

Artur WolkowiczUniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu
artur.wolkowicz@gmail.com

**MODELE EKONOMETRYCZNE JAKO NARZĘDZIE
STEROWANIA PROCESAMI TECHNOLOGICZNYMI**

**ECONOMETRIC MODELS AS A TOOL
FOR TECHNOLOGICAL PROCESS CONTROL**

DOI: 10.15611/ekt.2015.2.06

Streszczenie: W opracowaniu przedstawiono propozycję zastosowania modeli ekonometrycznych w sterowaniu procesami technologicznymi. Modele ekonometryczne są narzędziem służącym do wyznaczania prognoz krótkoterminowych, które są podstawą sterowania urządzeniami infrastruktury produkcyjnej. Zaproponowano metodę korekcji błędów prognoz w rzeczywistym procesie produkcyjnym. Przedstawiono modele wygładzania wykładniczego oraz adaptacyjny model trendu pelzającego z wagami harmonicznymi. W obliczeniach wykorzystano funkcję regresji. Wskazano zagadnienie programowania liniowego. Metoda przedstawiona została na przykładowym klasycznym procesie technologicznym stosowanym w energetyce. Przeprowadzone badanie wskazuje możliwość innego spojrzenia na procesy sterowania, niekoniecznie oparte na dotychczasowych sposobach regulacji. Zamysłem tego opracowania jest zademonstrowanie możliwości zastosowania ekonometrii w przemyśle.

Słowa kluczowe: model wygładzania wykładniczego z trendem pelzającym; model Browna; funkcja regresji; regresja wieloraka i progowa; programowanie liniowe.

Summary: This paper presents a proposal for process control applications based on econometric models. They are a tool which aim is to determine short-term forecasts, which are the basis to control the devices of production infrastructure. The article describes the application of the method of forecast errors corrective device in a real production process. Econometric models are presented: the exponential smoothing model and creeping trend adaptive model with harmonic scales. The calculations are used and the regression function is indicated by the linear programming problem. The method is presented on the example of classical technological process used in the energy sector. The study indicates the possibility of another perspective on the control processes, not necessarily based on the existing methods of regulation. The idea of this study is to demonstrate the possibility of using econometrics in the industry.

Keywords: exponential smoothing model with creeping trend, Brown model, regression function, multiple and threshold regression, linear programming.

1. Wstęp

Celem opracowania jest wskazanie możliwości zastosowania modeli ekonometrycznych w układach sterowania systemami produkcyjnymi.

Sterowanie urządzeniami może być usprawnione przez zastosowanie regulatorów przetwarzających sygnały z obiektów sterowanych. W obszarze automatyzacji sterowania prowadzone są intensywne badania, zarówno nad metodami przetwarzania sygnałów, jak i nad technicznym doskonaleniem urządzeń. Miniaturyzacja i malejące ceny podzespołów elektronicznych zwiększają tempo wzrostu poziomu obecności urządzeń elektronicznych, w tym różnego rodzaju regulatorów w procesach produkcyjnych i konsumpcyjnych urządzeniach powszechnego użytku. Jednymi z najczęściej stosowanych rozwiązań są regulatory przetwarzające dane (sygnały) generowane przez te urządzenia w procesie ich eksploatacji. W tym celu przetwarza się dane obrazujące stan obecny oraz pewną ilość danych historycznych.

Szeroki wachlarz dostępnych specyfikacji modeli ekonometrycznych pozwala na dobranie odpowiedniego narzędzia, dostosowanego do specyfiki obiektu sterowania. Dodatkowym motywem uzasadniającym takie rozwiązanie może być potrzeba regulacji skomplikowanych procesów o większej liczbie zaangażowanych urządzeń, które jednocześnie biorą udział w wykonaniu pojedynczego zadania.

Na przykład w kontroli temperatury w urządzeniach AGD (lodówki) bardzo dobrze sprawdzają się powszechnie stosowane regulatory – wtedy nie ma potrzeby stosowania dodatkowych narzędzi. Sytuacja ulega zmianie, gdy w zastosowaniach pojawia się sterowanie szeregiem urządzeń jednocześnie z wykorzystaniem charakterystyk jednostkowych poszczególnych obiektów. Analiza stanu urządzeń w czasie jest podstawą generowania polecenia w reakcji na zmianę wybranych parametrów procesu produkcyjnego.

W badanym procesie produkcyjnym zadanie polega na dobraniu właściwych wielkości obciążeń cząstkowych, które optymalizują proces technologiczny. Proponowanym narzędziem zautomatyzowanej analizy danych generowanych w badanym procesie produkcyjnym są modele ekonometryczne. Dynamiczne zmiany parametrów w produkcji wymagają ciągłego, wzmożonego nadzoru. Bardzo często sterowanie wymaga od doświadczonego sterującego szybkiej prognozy i wykonania odpowiedniej procedury. Działanie człowieka jest wtedy najsłabszym ogniwem w układzie ze względu na możliwe opóźnienia i błędne reakcje w warunkach stresu.

