

dr hab. inż. Paweł D. Domański, prof. uczelni
Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej
Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych
Politechnika Warszawska
ul. Nowowiejska 15/19
00-665 Warszawa

12 grudnia 2023 r.

S E K R E T A R I A T
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia 19. 12. 2023

Zarejestrowano pod nr

Podpis *dm*

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Mateusza Borkowskiego
pt. „Zwiększenie efektywności systemu chłodzenia
serwerowni w klimacie przejściowym z wykorzystaniem
układów sterowania i analizy danych”

wykonana na zlecenie Rady Dyscypliny Automatyka,
Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne
Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie

1. Ogólna charakterystyka, zakres, cel i teza rozprawy

Rozprawa doktorska przygotowana przez mgr. inż. Mateusza Borkowskiego jest zatytułowana „Zwiększenie efektywności systemu chłodzenia serwerowni w klimacie przejściowym z wykorzystaniem układów sterowania i analizy danych”. Praca była realizowana jako doktorat wdrożeniowy. Rozważa ona zagadnienia związane z analizą efektywności pracy systemu chłodzenia serwerowni oraz realizacją zadania jej poprawy. Praca ta jednoznacznie rozważa modernizację określonej serwerowni firmy POLCOM położonej w Skawinie koło Krakowa i praktycznie nie rozpatruje perspektywy bardziej ogólnej.

Praca zarówno w swojej wymowie jak i układzie podzielona jest na dwa elementy, rozdzielone merytorycznie i czasowo. Część pierwsza obejmuje zagadnienia związane z analizą konfiguracji układu chłodniczego oraz poprawą efektywności całego systemu poprzez lepsze harmonogramowanie załączania i wyłączania poszczególnych elementów chłodniczych. Te prace realizowane były w latach 2014–2015. Druga część rozprawy skupia się na zagadnieniach regulacyjnych związanych z przeprojektowaniem strategii sterowania. W tym etapie najpierw została zmodernizowana struktura systemu chłodzącego (rok 2017), zaś później, w latach 2021–2022, została zaprojektowana i wdrożona struktura nieliniowego regulatora rozmytego klasy PID wraz z systemem odsprzegania zakłóceń typu *feedforward* nazwanym „regulacją z krzywą”. Prace kończy analiza ekonomiczna wdrożonego rozwiązania.

Podsumowując, nadrzędnym celem recenzowanej rozprawy jest modernizacja rzeczywistego układu chłodzącego serwerowni, przy czym ogranicza się ona do owego jednostkowego

systemu wraz z jego dobrodziejstwem i ograniczeniami. Praca i jej zakres ewaluowały w czasie co jest mocno widoczne w układzie dokumentu rozprawy. Autor w dokumencie stawia tezę, że **modernizacja konfiguracji sprzętowej i programowej układu chłodniczego do systemu o otwartej architekturze wraz ze znajomością zmiennych warunków pracy pozwala na opracowanie dedykowanego algorytmu sterowania i w konsekwencji uzyskanie synergii wskaźników jakościowych wykazujących korzystne zmiany w zakresie zużycia energii i efektywności.**

Powyżej sformułowana i udowodniana przez Autora teza jest nierozdzielnie związana z rzeczywistym obiektem i jako taka wpisuje się w postać doktoratu wdrożeniowego.

2. Zawartość merytoryczna rozprawy

Praca podzielona jest na mniejsze zadania (tak jak już wyżej określono) rozpatrujące zagadnienia cząstkowe, tzn.

- identyfikację warunków klimatycznych,
- modernizację konfiguracji instalacji chłodniczej,
- modernizację komponentów (agregatów chłodniczych, chłodnic, pomp obiegowych, elektrozaworów),
- modernizację architektury systemu sterowania,
- modernizację systemu akwizycji i monitorowania,
- analizę danych historycznych,
- analizę funkcjonowania podzespołów wykonawczych
- oraz opracowanie indywidualnej metody sterowania.

