

Mgr inż. Paweł Biały
Prof. dr hab. inż. Stanisław Skoczowski
Instytut Automatyki Przemysłowej, Politechnika Szczecińska

PID CZY FUZZY LOGIC **sterowanie poziomem wody w kotle parowym**

W referacie poruszony został problem regulacji poziomu wody w kotłach parowych. Właściwa regulacja zapewnia ciągłość pracy oraz niweluje straty wynikające z ponownych uruchomień kotłowni. Rozwiązania standardowe stosowane do regulacji poziomu wody przewidują jako element wykonawczy zawór regulacyjny. Jak zostanie wykazane w artykule destabilizuje to układ regulacji. Zastosowanie przetwornicy częstotliwości zdecydowanie poprawia jakość regulacji. Wybór PID czy FUZZY LOGIC ma natomiast duży wpływ na jakość sterowania.

PID or FUZZY LOGIC **water level control in steam boilers**

The paper considers the problem of water level control in steam boilers. Appropriate way of control provides continuity of work and levels wastes that go after another starts of boilers system. Standard solutions applied to control water level are based on control valve as an executive component. As it is proved in the paper, this solution destabilizes the control system. Applying frequency inverters significantly improves the quality of control process. On the other hand, choice between PID and FUZZY LOGIC has a great influence on the quality of control process.

W ostatnich latach obserwujemy szybki postęp technologiczny - przedsiębiorstwa inwestują w zaawansowane techniki i rozwiązania po to, aby obniżyć koszty produkcji. Inwestorzy oczekują, iż wydane pieniądze w jak największym stopniu odciążą pracowników i pozwolą na optymalizację kosztów wytwarzania w przedsiębiorstwie poprzez zapewnienie właściwego przebiegu procesów technologicznych. Prawidłowe utrzymywanie poziomu wody w kotle w istotny sposób wpływa na przebieg procesu technologicznego wykorzystującego parę technologiczną. Kotłownia parowa dopuszczona do ruchu podlega odbiorom UDT - oprócz zabezpieczenia maksymalnego zasolenia wody i maksymalnego ciśnienia pary w kotle inspektorzy sprawdzają przede wszystkim zabezpieczenia dotyczące poziomu wody w kotle, jego minimum i maksimum. Przekroczenie tych wartości powoduje bowiem wyłączenie pracy kotła, a co za tym idzie - przerwa w pracy urządzeń i produkcji w przedsiębiorstwie. Margines dopuszczalnych wahań poziomu wody (różnica pomiędzy minimalnym i maksymalnym poziomem) jest względnie mały (ok. 250 mm), stąd efektywna regulacja poziomu wody jest tak ważna.

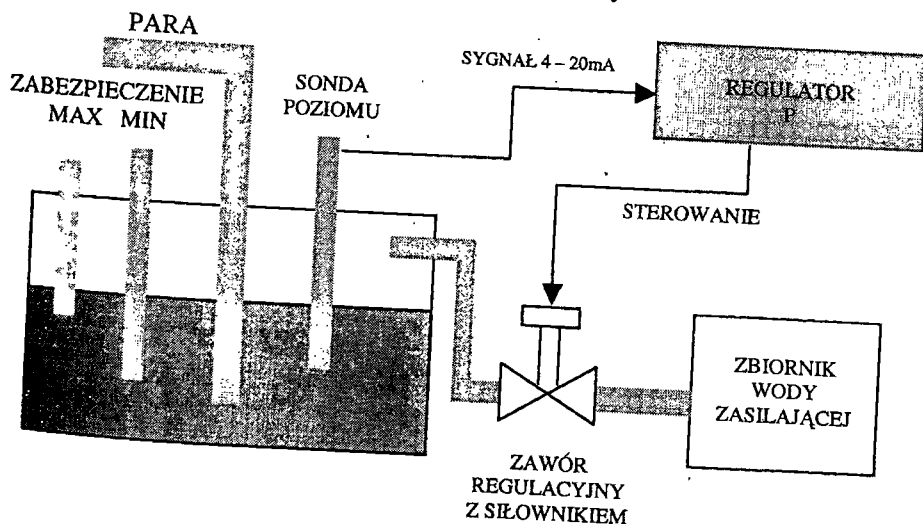
Firmy zajmujące się automatyką kotłową oferują trzy metody sterowania poziomem wody:

- regulacja impulsowa oparta na pomiarze przewodności – pompa zostaje włączona, gdy poziom wody osiąga dolną wyznaczoną granicę, a następnie wyłączona po osiągnięciu górnej dopuszczalnej granicy;
- regulacja ciągła (SISO – jedno wejście, tj. poziom wody; jedno wyjście, tj. sterowanie zaworem) – poziom wody utrzymywany jest poprzez dolewanie wody przechodzącej przez zawór regulacyjny. Pompa pracuje ze stałą wydajnością, natomiast regulator proporcjonalny otwiera bądź zamyka zawór regulacyjny kierując część wody do kotła, a resztę z powrotem do zbiornika wody zasilającej;
- regulacja ciągła trój impulsowa (MISO - wiele wejść, tj. poziom wody, przepływ pary, przepływ wody oraz jedno wyjście, tj. sterowanie zaworem regulacyjnym) – ten sposób regulacji jest rozszerzeniem zwykłej regulacji ciągłej (SISO) o pomiar przepływu pary i przepływu wody co pozwala na lepszą jakość regulacji.

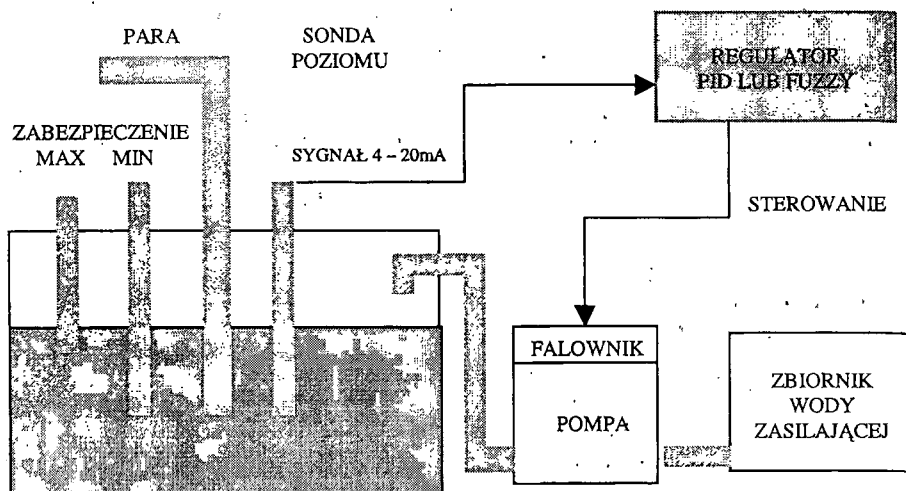
Najczęściej stosowana jest ciągła regulacja poziomu wody w układzie SISO. Ze względu na powszechność jej zastosowania w obiektach grzewczych oraz jej koszty, swoje badania oparliśmy na tym właśnie układzie regulacji.

Układ rozszerzony MISO stosuje się w bardzo trudnych obiektach, w których proces technologiczny jest bardzo zmienny. Układ ten jest rozwiązaniem względnie drogim, ponieważ wymaga zastosowania pomiaru przepływu pary. Regulacja impulsowa zaś, ze względu na zbytne uproszczenie, powoduje, że poziom wody często przekracza graniczne wartości, co z kolei powoduje częste awarie kotła. W związku z tym, rozwiązanie to nie jest powszechnie stosowane.

Rys.1. Standardowa regulacja poziomu wody w kotle parowym oparta na regulatorze P oraz zaworze regulacyjnym jako elementem wykonawczym.



Rys.2. Regulacja poziomu wody w kotle parowym oparta na regulatorze PID I FUZZY LOGIC przy wykorzystaniu falownika jako elementu wykonawczego.



