

dr hab. inż. Jarosław Knaga,
Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie,
Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki,
Katedra Inżynierii Bioprocusów, Energetyki i Automatykacji,

RECENZJA

**Rozprawy doktorskiej mgr inż. Jacka Gajkowskiego pt.
„Adaptacyjny układ regulacji pracy sprężarkowej pompy ciepła”
wykonanej pod kierunkiem promotora dr hab. inż. Pawła Obstawskiego**

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Jacka Gajkowskiego została opracowana na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej, Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, zgodnie z IIM.510.2.2017 z dnia 2021-06-22.

2. Ogólna charakterystyka Rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska nt: „**Adaptacyjny układ regulacji pracy sprężarkowej pompy ciepła**” zawiera 195 stron tekstu, a w skład tego wchodzi 16 rozdziałów podstawowych (liczących 169 stron), aneks (w liczbie 4 stron) oraz wykaz bibliografii liczącej 157 pozycji (13 stron). Rozprawę poprzedza streszczenie w języku polskim i angielskim, oraz wykaz stosowanych w pracy oznaczeń, indeksów i skrótów. Ponadto przed wstępem została zamieszczona informacja, iż przedstawione wyniki badań zostały wykonane w ramach realizacji projektu TechRol pt: ”Nowe technologie Eko-energetyczne dla zrównoważonego rozwoju obszarów wiejskich i niskoemisyjnej produkcji rolnej” umowa nr BIOSTRATEG3/344128/12/NCBR/2017.

Pierwsze sześć głównych rozdziałów, tj.:

1. Wstęp
2. Klasyfikacja źródeł ciepła

3. Budowa i zasada działania sprężarkowej pompy ciepła pracującej w układzie powietrze-woda
4. Elementy składowe instalacji hydraulicznej CO i CWU
5. Tryby eksploatacyjne sprężarkowych pomp ciepła
6. Strategie regulacji CO

stanowią jednolity przegląd literatury, nakreślając przy tym problem badawczy dotyczący współczesnych systemów grzewczych opartych na sprężarkowych pompach ciepła pracujących w układzie powietrze-woda.

W siódmym rozdziale został sformułowany główny cel opracowania oraz cele pośrednie. Następnie określono zakres niezbędnych prac pozwalających na osiągnięcie nakreślonych celów. W dalszej części rozprawy, tj. w rozdziałach:

8. Opis techniczny budynku referencyjnego
9. Opis stanowiska badawczego
10. Modelowanie elementów instalacji CO

zawarto opis przedmiotu badań i metodykę badań, natomiast w rozdziałach:

11. Badania symulacyjne pracy instalacji CO
12. Analiza właściwości dynamicznych poszczególnych
13. Analiza koncepcji strategii sterowania
14. Adaptacyjny układ regulacji pracy instalacji CO
15. Weryfikacja opracowanego adaptacyjnego algorytmu regulacji CO
16. Podsumowanie i wnioski

przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań w układzie rzeczywistym i symulacyjnym pracę adaptacyjnego układu regulacji, które zakończono podsumowaniem osiągniętych rezultatów.

Rozprawa jest napisana w sposób przejrzysty i staranny. Jednakże autor nie ustrzegł się nielicznych błędów stylistycznych czy edytorskich. Poniżej zamieszczam wykaz przykładowych błędów:

- str. 18, rysunek 2.2 opis osi pionowej jest nie czytelny,
- str. 25 wers 10 od dołu strony, jest: „... trafia do skraplacza, w którym oddaje ciepło Q_g medium obiegu grzewczego instalacji CO,..., powinno być: „... trafia do skraplacza, w którym oddaje ciepło Q_g do medium obiegu grzewczego instalacji CO,...,
- str. 35 wers 10 od dołu strony, jest: „Rzadki rozstaw rur w grzejniku podłogowym...” może być: „Większy rozstaw rur w grzejniku podłogowym...”

