

Wpłynęło dnia 20.12.2023.....

Zarejestrowano pod nr *oh*

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

Niniejsza recenzja została sporządzona na prośbę Pana prof. dr hab. inż. Ryszarda Sroki, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne AGH w Krakowie.

1. Zakres, cel i teza

Upowszechnienie technologii IT we wszystkich obszarach działalności powoduje wzrost zapotrzebowania na moc obliczeniową i przestrzeń dyskową. Obiektami będącymi w stanie to zapewnić są profesjonalne centra danych, czyli serwerownie, których funkcjonowanie wymaga nieprzerwanego chłodzenia. Panujący w Polsce klimat przejściowy sprawia, że latem chłodzenie zapewniają agregaty sprężarkowe, a zimą zespoły wentylatorów, których pobór mocy jest wyraźnie mniejszy. Wiosną i jesienią, zależnie od temperatury, korzysta się zarówno ze sprężarek jak i wentylatorów.

Efektywność systemu chłodzenia zużywającego 30 do 50% energii pobieranej przez serwerownię można poprawić zwiększając czas pracy wentylatorowej, inaczej czas chłodzenia swobodnego (*freecooling*). Dlatego cel rozprawy doktorskiej mgr inż. Mateusza Borkowskiego wyrażony wprost w jej tytule, czyli *Zwiększenie efektywności systemu chłodzenia serwerowni w klimacie przejściowym z wykorzystaniem układów sterowania i analizy danych* uważam za jak najbardziej właściwy, zarówno pod względem metodologicznym jak i technicznym. Sposób osiągnięcia celu jest nakreślony w tezie rozprawy, cyt.: modernizacja konfiguracji sprzętowej i programowej systemu chłodniczego do systemu o otwartej architekturze wraz ze znajomością warunków pracy pozwala na opracowanie dedykowanego algorytmu sterowania i w konsekwencji uzyskanie synergii wskaźników jakościowych wykazujących korzystne zmiany w zakresie zużycia energii i efektywności.

Wdrożenie zaproponowanego rozwiązania nastąpiło w serwerowni POLCOM Data Center w Skawinie, której pobór mocy jest rzędu kilku MW. Ze względu na ciągłą pracę systemu chłodzenia praktycznie wykluczone były eksperymenty obiektowe, stąd zasadniczym źródłem informacji dla realizacji rozprawy mogła być tylko analiza danych historycznych i bieżących. Założono, że zmodernizowany system chłodzenia ma zmniejszyć zużycie energii o 50%, a koszty z tym związane zwrócić się w ciągu 3 lat. Podstawowymi zadaniami badawczo-rozwojowymi były w tej sytuacji – modernizacja instalacji chłodniczej, nowy algorytm sterowania oraz otwarty system sterowania nadrzędnego.

2. Przegląd treści

Oprócz wstępu (rozd. 1) i podsumowania (10), zasadnicze rozdziały pracy można zgrupować następująco:

- (i) modernizacja instalacji chłodniczej (2, 3, 4),
- (ii) rozwój algorytmu sterowania (5, 6, 7),
- (iii) efektywność i wskaźniki ekonomiczne (8, 9).

Część pierwsza rozpoczyna się od ogólnej charakterystyki serwerowni POLCOM oraz analizy danych historycznych z 2015 r., kiedy chłodzenie zapewniały agregaty BREF mogące pracować zarówno w sprężarkowym trybie CP (*compressor*) jak i wentylatorowym FC (*freecooling*). Przełączanie trybów realizował zamknięty system sterowania na podstawie progów temperatury zewnętrznej ustawionych przez producenta agregatów. Analiza danych pokazała jednak, że przełączanie z trybu CP na FC mogłoby następować wcześniej rokując szansę na redukcję zużycia energii. Ingerencja w zamknięty system sterowania była jednak niemożliwa. Tym niemniej Autor opracował pierwszą wersję systemu nadrzędnego, za pomocą którego próbował zastąpić jeden agregat BREF pracujący w trybie CP dwoma agregatami pracującymi w trybie FC przy o połowę mniejszym poborze mocy. Próby te jak i dalsze analizy pokazały jednak, że znaczące zwiększenie efektywności chłodzenia wymaga modernizacji całej serwerowni.

Modernizacji poddano najpierw tylko część systemu chłodzenia zastępując jeden agregat BREF wysokowydajnym sprężarkowym agregatem Turbocor dla trybu CP oraz oddzielnym 20-wentylatorowym urządzeniem Drycooler dla FC. Przełączanie między trybami następowało przy progach 10.5 i 12°C. Drycooler był wyposażony w regulator PID temperatury wewnętrznej cieczy chłodzącej z fabrycznymi nastawami. System nadrzędny realizował sterowanie sekwencyjne w formie maszyny 9-stanowej. W ciągu 2017 r. drugi oryginalny system BREF i nowy system Turbocor + Drycooler pracowały równolegle pozwalając na analizy porównawcze. Stwierdzono znaczące ograniczenie zużycia energii elektrycznej przez zmodernizowany system, wzrost efektywności wyrażony współczynnikiem COP (stosunek generowanej energii chłodniczej do pobieranej energii elektrycznej) oraz możliwość zarządzania przez system nadrzędny. W szczególności nowy system chłodzenia zmniejszył zużycie energii elektrycznej w 2017 r. o 67% (207 MWh).

