

AGH

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

DYSCYPLINA AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA I
TECHNOLOGIE KOSMICZNE

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Zwiększenie efektywności systemu chłodzenia serwerowni w klimacie przejściowym z wykorzystaniem układów sterowania i analizy danych

Autor: Mateusz Borkowski

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Adam Krzysztof Piłat, prof. u.

Praca wykonana: Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii
Biomedycznej

Kraków, 2023

1 Wstęp

Aktualnie obserwowany rozwój i popularyzacja nowych technologii w obszarze IT niosą za sobą wzrost zapotrzebowania na moc obliczeniową oraz przestrzeń dyskową. Pociąga to za sobą wzrost zapotrzebowania na między innymi usługi kolokacji oraz usługi chmurowe. Budynkami przeznaczonymi do świadczenia tego typu usług są profesjonalne centra danych (ang. Data Center). To specyficzne obiekty produkcyjne pod względem rodzaju zużywanych surowców i materiałów do prowadzenia procesu produkcyjnego. W większości przypadków, głównym surowcem zużywanym do prowadzenia procesu produkcyjnego jest energia elektryczna. Zasila sprzęt IT, który dostarcza zasoby mocy obliczeniowej i przestrzeni dyskowej. Dostarczona energia elektryczna w nieznacznym stopniu używana do wytworzenia mocy obliczeniowej, praktycznie w całości jest oddawana przez sprzęt IT jako odpad w postaci energii cieplnej. Jednocześnie ze wzrostem zapotrzebowania na usługi Data Center rośnie również ilość zużywanej przez nie energii elektrycznej. Następnie energia cieplna zostaje przetransportowana na zewnątrz budynku i rozproszona w powietrzu zewnętrznym przy pomocy systemu chłodniczego, który do procesu transferu i rozproszenia energii cieplnej na zewnątrz budynku również zużywa energię elektryczną. Zatem wraz ze wzrostem zapotrzebowania na usługi świadczone przez Data Center obserwowany jest wzrost ilości zużywanej przez nie energii elektrycznej. Budynek typu Data Center może pobierać około od 50 do 100 razy więcej energii elektrycznej niż standardowe budynki biurowe.

Rozprawa doktorska przedstawia sposób ograniczenia zużycia energii elektrycznej przez system chłodniczy w komercyjnej pracującej serwerowni firmy POLCOM. Ograniczenie to osiągnięto poprzez zwiększenie efektywności systemu chłodzenia, wykorzystując metody analizy danych historycznych oraz modyfikację systemu chłodniczego w zakresie sprzętowym oraz programowym (ze szczególnym uwzględnieniem układów sterowania).

Na wstępie poddano analizie aktualną sytuację rynkową oraz rozpoznano rozwiązania istniejące na rynku. Wzięto pod uwagę możliwości ich zastosowania w serwerowni POLCOM. Przeprowadzona analiza dała możliwość podjęcia strategicznej decyzji o kierunku rozwoju systemu chłodniczego. Stwierdzono, że na rynku brakuje gotowego, wyspecjalizowanego i dowolnie konfigurowalnego rozwiązania do chłodzenia serwerowni.

W celu określenia punktu wyjścia do realizacji doktoratu dokonano analizy pracy pierwotnie zamontowanych w serwerowni POLCOM zewnętrznych agregatów chłodniczych BREF. Analizie poddano następujące dane za rok 2015: temperaturę zewnętrzną, pobór mocy elektrycznej przez agregaty chłodnicze, zapotrzebowanie na moc chłodniczą agregatów chłodniczych. Na podstawie obserwacji, wiedzy specjalistycznej oraz danych o poborze mocy elektrycznej określono tryb pracy agregatów chłodniczych za okres 2015 roku (tryb sprężarkowy - CP, tryb freecooling - FC). Dokonano analizy wydajnościowej oraz efektywnościowej pracy systemu chłodzenia w korelacji z temperaturą zewnętrzną, trybem pracy oraz zapotrzebowaniem na moc chłodniczą. Określono i przeanalizowano wady i zalety

systemu chłodniczego i zaproponowano możliwości zwiększenia jego wydajności poprzez modernizację zarówno systemu chłodniczego jak i systemu sterownia.

