

ROBERT KIELIAN
----------------

MARIUSZ LIPIŃSKI\*

WŁODZIMIERZ OBALEŃSKI

Instytut Automatyki Systemów  
Energetycznych – IASE sp. z o.o.  
Centrum Badawczo-Rozwojowe  
Wrocław

## Model poziomu wody w walczaku oraz jego praktyczne wykorzystanie do optymalizacji układu automatycznej regulacji poziomu wody w walczaku pracującego w warunkach zrzutu obciążenia na potrzeby własne

W artykule przedstawiono model poziomu wody w walczaku zaprojektowany w środowisku MATLAB/Simulink, który pozytywnie zweryfikowano podczas badań symulacyjnych w różnych warunkach ruchowych typowych dla obiektu energetycznego o mocy 200 MW, a następnie wykorzystano do modyfikacji układu automatycznej regulacji poziomu wody w walczaku w warunkach zrzutu obciążenia bloku do poziomu potrzeb własnych. Uzyskano wyraźną poprawę jakości regulacji poziomu wody w walczaku w tych warunkach zrzutu.

### 1 Wprowadzenie

Szybki rozwój możliwości obliczeniowych komputerów oraz powszechne wprowadzenie w elektrowniach i elektrociepłowniach systemów cyfrowego sterowania otworzyły z jednej strony zupełnie nowe pola zastosowań modelowania matematycznego, a z drugiej wykreowały zapotrzebowanie na zaawansowane algorytmy projektowania urządzeń i instalacji oraz wspomagania eksploatacji. Obszar nowych zastosowań jest niezwykle szeroki, dlatego też poświęcono im szereg projektów badawczych.

---

\*E-mail: [mariusz.lipinski@iase.wroc.pl](mailto:mariusz.lipinski@iase.wroc.pl)

W pracy [1] rozważane jest również opracowanie i zbudowanie symulatora bloku energetycznego dla szkolenia obsługi ruchowej. Budowa symulatora wymaga wiedzy o automatyzowanym obiekcie, którą trzeba zdobyć w czasie jego normalnej eksploatacji. Następnym krokiem jest opracowanie algorytmów sterowania i ich uruchomienie. Blok energetyczny nie jest miejscem, na którym można dowolnie eksperymentować i sprawdzać opracowane algorytmy, należy to robić na „symulatorach umieszczonych w komputerze. Wiedza o obiekcie wprowadzana jest w postaci plików (realizacji rzeczywistych) i w postaci modelu obiektu natomiast układ sterowania jest modelowany. Eksperyment symulacyjny jest szybszy niż badania na obiektach rzeczywistych oraz całkowicie bezpieczny. Symulacyjny trening umożliwi opanowanie procesu sterowania w wymaganych przedziałach zmian zmiennych procesowych i zadanych uwarunkowaniach [2].

Mając na względzie współczesne tendencje rozwojowe sektora energetycznego Instytut Automatyki Systemów Energetycznych sp. z o.o. opracował wybrane modele cieplnych obiektów energetycznych a także sposoby ich współpracy z różnymi systemami automatyki cyfrowej.

Realizowane zadanie obejmowało:

1. Stworzenie, rozbudowę i doskonalenie wybranych modeli cieplnych obiektów energetycznych z wykorzystaniem oprogramowania MATLAB.
2. Opracowanie sposobu współpracy oprogramowania MATLAB z różnymi rozproszonymi systemami sterowania DCS (ang. *distributed control system*), istniejącymi na blokach energetycznych.
3. Przeniesienie wybranych modeli cieplnych obiektów energetycznych do systemów DCS.
4. Próby obiektowe i testy optymalizacyjne (uzyskanie podobnych odpowiedzi wielkości modelowanej i rzeczywistej obiektu na te same zakłócenia w różnych warunkach pracy bloku).
5. Przeniesienie zestrojonego modelu na obiekcie rzeczywistym do środowiska MATLAB/Simulink [3] i modyfikację układu automatycznej regulacji modelowanego parametru (tworzenie specjalnych członów korekcyjnych) w celu uzyskania poprawy jakości regulacji, w szczególności w trudnych warunkach ruchowych bloku energetycznego.
6. Implementację i strojenie na obiekcie rzeczywistym stworzonego specjalnego członu korekcyjnego.