Kocioł parowy jest obiektem bardzo trudnym do regulacji ze względu na zmieniające się warunki pracy, co spowodowane jest rodzajem procesów technologicznych, do których para jest wykorzystywana. Zmieniające się pobory pary powodują, iż wydajność chwilowa jest funkcją zmienną, a co za tym idzie - palnik pracujący zmienia swą moc od min do max często w bardzo krótkim czasie. Zmienne pobory powodują dodatkowo zmianę ciśnienia wewnątrz walczaka, co ma również wpływ na odczyt rzeczywistego poziomu wody (ma to związek ze zmianą nacisku na taflę wody, a więc i na objętość masy wodnej). Dodatkowo, proces grzania powodując wrzenie wody zakłóca pomiar i sztucznie zawyża odczyt poziomu. Moment wyłączenia grzania (np. awaria) spowoduje więc nagłe obniżenie poziomu i wyrównanie tafli wody, a co za tym idzie - otwarcie zaworu regulacyjnego przez regulator. Ponowne uruchomienie kotła podwyższy z kolei odczytywany pomiar. Jest to bardzo niebezpieczne, gdyż nagłe skoki poziomu wody mogą spowodować zbliżenie się do maksymalnej dopuszczalnej granicy i awaryjne wyłączenie kotła, a tym samym przerwę w dostawie pary oraz straty wynikające z ponownego przewietrzania kotła.

Bardzo istotny jest również fakt, iż regulator pracuje w zakresie dodatnich wartości - mamy możliwość jedynie dolania wody, natomiast jej ubytek powodowany jest tylko przez procesy technologiczne (ubytek pary, regulacja zasolenia i odmulanie). Należy więc mieć na uwadze mając świadomość, że utrudniają one utrzymanie prawidłowego poziomu wody w kotle. Kontrolowanie zasolenia wody w sposób ciągły jest konieczne, ponieważ woda wprowadzana do kotła jest uprzednio uzdatniana, m.in. poprzez wprowadzenie związków soli. Proces grzania powoduje, że na powierzchni wody w kotle wytrąca się sól w postaci piany, która musi być usuwana. Ubytek wody będący wynikiem odsalania jest także funkcją zmienną, zależną od procesu technologicznego i należy go również brać pod uwagę w regulacji poziomu wody jako czynnik zakłócający. Kolejnym zakłóceniem, aczkolwiek mającym mniejszy wpływ, jest

okresowe odmulanie kotła, czyli 3-5 sekundowe upuszczenie kilkudziesięciu litrów wody. Dodatkowo trzeba zaznaczyć, iż dolewanie wody o temperaturze 105 °C (woda w zbiorniku zasilającym) do wody w walczaku o temperaturze 160 °C powoduje - aż do momentu dogrzania do temp 160 °C - obniżenie temperatury wody w kotle i zmniejszenie objętości pęcherzyków powietrza w wodzie (zmniejszenie poziomu).

W związku z dużą ilością czynników wpływających na poziom wody w kotle, w tym również perturbacji o zmiennym charakterze, model kotła jest trudny do opisanie w sposób dokładny. Dodatkowym utrudnieniem są stosowane technologie - każda firma produkująca kotły ma własne rozwiązania w zakresie budowy urządzeń.

Rozważania teoretyczne, oparte na stworzeniu uproszczonego modelu kotła parowego (program Matlab, Simulink) i przeprowadzeniu symulacji procesów zachodzących w rzeczywistości w procesie wytworzenia pary (zmiennosc poborów pary, ubytki wody oraz zakłócenia wynikające z procesu wrzenia wody), potwierdziły się całkowicie w testach praktycznych. Sposób regulacji zastosowany przez nas dał zdecydowanie lepsze rezultaty niż dotychczasowe rozwiązania standardowe proponowane przez firmy zajmujące się automatyką kotłową. Zastępując zawór dławiący, który daje dodatkowe zakłócenie (opór), a przede wszystkim jest elementem wolno reagującym, zastosowaliśmy falownik, jako element wykonawczy przepływu wody do kotła. Dzięki tej zamianie uzyskano o wiele większe możliwości sterowania (szybkość).

Choć jest to radykalne stwierdzenie, zauważono, iż pompy dobierane przez firmy zajmujące się technikami grzewczymi są dobierane nieprawidłowo. Proponowane parametry pomp są oczywiście wystarczające (punkt pracy znajduje się w polu pracy danej pompy), jednak dynamika sterowania nie jest w ogóle brana pod uwagę.

