

## OCENA WPŁYWU POPRAWY DOKŁADNOŚCI POMIARU TEMPERATURY PARY ŚWIEŻEJ NA EFEKTYWNOŚĆ EKONOMICZNĄ BLOKU ENERGETYCZNEGO

Alicja STOLTMANN<sup>1</sup>, Marcin JASKÓLSKI<sup>2</sup>

1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
e-mail: ala.stoltmann@gmail.com
2. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
tel:+48 58 347 12 54, e-mail: mjask@ely.pg.gda.pl

**Streszczenie:** W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań wpływu poprawy dokładności pomiaru temperatury pary świeżej na wskaźniki sprawności i produkcji bloku ciepłowniczego. Analizy dokonano w oparciu o moduł zaproponowany przez firmę Alstom, składający się z regulatora stanu z obserwacją oraz precyzyjnej termopary. Narzędziem wykorzystanym do badań był program GateCycle 6.1, w którym zamodelowano blok BC-50, wykorzystując rzeczywiste parametry obiegu. Analiza wyników modelowania potwierdziła, że modernizacja układu regulacji temperatury pary świeżej jest opłacalna ekonomicznie oraz pozwala na zmniejszenie ilości paliwa dostarczanego do kotła.

**Słowa kluczowe:** temperatura pary świeżej, dokładność pomiaru, program GateCycle.

### 1. WPROWADZENIE

W układzie bloku ciepłowniczego dokonuje się pomiarów różnych wielkości wykorzystywanych w procesach diagnostycznych. Wśród nich jest pomiar temperatury, który uchodzi za jeden z trudniejszych w technice cieplnej.

Dokładność pomiaru uzależniona jest w dużej mierze od wyboru rodzaju przyrządu do pomiaru temperatury, właściwego dla danych warunków, jego dokładności, a także sposobu prowadzenia pomiaru. Pomiar temperatury pary znajdującej się w ruchu jest obarczony błędem spowodowanym odprowadzeniem ciepła z miejsca pomiaru przez przewodzenie, przez czujnik termometru, a także przez promieniowanie. Wybór właściwej metody pomiaru oraz poprawne umieszczenie przyrządu zwiększa poprawność pomiarów.

Brak izolacji termicznej oraz niska stabilność cieplna bloku ciepłowniczego ma w dużej mierze wpływ na niepewność pomiaru temperatury pary świeżej.

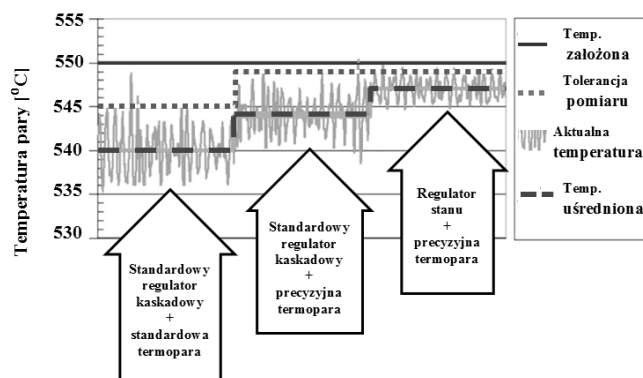
Aby zwiększyć dokładność oceny poprawności dokonanych pomiarów, należy uśrednić parametry w wybranych, najbardziej stacjonarnych, okresach eksploatacji bloku energetycznego [1].

Praca poszczególnych elementów bloku energetycznego, takich jak: kocioł, turbina, generator i transformator blokowy, regulowana jest wspólnym wieloparametrowym układem sterowania.

Układy automatycznej regulacji polepszają jakość sterowania i odciążają obsługę bloku od czasochłonnej stabilizacji parametrów. Jednym z głównych układów regulacji automatycznej jest regulacja temperatury pary świeżej, która pozwala na sterowanie wtryskiem wody do pary wodnej w przegrzewaczu pary znajdującym się w kotle, utrzymując tym samym wartość temperatury na stałym poziomie.

