

Gdańsk, 16 sierpnia 2021 r.

dr hab. inż. Grzegorz Żywica, prof. IMP PAN  
Zakład Dynamiki i Diagnostyki Turbin  
Instytut Maszyn Przepływowych im. R. Szewalskiego  
Polska Akademia Nauk

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Jacka Gajkowskiego pt.:

**„Adaptacyjny układ regulacji pracy sprężarkowej pompy ciepła”**

opracowana na podstawie decyzji Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Szkoły Głównej  
Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie (pismo IIM.510.2.2017 z dnia 22.06.2021 r.)

**Tematyka rozprawy**

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska poświęcona jest metodom regulacji pracy sprężarkowych pomp ciepła pracujących w układzie powietrze-woda. Urządzenia tego typu są coraz częściej stosowane w systemach grzewczych budynków, jako nowoczesne i ekologiczne źródło ciepła. Celem pracy było opracowanie adaptacyjnego algorytmu regulacji pracy instalacji CO (centralnego ogrzewania) zasilanej sprężarkową pompą ciepła, który umożliwiłby dopasowanie mocy urządzenia grzewczego i instalacji CO do aktualnego obciążenia cieplnego budynku. Autor rozprawy podjął się więc opracowania własnej metody regulacji sprężarkowej pompy ciepła, co zrealizował zarówno w formie modelu symulacyjnego jak i budowy rzeczywistego układu, który został przetestowany na stanowisku badawczym.

W nowoczesnych systemach ogrzewania budynków pompy ciepła stopniowo zastępują inne urządzenia grzewcze, bazujące na nieodnawialnych nośnikach energii. Oprócz wynikających z tego długookresowych korzyści użytkowych, środowiskowych i finansowych, sytuacji tej sprzyjają także nowe przepisy promujące odnawialne źródła energii. Z drugiej strony, producenci pomp ciepła oraz ich użytkownicy cały czas poszukują nowych metod regulacji urządzeń grzewczych, tak aby zapewniały one jak najwyższy komfort cieplny przy minimalnych kosztach eksploatacji. W tym kontekście podjęte przez Doktoranta badania podejmują aktualne i bardzo istotne kwestie. Oprócz możliwości opracowania nowych, oryginalnych metod regulacji pracy sprężarkowych pomp ciepła, efekty tych badań mogą w przyszłości znaleźć szerokie zastosowanie praktyczne. Dlatego uważam, że wybór tematu pracy oraz sformułowany cel rozprawy jest oryginalny pod względem poznawczym i odpowiada poziomowi pracy doktorskiej w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

## Ogólne omówienie rozprawy

Wraz z załącznikami i zestawieniem literatury praca liczy 195 stron i jest podzielona na 16 rozdziałów. Na początku przedstawiono wykaz oznaczeń, indeksów dolnych oraz skrótów stosowanych w pracy. Rozdziały 1–6 mają charakter wprowadzający. W rozdziale 1 przedstawiono aktualne przepisy dotyczące standardów w zakresie ogrzewania budynków oraz problemy związane ze stosowaniem powszechnie dostępnych metod regulacji urządzeń grzewczych i instalacji CO. W rozdziale drugim podano klasyfikację źródeł ciepła z uwzględnieniem aktualnych trendów na rynku urządzeń grzewczych. Zauważono, że pompy ciepła stopniowo wypierają z rynku inne urządzenia grzewcze. Podstawy budowy i zasada działania sprężarkowej pompy ciepła typu powietrze-woda oraz elementy wchodzące w skład instalacji grzewczej budynku zostały omówione w rozdziale trzecim i czwartym. W następnej części pracy (rozdział 5) omówiono tryby eksploatacji stosowane w przypadku sprężarkowych pomp ciepła (monowalentny i biwalentny). W rozdziale szóstym omówiono metody regulacji systemów ogrzewania budynków, w tym strategię stałotemperaturową oraz z uwzględnieniem kompensacji temperatury w oparciu o krzywe grzewcze. Szczególną uwagę poświęcono regulacji instalacji CO zasilanych sprężarkowymi pompami ciepła, wskazując niedoskonałości powszechnie stosowanej w praktyce metody, bazującej na doborze odpowiedniej krzywej grzewczej. W rozdziale tym przedstawiono również obszerny przegląd różnego typu algorytmów regulacji, które są stosowane do sterowania urządzeniami i systemami grzewczymi. Zauważono, że podstawowy i powszechnie stosowany algorytm opierający się na rodzinie krzywych grzewczych wymaga doboru odpowiednich parametrów, co jest procesem długotrwałym.