Powyższy tok postępowania został wykorzystany do optymalizacji układu automatycznej regulacji poziomu wody w walczaku, w warunkach zrzutu obciążenia na

potrzeby własne, jak również może zostać wykorzystany do optymalizacji innych, trudnych obwodów regulacji w różnych warunkach ruchowych (praca normalna, rozruch, zrzut obciążenia na potrzeby własne itp.)

Wykorzystywanie opracowanych procedur uzasadnia potrzeba ograniczenia do minimum eksperymentów obiektowych, których przeprowadzenie zawsze wiąże się z różnego rodzaju ryzykami, a ponadto eksperymenty symulacyjne można prowadzić szybciej niż na obiektach rzeczywistych. Symulacyjny trening umożliwia opanowanie procesu sterowania w wymaganych przedziałach zmian zmiennych procesowych i zadanych uwarunkowaniach [2,4].

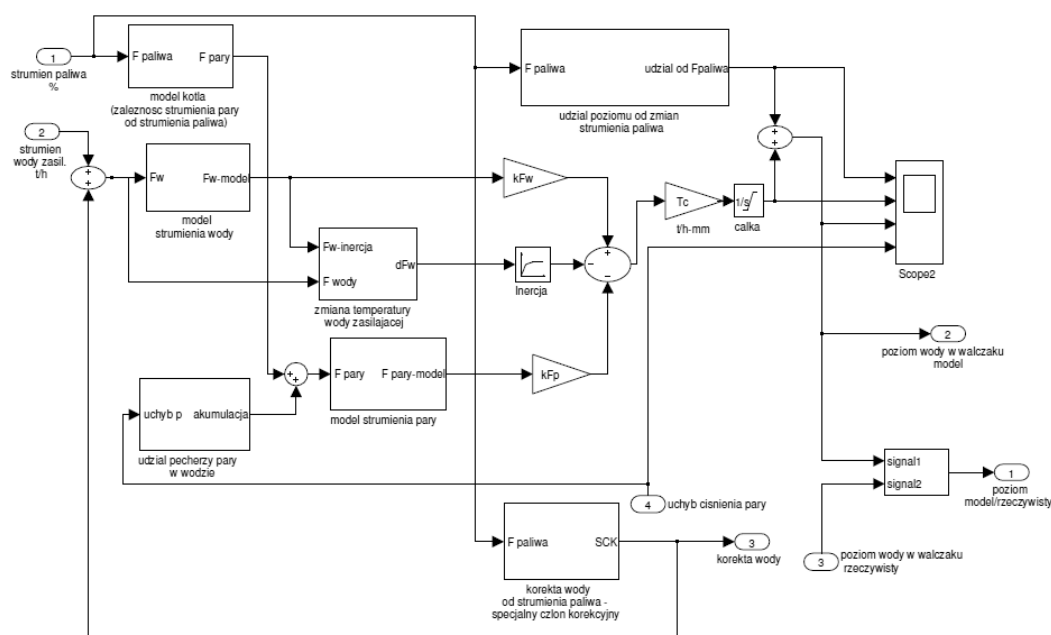
## **2 Model poziomu wody w walczaku opracowany w środowisku MATLAB/Simulink**

Bazując na wspomnianych wyżej koncepcjach i doświadczeniu obiektowym [2,4] oraz dokonując analizy literaturowej [5–9] stworzono model poziomu wody w walczaku w postaci bloków funkcyjnych za pomocą środowiska MATLAB/Simulink. Następnie model ten został przetestowany przy użyciu danych w postaci cyfrowej pozyskanych z pracy jednego z obiektów energetycznych o mocy 200 MW, ze szczególnym uwzględnieniem zrzutu obciążenia do poziomu potrzeb własnych. Podczas testów zmieniano strukturę i dobierano odpowiednie nastawy (między innymi stałe czasowe i wzmocnienia poszczególnych elementów składowych modelu), najczęściej uśredniając je tak, by były uniwersalne dla wszystkich analizowanych ciągów czasowych, aby w sposób najdokładniejszy przebiegi czasowe poziomu wody rzeczywistego w walczaku (z działającym układem regulacji) i zamodelowanego były zgodne z przebiegami rzeczywistymi.