- str. 35 wers 6 od dołu strony, jest: „Z tego też względu realizuje się grzejnik podłogowy z tzw. strefą brzegową, w której rury ułożone są gęściej niż w pozostałej części grzejnika.” powinno być: Z tego też względu buduje się grzejnik podłogowy z tzw. strefą brzegową, w której rury ułożone są o mniejszym rozstawie niż w pozostałej części grzejnika.
- str. 42 i 43 rysunki 5.5 i 5.7 opisano różną wielkością czcionki,
- dla zależności (6.1) na str. 46 i zależności (6.5) na str. 48 podano opis oznaczeń, natomiast w pozostałych przypadkach posłużono się ogólnymi zasadami oznaczeń – brak spójności,
- str. 52 wers 11 od dołu strony: brak odstępu po kropce,
- str. 52 wers 1 od dołu strony, jest: „Wadą tego algorytmu okazała się jego wrażliwość...”, powinno być: Okazało się iż wadą tego algorytmu jest wrażliwość...,
- str. 64 rysunek 9.1 brak opisu ważniejszych elementów układu hydraulicznego,
- str. 72 rysunek 9.10, opis wykresu jest nieczytelny ze względu na małą czcionkę, powtarza się to na wszystkich wykresach generowanych prawdopodobnie z programu Matlab,
- str. 78 wers 3 od góry strony, jest: „Ponadto większość modeli wykorzystywanych w badaniach symulacyjnych nie zostały zweryfikowane”; powinno być: Ponadto większość modeli wykorzystywanych w badaniach symulacyjnych nie została zweryfikowana,
- str. 98 w zależność (10.34), jest: opór cieplny grzejnika R_{pod_g} ; a powinno być, R_{pod_gr} ,
- str. 182 załącznik 17.3 w kolumnie pierwszej, jest: „...temperatura uproszczona lub zoptymalizowana grzywa grzewcza” powinno być: ...temperatura uproszczona lub zoptymalizowana krzywa grzewcza.

Pewnym mankamentem pracy, a w szczególności części w której zawarto wyniki symulacji i ich analizę są zdania wielokrotnie złożone, które utrudniają zrozumienie przedmiotu tych analiz. Takim przykładem jest zdanie na str. 153 „Z przebiegu stanów przejściowych temperatury murów (T_m).... ...temperatura wody na zasobniku obiegów grzewczych może osiągać niższe wartości by pokryć zapotrzebowanie budynku na ciepło”. Sens tego zdania dopiero wyjaśnia konkluzja.

Jak wcześniej już wspomniano, rozprawa doktorska zawiera bardzo obszerny wykaz literatury liczący 157 pozycji. Większość cytowanej literatury to są opracowania najnowsze z okresu ostatnich dziesięciu lat. Należy przy tym nadmienić iż cytowane pozycje są dobrze dobrane, wyczerpując przy tym przedmiot badań rozprawy doktorskiej. Również należy zwrócić uwagę na literaturę z zakresu analizy obecnych algorytmów sterowania, stosowanych w układach regulacji systemów grzewczych wiodących firm, co zostało uwzględnione w zestawieniu tych algorytmów w postaci załącznika 17.3. Podkreśla to również użyteczny charakter opracowania.

3. Ocena wyboru tematu rozprawy i jej zakresu

W warunkach krajowych ciągle zwiększające się zużycie energii, w tym energii elektrycznej związane jest z rozwojem gospodarczym, oraz poprawą dobrobytu ekonomiczno-społecznego. Jednakże energia, którą konsumujemy pochodzi praktycznie ze spalania paliw kopalnych, co nie jest bez znaczenia dla środowiska naturalnego. Rosnąca świadomość ekologiczna społeczeństwa powoduje, iż coraz istotniejszym zagadnieniem staje się rozwój źródeł energii, których oddziaływanie na środowisko jest jak najmniejsze lub go brak. Stąd główne kierunki rozwoju m.in. dotyczą aktualnie zwiększenia udziału energetyki ze źródeł odnawialnych, oraz poprawienia efektywności energetycznej istniejących rozwiązań technicznych, czy technologicznych związanych z procesem pozyskania energii odnawialnej. O ile w przypadku zwiększenia udziału energii ze źródeł odnawialnych można stymulować różnymi programami, grantami, czy współfinansowaniem urzędzeń energetyki odnawialnej czego przykładem jest program Prosument w warunkach krajowych, to zdecydowanie trudniej jest w przypadku poprawy efektywności energetycznej już istniejących technologii pozyskania energii z tych źródeł. Jedną z takich technologii, są układy oparte na pompach ciepła, które pozyskując ciepło ze źródeł niskotemperaturowych, naturalnych, wykorzystują dodatkowy strumień energii wytworzonej już ze źródeł konwencjonalnych. W przypadku małych jednostek, które stanowią grupę sprężarkowych pomp ciepła, cieszących się rosnącym zainteresowaniem w obszarze urzędzeń grzewczych przeznaczonych najczęściej do przygotowania ciepłej wody użytkowej i ogrzewania budynków jednorodzinnych, nie tylko powstałych w nowoczesnych technologiach, ale również istniejących, w których ze względu na wprowadzane programy „Czyste powietrze” przez organy samorządu terytorialnego wymuszają na ich właścicielach wymianę istniejących źródeł ciepła, opartych na spalaniu węgla na inne ekologiczne, lub o ograniczonej emisji. W ten sposób ograniczając emisję w miejscu instalacji sprężarkowych pomp ciepła pracujących w różnych układach cieplnych nie redukuje jej całkowicie ponieważ, energia elektryczna niezbędna do ich zasilania i pozostałego oprzyrządowania pochodzi z krajowego systemu energetycznego opartego głównie na węglu kamiennym i brunatnym. Mając na uwadze takie pochodzenie energii elektrycznej, oraz sprawność systemu jej wytwarzania i przesyłu, jesteśmy zobowiązani do poszukiwania technicznych rozwiązań efektywnego jej wykorzystania również w przypadku urzędzeń energetyki odnawialnej. W recenzowanej rozprawie Autor podjął problematykę ograniczenia zużycia energii elektrycznej przeznaczonej do zasilania sprężarkowej pompy ciepła pracującej w instalacji CO w układzie powietrze-woda, poprzez opracowanie adaptacyjnego układu sterowania taką instalacją.