Zauważono jednak dwa niekorzystne zjawiska w pracy Drycoolera z fabrycznym regulatorem PID, tj.:

- 1) znaczne przeregulowanie przy przełączaniu z trybu FC na CP (Drycooler wspierał Turbocor również w trybie CP),
- 2) oscylacje temperatury cieczy wewnętrznej przy niskiej temperaturze zewnętrznej.

Autor podjął więc prace nad nowym rozszerzonym algorytmem sterowania opisanym w drugiej części rozprawy (rozdz. 5, 6, 7). Rozpoczął je od identyfikacji charakterystyk statycznych Drycoolera w trybach FC i CP (prędkość wentylatorów w funkcji temperatury zewnętrznej) na podstawie długotrwałych danych eksploatacyjnych. Charakterystyki te okazały się mocno nieliniowe, ale ich uwzględnienie w nowym algorytmie sterowania wymagało rezygnacji z algorytmu fabrycznego. Dlatego więc, najpierw w środowisku Matlab-Simulink, Autor przygotował równoważny regulator PID, który za pomocą narzędzia PLC Code Generation zaimplementował w sterowniku. Okazało się, że uwzględnienie punktu pracy odpowiednio do charakterystyki statycznej zlikwidowało oscylacje niskotemperaturowe, ale nie zredukowało przeregulowania. W tej sytuacji podjęto decyzję o rezygnacji z regulatora PID (jednoweściowego) i zastąpieniu go regulatorem rozmytym o czterech wejściach, z których dwa reprezentują temperatury wejściową i wyjściową cieczy chłodzącej, a dwa ich pochodne. Opracowany regulator rozmyty typu Mamdaniego korzystający z 16. reguł dla trybu CP i 14. dla FC, aktywnych przede wszystkim w stanach dynamicznych, niemal zupełnie wyeliminował przeregulowanie przy przełączaniu z FC do CP. Stanowi on jedną z trzech części finalnego regulatora hybrydowego, w którym dwie pozostałe reprezentują charakterystyki statyczne oraz całkowanie eliminujące błąd ustalony. Regulator hybrydowy został wdrożony w otwartym systemie sterowania chłodzeniem w serwerowni POLCOM.

Podsumowujące wyjaśnienia źródeł zwiększenia efektywności oraz uzyskane wskaźniki ekonomiczne przedstawiono w części trzeciej (rozdz. 8, 9). Założona redukcja zużycia energii o 50% była na tyle duża, że niezbędna okazała się całkowita zmiana technologii chłodzenia na wewnętrzny agregat sprężarkowy Turbocor dla trybu CP i zewnętrzny wentylatorowy Drycooler dla FC. Wzrost efektywności nastąpił w obydwu trybach, ale szczególnie dla FC przy temperaturach zewnętrznych poniżej 10°C. Dedykowany regulator hybrydowy z charakterystykami statycznymi, całkowaniem i regulatorem rozmytym usunął niekorzystne cechy standardowego rozwiązania. Źródłem informacji do opracowania regulatora były dane historyczne i bieżące, których zebranie nie wymagało ingerencji w nieprzerwanie biegnący proces chłodzenia. Tworzenie modelu matematycznego Drycoolera na podstawie eksperymentów obiektowych było więc niemożliwe. Efektem modernizacji sprzętowo-programowej serwerowni POLCOM była redukcja energii elektrycznej potrzebnej do wytworzenia 1 MWh energii chłodniczej z 122 kWh do 43.4 kWh, czyli o 65%. Odpowiednio wzrósł również współczynnik efektywności COP. Okres zwrotu nakładów finansowych na inwestycję szacuje się na 2.4 roku.

3. Ocena ogólna

Na zasadniczy rezultat rozprawy składa się opracowanie i wdrożenie nowego systemu chłodzenia serwerowni ze znaczącym zwiększeniem efektywności energetycznej. W stosunku do pierwotnego systemu z agregatami BREF nowy system oparto na wysokowydajnych sprężarkowych agregatach Turbocor i energooszczędnych wentylatorowych urządzeniach Drycooler, ze sterowaniem przez otwarty system nadrzędny zamiast dotychczasowego zamkniętego z nastawami fabrycznymi. Ze względu na wymaganą ciągłą pracę serwerowni, źródłem informacji dla prac badawczo-rozwojowych były analizy danych historycznych i bieżących, z bardzo ograniczoną możliwością eksperymentowania. Lista najważniejszych rozwiązań opracowanych przez Autora obejmuje:

- algorytm wykorzystania rezerwowego agregatu BREF dla wydłużenia pracy w trybie FC,
- projekt nowej instalacji sprzętowej systemu chłodzenia (Turbocor + Drycooler) wraz z przeprojektowaniem rurażu,
- algorytm przełączania między trybami CP i FC w szerokim zakresie temperatury zewnętrznej, łącznie z implementacją,
- projekt aparatury kontrolno-pomiarowej, elektrozaworów sterujących itp. oraz programu zarządzającego,
- opracowanie i wdrożenie dedykowanego regulatora hybrydowego temperatury na wyjściu Drycoolera.

