

dr hab. inż. Artur Gutkowski, prof. uczelni
Politechnika Łódzka
Wydział Mechaniczny
Instytut Maszyn Przepływowych
ul. Wólczańska 219/223, 90-924 Łódź
email: artur.gutkowski@p.lodz.pl

Łódź, dnia 01.09.2023

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Rafała Kuźniaka

pt. „Metoda doboru mocy i pojemności magazynu energii elektrycznej w celu redukcji kosztów w zakładzie przemysłowym”

1. Podstawa wykonania recenzji

Podstawą przygotowania recenzji jest pismo nr MAA-510/72/2023 Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej, Pana dr hab. inż. Sławomira Błasiaka, prof. PŚk, z dnia 4.07.2023 informujące o powołaniu mnie na recenzenta pracy doktorskiej Pana mgra inż. Rafała Kuźniaka. Wraz z pismem otrzymałem egzemplarz pracy wydanej w postaci monografii.

2. Aktualność tematu rozprawy

Zagadnienia związane z magazynowaniem energii elektrycznej są obecnie jednym z głównych nurtów prac rozwojowych prowadzonych w różnych ośrodkach badawczych na świecie, ale także są dziedziną, którą bardzo się interesują zakłady przemysłowe. Wykorzystanie magazynów energii w takich zakładach może być realizowane w różnych celach. Jednym z nich może być zapewnienie zasilania awaryjnego w przypadku wystąpienia awarii sieci energetycznej. Innym przykładem może być zwiększenie udziału odnawialnych źródeł energii (np. energii słonecznej lub wiatrowej), dzięki takiemu podejściu ma także miejsce redukcja emisji CO₂. Należy pamiętać, że na końcu takiej działalności przedsiębiorstw jest zysk ekonomiczny. Doktorant w swojej pracy skoncentrował się na dwóch innych celach, które umożliwiają zmniejszenie kosztów przedsiębiorstwa są to arbitraż cenowy i *peak shaving*. Pierwsza z tych strategii zakłada kupowanie energii elektrycznej w okresach niskich cen i wykorzystanie jej w okresach, gdy cena energii jest wysoka. Druga ze strategii polega na redukcji szczytowych wartości mocy pobieranej przez przedsiębiorstwo. Pomimo tego, że żadna z tych strategii nie zwiększa bezpośrednio wykorzystania źródeł OZE to jednak pozwalają one na „optymalizację” kosztów kupna energii.

Biorąc pod uwagę powyższe, uważam wybór tematu pracy doktorskiej za trafny i istotny z praktycznego punktu widzenia.

3. Charakterystyka treści rozprawy

Treść rozprawy została przedstawiona na 184 stronach z zachowaniem podziału na spis treści, 8 rozdziałów, spis oznaczeń, wykaz cytowanej literatury a także przepisy prawne. W pracy zamieszczono 45 rysunków, 23 tabele i 103 pozycje literatury.

Rozdział 1 pt.: *Wstęp* (7 stron) nakreśla zarys tematyczny rozprawy. W pierwszej części rozdziału Doktorant przytacza obowiązujące dyrektywy transformacji energetycznej, które zobowiązują do osiągnięcia neutralności klimatycznej, w czym znacząco ma pomóc rozwój technologii odnawialnych źródeł energii (OZE) oraz technologii magazynowania energii. Jednakże głównym problemem wykorzystania OZE jest ich niestabilna i trudna do przewidzenia generacja energii, zależna od warunków atmosferycznych. To wszystko powoduje, że operator systemu energetycznego jest zmuszony posiłkować się konwencjonalnymi źródłami energii (węgiel, gaz) w celu pokrycia szybkozmiennych zapotrzebowań na energię.

W dalszej części rozdziału Autor opisuje skrótowo funkcjonalności jakie mogą pełnić magazyny energii elektrycznej w instalacjach mikrosieci przedsiębiorstw. Wymieniono dwie funkcjonalności: techniczne i biznesowe.

Rozdział 2 pt.: *Cel i zakres pracy* (2 strony) omawia cel i zakres prowadzonych w ramach rozprawy badań i analiz. Doktorant jako cel pracy wskazuje opracowanie metody doboru mocy i pojemności magazynu energii elektrycznej w celu redukcji kosztów energii elektrycznej w zakładzie przemysłowym. Swoje analizy ogranicza do dwóch strategii: arbitrażu cenowego i *peak shaving*.

