rozprawy stwierdzam, że **opiniowana praca w pełni spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2020 r., poz. 85 z późn. zm.)**. Wysoki poziom merytoryczny pracy, poprawność metodyczna oraz potencjał aplikacyjny uzyskanych wyników pozwalają uznać ją za wartościowy wkład w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna.

Podpisano
przez
ANDRYCH-ZALEWSKA
MONIKA
KATARZYNA w
dniu
27.01.2026 11:21