W artykule uzasadniono celowość zastosowania narzędzi ekonometrii w układach sterowania. Zostanie zaproponowana, odmienna od obecnie stosowanej, zasada reakcji na odchylenie już występujące; działanie przewidujące wystąpienie odchylenia oraz technika generowania (zautomatyzowanej) decyzji o charakterze reakcji wyprzedzającej.

W szczególności zostaną przedyskutowane: rodzaje i zachowanie regulatorów, proponowane modele ekonometryczne, zagadnienie programowania liniowego oraz metoda weryfikacji i regulacji stosowanego rozwiązania.

2. Rodzaje i zachowanie regulatorów

Regulatory stosowane w procesach produkcyjnych można przedstawić, w dużym skrócie, jako urządzenia reagujące na odchylenie od wartości oczekiwanej zmiennej zależnej (sterowanej charakterystyki procesu). Sposób reakcji można zapisać w postaci równania. Stosuje się regulatory dostosowane do wymaganych typów reakcji na odchylenia. Stosuje się regulatory:

- regulator dwupołożeniowy,
- regulator proporcjonalny P,
- regulator całkowy I,
- regulator różniczkowy D.

Wymienione regulatory, nazywane członami regulacyjnymi, stosowane są w układach połączonych opisanych w punkcie 2.5.

2.1. Regulator dwupołożeniowy

Przedstawicielem regulatorów dwupołożeniowych szeroko stosowanym jest regulator temperatury żelazka – działa, utrzymując temperaturę w określonym przedziale. Jeżeli rzeczywista temperatura zawiera się w przedziale oczekiwanym lub przekracza górną wartość, grzałka jest wyłączona, natomiast spadek wartości temperatury poniżej zadanej powoduje włączenie grzałki. Wykres temperatury jest wtedy linią łamaną.

2.2. Regulator proporcjonalny P

Regulator proporcjonalny reaguje na odchylenie zmiennej regulowanej od wartości oczekiwanej zgodnie z równaniem [Rumanowski 2004]:

$$U(t) = k_p e(t), \quad (1)$$

$$e(t) = W(t) - Y(t), \quad (2)$$

gdzie: $U(t)$ – sygnał sterowania,

$e(t)$ – jest odchyleniem od wartości oczekiwanej w danym czasie t ,

k_p – współczynnik wzmocnienia,

$W(t)$ – wartość zadana,

$Y(t)$ – wartość rzeczywista.

Regulatory tego typu stosuje się na przykład w regulacji poziomu wody lub ciśnienia w zbiornikach. Spełniają swoje zadanie, jeśli nie ma potrzeby dużej dokładności regulacji.

2.3. Regulator całkowy I

Regulator całkowy stosowany w układach o małej dynamice zmian charakteryzujemy równaniem [Kowal 2012]:

$$U(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt, \quad (3)$$

gdzie T_i jest czasem całkowania.

Samodzielnie ten typ regulatora występuje sporadycznie. Zwykle występuje w połączeniu z regulatorami typu P oraz D.

2.4. Regulator różniczkowy D

Regulator różniczkowy D może być stosowany samodzielnie, lub w zestawieniu z innymi regulatorami, np. całkującym I i proporcjonalnym P. Analogowe regulatory o segmencie różniczkującym charakteryzują długość czasu wyprzedzenia T_d . Można to określić jako reakcję regulatora na wystąpienie odchylenia zmiennej regulowanej od wartości oczekiwanej. Regulator zwielokrotnia swoją reakcję w początkowej fazie działania, co dynamizuje korekcję wielkości wartości rzeczywistej do wartości zadanej. Równanie idealnego regulatora możemy zapisać [Kowal 2012]:

$$U(t) = T_d \frac{de(t)t}{dt}. \quad (4)$$

Wyjątkowo trudny problem w działaniu regulatora różniczkującego pojawia się, zdaniem autora, w chwili, gdy w czasie różniczkowania występuje tzw. punkt przebiegienia lub ekstremum. Dokładniej precyzując, sytuacja ta występuje w końcowym momencie okresu różniczkowania. W praktyce uwidacznia się to dużymi wahaniami wartości zmiennej regulowanej przy szybkich zmianach parametrów.

