

Dr hab. inż. Janusz Lichota, prof. PWr  
Politechnika Wrocławska  
Wydział Mechaniczno-Energetyczny  
Zakład Mechaniki i Systemów Energetycznych W9/Z2

Wrocław 10 V 2019

Recenzja rozprawy doktorskiej pt.  
*„Wykorzystanie energii odnawialnej w wybranych układach  
hybrydowych małej mocy”*

dla

Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej

Autor rozprawy : **mgr inż. Janusz Buchoski**

Promotor rozprawy : **prof. dr hab. inż. Henryk Kaproń**

Podstawa opracowania recenzji : pismo dziekana Wydziału Elektrotechniki i Informatyki  
Politechniki Lubelskiej  
**Prof. dr hab. inż. Henryki Danuty Stryczewskiej**  
Nr E/Dr-114-2008/135/2019 z dnia 2.05.2019 r.

Przedłożona do recenzji rozprawa ma 147 stron.

Wnioskowana dyscyplina naukowa: **elektrotechnika**

## Spis treści

1. Kryteria merytoryczne .....	3
1.1. Poprawność merytoryczna .....	3
1.2. Trafność tematu rozprawy .....	3
1.3. Struktura tekstu .....	3
1.4. Zgodność tematu z treścią rozprawy .....	3
1.5. Trafność celów rozprawy .....	4
1.6. Trafność wnioskowania .....	4
1.7. Elementy nowości w rozprawie .....	5
1.8. Poprawność metodologii .....	5
1.9. Praktycyzm treści .....	6
1.10. Teoretyzm treści .....	6
1.11. Uwagi do zawartości merytorycznej .....	6
2. Kryteria edytorskie .....	11
3. Wniosek .....	14

# 1. Kryteria merytoryczne

---

## 1.1. Poprawność merytoryczna

Rozprawa jest poprawna merytorycznie: określono temat rozprawy, opisano genezę tematu wykorzystania energii odnawialnej w układach hybrydowych małej mocy na podstawie przeglądu literatury, wyznaczono cele badań układów hybrydowych, zapisano tezę o optymalnym wykorzystaniu odnawialnych zasobów energetycznych przy zachowaniu ciągłości zasilania odbiorców przez układ hybrydowy. Na podstawie literatury opisano różne układy hybrydowe. Przedstawiono ich wady i zalety oraz warunki ich pracy. Badania własne zostały opisane poprzez podanie koncepcji metody obliczeń oraz sposobu oceny wyników. Ujęcie matematyczne oraz zagadnienie optymalizacji doboru i wykorzystania hybrydowych układów generacji energii małej mocy jest poprawnie sformułowane, a wyciągnięte wnioski na podstawie wyników obliczeń są prawidłowe. Zarysowano również perspektywy rozwojowe układów hybrydowych małej mocy.

## 1.2. Trafność tematu rozprawy

Rozprawa zajmuje się ważnym społecznie oraz cywilizacyjnie zagadnieniem integracji autonomicznych systemów energetycznych zasilających odbiorców domowych. Zagadnienie jest szczególnie istotne w kontekście szybko zachodzących niekorzystnych zmian dla życia na naszej planecie. Rozprawa w sposób rzetelny łączy ze sobą modele zjawisk oraz wskaźniki ekonomiczne i ekologiczne hybrydowych układów generowania energii elektrycznej i ciepła.

## 1.3. Struktura tekstu

Praca została podzielona na 9 rozdziałów obejmujących: wstęp, tezę, cel i zakres pracy, modelowanie układów hybrydowych, analizę lokalizacji, analizę potrzeb energetycznych budynku, symulację pracy układu hybrydowego, analizę ekonomiczną ekologiczną w warunkach krajowych, podsumowanie i wnioski oraz literaturę. Struktura pracy odzwierciedla klasyczny sposób rozwiązywania zagadnienia naukowego polegający na sformułowaniu własnego zagadnienia badawczego i rozwiązaniu go na tle literatury.