Cel i zakres pracy zostały przedstawione w rozdziale siódmym. Jako rozwiązanie wcześniej omówionych problemów, związanych z powszechnie stosowaną metodą regulacji systemów grzewczych budynków, Doktorant zaproponował opracowanie adaptacyjnego algorytmu regulacji, który umożliwiłby lepsze dopasowanie mocy urządzenia grzewczego oraz temperatury zasilania do aktualnego zapotrzebowania. Osiągnięcie celu głównego wymagało realizacji trzech celów pośrednich, które polegały na:

- opracowaniu algorytmu umożliwiającego obliczenie wartości temperatury zadanej medium roboczego w zależności od obciążenia cieplnego budynku w kluczowych punktach instalacji,
- obliczeniu histerezy między temperaturą zadaną wody w zasobniku buforowym, a wartością temperatury sterującej włączającej i wyłączającej pompę ciepła,
- określeniu czasu, po którym następowałaby weryfikacja obliczonych wartości temperatur zadanych oraz ewentualna ich adaptacja do aktualnych warunków.

W rozdziałach 8 i 9 zamieszczono opisy przyjętego budynku referencyjnego (dla którego wykonano obliczenia) oraz stanowiska badawczego (na którym prowadzono badania weryfikacyjne).

W kolejnych rozdziałach przedstawiono badania symulacyjne i eksperymentalne zrealizowane przez Doktoranta. W rozdziale 10 omówione zostały modele poszczególnych elementów instalacji CO, w tym: model sprężarkowej pompy ciepła, zbiornika buforowego, zaworu mieszającego oraz budynku. Zostały one zaimplementowane w pakiecie MATLAB & Simulink. Na końcu tego rozdziału przedstawiono eksperymentalną weryfikację przygotowanych modeli. Badania symulacyjne omówione w rozdziale 11 obejmowały analizę pracy zamodelowanej instalacji z wykorzystaniem standardowych algorytmów regulacji bazujących na krzywych grzewczych. Obliczenia przeprowadzono dla okresu trzech dni przy założeniu, że temperatura zewnętrzna zmienia się w zakresie od  $-5^{\circ}\text{C}$  do  $+5^{\circ}\text{C}$ . Analizy te potwierdziły, że koszt eksploatacji systemu ogrzewania w znacznej mierze zależy od doboru krzywych grzewczych oraz że dobór właściwych krzywych grzewczych jest uciążliwy i czasochłonny. Rozdział 12 obejmuje analizę stanów przejściowych, która została wykonana dla najważniejszych komponentów systemu grzewczego, w tym: grzejnika podłogowego, masy powietrza znajdującego się wewnątrz budynku, przegród zewnętrznych, zbiornika buforowego oraz całego budynku. Dzięki tym analizom pozyskano informacje na temat właściwości dynamicznych modeli poszczególnych komponentów systemu grzewczego, co było niezbędne do opracowania i przetestowania nowego algorytmu regulacji.

W rozdziale 13 zatytułowanym „Analiza koncepcji strategii sterowania” zaprezentowana została koncepcja algorytmu sterowania, dostosowanego do rozważanej instalacji CO. Strategia regulacji została opracowana na podstawie analizy wybranych zmiennych stanu systemu. W ostatniej części rozdziału 13 Doktorant zaproponował modernizację hydrauliczną instalacji CO, polegającą na wyeliminowaniu z niej obiegu bezpośredniego i zastosowaniu we wszystkich obiegach grzewczych indywidualnej grupy pompowej z zaworem mieszającym. Modernizacja ta pozwala na wdrożenie proponowanej koncepcji adaptacyjnego układu regulacji. Zasada działania tego układu została szczegółowo omówiona w rozdziale 14, wraz z przykładowymi przebiegami parametrów instalacji CO, uzyskanymi przy różnych poziomach otwarcia zaworu mieszającego. Szczególną uwagę zwrócono na okresy pracy i postoju sprężarki, gdyż mają one wpływ na jej zużycie oraz koszty eksploatacji systemu grzewczego.