Prace prowadzone były bardzo solidnie, a wybór konkretnego rozwiązania poprzedzała analiza możliwych wariantów. Na przykład do opisu charakterystyki statycznej rozważano cztery funkcje nieliniowe. Regulator rozmyty wykorzystuje trzy rodzaje funkcji przynależności. Oprogramowanie sterujące opracowane w środowisku Matlab-Simulink z konwersją PLC Code Generation świadczy o otwartości systemu. Liczne przebiegi czasowe i histogramy na bieżąco uzasadniają wysnuwane wnioski. Zdaniem recenzenta, wkład pracy Autora na przygotowanie rozprawy jest wyraźnie większy niż ma to miejsce w typowych doktoratach.

Długotrwałe badania nowego systemu pokazały, że efektywność chłodzenia serwerowni wyraźnie wzrosła. Uzasadnia to poprawność tezy rozprawy wskazującej, że modernizacja konfiguracji sprzętowej i programowej systemu chłodzenia korzystnie wpływa na zużycie energii i efektywność. Potwierdzają to wyniki uzyskane w serwerowni POLCOM.

Spis publikacji liczy 95 pozycji ściśle związanych z tematyką pracy, wśród których znajduje się 6 prac Autora napisanych wraz z promotorem.

W sumie rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Borkowskiego zasługuje na autentycznie dobrą ocenę. Postępując rzetelną, przemyślaną drogą osiągnął on postawiony cel jakim był nowy efektywny energetycznie system chłodzenia serwerowni POLCOM będący jego opracowaniem autorskim.

4. Uwagi

Poniższe uwagi krytyczne mają znaczenie drugorzędne i nie umniejszają wartości rozprawy.

- 1) Autor mógł krytyczniej odnieść się do fabrycznych nastaw regulatora PID zastosowanych w Drycoolerze, które wynoszą: $K_p=2.5$, $T_n=30s$ – całkowanie, $T_v=60s$ – różniczkowanie, $T_c=20s$ – tłumienie. Według znanych reguł Zieglera-Nicholsa nastawiania regulatora PID, czas T_v nie powinien przekraczać czwartej części T_n , czyli tutaj $30/4=7.5s$, a nie $60s$. Zera transmitancji regulatora są więc zespolone (tutaj $-0.01 \pm j0.017$) powodując przeregulowanie.
- 2) O ile projektowanie regulatora rozmytego jest wyczerpująco uzasadnione liczbami, powierzchniami sterowania itp., o tyle brakuje wartości wzmocnienia składowej całkującej regulatora hybrydowego. W bloku PID Beckhoffa wynosi ona $K_p/T_n=2.5/30=0.063$ [1/s]. Jak to wygląda w regulatorze hybrydowym?
- 3) Bibliografia, której przegląd znajduje się we Wstępie, obejmuje artykuły związane ściśle z tematyką pracy, często o profilu inżynierskim. Recenzent oczekiwałby jednak również paru pozycji książkowych na temat technologii chłodzenia, automatyzacji procesów, czy sterowania rozmytego. Warto byłoby również zacytować oryginalną pracę Mamdaniego lub nowszą książkę, gdzie regulator ten jest opisany.

Rozprawa jest relatywnie obszerna (128 str.) i pod względem formalnym nie budzi żadnych zastrzeżeń. Język opisów tekstowych, rysunki i histogramy są bez zarzutu. Zaledwie kilka usterek redakcyjno-edytorskich świadczy o starannej korekcie.

5. Wniosek końcowy

Uważam, że cel postawiony w rozprawie został osiągnięty. Mgr inż. Mateusz Borkowski doprowadził do całkowitej modernizacji technologii chłodzenia serwerowni POLCOM według własnego projektu, opracował otwarty nadrzędny system sterowania, przeprowadził wdrożenie i w wyniku długookresowych badań wykazał znaczne zwiększenie efektywności energetycznej, tj. wyraźnie ponad 50%. Stanami dynamicznymi steruje regulator hybrydowy będący jego oryginalnym osiągnięciem.

Uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Borkowskiego pt. *Zwiększenie efektywności systemu chłodzenia serwerowni w klimacie przejściowym z wykorzystaniem układów sterowania i analizy danych*, której tematyka mieści się w dyscyplinie *automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne*, w pełni spełnia wymagania stawiane w Ustawie *Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce* z dn. 20.07.2018 r. i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Jednocześnie ponieważ jest on autorem dwóch publikacji z listy JCR, a opisane rozwiązanie techniczne zostało wdrożone oraz ze względu na wkład pracy przekraczający typowy poziom, wnoszę o wyróżnienie tej rozprawy.

Leszek Tytus