Autor słusznie zauważył, iż głównym czynnikiem wpływającym na zużycie energii elektrycznej przeznaczonej na zasilanie sprężarkowej pompy ciepła jest gradient temperatury pomiędzy dolnym a górnym źródłem ciepła. Ograniczenie różnicy temperatur między dolnym a górnym źródłem ciepła można zrealizować przez obniżenie temperatury na górnym źródle lub przez wzrost temperatury dolnego źródła co w praktyce nie jest możliwe, ponieważ stan termiczny tego źródła wynika z jego zasobności. Ograniczenie temperatury na górnym źródle, przy zachowaniu odpowiedniego komfortu cieplnego w pomieszczeniach ogrzewanych instalacją CO wyposażoną w sprężarkową pompę ciepła pracującą w układzie powietrze-woda Autor realizuje poprzez opracowanie adaptacyjnego algorytmu regulacji instalacji CO, która jest wyposażona w taką pompę ciepłą.

Z zakresu adaptacyjnych algorytmów regulacji jest dość obszerna literatura obejmująca badania różnych rozwiązań aplikacji takich algorytmów. Również obszerna literatura jest odnośnie efektywności energetycznej samych pomp ciepła jak i pomp ciepła pracujących w systemie centralnego ogrzewania. Natomiast do nielicznych należą publikacje z zakresu przedmiotu badań, recenzowanej pracy, co podkreśla oryginalność opracowanego adaptacyjnego algorytmu regulacji instalacji CO wyposażonej w sprężarkową pompę ciepła, a zarazem wpisuje pracę w nurt nowego kierunku badań.

W pierwszej części pracy Autor dokonał przeglądu literatury obejmującej wszystkie elementy instalacji grzewczej opartej na sprężarkowej pompie ciepła ze szczególnym uwzględnieniem algorytmów sterowania urządzeniami grzewczymi i instalacjami CO. Następnie sformułował problem badawczy i odpowiednio cel główny i trzy cele pośrednie, które są spójne. Pewne wątpliwości mam co do sprecyzowania celu głównego, w którym wskazano „minimalizację kosztów eksploatacji instalacji”. W pracy wykazano mniejsze zużycie energii elektrycznej, które Autor utożsamia z mniejszymi kosztami eksploatacyjnymi. W drugiej części pracy opracowano modele poszczególnych komponentów wchodzących w skład instalacji CO z grzejnikami podłogowymi oraz budynkiem referencyjnym. Do tego wykorzystano równania różniczkowe pierwszego rzędu, które po przekształceniu za pomocą transformaty Laplace’a sprowadzono do transmitancji operatorowej. Modele zostały zweryfikowane w oparciu o przygotowane stanowisko badawcze przy wykorzystaniu wymuszenia jednostkowego, co merytorycznie nie budzi zastrzeżeń w zakresie metodyki badań.