2 Zwiększenie efektywności systemu chłodzenia jako efekt przeprowadzonych prac badawczo-rozwojowych

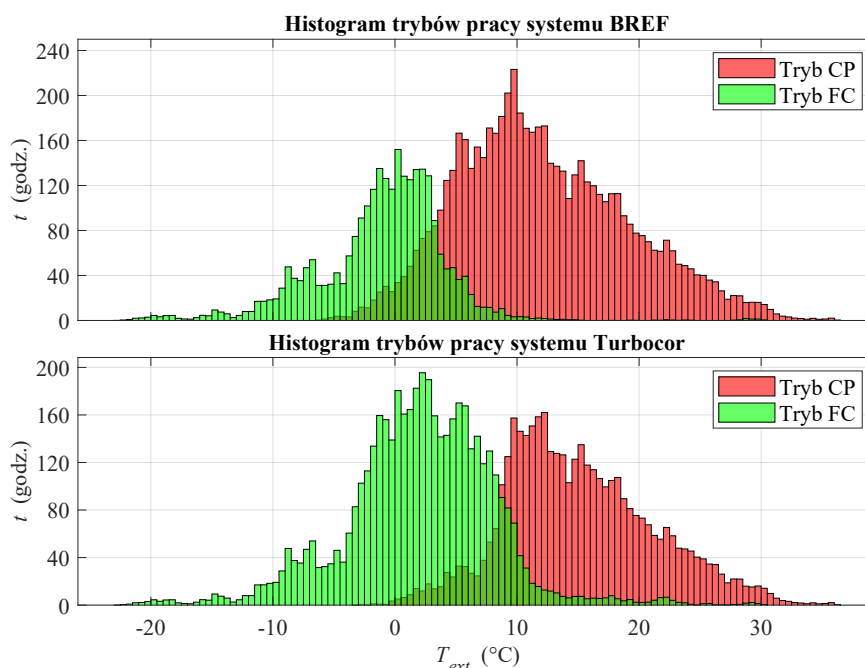
Na podstawie zebranych danych historycznych z istniejącego systemu chłodniczego, opracowano jego modernizację, polegającą na wymianie agregatów chłodniczych BREF na agregaty TURBOCOR wyposażone w nowoczesne sprężarki odśrodkowe łożyskowane magnetycznie. Dodatkowo podjęto decyzję o instalacji suchych chłodnic cieczy (ang. drycooler-ów), elektrozaworów oraz sterowanych pomp obiegowych. Ponieważ urządzenia te posiadają autonomiczne, zamknięte systemy sterowania, niemożliwe było zrealizowanie optymalnej współpracy pomiędzy nimi bez dedykowanego nadrzędnego systemu sterowania. Konieczne okazało się więc opracowanie autorskiego nadrzędnego systemu zarządzającego pracą systemu chłodniczego, który z powodzeniem wdrożono w serwerowni.

Głównym celem modernizacji systemu chłodzenia serwerowni było wydłużenie czasu pracy systemu chłodniczego w trybie bezsprężarkowym (ang. freecooling - FC). W celu weryfikacji spełnienia założonych celów dokonano analizy porównawczej wdrożonej modernizacji systemu chłodniczego. W szczególności dokonano porównania parametrów pracy standardowych agregatów chłodniczych z agregatami chłodniczymi nowej generacji zbudowanych w oparciu o sprężarki z wirnikiem łożyskowanym magnetycznie, współpracujących z suchymi chłodnicami cieczy (ang. Drycooler). Przeprowadzona analiza dotyczyła dwóch trybów pracy systemu chłodniczego: sprężarkowego oraz bezsprężarkowego (ang. freecooling). Jako baza do analizy posłużyły dane pomiarowe zebrane przez systemy monitorujące pracę systemu chłodniczego serwerowni POLCOM.

Wykres 1 przedstawia czas pracy systemu chłodniczego w danym trybie pracy, w odniesieniu do temperatury zewnętrznej. Osobno przedstawiono wykres dla agregatów BREF oraz dla agregatów Turbocor. Widoczne są dwa rozkłady odpowiadające pracy sprężarkowej (czerwony kolor) oraz pracy freecooling'owej (zielony kolor). Oś symetrii rozkładu pracy freecoolingowej wynosi dla systemu BREF 0°C, dla systemu Turbocor 4°C. Oś symetrii rozkładu pracy sprężarkowej wynosi dla systemu BREF 11°C, dla systemu Turbocor 13°C.

System Turbocor osiągnął dłuższy czas pracy w trybie FC w stosunku do systemu BREF. Różnica w czasie pracy freecoolingowej dla tych systemów wyniosła 2064 godziny. Czas pracy systemu Turbocor w trybie FC w odniesieniu do czasu pracy systemu BREF w trybie FC wydłużył się więc o 78%. Modernizacja systemu chłodzenia miała wymierny wpływ na poprawę czasu pracy w trybie FC.

Przeprowadzono roczną obserwację pracy wdrożonego systemu automatyki, działającego nieprzerwanie w środowisku produkcyjnym. Z uwagi na swój indywidualny charakter i ilość danych jest do unikalna baza do prowadzenia dalszych badań i analiz.