Autor przedstawił także w tym rozdziale hipotezy badawcze (zamiast tezy):

Hipoteza 1: *Zastosowanie strategii arbitrażu cenowego, możliwe dzięki wykorzystaniu magazynu energii elektrycznej z odpowiednio dobranymi parametrami, uwzględniającymi zapotrzebowanie przedsiębiorstwa na energię elektryczną, pozwala na uzyskanie przez zakład przemysłowy efektu ekonomicznego.*

Hipoteza 1.1: Istnieje wskaźnik efektu ekonomicznego, umożliwiający określenie optymalnej pojemności i mocy magazynu energii, realizującego strategię arbitrażu cenowego w przedsiębiorstwie.

Hipoteza 2: *Zastosowanie strategii peak shaving, możliwe dzięki wykorzystaniu magazynu energii elektrycznej z odpowiednio dobranymi parametrami, uwzględniającymi zapotrzebowanie przedsiębiorstwa na moc elektryczną, pozwala na uzyskanie przez zakład przemysłowy efektu ekonomicznego.*

Hipoteza 2.1: Istnieje wskaźnik efektu ekonomicznego, umożliwiający określenie optymalnej pojemności i mocy magazynu energii, realizującego strategię peak shaving w przedsiębiorstwie w zależności od przyjętych warunków ładowania magazynu energii w ciągu doby.

Rozdział 3 pt.: *Przegląd literatury* (15 stron) koncentruje się na dwóch obszarach związanych z magazynowaniem energii elektrycznej w celu redukcji kosztów w zakładach przemysłowych. Pierwszy dotyczy regulacji rynku energii elektrycznej wynikających z strategii energetycznej kraju oraz polityki klimatyczno-energetycznej Unii Europejskiej. Drugi obszar dotyczy metody określenia optymalnych parametrów technicznych systemów

magazynowania energii współpracujących z mikrosieciami. W dalszej części Doktorant skoncentrował się na strategiach biznesowych, które mogą realizować magazyny energii. Pierwszej opartej na zarządzaniu w okresie dobowym energią elektryczną, gdzie można wymienić dwa przypadki: pobieranie energii z zewnętrznej sieci – arbitraż cenowy lub odbieraną z generacji wewnętrznej OZE – *time-shifting*. Druga kategoria dotyczy strategii opartych na redukcji mocy pobieranej z sieci, gdzie pierwszy przypadek dotyczy redukcji mocy szczytowej – *peak shaving* a drugi redukcji na żądanie – DSR (*Demand Side Response*).

Rozdział 4 pt.: *Uwarunkowania pracy magazynu energii w zakładzie przemysłowym* (32 strony) opisuje szczegółowo składowe koszty oraz zasady ich naliczania zgodnie z wymogami formalno-prawnymi, które obowiązują w Polsce. Autor wyjaśnia rolę mocy umownej w umowach dotyczących świadczenia usług dystrybucji energii elektrycznej a także podkreśla fakt naliczania dodatkowych opłat w przypadku stwierdzenia jej przekroczenia w okresie rozliczeniowym. W dalszej części Doktorant opisuje zarządzanie zasobami magazynów energii a także szczegółowo przedstawia strategie biznesowe pracy magazynów energii w zakładach przemysłowych (wymienionych już w poprzednim rozdziale) i tłumaczy możliwości generowania dodatkowych zysków lub zmniejszania kosztów w przedsiębiorstwie.

Rozdział 5 pt.: *Metodyka doboru mocy i pojemności magazynu energii przy zastosowaniu strategii arbitrażu cenowego i peak shaving* (31 stron) przedstawia proces definiowania modeli matematycznych działania BESS dla dwóch wybranych strategii. W pierwszej części rozdziału Autor przedstawia charakterystyki wybranych przedsiębiorstw (za lata 2018 i 2019), reprezentujących 3 branże i w sumie 5 zakładów a także charakterystykę obiektu referencyjnego, wyznaczoną na podstawie profilu standardowego przez jednego z polskich Operatorów Systemu Dystrybucyjnego. W dalszej części krok po kroku definiowane są modele matematyczne dla arbitrażu cenowego i *peak shaving* przedstawiające dochód operacyjny z realizacji wybranej strategii.