W powiązaniu z tymi zagadnieniami i jako ich wynik Autor wymienia następujące rozwiązania autorskie zrealizowane w latach 2014–2023:

1. projekt algorytmu sterującego załączaniem i wyłączaniem rezerwowego agregatu chłodniczego BREF,
2. uruchomienie systemu sterowania opartego o powyższy algorytm w środowisku produkcyjnym,
3. projekt modernizacji systemu chłodzenia (przeprojektowanie ruraru chłodniczego pod kątem montażu agregatów chłodniczych typu Turbocor oraz jednostek Drycooler),
4. projekt systemu sterowania przełączaniem systemu chłodniczego pomiędzy trybami FC i CP wraz z układem czujników procesowych, elementami wykonawczymi oraz system wizualizacji,
5. uruchomienie w środowisku produkcyjnym system automatyki realizującej przełączanie systemu chłodniczego serwerowni pomiędzy trybami pracy FC i CP,
6. przeprowadzenie analizy danych historycznych od roku 2014, jako etap identyfikacji systemu chłodniczego pod kątem dalszego zwiększenia jego efektywności energetycznej,
7. opracowanie i wdrożenie dedykowanego regulatora hybrydowego temperatury wyjściowej z Drycoolera.

Rozprawa rozpoczyna się od jedynie pokrótce zarysowanego rozdziału (jedna strona) opisującego metodykę badań oraz wykorzystywany aparat algorytmiczny. Należy stwierdzić,

że tak sformułowana metodyka i opis algorytmów nie pozwala czytelnikowi zapoznać się jak i czym Autor będzie się posługiwał w dalszej części pracy. Takie podejście pozostawia ogromny niedosyt skazując czytelnika na odkrywanie metodyki rozprawy w trakcie jej czytania.

W dalszej części należałoby oczekiwać dogłębnej analizy przedmiotowej oraz (w przypadku doktoratu wdrożeniowego) implementacyjnej analogicznych rozwiązań zarówno występujących w literaturze naukowo-badawczej jak i komercyjnych. Jak się okazuje, w pracy nie ma dedykowanej części poświęconej temu zagadnieniu i czytelnik musi opierać się jedynie na skromnym przedstawieniu wybranej literatury zawartej we Wstępie.

Rozdział 2 pracy prezentuje ogólne informacje o rozważanej serwerowni i warunkach klimatycznych, w której przychodzi jej pracować. W części tej zaprezentowana jest analiza warunków pogodowych. Niestety należy ją ocenić jako pobieżną, gdyż ograniczona jest jedynie do temperatury (brak ciśnienia, wilgotności, może wiatru i jego kierunku) i obejmuje jedynie jeden rok – 2015. Nie da się ukryć, że trudno jest ekstrapolować roczną zmienność na podstawie analizy tylko jednego roku kalendarzowego; szczególnie, gdy weźmiemy pod uwagę obserwowaną ostatnio wysoką dynamikę zmian atmosferycznych. Analiza przeprowadzona jest z wykorzystaniem histogramów, współczynników rozkładu normalnego i wykresów pudełkowych (*ang.* boxplot).

Kolejny rozdział przechodzi do opisu systemu pierwotnego z zewnętrznym sterowaniem agregatami chłodniczymi. Rozdział ten prezentuje modyfikacje strategii załączania i wyłączania poszczególnych elementów systemu, który prowadzi do zwiększenia efektywności. Rysunek 3.2 (str. 19) stanowi kwintesencję merytoryczną tej części wdrożenia i prezentuje sekwencje załączeń poszczególnych elementów w zależności od pomiaru temperatury zewnętrznej. Pozostała część rozdziału dyskutuje otrzymane wyniki, które sprowadzają się do częstszego wykorzystywania trybu *freecooling* i ograniczenia trybu ze sprężarką. Jednocześnie Autor traktuje ten etap prac jako element poznawczy instalacji i właściwego zagadnienia, co wpisuje się w historię tworzenia rozprawy i jest tak naprawdę elementem koniecznym dowolnego procesu wdrożeniowego.