Autor w tej części opracowania również dokonał analizy strategii sterownia instalacji CO, w ujęciu klasycznym (w oparciu o krzywe grzewcze), na podstawie implementacji opracowanych wcześniej modeli w środowisku Matlab-Simulink. Następnie po przeprowadzeniu symulacji wykonał analizę własności dynamicznych i statycznych poszczególnych komponentów systemu

cieplnego w funkcji ich kluczowych parametrów, co dało Autorowi podstawę do opracowania koncepcji adaptacyjnego układu regulacji pracy instalacji CO. Wykazał się przy tym nie tylko dobrą znajomością programu w którym prowadził symulacje (Matlab-Simulink) ale również aparatu matematycznego. Opracowana autorska koncepcja istotnie stanowi nowe podejście do sterowania instalacją CO, to jest wymiany masy i energii i jest problematyką wpisującą się w inżynierię mechaniczną. Opracowaną koncepcję sterowania Autor zweryfikował na stanowisku badawczym w ujęciu porównawczym z klasycznym układem regulacji powszechnie stosowanym w instalacjach z pompą ciepła opartym na krzywych grzewczych, wykazując w ten sposób potencjał przedmiotowego rozwiązania w zakresie ograniczenia zużycie energii elektrycznej w tego typu instalacjach. Przedstawione porównanie jest obarczone brakiem informacji o parametrach statystycznych temperatury otoczenia, która w tym przypadku jest istotnym czynnikiem.

Z treści opracowania wynika iż przedmiotem sterowania jest instalacja CO. Stąd pewne moje zastrzeżenia, co do tytułu opracowania sugerującego zawężenie tematyki do pracy sprężarkowej pompy ciepła. Oczywiście pompa ciepła jest ważnym elementem tej instalacji ponieważ stanowi źródło ciepła i to od jej pracy zależy zużycie energii elektrycznej. Jednakże w pracy przedstawiono szerszy problem obejmujący instalację CO.

Postawiony problem badawczy, oraz cel główny i cele pośrednie są spójne i uzasadnione aktualnym stanem wiedzy. Uważam iż cel pracy został osiągnięty.

4. Uwagi szczegółowe

Rozprawę doktorską mgr inż. Jacka Gajkowskiego pt. „Adaptacyjny układ regulacji pracy sprężarkowej pompy ciepła” oraz zawarte w niej wyniki badań oceniam pozytywnie. Chciałbym jednak zwrócić uwagę na pewne jej mankamenty oraz kwestie dyskusyjne:

1. Na stronie 15, klasy energetyczne np. pomp ciepła Autor określa raz w przedziale od A+ do A+++ , a innym razem od A+++ do A+.
2. Na stronie 17 Autor wskazuje iż „Popularność pomp ciepła pracujących w układzie powietrze woda... ..wynika z niższych kosztów inwestycji ... budowy wymiennika oraz stosowania sprężarek inwerterowych...”. Pojawia się pytanie czy tylko to jest powodem. Czy klimat i jego zmiany nie wpływają?
3. Na stronach np. 19, 27 Autor używa pojęcia „pomp gruntowych” czy „powietrznych pomp ciepła”, co jest pojęciem potocznym, stanowiącym pewien skrót myślowy, odnośnie układu w których może pracować sprężarkowa pompa ciepła tj. w układzie źródła dolnego i

górnego np. powietrze - woda. Nie powinno się tego stosować w odniesieniu do rodzaju czy typu tylko układu pracy, tak jak to Autor podaje w pierwszym akapicie str. 19.