Istotą problemu jest fakt, iż w procesie regulacji poziomu wody w kotle o ciśnieniu 5.5 bar wewnątrz walczaka uzyskujemy tak zwaną strefę martwą sterowania, czyli pole pracy, w którym opory są na tyle duże, że woda nie jest dolewana (rys. 2). Regulator nie ma informacji, że przy ciśnieniu 5.5 bar sterowanie od 0 - 37 Hz nie przynosi żadnych efektów, a opory są tak duże, że pompa nie jest w stanie przebić wody do walczaka.

Rozwiązaniem problemu mogłoby być ograniczenie sterowania regulatora np. od 37-50 Hz unikając w ten sposób strefy martwej. W kotłach parowych jest to jednak niemożliwe, gdyż w większości fabryk parametry pracy (ciśnienie zadane) są często zmienne, zwłaszcza w tak szczególnym momencie jak rozruch kotłowni, gdzie układ startuje od 0 bar do ciśnienia pracy. Wynika z tego, że zakres sterowania powinien zmieniać się dynamicznie w zależności od ciśnienia w kotle.

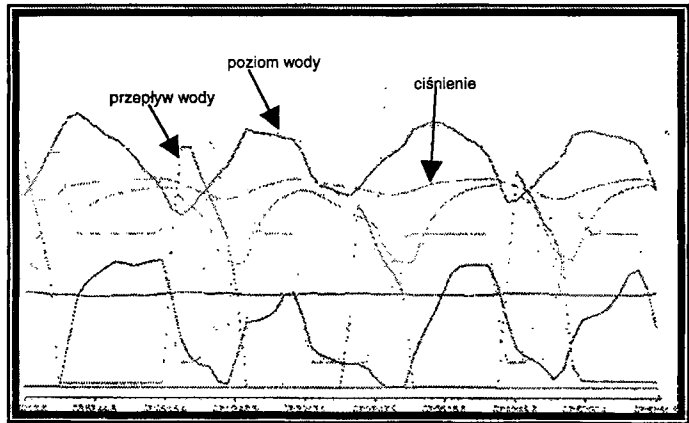
Przedstawione poniżej wyniki badań mają na celu porównanie dotychczas stosowanych rozwiązań w zakresie regulacji i proponowanych innowacji. Przeprowadzono analizę regulacji PID z użyciem zaworu regulacyjnego. Analizy regulacji z użyciem falownika zaś przeprowadziliśmy zarówno w układzie PID, jak i FUZZY. W ten sposób uzyskaliśmy wnioski na temat porównania użyteczności zastosowania zaworu i falownika, ale także porównania regulatora PID i FUZZY.

Zajęto się problemem doboru regulatora i jego nastaw zakładając, że mamy do dyspozycji tylko regulator PID i regulator FUZZY, których nie możemy udoskonalać np. programami w sterownikach.

Wnioski zostały oparte na badaniach, które przeprowadzono na kotle 780 kW (1200 kg/h pary). Aby urealnić wyniki badań, układ poddawano także działaniu warunków ekstremalnych (nagłe pobory pary, wyłączenia grzania oraz wszelkie perturbacje związane z produkcją pary – patrz rys. 11). Analizując proces wzięliśmy także pod uwagę nieliniowość funkcji $Q = g(f)$, gdzie Q jest przepływem a f częstotliwością, a także zależność wydajności pompy od ciśnienia statycznego (ciśnienie w kotle + opory przepływu).

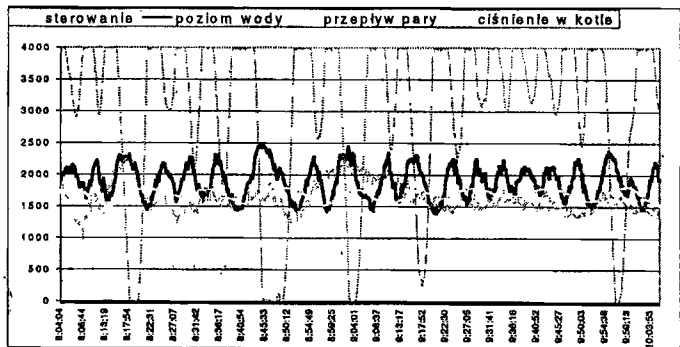
Rysunek 3 przedstawia zachowanie się poziomu wody w kotle oraz innych wielkości w czasie około 1 godziny pracy kotła. Jest to ekran wizualizacji rzeczywistego obiektu opartego na regulacji poziomu wody w układzie SISO z wykorzystaniem zaworu regulacyjnego jako elementu wykonawczego oraz regulatora P. Dane te uzyskaliśmy od jednego z zakładów przemysłowych w Szczecinie.