2.5. Regulatory złożone

Regulatory stosowane w praktyce występują w określonych zestawieniach, np. pojedynczego regulatora dwupołożeniowego lub regulatora proporcjonalnego. Bardziej złożone regulatory składają się z kilku członów, np. PD, PI oraz najbardziej dokładnego PID. Regulator PDI łączy w sobie działanie trzech typów regulatorów, przez co staje się najbardziej skuteczny. Równanie idealnego regulatora PID [asimo.pl 2013]:

$$U(t) = K_p \left[e(t) + T_d \frac{de(t)t}{dt} + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \right]. \quad (5)$$

Człony regulatorów najczęściej stosowane są w układzie równoległym, choć możliwe jest ułożenie w układzie szeregowym, np. przy regulacji obiektu o dużych wahaniami. Rozwiązanie takie związane jest ze specyfiką działania regulatorów typu D. Duże, szybkie wahania mogą spowodować przesterowanie. Człon różniczkujący odpowiada za wyprzedzenie (T_d) i może, reagując wyprzedzająco, spowodować rozchwianie wielkości regulowanej. Określone dotychczas zasady doboru stałych współczynników T_d i T_i ułatwiają stosowanie regulatorów PID.

3. Optymalizacja

Programowanie liniowe jest powszechnie narzędziem wspomagającym optymalizację procesów technologicznych. Pozwala określić wartości deterministyczne [Sikora 2008] procesów produkcyjnych. Proponowana w tym artykule metoda wymaga dokładnego usystematyzowania całego zasobu urządzeń biorących udział w procesie produkcji, wyznaczenia charakterystyki wydajności pracy zastosowanych urządzeń: wentylatorów, przenośników oraz przepływów. Występujące w procesach podzespoły z reguły posiadają nieliniową charakterystykę wydajności, podobną do funkcji regresji wykładniczej lub do wielomianu. Wymaga to transformacji danych i uzyskania modelu uliniowionego [Aczel 2011]:

$$\log Y = \log \beta_0 + \beta_1 x + \log \varepsilon \quad (6)$$

lub

$$y = az + bx + c. \quad (7)$$

Logarytmując dane lub podstawiając zmienną pomocniczą z przedstawiającą wartości x^2 [Dziechciarz 2003], wykorzystujemy w dalszym postępowaniu metodę simpleks pozwalającą rozwiązać zadanie programowania liniowego o założeniach:

$$Z = c_1 k_1 + c_2 k_2 + c_3 k_3 + \dots + c_n k_m \rightarrow \min, \quad (8)$$

$$c_{11} k_1 + c_{12} k_2 + c_{13} k_3 + \dots + c_n k_m \geq b_1, \quad (9)$$

$$c_{n1} k_1 + c_{n2} k_2 + c_{n3} k_3 + \dots + c_{nm} k_{nm} \geq b_n, \quad (10)$$

$$c_{11}, c_{12}, c_{13}, \dots, c_n \geq 0, \quad (11)$$

gdzie Z jest kosztem energii zasilającej podzespoły kotłów, $k_1, k_2, k_3, \dots, k_m$ są oznaczeniami kolejnych maszyn w procesie, natomiast $c_{11}, c_{12}, c_{13}, \dots, c_n$ reprezentują wartość procentową obciążenia danej maszyny.

Rozpatrując przedział wydajności przykładowej instalacji, rozwiązujemy zagadnienie ustawienia procesu, kolejno rejestrując wyniki przy zmianie wartości funkcji celu o jedną jednostkę. Uzyskana macierz wyników jest podstawą konstrukcji modelu regresji wielorakiej całej badanej instalacji lub jednego z rozbudowanych podzespołów tej instalacji. Wykorzystując uzyskane wyniki, opracowujemy mapę obciążeń jednostkowych zastosowanych maszyn.

4. Proponowane modele ekonometryczne

W opracowaniu badane jest zadanie utrzymywania ciśnienia pary (zmienna opisywana) w kolektorach elektrociepłowni. Zmienną (opisującą, sterowalną) jest wielkość produkcji pary przez kotły energetyczne. Kotły energetyczne składają się z trzech grup podzespołów: podajników paliwa, wentylatorów podmuchu oraz wen-

tylatorów ciągu kominowego. Każda grupa z wymienionych urządzeń ma charakterystykę pracy $y = az + bx + c$. Natomiast odbiór pary jest nieregularny ze względu na występowanie dziesięciu odbiorców indywidualnych. Dynamika zmian w szeregu czasowym wartości obciążeń jest bardzo duża. Utrzymanie stałego ciśnienia pary jest trudne.

Ważnym zjawiskiem jest występowanie istotnych zmian w krótkich przedziałach czasu. Zmienność ta może wykluczać zastosowanie regulatorów PID. Rozwiązania problemu, zdaniem autora, należy szukać w zastosowaniu modeli ekonometrycznych, pozwalających z dużą dokładnością prognozować zachowanie się instalacji energetycznej. Właściwa specyfikacja modelu i estymacja parametrów w ruchu ciągłym elektrociepłowni będzie, zdaniem autora, skutecznym narzędziem doskonalenia regulacji. Poprawa precyzji prognoz krótkoterminowych, uzyskana w rezultacie zastosowania modeli ekonometrycznych w pełni zaspokoją oczekiwania w zakresie doskonalenia jakości regulacji.