Rysunek 1: Histogram pracy trybów pracy systemów chłodniczych w roku 2017

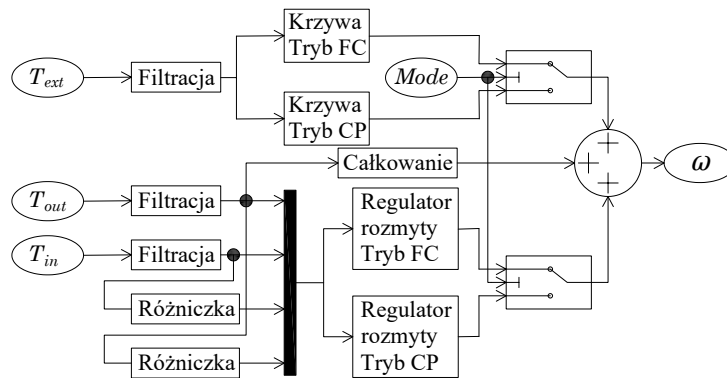
Wdrożony system automatyki potwierdził zakładane cele w zakresie niezawodności pracy, działając bezawaryjnie na przestrzeni roku, przynosząc firmie oszczędności w wydatkach związanych z pracą systemu chłodniczego. System pracował poprawnie w szerokim zakresie temperatur zewnętrznych, zarówno w okresie letnim, zimowym jak i przejściowym. Został on określony jako system sprawdzony i przebadany w warunkach praktycznych na tyle, że za bezpieczne dla ciągłości produkcji określono możliwość jego dalszej modernizacji i optymalizacji.

3 Eliminacja oscylacji temperaturowych w systemie chłodniczym poprzez wdrożenie dedykowanego regulatora hybrydowego

Na podstawie analizy pracy Drycoolera stwierdzono, że zaimplementowany fabrycznie w sterowniku Drycoolera regulator temperatury wyjściowej z (typu PID) pracował niepoprawnie. Objawiało się to powstawaniem, niebezpiecznych dla trwałości systemu chłodniczego oscylacji temperatury wyjściowej z Drycoolera. Opracowano więc i wdrożono dedykowany, hybrydowy regulator temperatury cieczy wyjściowej z Drycoolera, przez co uzyskano poprawę wskaźników jakościowych regulacji oraz wyeliminowano oscylacje temperaturowe, które obserwowano się w zmodernizowanym systemie chłodniczym.

Uproszczony schemat ideowy regulatora hybrydowego prezentuje rysunek 2. Sygnały wejściowe (T_{ext} - temperatura zewnętrzna, T_{in} - temperatura wejściowa do Drycoolera oraz T_{out} - temperatura wyjściowa z Drycoolera) są filtrowane. Następnie sygnał T_{ext} trafia do bloku zawierającego charakterystykę krzywej wydajności Drycoolera, a wyjście z tego bloku

trafia na sumator. Kolejnym wejściem sumatora jest sygnał z regulatora rozmytego, trzecim jest wartość całki błędów regulacji. Dodatkowo liczona jest również \dot{T}_{in} i \dot{T}_{out} . Różniczki trafiają na wejścia regulatora rozmytego. Sygnał wejściowy *Mode* jest informacją dla regulatora o aktualnym trybie pracy (FC lub CP).