Rys.3. Standardowa regulacja poziomu wody w kotle parowym.



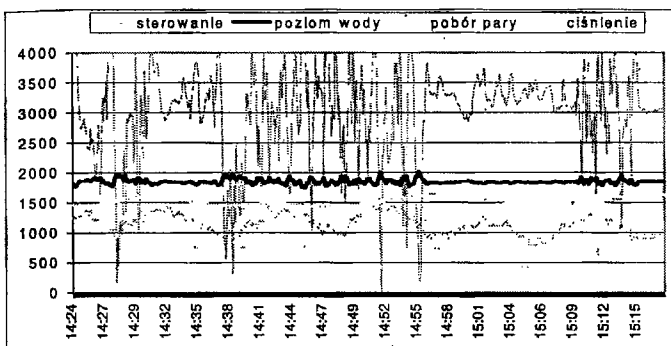
Źródło: Opracowanie własne

Rys.4. Sterowanie PI z wykorzystaniem falownicy - duży pobór pary



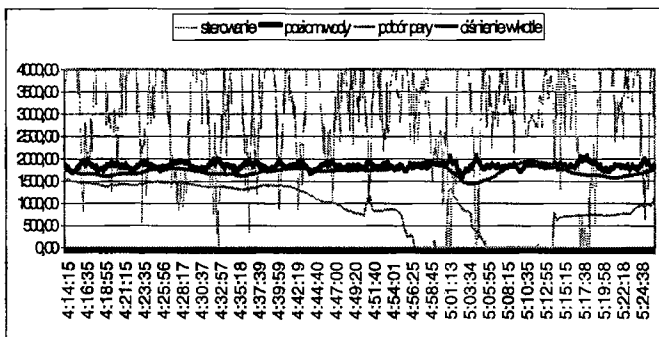
Źródło: Opracowanie własne

Rys.5. Sterowanie P z wykorzystaniem falownicy - nominalny pobór pary



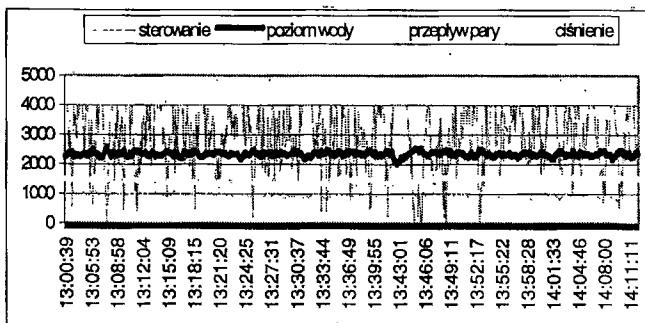
Źródło: Opracowanie własne.

Rys.6. Sterowanie P z wykorzystaniem falownicy - zmienny pobór pary.



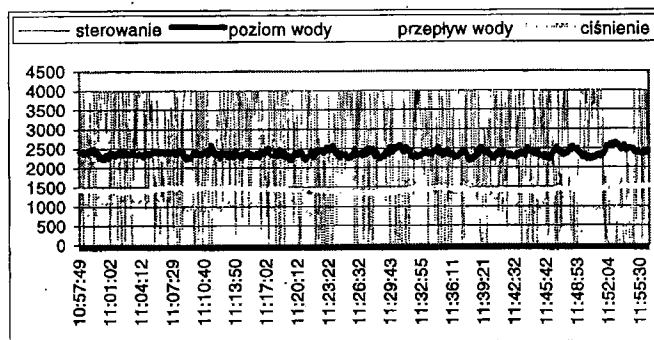
Źródło: Opracowanie własne.