Schemat ogólny modelu poziomu wody w walczaku bloku energetycznego przedstawiono na rys. 1, a wyniki badań symulacyjnych będących efektem końcowym optymalizacji nastaw powyższego modelu dla różnych zrzutów obciążeń [2,4] zilustrowano na rys. 2 (zestawienie przebiegów czasowych zamodelowanego i rzeczywistego poziomu wody w walczaku).

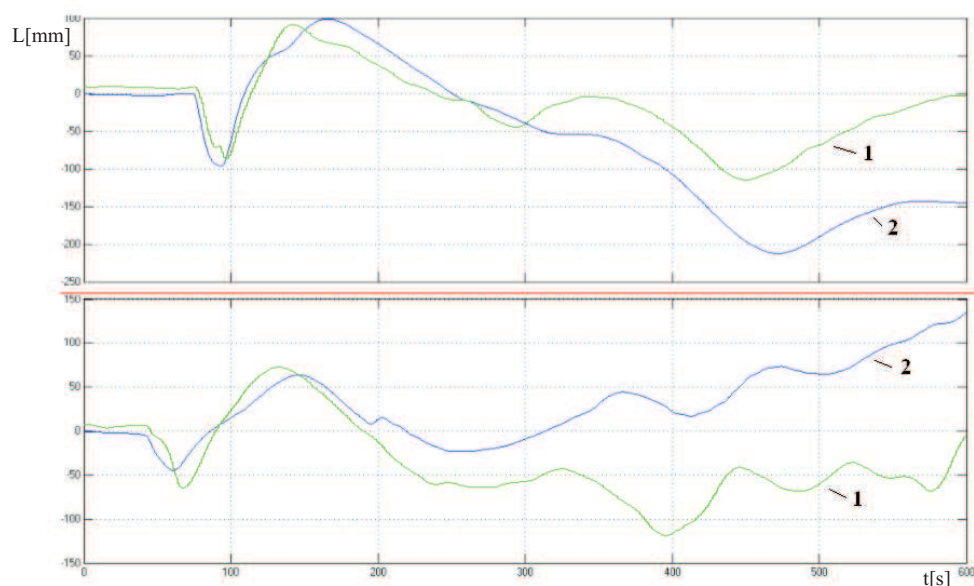
## **3 Model poziomu wody w walczaku opracowany w środowisku MATLAB/Simulink**

Po dokonaniu pozytywnej weryfikacji (rys.2) stworzonego modelu poziomu wody w walczaku w środowisku MATLAB/Simulink przeniesiono stworzony model do istniejącego systemu DCS na bloku energetycznym o mocy 200 MW (innego



Rysunek 1. Schemat ogólny modelu poziomu wody w walczaku bloku energetycznego. Wejścia do modelu (z dane uzyskane z obiektu energetycznego): 1 – paliwa – przepływ paliwa do kotła [t/h], 2 –  $(F_w)$  – strumień wody zasilającej [t/h], 3 – rzeczywisty poziom wody w walczaku [mm], 4 – uchyba ciśnienia pary świeżej [MPa]. Wyjścia z modelu: 1 – porównanie przebiegów rzeczywistego i zamodelowanego sygnału poziomu wody w walczaku [mm], 2 – zamodelowany poziom wody w walczaku [mm], 3 – wyjście ze specjalnego człony korekcyjnego (SCK) uzależnionego od przepływu paliwa w postaci przepływu wody zasilającej uzyskanego w wyniku działań optymalizacyjnych. Pozostałe oznaczenia: F-pary – przepływ pary świeżej do turbiny [t/h], Fw-model (Fw-inercja) – strumień wody zasilającej przetworzony w członach inercyjnych wyższego rzędu, dFw – różniczka przepływu wody zasilającej związana ze zmianą temperatury wody zasilającej podczas zrzutu, F-pary model – przepływ pary świeżej do turbiny z uwzględnieniem akumulacji (udział pęcherzy pary w wodzie) [t/h], udział od F-paliwa – udział poziomu wody w walczaku od zmian strumienia paliwa do kotła [mm], kFw – wzmocnienie strumienia wody zasilającej, kFp – wzmocnienie strumienia pary, Tc – czas całkowania, inercja – człon inercyjny pierwszego rzędu

od tego, z którego pozyskiwano dane wejściowe do modelu, aby był on bardziej uniwersalny), po uprzednim opracowaniu sposobu współpracy oprogramowania MATLAB z tym systemem [2,4]. Po tej operacji również stwierdzono podob-