Rysunek 2: Uproszczona struktura regulatora hybrydowego

3.1 Regulator rozmyty zawarty w regulatorze hybrydowym

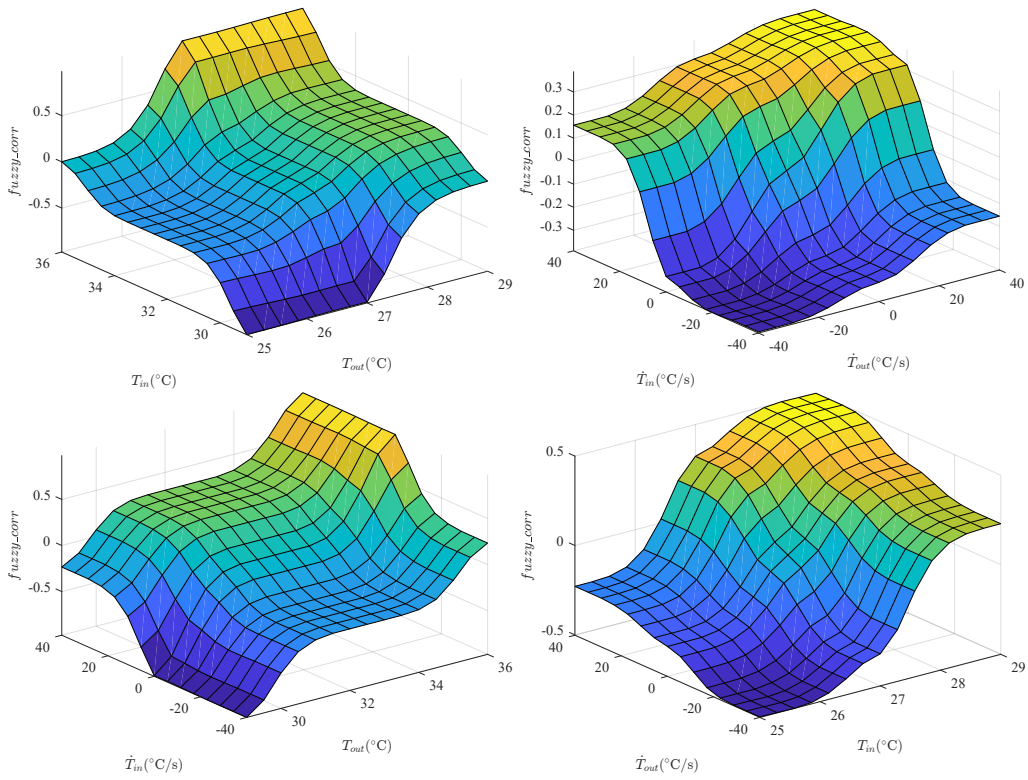
Jako wejścia regulatora rozmytego wykorzystano następujące sygnały: T_{in} , T_{out} oraz różniczki tych sygnałów. Łącznie regulator posiadał więc cztery wejścia. Jako wyjście regulatora ($fuzzy_{corr}$) określono korektę w zakresie od -1 do 1 aktualnej prędkości obrotowej wynikającej z wartości krzywej.

Zastosowano regulator typu MAMDANI o następującej konfiguracji: metoda AND została ustawiona jako PROD, metoda implikacji jako MIN, metoda agregacji jako SUM. Jako metodę defuzyfikacji ustawiono metodę Centroid reprezentującą środek ciężkości. W efekcie uzyskano następujące powierzchnie sterowania (rysunek 3 dla trybu CP oraz 4 dla trybu FC).

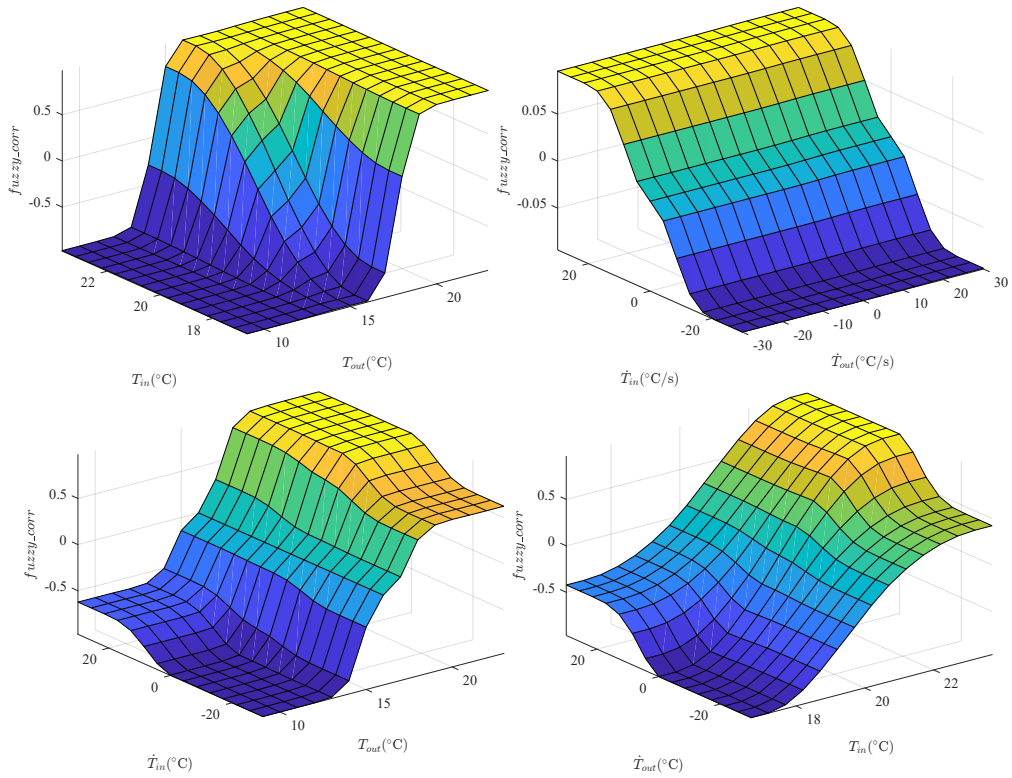
Rezultat pracy regulatorów przedstawia wykres 5. Obserwujemy poprawę jakości sterowania przy zastosowaniu dedykowanego regulatora. Pierwsze przeregulowanie zostało ograniczone z 31,0°C do 29,0°C, a więc odchyłka względem wartości zadanej została obniżona z 4°C do 2°C (o 50%). Wyeliminowano również drugie przeregulowanie, które nie występuje przy regulatorze dedykowanym.