Jak przedstawiono na rysunku 1, możliwe jest zwiększenie dokładności regulacji temperatury pary świeżej poprzez wymianę obecnie stosowanych regulatorów kaskadowych i standardowych termopar na modułowe zestawy zaproponowane przez firmę Alstom, które składają się z nowoczesnych regulatorów stanu z obserwacją a także z precyzyjnych termopar.

Z uwagi na brak możliwości przeprowadzenia badań na obiekcie rzeczywistym oraz ograniczenia zastosowanego w analizie modelu obiegu termodynamicznego, nie uwzględniono wpływu rozrzutu temperatur na oszczędności energetyczne, wynikające z zastosowania modułu regulacyjnego.



Rys. 1. Różnice w dokładności pomiędzy założoną temperaturą pary świeżej a temperaturą uśrednioną przy zastosowaniu trzech różnych zestawów regulacyjnych pary świeżej.  
(opracowanie własne na podstawie [2])

## 2. MODUŁ REGULACYJNY FIRMY ALSTOM

W przemyśle stosuje się urządzenia służące do pomiaru i regulacji temperatury pary będącej pod dużym ciśnieniem i w wysokiej temperaturze, cechujące się różną dokładnością i szybkością regulacji. Wtryskowe regulatory temperatury pary przegrzanej stosuje się w kilku miejscach w przegrzewaczu. Regulator wtryskowy składa się ze schładzacza wtryskowego, zaworu regulacji wtrysku oraz siłownika. Elementy te współpracują z układem pomiarowym temperatury pary oraz z układem regulacji bloku ciepłowniczego. Zastosowanie nowoczesnego regulatora wtrysku poprawia niezawodność systemu oraz zmniejsza koszty eksploatacyjne.

### 2.1 Precyzyjna termopara

Czujnikiem służącym do pomiaru temperatury pary świeżej jest wysokotemperaturowy czujnik temperatury, który jako element pomiarowy zawiera wymienny termoelement NiCr-NiAl. Służy do pomiaru temperatury w kotłach, rurociągach i instalacjach ciśnieniowych. Wykorzystuje zmianę siły termodynamicznej wbudowanego termoelementu w zależności od zmian temperatury. Czujnik ten, ze względu na wysoką dokładność jest najpowszechniej wykorzystywany w technice. Spoinę pomiarową umieszcza się w obudowie o dużym przewodnictwie cieplnym.

Precyzyjna termopara zawiera indywidualnie dobrany stop dla wymaganej temperatury oraz wbudowaną kalibrację. Pozwala to na zmierzenie temperatury z dokładnością do  $\pm 1$  K [2]. Porównanie precyzyjnej termopary z termoparą standardową stosowaną w technice przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Porównanie termopary standardowej i precyzyjnej pod względem dokładności pomiaru (opracowanie własne na podstawie [2])

	Standardowa termopara	Precyzyjna termopara z wbudowaną kalibracją
Dokładność pomiaru	$\pm 5$ K	$\pm 1$ K

### 2.2 Zawory regulacyjne i schładzacz pary

Wytwarzanie pary świeżej jest to proces, który można podzielić na trzy fazy: 1) podgrzewanie wody - odbywające się w podgrzewaczu wody, 2) odparowanie - odbywające się w parowniku oraz 3) przegrzewanie pary - mające miejsce w przegrzewaczu, składającym się z trzech stopni, pomiędzy którymi umieszczone są wtryskowe regulatory temperatury pary przegrzanej.

Regulator wtryskowy składa się ze schładzacza wtryskowego, zaworu regulacji wtrysku oraz siłownika. Elementy te współpracują z układem pomiarowym temperatury oraz z układem regulacji bloku ciepłowniczego.