## 1.4. Zgodność tematu z treścią rozprawy

Treść rozprawy jest zgodna z tematem. W pracy zdefiniowano pojęcie układu hybrydowego małej mocy oraz omówiono elementy układów hybrydowych wykorzystujących energię odnawialną. Przedstawiono model wytwarzania energii z elektrowni wiatrowej, ogniw fotowoltaicznych, ogniw paliwowych i pomp ciepła, a także pokazano modele produkcji

wodoru oraz akumulatorów energii. Na podstawie lokalizacji oraz potrzeb energetycznych przyjętego do analizy budynku przedstawiono wyniki symulacji współpracy układu hybrydowego z siecią oraz jego pracy wyspowej. Przeanalizowano wskaźniki ekonomiczne 18 wariantów integracji układu hybrydowego z budynkiem pasywnym oraz niskoenergetycznym.

## 1.5. Trafność celów rozprawy

Podstawowym celem badawczym rozprawy była analiza wpływu wybranych czynników eksploatacyjnych i ekonomicznych hybrydowego układu wytwarzania energii na wyniki funkcji celu minimalizującej nakłady ekonomiczne przy spełnieniu warunku zachowania ciągłości wytwarzania energii elektrycznej i ciepła dla potrzeb odbiorcy. W związku z tym trafnie sformułowano model układu hybrydowego współpracującego z systemem elektroenergetycznym oraz mogącym pracować w układzie wyspowym, zidentyfikowano podstawowe zmienne w modelu oraz pokazano przebiegi wytwarzania energii elektrycznej i ciepła, a także nakłady inwestycyjne oraz koszty eksploatacyjne.

## 1.6. Trafność wnioskowania

W rozdziale szóstym omówiono warianty obliczeń w budynku niskoenergetycznego oraz budynku pasywnego definiując 18 różnych wariantów. W poszczególnych wariantach obliczeń wykorzystano opisywane modele w rozdziale trzecim. Badano wpływ typu budynku, obecności akumulatora energii, typu pompy ciepła powietrznej lub gruntowej, tradycyjnego ogrzewania, ogniwa paliwowego, rodzaju pracy instalacji - dla potrzeb sieci elektroenergetycznej lub wyspowej - oraz zasobnika wodoru na wytwarzanie energii elektrycznej, zużycie energii elektrycznej oraz wymianę energii z siecią elektroenergetyczną. Wyniki obliczeń zostały podsumowane w tabeli 6.20. Wyciągnięto wniosek, że połączenie układu fotowoltaicznego i generatora wiatrowego zapewnia niezależność energetyczną budynku, a wyposażenie budynków w ogniwo paliwowe zapewnia 100% niezależność energetyczną budynku.

W analizie ekonomicznej oraz ekologicznej (rozdział 7) w sposób jasny oddzielono od siebie założenia, metodę oraz wyniki obliczeń dla zdefiniowanych wcześniej 18 wariantów obliczeń. Jako wskaźnik ekonomiczny obliczoną wartość bieżącą netto NPV. Natomiast jako efekt ekologiczny określono jako uniknięty strumień masy zanieczyszczeń gazowych w emitowanych do atmosfery (dwutlenek węgla CO<sub>2</sub>, pył, dwutlenek siarki SO<sub>2</sub>, dwutlenek azotu NO<sub>2</sub>) z konwencjonalnych źródeł wytwarzania energii obejmujących węgiel brunatny i kamienny, drewno, olej opałowy oraz gaz ziemny.

W podsumowaniu wskazano najlepsze rozwiązanie techniczne uzyskane w rozprawie zawierające panele fotowoltaiczne, turbinę wiatrową, akumulator energii oraz gruntowe pompy ciepła. Podkreślono rolę akumulatora energii jako urządzenia, które pozwala na obniżenie nakładów inwestycyjnych na hybrydowe układy generowania energii. Zaakcentowano rolę prawidłowo dobranej mocy instalacji hybrydowej do profilu zużycia

energii u odbiorców podkreślając jej zasadniczy wpływ na wartość bieżącą netto inwestycji. Określono również wpływ systemów wsparcia odnawialnych źródeł energii jako ważnego instrumentu finansowego zachęcającego do inwestycji prowadzących do poprawy jakości powietrza.