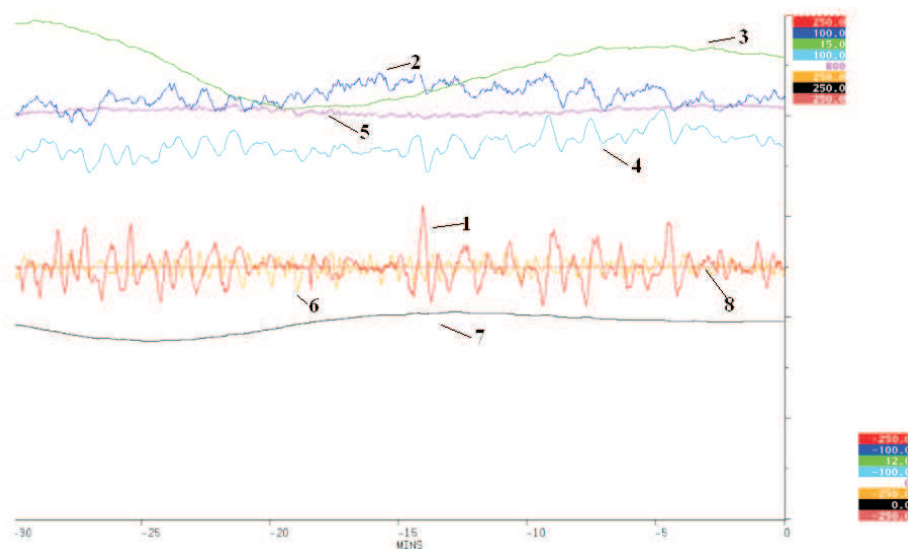
Rysunek 2. Model poziomu wody w walczaku bloku energetycznego: porównania przebiegu modelowanego – 1 i rzeczywistego – 2 dla dwóch różnych zrzutów obciążenia na potrzeby własne

ne odpowiedzi modelu wymuszone zakłóceniami wewnętrznymi i zewnętrznymi w porównaniu do odpowiedzi obiektu rzeczywistego na te same zakłócenia. Następnie dokonano ich strojenia podczas badań obiektowych w różnych warunkach pracy bloku.

Podczas strojenia modelu poziomu wody w walczaku (badania obiektowe) dobrano nastawy dla modelu kotła uwzględniające (poprzez odpowiedzi skokowe i wymuszenia naturalne) wpływ zmian strumienia wody i pary oraz udziału strumienia paliwa tak, aby przy stałym ciśnieniu pary osiągnąć stan równowagi. Następnie dobrano nastawy dla udziału akumulacji (ciśnienia pary). Wprowadzono również w tym przypadku regulator korekcyjny, który mając wpływ na przepływ wody zasilającej uzupełniał bilans poziomu wody. Podczas testów obiektowych okazało się, że najbardziej zbliżone wyniki modelu poziomu wody w walczaku, w odniesieniu poziomu do rzeczywistego, uzyskano przy stałej wartości początkowej wyjścia tego regulatora, co jest dowodem na to, że nie jest ono sprzężone z wielkościami wchodzącymi w skład tego modelu, a powyższy regulator kompensuje zakłócenia, które nie wchodzą w skład tego modelu.

Wyniki badań obiektowych zostały przedstawione na rys. 3, na którym pokazano przebiegi czasowe wielkości mających wpływ na poziom wody w walczaku

oraz porównanie wartości modelowanej i rzeczywistej tego poziomu dla jednego z obiektów energetycznych o mocy 200 MW. Duże podobieństwo zamodelowanych i rzeczywistych sygnałów dla modelowanych parametrów świadczy o poprawności stworzonych modeli [2,4].