Zawory regulacji wtrysku narażone są na wysokie ciśnienie panujące w rurociągu pary przegrzanej. Najnowsze systemy wtrysku zapewniają skuteczną kontrolę i rozpylanie wody, zapewniające optymalną wydajność systemu kontroli. Poprawiają także niezawodność systemu oraz zmniejszają koszty eksploatacyjne.

W schładzaczu wtryskowa para narażona jest na wysoką zmianę temperatury podczas wtrysku do pary. Dlatego też w module regulacyjnym pary świeżej zastosowano dysze z mechanizmem sprężynowym zapewniające doskonałe rozpylanie wody nawet przy minimalnym ciśnieniu wlotowym [2].

### 2.3 Regulator stanu z obserwatorem

W większości elektrowni i elektrociepłowni, w celu kontroli temperatury pary świeżej, stosuje się regulatory kaskadowe. Ten rodzaj regulacji pozwala utrzymać temperaturę pary świeżej z dokładnością w przedziale  $\pm 5$  K  $\div$   $\pm 10$  K.

Poprawę wydajności systemu sterowania zapewnia zastosowanie regulatora stanu z obserwatorem (ASC - Advanced State Controller). Obserwowanym parametrem jest temperatura pary świeżej na wyjściu z kotła. Regulator stanu przetwarza sygnał zmierzonej temperatury, umożliwiając stabilną, dokładną i szybką reakcję układu sterowania. Regulator stanu z obserwatorem zmniejsza odchyłkę pomiaru o 30-50% w porównaniu z klasycznym regulatorem kaskadowym. W wartościach bezwzględnych, wahania mogą być zredukowane do  $\pm 2$  K w warunkach ustalonych oraz  $\pm 5$  K w warunkach przejściowych.

Tablica 2 przedstawia porównanie regulatora kaskadowego z regulatorem stanu z obserwatorem pod względem dokładności regulacji temperatury pary świeżej, w warunkach ustalonych i przejściowych.

Tablica 2. Porównanie regulatora kaskadowego i regulatora stanu z obserwatorem (opracowanie własne na podstawie [2])

	Regulator kaskadowy	Regulator stanu z obserwatorem
Dokładność regulacji temperatury	$\pm 7$ K	$\pm 2$ K

## 3. MODEL BLOKU BC-50 W PROGRAMIE GATECYCLE 6.1

Do rozważań przyjęto blok BC-50, pracujący w Elektrociepłowni Gdańsk 2 (Ec2). Program GateCycle, w którym zamodelowano blok BC-50, został opracowany przez firmę General Electric. Pracuje w środowisku Windows, służy do symulacji pracy obiegów parowych i gazowych. Wykorzystywany jest w przypadku rozbudowy lub projektowania nowych instalacji albo badania istniejących.

W Elektrociepłowni Gdańskiej w bloku BC-50 zastosowano kocioł parowy, pyłowy, walczakowy OP-230 o maksymalnej wydajności trwałej 230 t/h pary, z naturalną cyrkulacją. Kocioł opalany jest pyłem węgla kamiennego o wartości opałowej 21,98 MJ/kg. Palenisko jest rodzaju tangencjonalnego (palniki ustawione narożnie). Sprawność kotła wynosi 89%. Jako źródło szczytowe zastosowano kocioł wodny WP-120.

Turbina 13UP-55 skojarzona z kotłem OP-230 jest turbiną upustowo-przeciwprężną, osiową, akcyjną, dwukadłubową z upustami pary do zasilania odbiorcy technologicznego oraz do zasilania wymienników ciepłowniczych i regeneracyjnych. Turbina składa się z części wysoko- (WP) i średnioprężnej (SP). Moc turbiny wynosi 55 MW.

Blok wyposażony jest w generator synchroniczny GTHW-63 (G) chłodzony wodorem.