Rozdział 6 pt.: *Symulacja pracy magazynu energii* (36 stron) omawia wyniki przeprowadzonych obliczeń. Rozdział został podzielony na dwie części, pierwsza dotyczyła obliczeń dla strategii arbitrażu cenowego a druga dla strategii *peak shaving*. W pierwszej części parametrem wejściowym była zwiększająca się skokowo pojemność magazynu, natomiast wielkościami wyjściowymi były: maksymalna moc rozładowania BESS, maksymalna moc ładowania BESS, energia roczna ładowania, energia roczna rozładowania, wykorzystanie pojemności BESS, dochód roczny i elastyczność pojemnościowa dochodu. W drugiej części, Doktorant analizował strategię *peak shaving*, zbadał możliwość redukcji mocy umownej poprzez kompensację szczytów mocy przez magazyn energii. Autor przeanalizował dwa przypadki (wariant *A* i wariant *Z*) z uwagi na dopuszczalne okresy ładowania. Wariant *A* przewidywał ładowanie magazynu energii zaraz po rozładowaniu, jak tylko jest to możliwe, bez wyznaczonej strefy ładowania. Natomiast wariant *Z* zakładał ładowanie tylko w wyznaczonej strefie ładowania. Na krzywych przedstawiających dochód BESS w funkcji redukcji mocy umownej, mogą występować dwa punkty charakterystyczne: pierwszy, dla którego dochód jest największy oznaczony jako opt.1, oraz drugi, dla którego krzywa dochodu zmienia swój charakter, oznaczony jako opt.2. Punkt ten określa stan, kiedy kumulacja przekroczeń mocy zaczyna mieć istotny wpływ na dochód, natomiast rozbudowa magazynu

przestaje być efektywna. Doktorant zaproponował sposób określenia tego punktu bazując na zaproponowanym przez niego parametrze *Elastyczność mocowa dochodu*. Autor swoje analizy poparł licznymi tabelami i wykresami.

Rozdział 7 pt.: *Dobór parametrów pracy magazynu energii* (15 stron) przedstawia w pierwszej części wyznaczenie efektywnej pojemności i mocy magazynu energii z wykorzystaniem parametru *Elastyczność pojemnościowa dochodu* dla strategii arbitrażu cenowego. Doktorant ustalił arbitralnie wartość tej wielkości na poziomie 95%. Dla przypadków, gdy wielkości pojemności magazynu i jego mocy różniły się w zależności od roku (jak ma to miejsce w zakładach BS, CJ i CL) zdecydowano się na wybranie magazynu o mniejszej pojemności w celu uniknięcia przewymiarowania magazynu energii. Autor zwraca uwagę na znaczenie organizacji pracy przedsiębiorstw co przekłada się na zależność krzywych *Elastyczność pojemnościowa dochodu* od zmiany mocy umownej (BK2018, CL2018 i TC2018 – słaba zależność, A218, BS2018 i CJ2018 – znacząca zależność).

Następnie opisano wybór parametrów magazynu energii przy realizacji strategii *peak shaving* dla wariantu A jako bardziej dochodowego. W tym przypadku wybrano największą wartość pojemności magazynu z badanych lat, aby uniknąć ryzyka przekroczenia mocy umownej, będącego efektem braku wystarczającej pojemności magazynu do redukcji kolejnych kumulujących mocy pobieranej ponad moc umowną.

Autor przeprowadził także analizę statystyczną histogramów do oceny wyników doboru magazynu energii, ale wyniki tej analizy nie dały jednoznacznej odpowiedzi na związek wyników symulacji i wyznaczonych punktów opt.1 i opt.2.

Rozdział 8 pt.: *Podsumowanie i wnioski końcowe* (9 stron) w skrócie przypomina podstawowe założenia strategii arbitrażu cenowego i *peak shaving*. Następnie zostały przedstawione wnioski końcowe dla każdej strategii. W dalszej części Doktorant przeprowadził walidację hipotez, stwierdzając, że hipotezy 1 i 1.1 są prawdziwe a hipotezy 2 i 2.2 są fałszywe. Na końcu rozdziału zostały wypunktowane ograniczenia stworzonych modeli matematycznych oraz nakreślone kierunki przyszłych badań.

Ostatnia część pracy to spis oznaczeń, literatura (103 pozycje), przepisy prawne z linkami do dokumentów oraz spis rysunków i tabel.

4. Ocena pracy

Rozwiązanie problemu badawczego przedstawionego w pracy doktorskiej wymagało przeprowadzenia dogłębnej analizy literatury dotyczącej polityki klimatyczno-energetycznej UE i Polski, doboru mocy i pojemności magazynów energii elektrycznych oraz opracowania modelu matematycznego i przeprowadzenia symulacji. Cel ten został w pełni osiągnięty a uzyskane wyniki stanowią wartościowy dorobek. Doktorant wykorzystał standardowe, ale w pełni odpowiednie metody badawcze, przedstawił także pogłębioną dyskusję wyników. Rozprawa doktorska jest napisana dobrym językiem polskim. Pozytywnie oceniam postawienie problemu badawczego oraz sposób jego rozwiązania.

Pomimo tego, że rozprawa dotyczy sposobu doboru magazynów energii elektrycznej w celu optymalizacji kosztów w zakładach przemysłowych to w obecnych czasach jest to temat interdyscyplinarny, który przenika do sfery zainteresowań naukowców działających w dziedzinie inżynierii mechanicznej. Dlatego też uważam, że rozprawa ma dużą wartość praktyczną.