Rysunek 3. Przebieg wielkości mających wpływ na poziom wody w walczaku oraz porównanie wartości modelowanej i rzeczywistej tego poziomu dla obiektu energetycznego o mocy 200 MW bez statycznej kompensacji warunków początkowych: 1 – udział poziomu wody w walczaku od strumienia pary [-250 – +250 mm], 2 – rzeczywisty poziom wody w walczaku [-100 – +100 mm], 3 – ciśnienie w walczaku [12–15 MPa], 4 – zamodelowany poziom wody w walczaku [-100 – +100 mm], 5 – całkowity przepływ wody zasilającej do kotła [0–800 t/h], 6 – udział poziomu wody w walczaku od wody zasilającej [-250 – +250 mm], 7 – udział poziomu wody w walczaku od paliwa [0–250 mm], 8 – wyjście regulatora korekcyjnego modelu poziomu wody w walczaku [-250 – +250 mm]

#### 4 Praktyczne wykorzystanie zamodelowanego sygnału poziomu wody w walczaku do jego optymalizacji podczas zrzutu obciążenia na potrzeby własne

Model poziomu wody w walczaku odwzorowuje zjawiska fizyczne zachodzące w walczaku, które mają wpływ na poziom wody. Model generuje sygnał będący

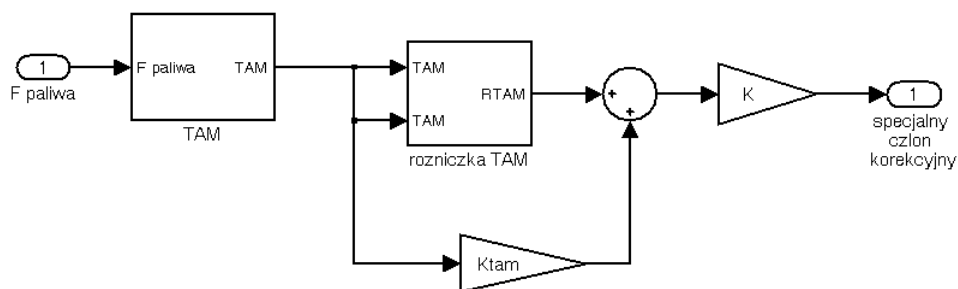
miarą zbilansowania wody zasilającej i pobieranej pary przez turbinę. Wpływ poszczególnych wielkości fizycznych na modelowany poziom wody w walczaku (strumień wody zasilającej, strumień pary, ciśnienie pary, strumień paliwa) umożliwia – podczas badań obiektowych – analizę przebiegu rzeczywistego, a w szczególności zakłóceń, które nie zostały uwzględnione w procesie modelowania. Ułatwia to strojenie i dobór nastaw w układzie regulacji poziomu wody w walczaku, a w szczególności kształtowanie wielkości regulacyjnej, jaką jest najczęściej strumień wody zasilającej.

W pracy przedstawiono wykorzystanie stworzonego i zoptymalizowanego modelu poziomu wody w walczaku do optymalizacji układu automatycznej regulacji (UAR) podczas zrzutu obciążenia na potrzeby własne, procesu szczególnie ważnego podczas przejścia bloku energetycznego na obszar wydzielony. Związane jest to ze wzrostem znaczenia bezpieczeństwa energetycznego, a tym samym zapewnienie niezawodnego dostarczania energii elektrycznej odbiorcom, który spowodował powstanie formalnych wymagań stawianych elektrowniom w zakresie przystosowania bloków energetycznych do świadczenia usługi gotowości do obrony przed skutkami awarii systemowych i odbudowy krajowego systemu elektroenergetycznego (KSE) po zaniku napięcia w sieci elektroenergetycznej na dużym obszarze (ang. *blackout*) [10].