W rozdziale 15 przedstawiono weryfikację opracowanego adaptacyjnego algorytmu regulacji pracy sprężarkowej pompy ciepła. Badania weryfikacyjne wykonano na stanowisku badawczym, w którego sterowniku PLC zaimplementowano ww. algorytm. W celu porównania uzyskiwanych efektów badania weryfikacyjne przeprowadzono zarówno dla opracowanego algorytmu regulacji jak i dla standardowego algorytmu, bazującego na krzywych grzewczych. Uzyskane wyniki przedstawiono na wykresach, które zostały szczegółowo omówione.

W ostatnim rozdziale pracy (rozdział 16) zamieszczono podsumowanie wykonanych badań oraz zestawienie wyciągniętych na ich podstawie wniosków. Do pracy dołączono trzy załączniki obejmujące: rysunki konstrukcyjne budynku referencyjnego, dodatkowe wyniki obliczeń oraz porównanie różnych algorytmów sterowania. Na końcu pracy zamieszczono bibliografię. Zestawienie cytowanych przez Doktoranta prac składa się łącznie z 157 pozycji.

Poszczególne rozdziały rozprawy tworzą logiczną całość, a struktura pracy ułatwia czytelnikowi zapoznawanie się z kolejnymi częściami oraz ich zrozumienie. Cała praca jest napisana w klarowny sposób, przy użyciu specjalistycznego słownictwa. Zrozumienie treści pracy ułatwia też bogata szata graficzna, składająca się z wielu zdjęć, schematów i wykresów.

W rozprawie występują drobne usterki edytorskie i terminologiczne, nie wpływające w sposób istotny na jakość całej pracy. Kilkanaście szczegółowych uwag podałem poniżej:

1. Na rysunku 3.1 przedstawiającym gruntową pompę ciepła należałoby uwzględnić również wymiennik gruntowy (przynajmniej schematycznie), tak jak to zostało przedstawione w przypadku powietrznej pompy ciepła na rys. 3.2.
2. Na stronie 20 przy omawianiu budowy pompy ciepła autor użył potocznego sformułowania „połączonych ze sobą miedzią chłodniczą”.
3. Na rysunku 3.4 przedstawiającym przekrój sprężarki rotacyjnej korzystne byłoby oznaczanie jej podstawowych części.
4. Punkty zaznaczone na wykresie pracy pompy ciepła (rys. 3.9) powinny być dodatkowo przedstawione na schemacie obiegu ciepła (np. na rys. 3.3).
5. Na stronach 25 i 79 zmiana postaci pary, z pary mokrej na parę przegrzaną, została niepoprawnie nazwana zmianą stanu skupienia.
6. W kilku miejscach autor używa nieprecyzyjnych pojęć „moc” (np. str. 25, 45, 94), „energia” (np. str. 79, 118, 120) i „obciążenie” (np. str. 120, 176) w znaczeniu „moc cieplna”, „energia cieplna” i „obciążenie cieplne”.
7. Ramka widoczna z trzech stron na rys. 5.1 jest zbędna i powinna być usunięta.
8. Do określenia temperatury na zewnątrz budynku Doktorant używa pojęcia „temperatura otoczenia” (np. na str. 45 i 168). Ponieważ pojęcie to w przypadku analizowanego systemu może oznaczać również temperaturę wewnątrz pomieszczenia (która jest temperaturą otoczenia np. dla grzejnika podłogowego, sprężarki lub zaworu mieszającego) zachęcam Doktoranta do używania w tym kontekście jednoznacznego pojęcia „temperatura zewnętrzna”.
9. Doktorant niepoprawnie nazywa badania przeprowadzone na stanowisku badawczym w laboratorium weryfikacją w warunkach eksploatacyjnych (np. w streszczeniu oraz na str. 60 i 169). Badania eksperymentalne wykonane w takich warunkach można co najwyżej nazwać weryfikacją w symulowanych warunkach operacyjnych/eksploatacyjnych lub weryfikacją w warunkach zbliżonych do