W rozdziale 4 Autor prezentuje modernizację warstwy sprzętowej systemu chłodniczego, która stanowi kontynuację wcześniejszych badań i wniosków otrzymanych z pierwszej fazy modernizacji. Zmodernizowana warstwa sprzętowa umożliwia dalszą poprawę sekwencji załączeń poszczególnych elementów idąc w kierunku wytyczonym w rozdziale 2. Analiza jest bardzo zbliżona do wcześniejszej idąc w kierunku maksymalizacji wykorzystania trybu *freecooling*. Rozdział, tak jak wcześniej kończy się analogiczną, choć bardziej dokładną, analizą ekonomiczną otrzymanych wyników. Należy zauważyć, że przyczyny wykazanej poprawy są niejasne. Nie wiemy czy wynikają z modernizacji sprzętu czy też sterowania.

Zagadnienia przedstawione do tego miejsca zajmowały się analizą stanów ustalonych i rozważane sterowanie dotyczyło sekwencji wykorzystywania poszczególnych urządzeń. Dalsza część pracy próbuje znaleźć dalsze zwiększenie efektywności oraz kolejne oszczędności w poprawie stanów przejściowych układu, a w szczególności regulacji dynamicznej Drycoolera.

Istniejąca infrastruktura regulacyjna Drycoolera oraz jej analiza jest przedstawiona w rozdziale 5. Niestety ze względu na ograniczenia technologiczne Autor nie dysponuje ani

dostępem, ani wystarczającą dokumentacją istniejącego układu sterowania wykorzystującego, jak to jest opisane, algorytm PID. Autor wykazuje jego niedostateczne, nad wyraz oscylacyjne (na granicy stabilności) jego działanie. Niestety Autor nie pokusił się o próbę identyfikacji przyczyn takiego a nie innego złego działania układu tym samym nie wiadomo, czy przyczyna leży po stronie błędnego strojenia, czy też błędnej jego konfiguracji.

W tym miejscu Autor wprowadza pojęcie „regulacji z krzywą”. Taka nazwa niestety jest myląca, gdyż czytelnik oczekiwałby struktury z charakterystyką statyczną gdzie układ regulacji miałby na celu doregulowanie błędu charakterystyki statycznej. Niestety do tego miejsca pracy nie ma żadnego rysunku struktury układu regulacji i czytelnik musi się domyślać o co chodzi. Idea tak nazwanej „regulacji z krzywą” znajduje wyjaśnienie dopiero na rysunku 7.1 dwa rozdziały dalej. Jego analiza wskazuje, że owa „regulacja z krzywą” to nic innego jak tylko statyczne odsprzęgnięcie wpływu zakłócenia, tzn. temperatury zewnętrznej. W tym miejscu od razu pojawia się analogia z układami sterowania pieców domowych, gdzie analogiczne podejście jest stosowane. Rozdział 6 prezentuje długoterminową analizę działania proponowanej „regulacji z krzywą”.

Dopiero kolejny rozdział 7 wprowadza strukturę nieliniowej regulacji dynamicznej z wykorzystaniem regulatora rozmytego klasy PID, przy czym nieliniowość realizowana poprzez układ rozmywania dotyczy tylko części PD, zaś całkowanie jest klasyczne. Rysunek 7.1 tłumaczy strukturę i szkoda, że znajduje się tak późno. „Regulacja z krzywą” okazuje się statycznym odsprzęgnięciem zakłóceń, zaś za odpowiedź dynamiczną odpowiedzialny jest regulator rozmyty, zwany hybrydowym. Układ regulacji jest przebadany i pokazana jest jego wyższość wobec oryginalnie zabudowanego przez Producenta regulatora PID. W tym miejscu należy zwrócić uwagę na mylący układ pracy. Jako że na początku nie ma dokładnego opisu metodyki pracy czytelnik jest „zagubiony” i niekoniecznie musi od razu wiedzieć o co chodzi Autorowi, szczególnie, że w układach regulacji z odsprzęgnięciem najpierw rozważa się regulator dynamiczny pracujący w pętli sprzężenia zwrotnego (*feedback*), a dopiero później elementy pracujące na zewnątrz pętli (*feedforward*).