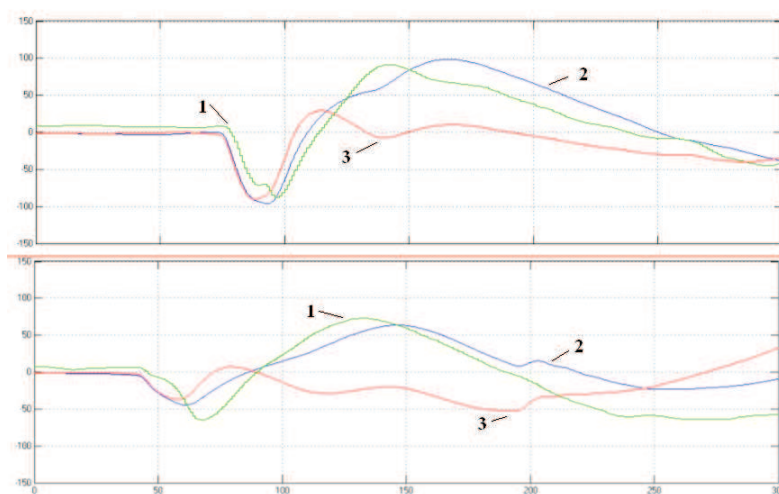
W takich awaryjnych sytuacjach ruchowych istnieje bardzo duże prawdopodobieństwo przekroczenia wartości dopuszczalnych przez poziom wody w walczaku. Właśnie dlatego (z wykorzystaniem stworzonego uprzednio modelu) układ automatycznej regulacji poziomu wody w walczaku został poddany działaniom optymalizacyjnym w oprogramowaniu MATLAB/Simulink poprzez takie dodawanie wielkości regulacyjnej (strumień wody zasilającej uzależniony od przepływu paliwa do kotła) aby przez okres około 5 min. po zrzucie obciążenia (okres, gdy istnieje bardzo duże prawdopodobieństwo zadziałania zabezpieczeń od nadmiernego wzrostu poziomu wody w walczaku) uzyskać przebieg poziomu wody w walczaku bliski wartościom  $\pm 50$  mm.

Podczas testów zmieniano strukturę i dobierano odpowiednie nastawy (między innymi stałe czasowe i wzmocnienia poszczególnych elementów składowych modelu i członu korekcyjnego), najczęściej uśredniając je aby były uniwersalne dla analizowanych ciągów czasowych, oraz aby w wyniku działań optymalizacyjnych uzyskiwać poziom wody w walczaku bliski wartościom  $\pm 50$  mm, czyli w granicach dalekich od zadziałania zabezpieczeń. Rysunek 4 przedstawia strukturę, w oprogramowaniu MATLAB/Simulink, członu korekcyjnego strumienia wody zasilającej, uzależnionej od przepływu paliwa do kotła. Wyniki działań optymalizacyjnych dla przykładowego zrzutu obciążenia na potrzeby własne dla jednego

z obiektów energetycznych (z którego były pozyskiwane dane do stworzenia modelu) przedstawia rys. 5 [4].