Recenzent zgadza się z tymi wnioskami.

## 1.7. Elementy nowości w rozprawie

Rozprawa przedstawia oryginalną analizę działania hybrydowego układu wytwarzania energii małej mocy. Do elementów nowości rozprawy można zaliczyć m.in.:

- algorytm obliczeń wymiany energii hybrydowym układzie wytwarzające energię, równania (3.25)-(3.32),
- opracowanie własnych modeli na podstawie literatury dotyczących wytwarzania energii z elektrowni wiatrowej, ogniw fotowoltaicznych, ogniw paliwowych, sprężarkowej pompy ciepła, produkcji wodoru oraz akumulatora elektrochemicznego,
- przeprowadzenie analizy wartości bieżącej netto NPV inwestycji w hybrydowy układ wytwarzania energii,
- określenie ilości unikniętych zanieczyszczeń gazowych do atmosfery we wszystkich wariantach obliczeń.

## 1.8. Poprawność metodologii

Przyjęto metodologię polegającą na zamodelowaniu elektrowni wiatrowej, ogniw słonecznych, ogniw paliwowych, akumulatorów energii oraz pomp ciepła. Elektrownia wiatrowa była modelowana poprzez zależność generowanej mocy od prędkości wiatru przez wielomian Lagrange'a. Ilość energii generowana przez ogniwo fotowoltaiczne była modelowana za pomocą modelu 2-diodowego. W przypadku wytwarzania wodoru przedstawiono reakcje chemiczne oraz wykorzystano model elektrolizy wody do określenia produkcji wodoru. Pokazano również reakcje chemiczne dla ogniwa paliwowego. Akumulator elektrochemiczny został zamodelowany za pomocą wzoru Peukerta. Omówiono również podstawowe równania termodynamiczne akumulacji ciepła w akumulatorach ciepła jawnego lub utajonego. Również pompę ciepła zamodelowano termodynamicznie korzystając z zależności na wykresie T-s. Modelowane instalacje zostały wprowadzone do funkcji celu poprzez zmienne oznaczające ilości generowanej przez nie energii; równanie (3.25) i (3.32). Przeanalizowano główne zmienne wpływające na wynik funkcji celu: lokalizację instalacji, potrzeby energetyczne budynku zarówno statyczne jak i funkcji czasu. Przeprowadzono z symulację pracy układu hybrydowego w 18 wariantach wyróżniając budynek niskoenergetyczny oraz pasywny, a także urządzenia wytwórcze współpracujące z siecią

elektroenergetyczną oraz pracę w poszczególnych urządzeniach. Następnie określoną wartość bieżącą netto w poszczególnych wariantach oraz ich efekt ekologiczny.

Pokazana metodologia jest spójna, logiczna oraz konsekwentna. Autor rozprawy wykazał umiejętność posługiwania się pojęciami z elektrotechniki, termodynamiki oraz ekonomii.

## 1.9. Praktycyzm treści

Jest to praca, która od strony praktycznej odpowiada na pytanie, który z hybrydowych układów wytwarzanie energii elektrycznej najbardziej się opłaca w sensie wartości bieżącej netto inwestycji przy dodatkowym kryterium prawie całkowitej niezależności od dostawy energii elektrycznej z sieci elektroenergetycznej. Stwierdzono, że najbardziej opłacalnym układem hybrydowym jest układ składający się z ogniw fotowoltaicznych, turbiny wiatrowej, akumulatora energii oraz gruntowej pompy ciepła.

## 1.10. Teoretyzm treści

W pracy pokazano własny model matematyczny służący do modelowania hybrydowych układów wytwarzania energii. Model wykorzystano do analizy ekonomicznej inwestycji w układ hybrydowy.

## 1.11. Uwagi do zawartości merytorycznej

Uwagi merytoryczne wymieniono w tabeli.