Zaproponowana i wdrożona struktura rozmytej regulacji PID ze statycznym odsprzęgnięciem zakłócenia jest porównana z producenckim układem PID i Autor wykazuje jej wyższość. Dwa kolejne rozdziały pracy (8 i 9) zawierają przedstawienie wyników ekonomicznych rozwiązań. Z punktu widzenia właściciela serwerowni i samego wdrożenia stanowią one potwierdzenie sensowności prac i usprawiedliwiają doktorat wdrożeniowy.

Niemniej nie można pominąć jednej kwestii. Autor rozważa jedną jedyną strukturę zmodernizowanego systemu. Jeśli mówimy o statycznych elementach modernizacji, można przyjąć, że fakt, iż one działają praktycznie broni się sam. Choć wciąż pozostaje pytanie czy nie można było zrobić tego lepiej. Żeby móc to stwierdzić, należałoby albo wprowadzać i testować różne struktury (na co oczywiście właściciel serwerowni, tej czy innej, nigdy by nie zezwolił) lub zbudować model symulacyjny obiektu. A wtedy różne struktury można badać do woli. Niestety Autor nie pokusił się o ten element i porównanie ograniczone jest jedynie do podejścia „before” and „after”.

Z punktu widzenia właściciela obiektu jest to wystarczające. Z perspektywy badawczej pozostawia spory niedosyt. Szczególnie dyskusyjny może być wybór rozmytego „regulatora

z krzywą”, gdyż narzucającym się rozwiązaniem i to nie tylko od strony badawczej ale i z praktyki wdrożeniowej w przemyśle procesowym jest układ regulacji dwu-punktowej czyli regulator PID wraz z dynamicznym odsprzęganiem zakłóceń. Ze względu na nieliniowość procesu prosto można go przykładowo wzbogacić o aktualizację parametrów względem punktu pracy (*gain scheduling*), zaś układ *feedforward* można zrealizować prosto za pomocą dwóch przeciwstawnych inercji.

Oczywiście jest to tylko jedna z wielu możliwych propozycji, gdyż w literaturze można znaleźć ich sporo. Zbudowanie poprawnego układu symulacji procesu – nie musi być w pełni idealny – pozwoliłoby usystematyzować proces badawczy i racjonalnie uargumentować taki a nie inny wybór. Bez tego elementu czytelnik jest ograniczony do jednego Autorskiego wyboru.

Jako że otrzymane rezultaty zostały osiągnięte metodą prób i błędów, trudno jest generalizować proponowane podejście, zarówno to statyczne jak i dynamiczne; szczególnie, w pracy brakuje udokumentowanej procedury dojścia do rozwiązania docelowego. Analogicznie do wcześniejszego komentarza dotyczącego symulatora, takie rozwiązanie jest jednostkowe i wystarczające z punktu widzenia tej jednej instalacji.

3. Ocena rozprawy

Ocena rozprawy doktorskiej p. Mateusza Borkowskiego podzielona jest na trzy części: merytoryczną, językową oraz redakcyjną.

3.1. Ocena merytoryczna rozprawy

Ocena merytoryczna rozprawy jest wystarczająca, szczególnie biorąc pod uwagę perspektywę doktoratu wdrożeniowego. Proces tworzenia takiej rozprawy jest dość specyficzny i w dużej mierze dziedziczy wszelkie „uroki” pracy obiektowej. Z jednej strony Autor musi pamiętać, że nadrzędnym celem jest bezpieczeństwo instalacji i w żadnym miejscu nie można sobie pozwolić na błędy, które zakłóciłyby jej normalną pracę. Tym samym Autor jest poważnie ograniczony i nie może sobie na wiele pozwolić. Równocześnie Autor może odczuwać tę wielką satysfakcję, kiedy to zaproponowane rozwiązanie działa i przynosi oczekiwane zyski. Z tej perspektywy Autor wykonał swoje zadanie poprawnie i zgodnie ze sztuką.