5. Pytania do pracy

1. W przeglądzie literatury Autor dużo pisze o możliwościach redukcji emisji CO₂ w przypadku wykorzystania magazynów energii elektrycznej współpracujących z odnawialnymi źródłami energii. Czy zdaniem Doktoranta w przypadku wykorzystania strategii biznesowych przedstawionych w jego pracy jest możliwa redukcja emisji gazów cieplarnianych?
2. Doktorant arbitralnie przyjął, że podczas doboru pojemności magazynu energii (dla strategii arbitrażu cenowego) kieruje się parametrem Elastyczność pojemnościowa dochodu równym $95\% \pm 1\%$. Punkt ten jest definiowany jako miejsce zmiany charakteru krzywej wyżej wymienionego parametru. Analizując wykresy przedstawiające ten parametr w funkcji pojemności BESS można mieć wątpliwości, że ta zmiana zachodzi zawsze pomiędzy 94 a 96% (np. rys. 26e). Czy Doktorant brał pod uwagę możliwość poszukiwania ekstremum funkcji w celu zidentyfikowania położenia tego punktu?
3. W propozycjach kierunku przyszłych badań Doktorant wymienia analizę możliwości uzyskania efektu synergii przy jednoczesnym zastosowaniu wielu strategii, w tym arbitrażu cenowego i *peak shaving*. Czym ten przypadek miałby się różnić od analizowanego wariantu Z (ver Z)?

6. Uwagi edycyjne i inne:

1. Strona 11 wiersz 5 – jest „barku” a powinno być „braku”.
2. Strona 43 – w Tabeli 6 w ostatnim wierszu są błędnie podane sumy opłat stałych za moc umowną dla B21 i B22.
3. Strona 57 wiersz 3 – jest „poporządkowane” a powinno być „podporządkowane”.
4. Strona 91 wiersz 2 – jest „w” a powinno być „z”.
5. Strona 103 – napisano „... największą zmiennością charakteryzuje się parametr „Elastyczność pojemnościowa dochodu”.”, nie do końca jest jasne co Autor miał na myśli, ponieważ ten parametr zmienia się w zakresie od 72 do 100% a np. energia roczna ładowania od 23550 do 865840 kWh. Domyślam się, że chodzi o przebieg krzywych.
6. Strona 104 – napisano, że „Powyżej punktu charakterystycznego, przedstawionego na rysunku 25a, wartość parametru „Elastyczność pojemnościowa dochodu” zaczyna znacząco spadać wraz ze wzrostem pojemności magazynu,” , chyba powinno być poniżej?
7. Strona 114 – Dwa pierwsze zdania są tożsame.
8. Strona 119 – Na rysunku 29 przydałaby się legenda dotycząca koloru.
9. Strona 132 wiersz 3 od dołu – jest „zapotrzebowani” a powinno być „zapotrzebowania”.
10. Strona 141 wiersz 5 od dołu – jest „analiza” a powinno być „analizy”.
11. Strona 151 – Na końcu strony jest napisane „z zastosowania strategii arbitrażu cenowego” a chyba powinno być *peak shaving*.

12. Strona 152 i 153 – Ostatni wniosek na stronie 152 i pierwszy na stronie 153 rozpoczynają się dokładnie tak samo tzn. „*Przedstawiona metoda doboru mocy i pojemności magazynu energii elektrycznej w celu implementacji strategii peak shaving*” następnie w pierwszym z wymienionych wniosków jest „*pozwała na wyznaczenie efektywnych parametrów magazynu energii*” natomiast w drugim jest „*nie pozwala na jednoznaczne wyznaczenie efektywnych parametrów magazynu energii*”. Następnie oba wnioski kończą się tą samą konkluzją.

7. Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że Autor przeanalizował oryginalny problem naukowy o dużym znaczeniu aplikacyjnym zwłaszcza dla przedsiębiorstw produkcyjnych, które rozważają wykorzystanie magazynów energii w celu optymalizacji kosztów zakupu energii elektrycznej.

Doktorant wykazał opanowanie warsztatu naukowego i umiejętność prowadzenia samodzielnych badań, analizy literatury i wyników a także wnioskowania. Autor posiadał umiejętność pisania rozprawy doktorskiej z klarownie sformułowanym tytułem, celem, zakresem pracy, hipotezami a także przejrzystym i dokładnym opisem metodologii badań i wyników.

Przedstawiona do recenzji rozprawa mgr inż. Rafała Kuźniaka pt. „*Metoda doboru mocy i pojemności magazynu energii elektrycznej w celu redukcji kosztów w zakładzie przemysłowym*” spełnia według mnie wymogi stawiane pracom doktorskim określone w ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017, poz. 1789 tj. ze zm.) i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

A. Gutkowski