Poprawie uległ również czas stabilizacji temperatury T_{out} w obszarze 27°C±°C. W przypadku regulatora PID wynosił 916 sekund a w przypadku regulatora rozmytego 807 sekund. Uległ więc skróceniu o 109 sekund (o 12%).

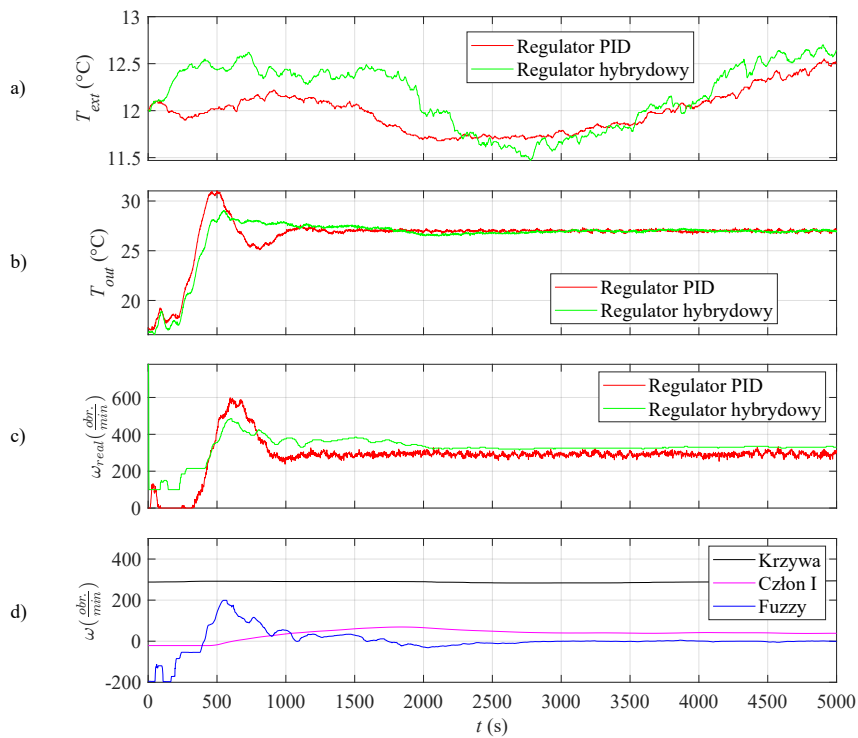
Zaobserwowano, że tendencja regulatora PID do generowania oscylacji w układzie regulacji uwidacznia się szczególnie przy niskich wartościach temperatury zewnętrznej. Im niższa wartość temperatury zewnętrznej, tym większa podatność układu regulacji na wejście w stan oscylacji. Zbadano to zagadnienie i wybrano kolejne dwa miarodajne przebiegi, tak, aby porównać zachowanie się regulatorów w omawianych niesprzyjających warunkach.