- rzeczywistych. Badaniami w warunkach eksploatacyjnych można byłoby nazwać pomiary wykonane w funkcjonującym budynku referencyjnym.
10. Masowe natężenie przepływu (podane w jednostce kg/min) Doktorant w kilku miejscach rozprawy nazywa przepływem objętościowym (np. na str. 73).
  11. Na niektórych rysunkach przedstawiających przebiegi analizowanych wartości (np. rys. 9.10–9.12 i 13.1–13.15) do opisu osi zastosowano zbyt małą czcionkę lub zbyt jasne kolory. W drukowanej wersji pracy opisy te są bardzo słabo widoczne lub wręcz nieczytelne.
  12. Dla ułatwienia interpretacji wyników oś odciętych na przebiegach czasowych (np. rys. 9.10–9.12, 11.4–11.6 i 12.17) powinna być wyskalowana w godzinach (lub ewentualnie w minutach), a nie w sekundach. Czytelnikowi trudno jest szybko zinterpretować wartości podane w sekundach rzędu 8000,  $2,5 \cdot 10^5$  lub  $12 \cdot 10^5$ .
  13. Napisy na rys. 10.11 są zbyt duże (kilka razy większe od tekstu pracy).
  14. W ostatnim zdaniu na stronie 174 podano niepoprawną wartość średniego współczynnika COP wynoszącą 2,70. Zgodnie z informacją zamieszczoną na stronie 172 współczynnik ten wynosił 2,74.
  15. W zestawieniu bibliografii niektóre pozycje są niepoprawnie sformatowane (brakuje wysunięcia tekstu). Przy niektórych pozycjach nie podano roku publikacji (poz. 60, 82, 86, 89 i 131).

### **Ocena merytoryczna rozprawy**

Doktorant na początku rozprawy bardzo dobrze wprowadza czytelnika w tematykę pracy oraz w jasny sposób przedstawia problemy współczesnych systemów grzewczych budynków, w których źródłem energii cieplnej są sprężarkowe pompy ciepła. Cytowana literatura została poprawnie dobrana i uwzględnia zarówno publikacje wydane we wiodących międzynarodowych czasopismach naukowych, czasopismach polskich, pismach branżowych, poradnikach i dokumentacji technicznej, jak i na stronach internetowych.

Na tle aktualnych problemów i niedoskonałości powszechnie stosowanych metod regulacji pracy systemów grzewczych i funkcjonujących w nich źródeł ciepła, Doktorant sformułował bardzo ambitny cel pracy oraz cele pośrednie. W pracy nie została sformułowana teza rozprawy, ani hipotezy badawcze. Należy zauważyć, że podjęta tematyka badań jest bardzo trudna, gdyż obejmuje szeroką i bardzo specjalistyczną wiedzę z kilku obszarów nauki i techniki. Poza ekspercką wiedzą z zakresu automatyki oraz projektowania, programowania i budowy układów sterowania, Doktorant wykazał się również szeroką wiedzą z zakresu techniki grzewczej, maszynoznawstwa, inżynierii sanitarnej, ochrony cieplnej budynków oraz modelowania złożonych obiektów technicznych.

Do rozwiązania sformułowanego problemu badawczego Doktorant zastosował samodzielnie opracowany model symulacyjny instalacji grzewczej uwzględniający straty ciepłe budynku, który został opracowany przy użyciu zaawansowanego aparatu matematycznego. W celu weryfikacji opracowanego modelu i układu regulacji pracy pompy ciepła musiał zaplanować i wykonać serię badań doświadczalnych. Uzyskane wyniki zostały przedstawione w przejrzysty sposób, szczegółowo omówione i poddane krytycznej analizie. Wykonane obliczenia symulacyjne oraz badania eksperymentalne były źródłem wielu nowych charakterystyk, które Doktorant potrafił samodzielnie zinterpretować, a na ich podstawie sformułował ogólne wnioski. Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską uważam, że jej Autor w pełni zrealizował postawione cele, umiejętnie wykorzystując odpowiednio dobrane narzędzia badawcze.

Za najbardziej istotne osiągnięcia Doktoranta uważam:

1. Opracowany model złożonego systemu technicznego, składającego się z budynku wyposażonego w instalację grzewczą z pompą ciepła. W modelu tym uwzględniono modele cząstkowe kluczowych podzespołów instalacji CO, w tym modele: pompy ciepła, zasobnika buforowego, trójdrogowego zaworu mieszającego. Opracowany przez Doktoranta model jest uniwersalny i umożliwia analizę właściwości statycznych i dynamicznych podobnych systemów w różnych warunkach pracy.
2. Opracowany algorytm regulacji pracy sprężarkowej pompy ciepła pracującej w instalacji grzewczej budynku, którego cechą charakterystyczną jest możliwość samoadaptacji mocy urządzenia grzewczego i poszczególnych obiegów instalacji CO do aktualnego obciążenia cieplnego budynku. Osiągnięcie to ma dużą wartość poznawczą i użyteczną.
3. Wyniki badań doświadczalnych uzyskane na specjalistycznym stanowisku badawczym, które dostarczają wielu cennych informacji na temat rzeczywistych właściwości układów grzewczych wyposażonych w powietrzną pompę ciepła pracującą w trybie biwalentnym monoenergetycznym. Wyniki badań eksperymentalnych w formie przebiegów kluczowych parametrów systemu grzewczego mogą być wykorzystane w dalszych pracach Doktoranta oraz przez innych badaczy, np. do weryfikacji innych modeli symulacyjnych.

### **Uwagi krytyczne**

Lektura rozprawy doktorskiej skłania mnie do sformułowania kilku uwag krytycznych, które wymagają wyjaśnień Doktoranta.

1. W kilku miejscach pracy Doktorant podaje, że krzywe grzewcze stosowane w układach sterowania systemów grzewczych mają postać funkcji liniowej, z ewentualną

modyfikacją polegającą na ich „łamaniu”. Algorytm sterowania z krzywymi grzewczymi w postaci linowej stanowił również punkt odniesienia do oceny opracowanego adaptacyjnego układu regulacji, co zostało omówione w rozdziale 15. Tymczasem od wielu lat niektórzy producenci urządzeń grzewczych dostarczają sterowniki pogodowe z algorytmem sterowania opartym o krzywe grzewcze wyższego rzędu (np. firma Vaillant). Oczywiście, krzywe grzewcze wyższego rzędu nie rozwiązują wszystkich problemów pojawiających się w układach sterowania określających temperaturę zasilania systemu grzewczego w zależności od temperatury zewnętrznej, ale w praktyce sprawdzają się lepiej od liniowych krzywych grzewczych. Dlatego bardzo ciekawe byłoby porównanie opracowanego adaptacyjnego algorytmu regulacji pracy sprężarkowej pompy ciepła z układem regulacji bazującym na krzywych grzewczych niebędących funkcjami linowymi.

2. Autor pracy nie poświęcił należytej uwagi analizie błędów mierzonych parametrów. W całej pracy można znaleźć jedynie informację o typie i klasie dokładności zastosowanego czujnika temperatury oraz zakresach pomiarowych wybranej aparatury. Nie wyznaczono błędów pomiaru dla poszczególnych torów pomiarowych i całego systemu pomiarowego. Nie wskazano również dokładnej lokalizacji punktów pomiarowych na schemacie stanowiska badawczego. Zarówno błędy pomiarowe, jak i niewłaściwe położenie poszczególnych czujników i przetworników w tego typu badaniach eksperymentalnych mogą mieć duży wpływ na wyniki pomiarów.
3. Doktorant w treści pracy wielokrotnie posługuje się pojęciem „wydajność” pompy. Np. na str. 73 rozprawy można przeczytać, że „po osiągnięciu przez układ stanu ustalonego skokowo zwiększono wydajność pompy P1 z 20% do 40%, co w rezultacie spowodowało wzrost przepływu objętościowego wody przez skraplacz z 11,4 kg/min na 16,2 kg/min”. Na podstawie tego opisu można stwierdzić, że dwukrotny wzrost „wydajności” pompy spowodował wzrost przepływu masowego (a nie objętościowego!) o 4,8 kg/min, a więc o 42% w odniesieniu do wartości początkowej. W związku z tym chciałbym prosić Doktoranta o wyjaśnienie, co dokładnie kryje się w tym przypadku pod pojęciem „wydajność”? Można się tylko domyślać, że w rzeczywistości chodzi np. o sterownię prędkością obrotową silnika pompy, a wartości podane w procentach odnoszą się do maksymalnej prędkości obrotowej.
4. Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych Doktorant stwierdził, że straty w poszczególnych wymiennikach ciepła wynoszą odpowiednio 40% w przypadku skraplacza oraz 30% dla parownika. Są to bardzo duże straty, rzadko spotykane we współczesnych wymiennikach ciepła. Mogą one świadczyć np. o niepoprawnej izolacji cieplnej wymienników, dużych błędach pomiarów lub pomyłkach obliczeniowych. Nie zostało to jednak wyjaśnione w treści pracy. Nie wiadomo też dokładnie, dla jakich

warunków pracy układu zostały wyznaczone te wartości. A może są to wartości średnie dla jakiegoś przedziału? Na rys. 10.27 oraz rys. 10.29–10.31 można zaobserwować ciągłe zmiany analizowanych parametrów pracy układu oraz brak ich stabilizacji w całym przedstawionym zakresie pomiarowym.