BC-50 posiada cztery stopnie podgrzewu regeneracyjnego: podgrzewacz średnioprężny (XN) zasilany z drugiego upustu turbiny średnioprężnej, odgazowywacz (QC) zasilany z pierwszego upustu turbiny średnioprężnej, wymiennik regeneracyjny wysokoprężny (XW1) zasilany z wylotu z turbiny wysokoprężnej oraz wymiennik regeneracyjny wysokoprężny (XW2) zasilany z pierwszego

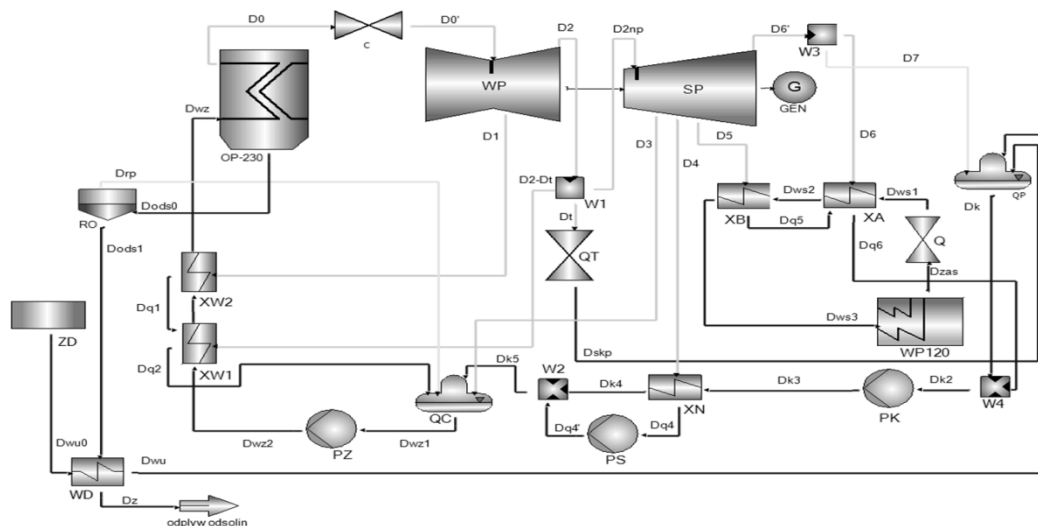
upustu turbiny wysokoprężnej. Wymienniki regeneracyjne wysokoprężne są typu powierzchniowego płaszczowego. Odgazowywacz nadbudowany jest nad zbiornikiem wody zasilającej i dzieli układ regeneracji na część średnioprężną i wysokoprężną [3].

W części średnioprężnej turbiny 13UP-55 para pobierana z upustu ciepłowniczego i z części wylotowej turbiny zasila wymienniki ciepłownicze (XA) i (XB). Aby zbadać wpływ dokładności pomiaru temperatury pary świeżej na efektywność ekonomiczną bloku na rurociągu pary świeżej, umieszczono bloczek o nazwie *Valve*

oznaczony na schemacie jako *C*, który umożliwił zadawanie temperatury strumienia pary  $D_0'$  za zaworem innej, niż temperatura strumienia pary  $D_0$  na wyjściu z kotła OP-230.

Ujemną odchyłkę pomiaru temperatury pary świeżej zamodelowano poprzez zadanie odpowiednio niższej temperatury pary za zaworem modelującym czujnik, niż temperatura pary za kotłem OP-230.

Na rysunku 2 przedstawiono schemat zaprojektowanego bloku BC-50 wykonany w programie GateCycle 6.1.



Rys. 2. Model bloku BC-50 wykonany w programie GateCycle 6.1 (opracowanie własne)

#### 4. WYZNACZENIE WSKAŹNIKÓW SPRAWNOŚCI I PRODUKCJI

Wskaźnikami charakteryzującymi pracę elektrociepłowni są moc dostarczona do kotła w paliwie, moc elektryczna wytwarzana przez turbospół, jednostkowe zużycie paliwa oraz ciepło wykorzystywane na cele technologiczne.