Jednakże część badawcza, która to jednak powinna być zawarta w rozprawie pozostawia wiele do życzenia. Poniżej wymienione są podstawowe zastrzeżenia:

1. Przegląd literatury przedmiotu jest bardzo ograniczony. Trudno znaleźć znaczącą ilość odniesień zarówno po stronie komercyjnej, czyli brakuje przeglądu rozwiązań konkurencyjnych jak też przegląd rozwiązań badawczych jest raczej szczątkowy, a należałoby oczekiwać wielu rozwiązań, szczególnie, że zbliżone zagadnienia były rozważane przykładowo podczas konferencji 2018 IFAC Conference on Advances in Proportional-Integral-Derivative Control.
2. Brakuje szczegółowego opisu metodyki pracy, który wprowadziłby czytelnika w zagadnienie i ograniczył błędne interpretacje.

3. Brak modelu obiektu, zarówno jego charakterystyk w stanie ustalonym jak i modelu dynamicznego dla zagadnień regulacji Drycoolera. Autor nie spróbował ani podejść do budowy modelu empirycznego, ani analitycznego.
4. Istniejący układ regulacji Drycoolera pozostaje nie rozpoznany i nieznana jest przyczyna niskiej jakości jego pracy i wprowadzanych oscylacji.
5. Brak modelu znakomicie utrudnia argumentację za wprowadzoną strukturą regulacji. Dlaczego Autor zastosował taką a nie inną? jakie są inne możliwości?
6. Analiza z perspektywy klimatycznej ograniczona jest do jednego roku, co raczej jest niewystarczające. Również uwzględnione są jedynie temperatury powietrza a przecież inne jego parametry (wilgotność i ciśnienie) też są istotne dla procesu.
7. Analiza statystyczna jest wielce uproszczona i ograniczona jest do rozkładów normalnych, które to akurat w wypadku badań atmosferycznych nie są wiążące.
8. Autor mógłby pokusić się o generalizację doświadczeń w postaci zdefiniowania procedury (ścieżki) modernizacyjnej dla systemów chłodzenia serwerowni.
9. W pracy dość ograniczona jest analiza alternatywnych ścieżek modernizacji takich jak akumulatory ciepła/zimna czy też odzyskiwanie ciepła. Warto byłoby się pokusić o dyskusję takich rozwiązań i możliwych przez nie do osiągnięcia rezultatów.

3.2. Poprawność językowa rozprawy

Rozprawa pracy jest napisana poprawnym językiem, choć Autor nie ustrzegł się dwóch niedociągnięć. Po pierwsze część nazewnictwa jest nie wytłumaczona. Czytelnik nie będący bliżej tych zagadnień nie musi od razu rozumieć co oznacza freecooling czy też drycooling. Po drugie Autor nie ustrzegł się stosowania żargonu dziedzinowego, jak np. „zapad napięcia”, „rurarz”, „strategia kontroli” czy też „regulacja z krzywą”. Ponadto na stronie 79 znajduje się określenie „najbardziej optymalny”, co nie powinno mieć miejsca. Przymiotnik optymalny jest niestopniowalny.

3.3. Poprawność redakcyjna rozprawy

Poniżej zamieszczone są uwagi redakcyjne:

1. Autor stosuje niekonsekwentne oznaczenia, i tak średnia jest oznaczana jako μ , \hat{x} i \bar{x} (na jednej stronie – 7).
2. W pracy znajdują się nieopisane oznaczenia, takie jak: SSE, SST.
3. Nie zawsze wiadomo, co znajduje się na rysunkach, jak np. 2.3, 2.4, 2.5
4. Układ pracy jest dyskusyjny. Prowadzenie rozważań z perspektywy chronologicznej wdrożenia prowadzi do niejasności interpretacyjnych.
5. Część z zagadnień powinna być zilustrowana właściwymi schematami; i tak brakuje schematu istniejącego układu regulacji, schematu układu PID z krzywą, zaś diagram 3.2 jest trudny w interpretacji.
6. Pozostawione są wolne miejsca, jak np. na stronie 83, 87 i 93.
7. Bibliografia jest niekonsekwentnie edytowana. Autor czasami opisuje autorów pełnym imieniem, a czasami tylko inicjałami.