5. W zaproponowanej przez Doktoranta strategii sterowania systemu centralnego ogrzewania zrezygnowano z wykorzystania czujnika temperatury na zewnątrz budynku. W obecnie stosowanych systemach grzewczych układ regulacji źródła ciepła na podstawie temperatury zewnętrznej określa pożądaną temperaturę wody grzewczej i w przypadku dużych zmian temperatur (np. między nocą i dniem) jest w stanie zmienić temperaturę wody grzewczej zanim dojdzie do wychłodzenia pomieszczeń lub ich przegrzania. Brak pomiaru temperatury zewnętrznej może więc opóźnić reakcję systemu grzewczego na zmiany zapotrzebowania ciepłego budynku, co zazwyczaj przekłada się na zwiększone koszty ogrzewania i pogorszenie komfortu cieplnego. Dlatego bardzo interesujące byłyby wyniki badań doświadczalnych proponowanego adaptacyjnego układu regulacji przy znacznych wahaniami temperatury zewnętrznej.
6. Badania eksperymentalne omówione w rozdziale 15 zostały wykonane przy zastosowaniu standardowego algorytmu bazującego na krzywych grzewczych oraz zaproponowanego algorytmu adaptacyjnego. Następnie uzyskane wyniki zostały ze sobą porównane. Należy jednak zauważyć, że podczas każdego z tych badań występowały inne warunki zewnętrzne. Podczas pierwszego testu, z zastosowaniem standardowej metody regulacji, temperatura zewnętrzna zmieniała się w zakresie od  $-1,5^{\circ}\text{C}$  do  $+2^{\circ}\text{C}$ . Z rys. 15.5 można odczytać, że podczas drugiego testu, z zastosowaniem nowego algorytmu, temperatura ta zmieniała się w zakresie od około  $+1^{\circ}\text{C}$  do  $+2^{\circ}\text{C}$ . Występowały więc istotne różnice i przy tej samej temperaturze wewnętrznej obciążenie cieplne budynku było w drugim przypadku mniejsze. Dlatego na podstawie uzyskanych wyników nie można jednoznacznie ocenić, czy korzystniejszy współczynnik COP (zmiana z 2,74 na 3,15) oraz mniejsze zużycie energii elektrycznej (o 42,55%) wynikały tylko ze zmiany algorytmu regulacji. Dodatkowo należy zauważyć, że badania te zostały wykonane w krótkim okresie czasu wynoszącym kilkanaście godzin i nie obejmowały nawet okresu jednej pełnej doby. Nie porównano również przebiegów temperatury wewnątrz pomieszczenia, a więc nie można porównać algorytmów pod względem zapewnienia komfortu cieplnego. Dlatego przedstawionych w pracy wyników weryfikacji eksperymentalnej nie traktowałbym jeszcze jako ostatecznych.

Przedstawione powyżej uwagi krytyczne są naturalne wobec złożoności podjętej tematyki badań i w dużej mierze mają charakter polemiczny. Dlatego tylko w niewielkim stopniu



zakłócają moją bardzo dobrą ogólną ocenę recenzowanej pracy i nie podważają osiągnięć Doktoranta.

### **Wniosek końcowy**

Opiniowana rozprawa doktorska dowodzi, że jej Autor posiada odpowiednią wiedzę i umiejętności w zakresie objętym tematem rozprawy. W celu postawionego problemu opracował własny model symulacyjny oraz wykonał serię obliczeń i badań eksperymentalnych. Zaproponował również swoją własną, oryginalną metodę regulacji pracy sprężarkowej pompy ciepła. Właściwie opisał przebieg wszystkich badań oraz umiejętnie zinterpretował ich wyniki. Dlatego pod względem merytorycznym oceniam pracę pozytywnie i stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Jacka Gajkowskiego spełnia warunki określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz 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 związku z powyższym wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie o dopuszczenie mgr inż. Jacka Gajkowskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