Rys.7. Sterowanie PD (mała wartość stałej różniczkowania D) z wykorzystaniem falownicy - nominalny pobór pary



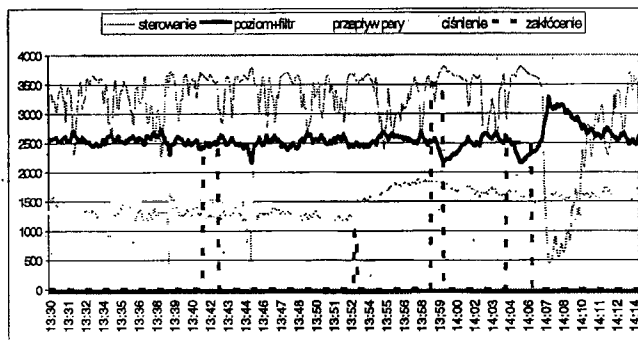
Źródło: Opracowanie własne.

Rys.8. Sterowanie PD (duża wartość stałej różniczkowania D) z wykorzystaniem falownicy - nominalny pobór pary



Źródło: Opracowanie własne.

Rys.9. Sterowanie FUZZY z wykorzystaniem falownicy - nominalny pobór pary.

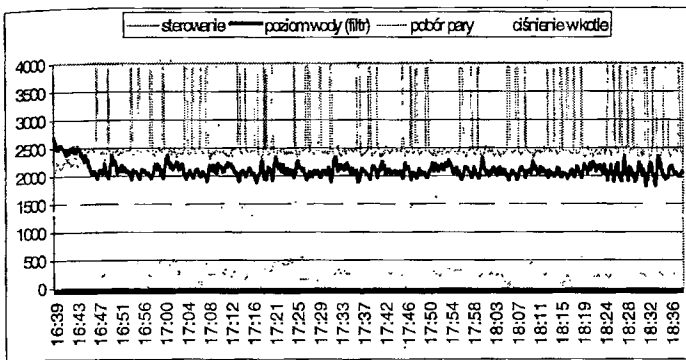


Źródło: Opracowanie własne.

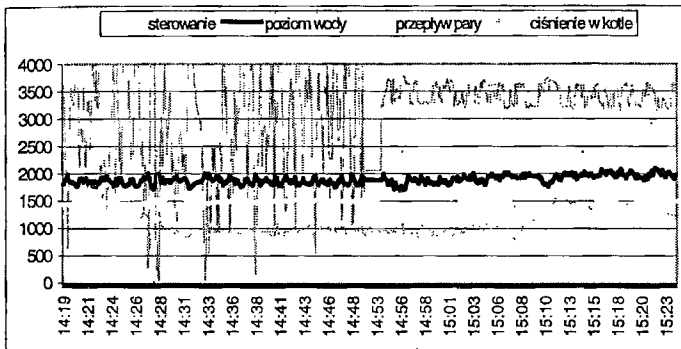
Linia przerywana - sygnał na wykresie przedstawia perturbacje:

- pierwsza kolumna (od lewej) – zmiana mocy palnika
- druga kolumna (od lewej) – zwiększenie poboru pary
- trzecia kolumna (od lewej) – odprowadzenie wody przez odmulanie ok. 20sek
- czwarta kolumna (od lewej) – natychmiastowe wyłączenie kotła

Rys.10. Sterowanie FUZZY z wykorzystaniem falownicy - mały pobór pary.

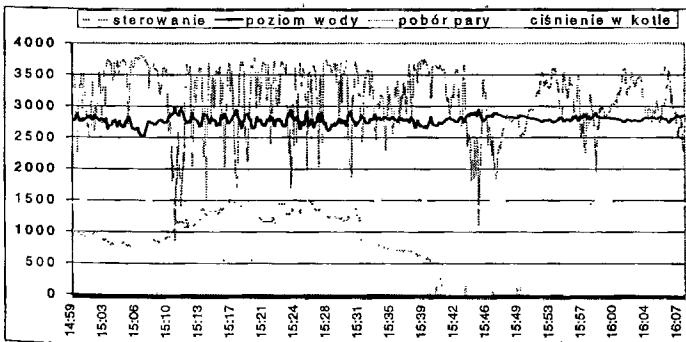


Rys.11. Lewa część - P. Prawa część FUZZY.



Źródło: Opracowanie własne.

Rys.12. Sterowanie FUZZY z wykorzystaniem falownicy - zmienny pobór pary.



Źródło: Opracowanie własne.