Rysunek 3: Powierzchnie sterowania dla trybu CP

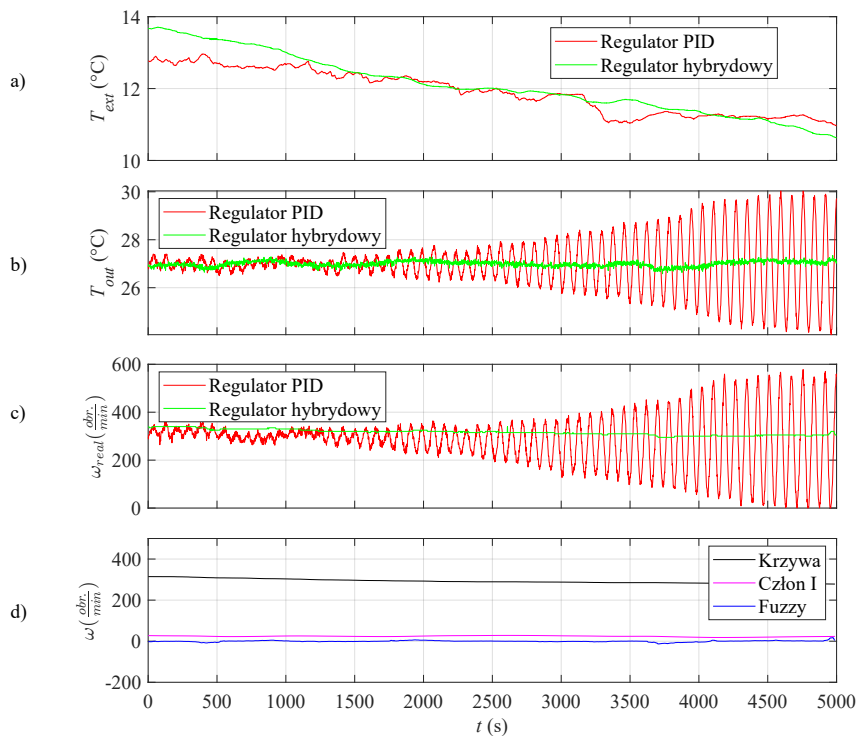


Rysunek 4: Powierzchnie sterowania dla trybu FC



Rysunek 5: Porównanie regulatorów PID i hybrydowego po przełączeniu systemu chłodniczego w tryb CP

Przebiegi temperatury T_{ext} w porównywalnych warunkach prezentuje wykres 6a. W obu przypadkach temperatura T_{ext} charakteryzuje się trendem malejącym (z okolic 13°C do około 11°C w czasie 5000 sekund).



Rysunek 6: Porównanie pracy regulatorów PID i hybrydowego przy niskiej temperaturze T_{ext}

Wykres 6b prezentuje przebieg temperatury T_{out} . W przypadku regulatora PID obserwowano pojawianie się narastających oscylacji od około 1250 sekundy. Zwiększają się one z czasem, aż do ustabilizowania na poziomie 24°C do 31°C . Regulator rozmyty pracuje w podobnych warunkach poprawnie i nie dopuszcza do pojawienia się oscylacji w badanym układzie, a odchyłka od wartości zadanej wynosi jedynie $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$.

Wyjście z regulatora rozmytego zachowuje się dużo bardziej stabilnie w stosunku do regulatora PID (patrz wykres 6c). W dużej mierze wartość sterowania jest stała w czasie. Mamy jedynie do czynienia z chwilowymi korektami wartości sygnału sterującego.

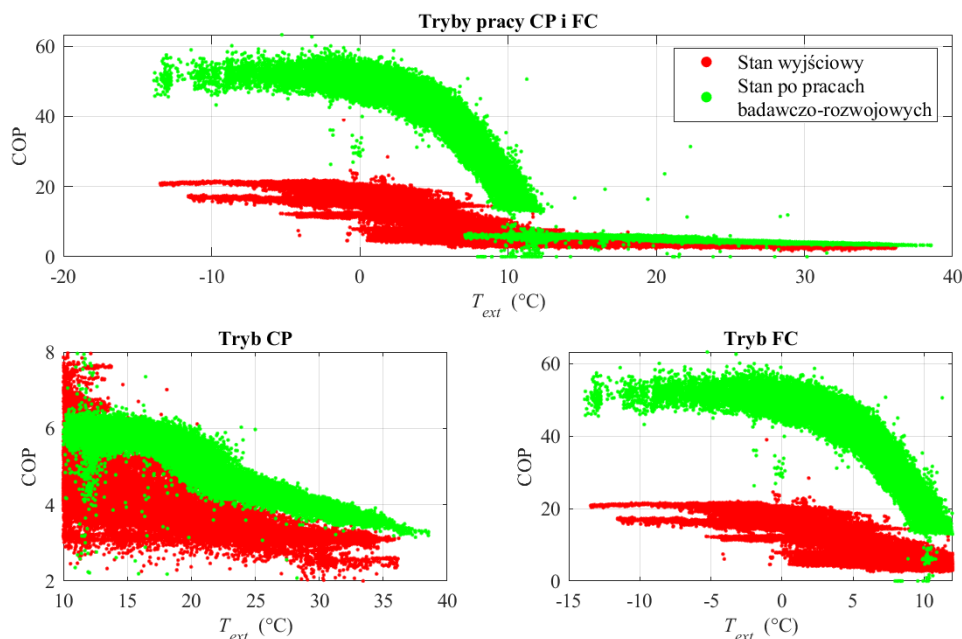
Wykres 6d pokazuje przebieg wartości poszczególnych członów regulatora hybrydowego (wartość krzywej sterowania, wartość całki oraz wyjście z regulatora hybrydowego). Dodatkowo, na tym wykresie, odczytać możemy wartość temperatury T_{ext} , wartość sygnału wyjściowego z regulatora (ω_{real}) oraz wartość temperatury T_{out} .