Str.	Jest	Komentarz/pytanie
12	tj. $v = f(P)$ elektrowni wiatrowych	$P=f(v)$
		Czy 'magazynowanie energii' jest właściwym terminem ?
17	<i>Wadą układu jest to, że bateria słoneczna, nawet wraz z baterią akumulatorów, nie jest w stanie zasilić odbiorników w ciągu całej doby.</i>	Jest. Choć to, na razie, się nie opłaca.
20	<i>Nowe rozwiązania zasobników, nierzadko oparte na znanych zjawiskach fizycznych,</i>	Wszystkie zasobniki są oparte o zjawiska fizyczne, chemiczne itd.
23	<i>zastosowanie procesów adiabatycznych, dzięki czemu możliwa będzie całkowita eliminacja zużycia paliwa</i>	Takich nie ma i nie będzie (entropia zawsze wzrasta w przemianach, 2 i 4 zasada termodynamiki).
32	<i>Z ogólnej ilości przychodzącej energii 30% jest odbijane z powrotem do przestrzeni kosmicznej, 47% zużywane jest na ogrzanie Ziemi, atmosfery i oceanów, 23% jest absorbowane w cyklu hydrologicznym (parowanie, opady), a tylko 400 TW (około 0,2%)</i>	Suma procentów = 100.2%

43	$P_{Tw}(v_{(n)}) = \sum_{i=1}^3 P_i \prod_{j \neq i} \frac{(v_{(n)} - v_j)}{(v_i - v_j)}, W,$ <p>gdzie: <math>i = 0, 1, \dots, n-1</math> – indeksy</p>	<p>Błędy we wzorze Lagrange'a:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- sumowanie jest do 3. Powinno być do 4.</li> <li>- niepotrzebna kropka w mianowniku '-.'</li> <li>- niezgodność sumy z opisem (i=1 czy i=0 ?)</li> <li>- powinno być <math>j \neq i</math></li> </ul>
	$A_{pV} = \sum_{n=1}^N P_{PV}(G_{r(n)}) \Delta t_{PV}$ $P_{PI}(i_{r(n)})$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- powinno być <math>G_r(n)</math> we wzorze</li> <li>- brak indeksu 'r' w opisie wzoru</li> </ul>
	$- \frac{(U + R_{SZ})}{R_b}, A, (3.4)$	<p>Brakuje natężenia prądu I w liczniku wzoru, w członie opisującym odbiornik. Woltów i omów nie można dodać.</p>
44	$2H_2O \rightarrow 2H_2 + 2O_2$	<p>Niepotrzebne 2 przy „2O<sub>2</sub>”. Bilans masy nie zgadza się.</p>
45	$2H_2O \rightarrow 2H_2 + 2O_2$	<p>Jw.</p>
48	$\eta_{bat} = (i_{ak} I_{nom}^{-1})^{-\kappa}$	<p>W dalszym tekście jest używana zmienna <math>\eta_a</math> lub <math>\eta_{ak}</math></p>
49	$Q_u = Q_{nom} \pm \int_0^t i_{ak}(t) dt.$	<p>Trzeba dodać warunek ograniczający całkę <math>Q_u \leq Q_{nom}</math>, bo nie można dodać pojemności powyżej nominalnej</p>
	<p>Z równań (3.6), (3.7) oraz (3.8), zakładając pracę ogniwa w warunkach normalnych (<math>c_{Tnom} = 1</math>) można otrzymać zależność</p> $Q_u = \eta_{ak}(i_a, T_{nom}) \cdot Q_{nom} \pm \int_0^t i_{ak}(t) dt.$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- równanie (3.11) można uzyskać z (3.10) po uwzględnieniu (3.7) <math>\eta_{bat} := \eta_{ak}</math></li> <li>- jeśli <math>c_{Tnom} = 1</math>, to czy <math>\eta_{ak}</math> zależy od <math>T_{nom}</math>? (równanie (3.9))</li> </ul>
	$Q_u = \eta_{ak}(i_a, T_{nom}) \cdot Q_{nom} \pm \int_0^t i_{ak}(t) dt$ $E(SOC) = E_{min} + \Delta u \cdot SOC$	<p>Niekonsekwencja w używaniu kropki jako znaku mnożenia. Czasem jest, czasem jej nie ma.</p>
	$= R_{elek}(\tau, Q) +$ <p>...</p>	<p>Brak definicji zmiennej <math>\tau</math></p>