Utrzymując stałą produkcję pary, w wyniku poprawnego działania regulatorów strumienia paliwa oraz podmuchu powietrza wtórnego, zmniejszono wartość temperatury pary za zaworem *C*, którego zadaniem było zamodelowanie błędu pomiaru czujnika.

Wyniki obliczeń numerycznych wykonano dla trzech przypadków: I - gdy temperatura pary przed i za zaworem *C* jest taka sama (wyznacza punkt odniesienia dla parametrów w kolejnych przypadkach); II - gdy temperatura pary za zaworem jest niższa niż przed nim o różnicę

temperatur zgodną z błędem regulacji dla standardowego regulatora kaskadowego i standardowej termopary; III - gdy temperatura pary za zaworem jest niższa niż przed nim o różnicę temperatur zgodną z błędem regulacji dla regulatora stanu z obserwacją i precyzyjnej termopary.

W związku ze spadkiem temperatury, a także ciśnienia, pary  $D_0'$  moc bloku spada przy stałym jednostkowym zużyciu paliwa. Zmniejszyły się także ciśnienie i temperatura strumienia  $D_2$ , w konsekwencji czego zmniejszył się strumień ciepła przekazywany na cele technologiczne. Wzrosło jednostkowe zużycie ciepła oraz straty mocy cieplnej, spadła także sprawność ogólna obiegu. Przy zastosowaniu modułu regulacyjnego firmy Alstom straty związane z błędem czujnika są na poziomie mniejszym niż 400 kW. Wartości różnic poszczególnych wskaźników sprawności i produkcji dla wcześniej opisanego przypadku II i III przedstawiono w tabelicy 3.

Tablica 3. Zestawienie różnic wskaźników sprawności i produkcji przy zastosowaniu regulatora kaskadowego i standardowej termopary oraz regulatora stanu i precyzyjnej termopary (opracowanie własne)

Nazwa	Symbol	Jednostka	Regulator kaskadowy+ standardowa termopara	Regulator stanu+ precyzyjna termopara	Różnica
Moc cieplna doprowadzona do kotła	$Q_d$	kJ/s	1583	388	1195
Moc elektryczna netto	$P_{gn}$	kW	-491	-124	366
Jednostkowe zużycie ciepła	$q_{pe}$	MJ/kWh	0,271	0,067	0,204
Jednostkowe zużycie paliwa	$b_e$	kg/kWh	0,0	0,0	0,0
Moc na cele technologiczne	$Q_t$	kJ/s	-69	-17	52
Straty mocy cieplnej	$\Delta Q$	kJ/s	2141	529	1612
Sprawność netto	$\eta_n$	[-]	-0,009	-0,002	0,007

## 5. ANALIZA EFEKTÓW EKONOMICZNYCH

### 5.1 Wskaźniki opłacalności finansowej modernizacji

Przyrost dochodu, wynikający ze zmniejszenia kosztów zakupu paliwa oraz zwiększonej sprzedaży energii elektrycznej, jest warunkiem koniecznym, aby inwestycja w modernizację poprawy regulacji temperatury pary świeżej okazała się opłacalna ekonomicznie. Przychód powinien być większy od przyrostu rocznych kosztów kapitałowych oraz kosztów związanych z nakładami inwestycyjnymi na modernizację układu regulacyjnego [4].

Przy wykorzystywaniu metod dyskontowych analizy opłacalności inwestycji posłużono się dwoma podstawowymi metodami: metodą wartości zaktualizowanej netto (NPV - Net Present Value) i metodą wewnętrznej stopy zwrotu (IRR - Internal Rate of Return).