WNIOSKI

Układ standardowy z zaworem dławiącym

Najważniejszą rzeczą jaką zauważono jest obecność dużych oscylacji dla układu standardowego (z zastosowaniem zaworu dławiącego). Wynikają one z faktu, iż element wykonawczy (zawór dławiący) jest dużo wolniejszy od przetwornicy. Należy również wziąć pod uwagę istnienie tzw. martwej strefy w regulacji – uzyskujemy ją w warunkach, kiedy ciśnienie w kotle osiąga 5.5 bar. Opory powstające na skutek ciśnienia w kotle są na tyle duże, że woda nie jest dolewana (pompa nie jest w stanie przebić wody do walczaka). Regulator nie ma zaś informacji, że przy tym ciśnieniu sterowanie od 0 - 37 Hz nie przynosi żadnych efektów. Regulator, który znajdzie się w strefie martwej „widząc”, iż nie ma reakcji na wyjściu (poziom wody obniża się mimo pracy pompy z częstotliwością np. 15 Hz) zaczyna zwiększać przepływ. Zawór nie jest jednak w stanie szybko opuścić strefy martwej, a w rezultacie powstaje obiekt sterowania z dużym opóźnieniem. Opóźnienie to sumuje się z opóźnieniem wynikającym z długością drogi jaką musi pokonać woda dolewana – pompa- kocioł, w wyniku czego sterowanie jest oscylacyjne.

Więcej na temat martwej strefy regulacji i problemu doboru pomp będziemy omawiać w kolejnych publikacjach.

Układ PID z falownicą

Efektom zastosowania szybkiego elementu wykonawczego, jakim jest falownik, jest pozbycie się tak dużych oscylacji i uzyskanie zdecydowanie lepszej jakości regulacji. Szybkość „opuszczenia” strefy martwej to ok. 2 s więc opóźnienie praktycznie nie występuje. Problemem powstającym przy tym rozwiązaniu jest duża częstość przełączeń sterowania od 0 do 50 Hz. Spowodowane jest to faktem, że mamy tu praktycznie do czynienia z zastosowaniem w przeważającym stopniu dużego wzmocnienia (zastosowanie PD pogorszyło tylko jakość regulacji – jeszcze szybsze zmiany wartości zadanej bez polepszenia odporności na zakłócenia). Dodanie całkowania z jednoczesnym obniżeniem wzmocnienia powoduje, iż układ zachowuje się spokojniej, ale tym samym upodabnia się do układu standardowego, w wyniku czego uzyskujemy oscylacje.

Układ FUZZY z falownicą

Przy zastosowaniu tego rozwiązania uzyskano wyniki utrzymywania poziomu wody identyczne jak dla sterowania P czy PD, jednak sama jakość jest bardzo dobra. Minimalizujemy prawie całkowicie opóźnienie wynikające ze strefy martwej, ponieważ płaszczyzna sterowania ułożona indywidualnie przez programistę ogranicza do minimum schodzenie sterowania do tej strefy.

PODSUMOWANIE

Obiekty tak trudne do regulacji jak kocioł parowy wymagają żmudnej i wielogodzinnej pracy, aby uzyskać zadowalające efekty. Naszym zdaniem zdecydowanie najlepszym regulatorem okazał się regulator FUZZY, ponieważ dokładność regulacji jest porównywalna natomiast sterowanie jest łagodniejsze co z pewnością ma wpływ na zużycie mechaniczne pompy. Wysoka jakość sterowania regulacji FUZZY jest spowodowana procesem realizacji pochodnej wejścia wewnątrz regulatora i wykorzystaniem jej do ułożenia powierzchni sterowania. Regulator FUZZY pozwala na takie ułożenie powierzchni regulacji, jakie wynika z doświadczenia obsługujących.

Przy zastosowaniu wszystkich członów regulatora PID z falownikiem uzyskamy regulator bardziej stabilny, spokojny, co w efekcie da nam rezultaty podobne do układu P z zaworem regulacyjnym. Sytuacja taka zaistnieje, ponieważ w układzie standardowym stosujemy szybki regulator P, natomiast bardzo wolny element wykonawczy – zawór regulacyjny. W układzie z falownikiem sytuacja będzie odwrotna – przy zastosowaniu całkowania zwolnimy reakcję regulatora sterującego szybkim elementem wykonawczym (falownikiem). Efekt będzie więc ten sam – powstanie opóźnienie, a w rezultacie oscylacje zależne od stałej całkowania.