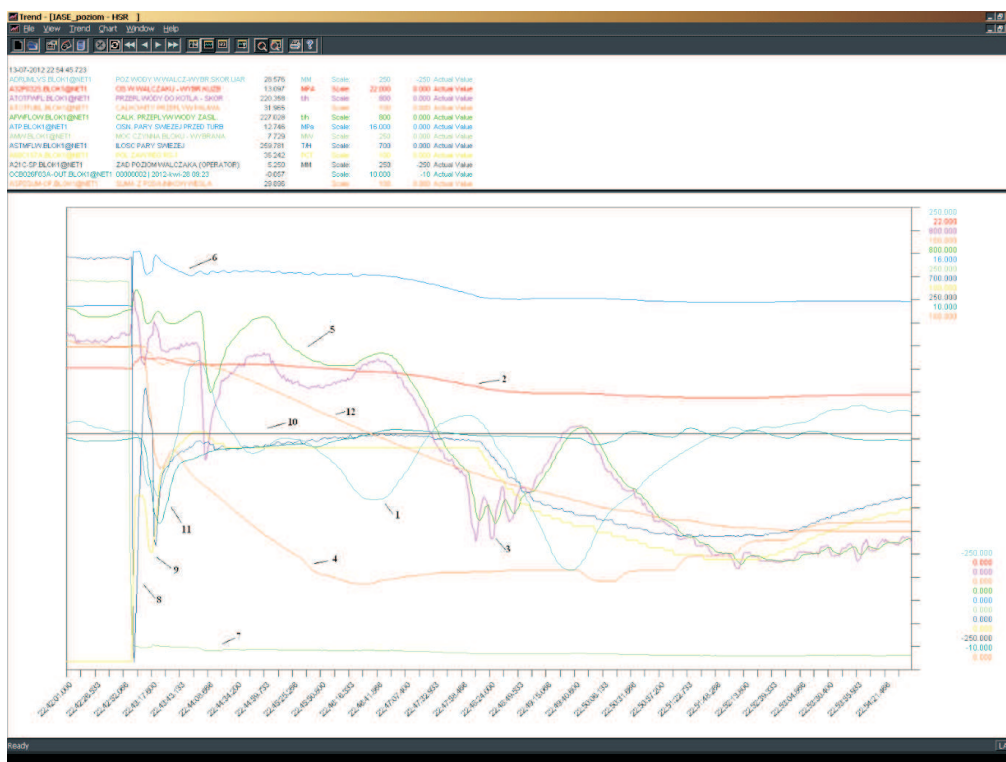


Rysunek 4. Model poziomu wody w walczaku bloku energetycznego ze specjalnym członem korekcyjnym zadanego strumienia wody zasilającej uzależnionym od przepływu paliwa do kotła:  $F_{\text{paliwa}}$  - strumień paliwa do kotła [t/h], TAM – przetworzony strumień paliwa za pomocą członów inercyjnych wyższego rzędu [t/h],  $K_{\text{tam}}$  – wzmocnienie członu TAM, RTAM – różniczka członu TAM, K – wzmocnienie sumy wzmocnienia i różniczki członu TAM, którego wyjściem jest specjalny czlon korekcyjny – SCK (korekta strumienia wody zasilającej [t/h])



Rysunek 5. Model poziomu wody w walczaku bloku energetycznego: porównania przebiegu modelowanego – 1, rzeczywistego – 2 i modelowanego po korekcji strumieniem wody zasilającej uzależnionej od strumienia paliwa – 3 dla dwóch różnych zrzutów obciążenia na potrzeby własne





Rysunek 6. Przebiegi czasowe wybranych wielkości obiektowych podczas zrzutu obciążenia na potrzeby własne dla jednego z obiektów energetycznych o mocy 200 MW: 1 – skorygowany poziom wody w walczaku [-250 + 250 mm], 2 – ciśnienie w walczaku [0–22 MPa], 3 – skorygowany przepływ wody do kotła [0–800 t/h], 4 – przepływ paliwa [0–100 t/h], 5 – przepływ wody zasilającej [0–800 t/h], 6 – ciśnienie pary świeżej przed turbiną [0–16 MPa], 7 – moc czynna bloku [0–250 MW], 8 – przepływ pary świeżej [0–700 t/h], 9 – położenie zaworu regulacyjnego RS [0–100%], 10 – wartość zadana poziomem wody w walczaku [-250 – +250 mm], 11 – sygnał korekcyjny poziomu wody w walczaku uzależniony od przepływu paliwa [-10 – +10 t/h], 12 – sumaryczne wystawienie podajników [0–100%]

Uzyskując zadawalające wyniki optymalizacyjne w oprogramowaniu MATLAB/Simulink, zgodnie z przyjętą uprzednio metodyką, przystąpiono do implementacji specjalnego członu korekcyjnego w systemie DCS na obiekcie energetycznym o mocy 200 MW, z którego pozyskiwane były dane do optymalizacji układu automatycznej regulacji poziomu wody w walczaku. Kolejnym etapem była tu optymalizacja (dobór nastaw członów korekcyjnych) zmodyfikowanego układu UAR

podczas zrzutu obciążenia. Na rys. 6 widoczny jest końcowy efekt tej procedury – przebieg czasowy wybranych wielkości obiektowych podczas zrzutu obciążenia na potrzeby własne wykonanego na obiekcie rzeczywistym, łącznie z sygnałem generowanym przez zaprojektowany człon korekcyjny. Można tu zaobserwować utrzymanie poziomu wody w walczaku w granicach dalekich od zadziałania zabezpieczeń.