Największą dynamikę zmian w tym przypadku wykazuje wartość krzywej, która nadąża za zmianą temperatury zewnętrznej T_{ext} . Obserwujemy również niezerową wartość całki z czego wynika, że jest ona konieczna, aby skompensować błąd regulacji. Sygnał z regulatora rozmytego charakteryzuje się krótkotrwałymi, chwilowymi korektami prędkości obrotowej, ponieważ mamy do czynienia z pracą w warunkach ustalonych, regulator rozmyty i całka mają niewielki udział w całościowej wartości sygnału sterującego a największym udziałem charakteryzuje się wartość krzywej sterowania.

4 Podsumowanie

Prace badawczo-rozwojowe zakończyły się opracowaniem rozwiązania zmniejszającego zużycie energii elektrycznej przez system chłodniczy serwerowni. Rozwiązanie zostało wdrożone i z powodzeniem pracuje w warunkach produkcyjnych. Dodatkowo w trakcie przeprowadzonych prac rozpoznano nowe niedoskonałości w działaniu systemu chłodniczego (oscylacje temperaturowe). Wpływały one negatywnie na trwałość systemu. Wyeliminowano je dzięki opracowaniu i wdrożeniu dedykowanego regulatora hybrydowego.

W celu całościowego spojrzenia na przeprowadzone prace postanowiono porównać dane dotyczące efektywności systemu chłodniczego po przeprowadzonych pracach (od połowy roku 2022 do połowy roku 2023) z danymi z przed rozpoczęcia badań (z roku 2015). W tym celu przygotowano wykres 7 prezentujący wartość współczynnika efektywności energetycznej COP systemu z przed i po modernizacji.



Rysunek 7: Efektywność energetyczna systemu chłodniczego z przed i po przeprowadzonych pracach badawczo-rozwojowych

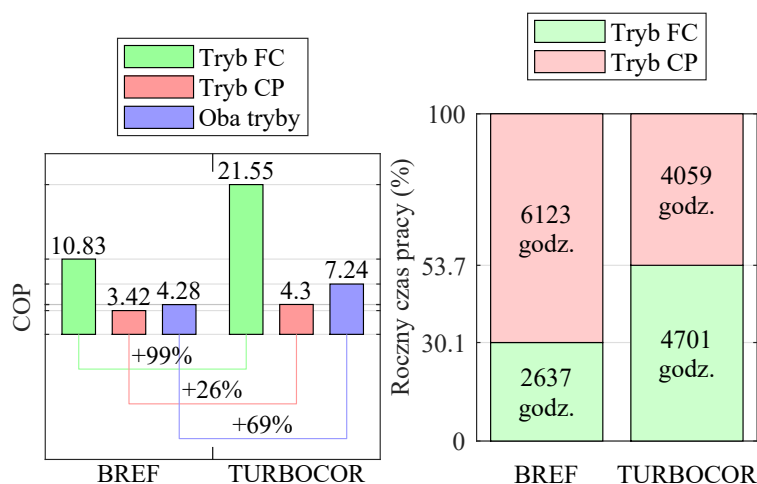
Dzięki przeprowadzonym pracom badawczo-rozwojowym poszerzono zakres wiedzy w obszarze pracy systemu chłodniczego, w szczególności agregatów chłodniczych i suchej chłodniczy cieczy (ang. Drycooler). Określono możliwości modernizacji systemu chłodniczego pod kątem sterowania maksymalizującego czas pracy w trybie bezsprężarkowym (ang. freecooling). Opracowano algorytm regulatora nadrzędnego sterującego systemem chłodniczym oraz regulator hybrydowy temperatury wyjściowej z Drycoolera, wykorzystujący logikę rozmytą.

Pomimo ograniczeń występujących w powszechnie dostępnych na rynku rozwiązaniach układów chłodniczych, opracowano unikalne i dedykowane rozwiązanie, uwzględniające spe-

cyficzne warunki klimatyczne konfiguracji POLCOM Data Center. Analiza pracy pracującej produkcyjnie serwerowni pozwoliła na indywidualny dobór elementów układu chłodzenia i zaprojektowanie dedykowanego układu sterowania. Założony cel modernizacji, jakim było wydłużenie czasu pracy układu w trybie FC, został osiągnięty. Zaprojektowane rozwiązanie zostało poddane wieloletnim, długotrwałym testom produkcyjnym, aby uzyskać dane ilustrujące pracę układu chłodzenia w różnych warunkach pracy. Opracowane rozwiązanie pozwoliło na zmniejszenie zużycia energii elektrycznej przez układ chłodniczy o 206,9 MWh, czyli 67% w ciągu 2017 roku. Zmniejszono zużycie energii elektrycznej potrzebnej do wytworzenia 1 MWh energii chłodniczej z 0,17 MWh do 0,05 MWh (patrz tabela 1). Osiągnięto istotne wzrosty średniorocznego współczynnika wydajności wynoszące 99% w trybie FC, 26% w trybie CP i 69% w obu trybach, a roczny czas pracy w trybie FC wydłużył się o 23,6% (patrz rysunek 8). Regułowy charakter i przejrzystość kolejności zmian stanu układu sterowania umożliwiła jego precyzyjną diagnostykę i niezawodną pracę przez cały rok.