Dla analizowanej modernizacji koszty nakładów inwestycyjnych wynoszą około 420 tys. zł. Na potrzeby analizy efektów ekonomicznych, metodą kosztów rocznych, założono zwrot kosztów kapitału inwestycyjnego po 5 latach eksploatacji modułu regulacyjnego. Wskaźnik opłacalności ekonomicznej inwestycji IRR wyniósł 15%, co przy przyjętej stopie dyskonta na poziomie 8% wskazuje na efektywność ekonomiczną inwestycji. Dodatkowo wyznaczono wskaźnik NPV, który wyniósł ok 90 mln zł potwierdzając efektywność ekonomiczną inwestycji.

### 5.2 Oszacowanie korzyści finansowych

Zastosowanie modułu zwiększającego dokładność pomiaru i regulacji temperatury pary świeżej pozwala na zmniejszenie ilości paliwa doprowadzonego do kotła OP-230.

Różnica w rocznym zużyciu węgla przed i po zainstalowaniu modułu regulacyjnego wynosi 1 409 t co pozwala zaoszczędzić w ciągu roku 172,5 tys. zł/a, przy założeniu ceny węgla na poziomie 120 zł/t. Oszczędność ta jest dwukrotnie wyższa niż roczne koszty kapitałowe.

Zmniejszenie ilości spalane paliwa zmniejsza ilość emisji CO<sub>2</sub> do atmosfery. Przy wartości opałowej węgla równej  $w_d=21980$  kJ/kg wskaźnik emisji CO<sub>2</sub> wynosi  $W_{CO_2}=94,85$  kg/GJ [5]. Dla podanych założeń roczne zmniejszenie emisji CO<sub>2</sub> po zainstalowaniu modułu regulacyjnego wynosi 2,938 t/a.

## 6. PODSUMOWANIE

Poprawa dokładności pomiaru a także poprawa wydajności układu sterowania temperatury pary świeżej pozwala na zmniejszenie ilości paliwa dostarczanego do kotła, przy nie zmienionej produkcji energii elektrycznej. Zmniejszenie ilości paliwa prowadzi do redukcji emisji CO<sub>2</sub>. Pozwala to na oszczędności wynikające z kosztów zakupu paliwa oraz kosztów zakupu uprawnień do emisji gazów cieplarnianych.

## 7. BIBLIOGRAFIA

1. Głuch J., Krzyżanowski J.: Diagnostyka cieplno-przepływowa obiektów energetycznych, Wydawnictwo Instytutu Maszyn Przepływowych PAN, Gdańsk 2004, ISBN 978-83-88237-65-9
2. Hellweg S.: Products for optimization of Power Plant operation, Elbląg 2012.
3. Reński A.: Instrukcja do ćwiczenia laboratoryjnego przeprowadzanego w EC2 w Gdańsku: Bilans bloku ciepłowniczego, Gdańsk, 2002.
4. Bartnik R.: Rachunek efektywności techniczno-ekonomicznej w energetyce zawodowej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2008, ISBN 978-83-60691-29-8
5. Wartości opałowe i wskaźniki emisji CO<sub>2</sub> w roku 2010 do raportowania w ramach Wspólnego Systemu Handlu Uprawnieniami do Emisji za rok 2013, Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami, Warszawa 2012.

## IMPACT ASSESSMENT OF THE ACCURACY OF LIVE STEAM TEMPERATURE MEASUREMENT ON THE ECONOMIC EFFECTIVENESS OF POWER UNIT

**Keywords:** live steam temperature measurement, GateCycle software, mathematical model of BC-50 cogeneration unit

In the paper, the results of analysis of the assessment of the impact of live steam temperature measures accuracy on the economic effectiveness of power unit, was presented. Analysis was based on Alstom Steam Temperature solution, which consists of modern sensor and control technology in the boiler. The solution contains an in-situ, self-calibrating temperature measurement system and Advanced State Controller with active observer technology. Mathematical model of BC-50 cogeneration unit was developed using GateCycle software, with actual unit parameters. The outcome of the analysis is that the application of Advanced State Controller with active observer technology results in the fuel consumption reduction and the reduction of CO<sub>2</sub> emissions. Proposed investment proves to be economically viable.