Z powyższego wynika, że najlepszym rozwiązaniem byłoby zastosowanie szybkiego regulatora PID (tylko wzmocnienie P, bez spowalniającego całkowania) z falownicą. Pamiętać jednak należy, iż takie sterowanie w efekcie zużywa pompę, przez szybką zmianę zadawanych parametrów pracy pompy. FUZZY LOGIC oparte jest z kolei na stworzeniu powierzchni sterowania, która jest dowolnie kształtowana przez programistę (patrz rys. 17). W zastosowanym regulatorze (FUZZY) stworzono 49 reguł zachowania się obiektu. Zostały one zapisane w tablicy decyzyjnej 7×7 (7 cech wejściowych związanych z poziomem wody oraz 7 cech wejściowych związanych z pochodną poziomu wody), która stanowi podstawę do opisanego różnych wariantów zachowania się obiektu. Możemy więc odpowiednimi decyzjami ograniczyć schodzenie sterowania do strefy martwej. Chcąc uzyskać porównywalność regulatora PID i FUZZY, w przypadku tego drugiego zastosowano w badaniach tylko jeden sygnał wejściowy (w więc tablica decyzyjna została stworzona z jednego parametru – poziomu wody i pochodnej poziomu wody). Zasadniczą różnicą pomiędzy regulatorem PID a FUZZY jest fakt, że PID steruje prawidłowo w warunkach nominalnej pracy obiektu dla której dobrane są nastawy P, I i D. Wszelkie perturbacje i drastyczne zmiany w trybie pracy kotłowni powodują, że PID nie potrafi dostosować reakcji regulacji do gwałtownie zmienionych warunków (mała odporność układu). FUZZY jest w tym zakresie znacznie bardziej elastyczny i odporny – w tablicy decyzyjnej programista może bowiem umieścić decyzję o sposobie i stopniu reakcji regulacji w odniesieniu do różnych warunków pracy urządzeń. Zastosowanie jedynie wzmocnienia P w PID mogłoby stanowić pewne rozwiązanie, jednak powoduje ono szybkie zużycie urządzeń - wrzenie wody w kotle powoduje błąd który jest jedynie wzmacniany.

Istnieją jednak i wady opisywanego przez nas rozwiązania. Jest to przede wszystkim trudność procesu programowania oraz dostępność narzędzi (oprogramowania regulatorów FUZZY). Nastawy regulatora PID można zaprogramować znając jedynie wpływ nastaw P, I i D na zachowanie obiektu. Regulacja FUZZY wymaga znajomości również innych czynników oraz umiejętności opisanego takich etapów jak fuzyfikacja,

defuzyfikacja oraz umiejętności obliczania środków ciężkości, a także znajomości narzędzi informatycznych, za pomocą których można to rozwiązanie zrealizować.

Opisane problemy sprawiają więc, że rzadko jeszcze spotykane są regulatory FUZZY czy regulatory oparte na sieciach neuronowych. Mamy jednak nadzieję, iż przedstawiony materiał przybliży problemy rzeczywistych obiektów i sposoby interpretacji ich zachowań.

Nasuwa się oczywiście pytanie o koszty regulacji - z pełną satysfakcją stwierdzono, że regulacja FUZZY zabiera więcej czasu programiście, jednak koszty urządzeń są niższe niż w przypadku regulacji standardowej dotychczas proponowanej. Rozwiązanie FUZZY jest również kilkukrotnie tańsze niż układ MISO z zastosowaniem informacji o przepływie pary (kilkanaście tysięcy jest to koszt pomiaru przepływu pary w kotłowni parowej).

Opisane rozwiązania oparte na sterowaniu z wykorzystaniem falownika zastosowano na rzeczywistym obiekcie w zakładzie przemysłowym jednej ze szczecińskich firm.

Literatura:

Katsuhiko Ogata „Modern Control Engineering” 1997 r.

Dane techniczne kotłów parowych firmy VISSMANN 2003r.

Dane techniczne urządzeń automatyki kotłowej firmy GESTRA 2003 r.

Dane techniczne firmy GRUNDFOS 2003 r.

Dokumentacja „Matlab Toolbox”, „IDR Mitsubishi Real Time”