4. Ocena dorobku publikacyjnego Doktoranta

Rozważania Autora obejmujące zakres merytoryczny niniejszej rozprawy znalazły odzwierciedlenie w trzech opublikowanych artykułach naukowych i trzech innych znajdujących się w procesie decyzyjnym:

1. Mateusz Borkowski and Adam Krzysztof Piłat. Saving energy and efficiency increase by enabling freecooling mode for cooling system in data center. *Energy Proceedings*, 23, November 2021. International Conference on Applied Energy, Thailand.
2. Mateusz Borkowski, Adam Krzysztof Piłat. Customized data center cooling system operating at significant outdoor temperature fluctuations. *Applied Energy*, 306:117975, January 2022
3. Mateusz Borkowski and Adam Krzysztof Piłat. Energy efficiency increase achieved by dedicated rule-based control of chillers operating in the data center. *Energies*, 15(7):2419, March 2022.
4. Mateusz Borkowski and Adam Krzysztof Piłat. Economic assessment of energy conversion and use of electrical energy after data center cooling control system modernization. in review, September 2023.
5. Mateusz Borkowski and Adam Krzysztof Piłat. Efficiency grow, energy savings, and co2 reduction by modernization and intelligent control cooling system in data center. in review, 2023. *International Conference on Applied Energy*, Qatar.
6. Mateusz Borkowski and Adam Krzysztof Piłat. Improved drycooler control by the identified nonlinear cooling characteristics. in review, 2023.

Powyższy dorobek nie jest bogaty, ale z punktu widzenia doktoratu wdrożeniowego samo modernizacja działania systemu chłodzenia serwerowni jest najlepszym świadectwem wdrożenia. Oczywiście jeśli Autor zbudowałby model procesu, ta automatycznie pojawiłby się znacznie szerszy materiał umożliwiający kolejne publikacje.

5. Inne osiągnięcia Doktoranta

Nie dotyczy.

6. Przydatność rozprawy dla nauk technicznych

Rozprawa a w szczególności związane z nią wdrożenie i modernizacja systemu chłodzenia dla serwerowni POLCOM jest wynikiem bardzo istotnym dla nauk technicznych, szczególnie z perspektywy wdrożeniowej. Wprowadza ona do świata naukowego specyfikę wdrożeniową, która jest zupełnie inna od sterylnego świata akademii. Równocześnie definiuje ona zagadnienie badawcze wartę dalszych badań mając na uwadze coraz większe wymagania dotyczące ograniczenia zużycia energii i powiązane ograniczenia emisyjne, nie tylko CO₂ ale i zanieczyszczenia cieplne.

7. Podsumowanie

Podsumowując, rozprawa doktorska przygotowana przez mgr. inż. Mateusza Borkowskiego i zatytułowana „Zwiększenie efektywności systemu chłodzenia serwerowni w klimacie przejściowym z wykorzystaniem układów sterowania i analizy danych” spełnia wymagania dla doktoratu wdrożeniowego, pomimo wymienionych w recenzji braków.

Mgr inż. Mateusz Borkowski zrealizował podany na wstępie cel rozprawy, a także wykazał słuszność sformułowanej tezy. Wykazał się przy tym wiedzą, umiejętnością samodzielnego rozwiązywania trudnych problemów technicznych oraz praktyką obiektową. Dlatego stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca doktorska pt. „Zwiększenie efektywności systemu chłodzenia serwerowni w klimacie przejściowym z wykorzystaniem układów sterowania i analizy danych” spełnia wymagania ustawowe, określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce, art. 186 (Dz. U. 2018 poz. 1668). Wniosuję o jej przyjęcie, a także dopuszczenie do publicznej obrony.

Ryszard D. Domaradzki