Tablica 1: Porównanie efektywności energetycznej systemów chłodniczych

System BREF	System Turbocor
Średnia moc i energia elektryczna	
66 kW 310,3 MWh	22 kW 103,4 MWh
Roczne oszczędności	206,9 MWh (67%)
Średnia moc i energia chłodnicza	
386 kW 1815 MWh	456 kW 2144 MWh
Ilość energii elektrycznej potrzebnej do wyprodukowania 1 MWh energii chłodniczej	
0,17 MWh Redukcja	0,05 MWh 0,12 MWh (71%)



Rysunek 8: Roczne COP i czas pracy w poszczególnych trybach

W efekcie modernizacji systemu chłodniczego osiągnięto redukcję ilości energii elektrycznej potrzebnej do wygenerowania 1MWh energii chłodniczej o 65% (z 122,46 kWh do 43,38 kWh). W roku 2022 omawiany system chłodniczy wyprodukował 12 790 MWh energii chłodniczej. Tym samym zredukowano zapotrzebowanie na energię elektryczną o 1011,4 MWh. Średnia roczna cena energii elektrycznej w Polsce w pierwszej połowie 2022 roku wynosiła 167,4 € za 1MWh. Roczna oszczędność kosztów zakupu energii elektrycznej wyniosła więc 169 k€. Prognozowany czas zwrotu inwestycji wyniósł 2,4 roku. Zredukowano również emisję CO₂ o 674 ton CO₂ w ciągu roku. Opisana modernizacja systemu chłodniczego spełniła założenia zarówno dotyczące ograniczenia wydatków na energię elektryczną (o 169 k€ rocznie) oraz ograniczenia emisji CO₂ (o 674 ton CO₂ w ciągu roku). Okres zwrotu inwestycji, na podstawie dotychczasowych wyników, szacowany jest na 2,4 roku.

Z punktu widzenia automatyki zrealizowane prace naukowo-badawcze i wdrożeniowe przyniosły skutek w postaci poprawy jakości sterowania oraz wymiernych korzyści ekonomicznych (patrz tabela 2). Ocena pracy dedykowanego regulatora hybrydowego jest pozytywna. Efektem jego pracy jest brak oscylacji temperaturowych w systemie chłodniczym oraz redukcja zużycia energii elektrycznej w chwilach po przełączeniu systemu chłodniczego pomiędzy trybami pracy. Z ekonomicznego punktu widzenia uzyskano oszczędność w wysokości 404 € na 288 przełączeniach między trybami pracy. W znacznym stopniu przyczyniło się do tego zastosowanie, jako jednego z członów regulatora hybrydowego, dedykowanego regulatora rozmytego. Komponent regulatora hybrydowego jakim jest logika rozmyta działał aktywnie przy dużej dynamice zmian wartości temperatur. W ustalonym stanie pracy układu stawał się on nieaktywny. Ponieważ największe oszczędności energii uzyskano właśnie podczas występowania stanów dynamicznych, można wnioskować że źródłem tych oszczędności jest dedykowany dla każdego z trybów pracy regulator rozmyty. W przeciwieństwie do regulatora PID, jest to regulator MISO, który uwzględnia dynamikę pracy Drycoolera biorąc pod uwagę zarówno stan temperatury na wejściu jak i wyjściu

z Drycoolera. Pozwala on lepiej prowadzić proces sterowania, nie dopuszcza również do powstania oscylacji temperaturowych w systemie chłodniczym.

Tablica 2: Porównanie wskaźników jakości regulatora PID i hybrydowego.

Wskaźnik	Tryb pracy	Regulator PID	Regulator hybrydowy	Redukcja
J_1 (kWh)	CP	13,4	7,1	6,3
	FC	37,0	26,5	10,5
J_2 (€)	CP	2,24	1,19	1,05
	FC	6,19	4,44	1,76
J_3 (kg)	CP	8,94	4,74	4,2
	FC	24,68	17,68	7,00
J_4 (s)	CP	2497	657	1840
	FC	2909	139	2770
J_5 (°C)	CP	7,6	0,3	7,3
	FC	2,9	0,3	2,6
J_6 (€)	CP	323	171	152
	FC	891	639	252
	CP&FC	1214	810	404