## 5 Wnioski

1. Modyfikacja UAR poziomu wody w walczaku dokonana przy użyciu przedstawionej metody, polegającej na wykorzystaniu modelu poziomu wody w walczaku do doboru specjalnego członu korekcyjnego, w sposób skuteczny zmniejsza prawdopodobieństwo potrzeby zadziałania zabezpieczeń przed nadmiernymi zmianami poziomu wody w walczaku powodującymi definitywne wyłączenie bloku. Zostało to potwierdzone podczas zrzutu obciążenia na potrzeby własne na jednym z obiektów energetycznych o mocy 200 MW. Taka modyfikacja pozwala to spełnić wymogi stawiane blokom energetycznym, zawarte w Instrukcji Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej [10].
2. Przedstawiony model umożliwia poznanie zjawisk fizycznych zachodzących w walczaku, mających wpływ na poziom wody w urządzeniu. Sygnał pomocniczy wypracowany w modelu może być wykorzystany do diagnostyki pracy podgrzewacza wody w celu wykrycia jego nieszczelności.
3. Omówione etapy postępowania optymalizacji poziomu wody w walczaku oraz innych parametrów istotnych dla pracy cieplnego obiektu energetycznego mogą w znacznym stopniu ograniczyć ilość testów obiektowych, a także przynieść wymierne korzyści ekonomiczne w postaci redukcji nakładów poniesionych na etapie projektowania i uruchomienia układu automatycznej regulacji wybranych parametrów cieplnych obiektów energetycznych.
4. Zastosowany tok postępowania może zostać wykorzystany do optymalizacji innych, trudnych obwodów regulacji w różnych warunkach ruchowych (praca normalna, rozruch, zrzut obciążenia na potrzeby własne itp.).

*Praca wpłynęła do redakcji we wrześniu 2012 r.*

## Literatura

- [1] *Wybrane modele matematyczne w diagnostyce i symulacji procesów cieploprzepływowych w instalacjach energetycznych*. Praca zbiorowa pod redakcją R. Laskowskiego i J. Lewandowskiego Warszawa 2008.
- [2] Adamowicz A., Fennig W., Kielian R., Lipiński M., Obaleński W., Wierzbicki Z. (Instytut Automatyki Systemów Energetycznych sp. z o.o.): *Opracowanie modeli cieplnych obiektów energetycznych i sposobów ich współpracy z różnymi systemami automatyki cyfrowej*. Sprawozdanie z realizacji pracy naukowo-badawczej nr 966, Wrocław 2010.
- [3] *MATLAB/Simulink, wersja R2009b*. Oprogramowanie Naukowo-Techniczne (ONT Poland).
- [4] Adamowicz A., Fennig W., Kielian R., Lipiński M., Obaleński W., Wierzbicki Z. (Instytut Automatyki Systemów Energetycznych sp. z o.o.): *Opracowanie modeli cieplnych obiektów energetycznych i sposobów ich współpracy z różnymi systemami automatyki cyfrowej*. Sprawozdanie z realizacji pracy naukowo-badawczej nr 972, Wrocław 2011.
- [5] Rakowski J.: *Automatyka cieplnych urządzeń siłowni*. WNT, Warszawa 1976.
- [6] Janiczek R.: *Eksploatacja elektrowni parowych*, WNT, Warszawa 1992.
- [7] Findeisen W.: *Technika regulacji automatycznej*. PWN, Warszawa 1965.
- [8] Chorowski B.: *Kocioł walczakowy jako obiekt regulacji poziomu wody*. Zeszyty Naukowe Politechniki Wrocławskiej. Energetyka **1**(1965), 92–103.
- [9] Laudyn D., Pawlik M., Strzelczyk F.: *Elektrownie*. WNT, Warszawa 1990.
- [10] Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A.: *Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej*. Warszawa 2012.

### **The drum water level model and its application to automatic control system optimization of water level during load dump to cover own demand requirements**

#### S u m m a r y

The paper presents the drum water level model implemented in MATLAB/SIMULINK. The model was positively verified during simulations under different operating condition, typical for 200 MW power plant. Subsequently the model was used to modify the drum water level control system during the dump of the unit load to the level corresponding to the case of covering the own demand requirements. An improvement of the drum water level quality of control was achieved.