4. Na stronie 36 Autor wskazuje „...iż do wykonania grzejnika podłogowego stosowane są rury typu PE-X najczęściej o średnicy nominalnej 16-17 mm. Czy w tym zakresie średnic są jeszcze inne wymiary nominalne?
5. W opracowaniu Autor wielokrotnie powołuje się na redukcję kosztów przy zastosowaniu opracowanego algorytmu adaptacyjnego, co oczywiście nie jest wykluczone. Ale czy na pewno redukcja zużycia energii elektrycznej, która jest w tym przypadku udowodniana będzie skutkować redukcją kosztów eksploatacyjnych? Czy w tym przypadku nie będzie bez znaczenia taryfa/strefa.
6. Na stronie 58 ze wzoru 7.1 nie wynika „że im wyższa jest wartość współczynnika COP tym koszt eksploatacyjne urządzenia są niższe”. Możemy tylko stwierdzić, że COP jest odwrotnie proporcjonalne do Q_s czyli redukcję energii elektrycznej do napędu sprężarki.
7. Na stronie 160 podano „że sprężarka nie powinna być uruchamiana częściej jak dziesięć razy w ciągu doby.” Na jakiej podstawie podano taką częstotliwość?
8. Na stronie 147 Autor podaje: „...rezultacie redukcję zużycia energii elektrycznej o 42,55% z wartości 49,92 kWh do wartości 21,24 kWh” co nie jest spójne. Proszę o sprawdzenie i poprawną interpretację, również do informacji zawartej we wniosku pkt. 6.
9. W rozdziale 15 w którym Autor dokonał weryfikacji w czasie rzeczywistym opracowanego adaptacyjnego algorytmu regulacji i standardowego algorytmu regulacji bazującego na krzywych grzewczych, oraz porównania pracy instalacji tak regulowanych m.in. w zakresie energetycznym, nie podał statystycznego opisu temperatur otoczenia w okresie przeprowadzonych prób.
10. Opracowany autorski algorytm sterowania adaptacyjnego instalacji wyposażonej w sprężarkową pompę ciepła niewątpliwie jest bardziej rozbudowany od klasycznych rozwiązań. Jakie minimalne zasoby powinno posiadać urządzenie np. panel operatorski który Autor wykorzystał, aby można było sterować pracą instalacji CO, w skład której wchodzi dwie grupy pompowe.
11. W pkt. 7 wniosków Autor wskazuje na możliwość diagnostyki podwyższonych kosztów eksploatacji instalacji CO w zakresie zużycia energii. Czy można ustalić na podstawie zwrotnej informacji diagnostycznej źródło podwyższonego zużycia energii (np.: pompa ciepła, grupa pompowa, bufor,...) i czy na podstawie tej informacji możemy określić np. optymalną wielkość zbiornika buforowego? Taka diagnostyka może być bardzo praktyczna i cenna dla użytkownika.

Autor przedstawił do recenzji obszerną pracę badawczą, która niewątpliwie wymagała znacznych umiejętności badawczych, jak również organizacyjnych. Realizacja autorskiego algorytmu sterowania instalacją CO wyposażoną w sprężarkową pompę ciepła wymagała również od Autora biegłej znajomości programu Matlab-Simulink, oraz programowania paneli operatorskich, czy sterowników. Wykazane powyżej w recenzji uwagi oraz uchybienia nie umniejszają merytorycznej wartości całego opracowania. Pewne nieścisłości które zostały wykazane mogły pojawić się na etapie redagowania pracy. Natomiast przedstawione uwagi i sugestie mają przede wszystkim charakter polemiczny i dyskusyjny. Konkludując, moja ocena rozprawy doktorskiej jest pozytywna.

5. Wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Jacka Gajkowskiego pt. „Adaptacyjny układ regulacji pracy sprężarkowej pompy ciepła”, zawiera wartościowe wyniki zarówno z punktu widzenia naukowego, jak i utylitarne. Autor zaprezentował w swojej rozprawie doktorskiej oryginalne rozwiązanie adaptacyjnego układu sterowania sprężarkową pompą ciepła w instalacji CO, które wynika z naukowych podstaw. Przedstawione rozwiązanie problemu naukowego ma swoją wartość poznawczą i jest niewątpliwie oryginalnym naukowym dziełem, w którym Autor wykazał się wiedzą teoretyczną, umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań. Z przekonaniem stwierdzam iż Doktorant zrealizował założony cel badań.

W świetle przedstawionej argumentacji, uwag redakcyjnych i merytorycznych które mają charakter dyskusyjny uważam, że rozprawa doktorska nt: „Adaptacyjny układ regulacji pracy sprężarkowej pompy ciepła” wykonana przez mgr inż. Jacka Gajkowskiego pod kierunkiem promotora dr hab. inż. Pawła Obstawskiego, spełnia wymogi i wymagania stawiane rozprawom doktorskim zgodnie z ustawą: (Ustawa z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki Dz. U. 2017 poz. 1789, z późn. zm. w zw. z art. 179 Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce Dz. U. 2018 poz. 1669). W zakresie dyscypliny inżynieria mechaniczna. W związku z powyższym stawiam wniosek o dopuszczenie Pana mgr inż. Jacka Gajkowskiego do publicznej obrony pracy doktorskiej.

dr hab. inż. Jarosław Knaga