Na przykład dobierając czas prognozy na dwa okresy w przód ($t + 2$), uzyskuje się wartości estymowane o dokładności spełniającej warunek poziomu istotności $\alpha = 0,01$. Prognoza tak dokładna jest właściwym impulsem sterującym. Dlatego można przyjąć, że zjawiska cykliczności i sezonowości można w tym wypadku pominąć, gdyż w zastosowanych sekundowych przedziałach czasu trudno o takie zjawisko.

Autor proponuje wykorzystanie modelu wygładzania wykładniczego Browna oraz modelu trendu pełzającego z wagami harmonicznymi. Model typu GARCH wykorzystujący informację z długich przedziałów czasu został przez autora wykluczony. Powodem jest brak spełnienia warunku zbieżności szeregu danych w początkowym okresie pracy urządzenia. Ogranicza to przydatność przy rozruchach oraz w okolicznościach utraty danych historycznych dłuższego okresu.

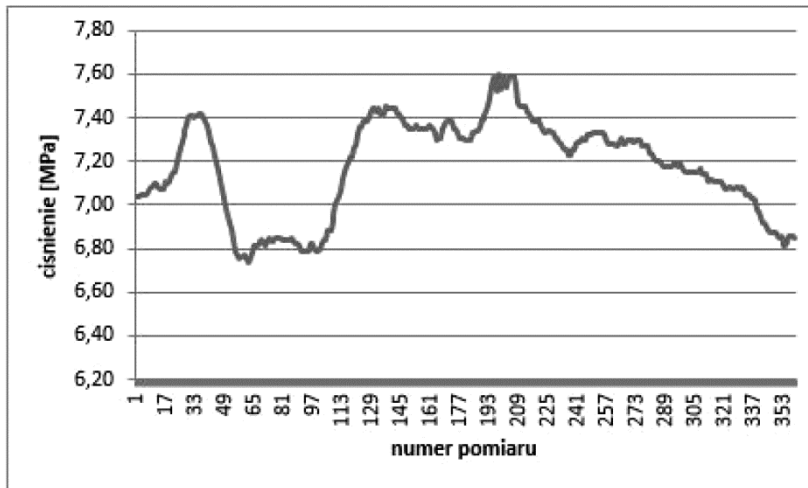
W związku z powyższym do opracowania i rozwiązania zagadnienia zostały wybrane dwie specyfikacje modelowe: model wygładzania wykładniczego oraz model trendu pełzającego z wagami harmonicznymi. Jako pierwszy zostanie przedstawiony model wygładzania wykładniczego określonego wzorem

$$\hat{Z}_{t+1} = Z_t + (1 - w)(\hat{Z}_t - Z_t), \quad (12)$$

gdzie: \hat{Z}_{t+1} to wartość prognozy przyszłego okresu, \hat{Z}_t jest wartością prognozy w czasie rzeczywistym, Z_t to wartość zmiennej w czasie t .

Model wygładzania wykładniczego [Aczel 2011] spełnia problem wartościowania danych w ujęciu czasowym. Dane starsze mają wartość wagi zmniejszającą się w sposób wykładniczy. Natomiast parametr wagowy w zawiera się w przedziale $0 < w < 1$. Własność wpływu liczby danych historycznych branych do obliczania w modelach ograniczono do dwunastu, tak aby proponowane modele były możliwe do oceny i porównania. Badane kotły parowe wykazywały czas inercji około 35 sekund. Natomiast dostępne dane historyczne gromadzone były w odstępach 20 sekund. Zmiany parametrów w procesie następowały szybciej, ale dwudziestosekun-

dowy odstęp zapisu pozwolił, w mechaniczny sposób, wstępnie wygładzić przebieg wartości danych. Na rysunku 1 przedstawiono wykres cząstkowy szeregu czasowego wartości ciśnienia pary obrazujący jego niestabilność w zapisie 20-sekundowym.



Rys. 1. Wykres ciśnienia pary

Źródło: opracowanie własne.

W dalszym etapie zastosowano wyznaczanie prognozy wielkości zmiennej o dwa okresy zapisu danych, co oznacza wyprzedzenie o 40 sekund. Okres prognozy pozwala na uzyskanie stabilizacji reakcji obiektów już po czasie inercji na zmianę ustawień wewnętrznych podzespołów kotłów. Uzyskane wartości prognoz w badanym okresie dwóch tygodni charakteryzowała duża dokładność. Najlepszy okazał się model z parametrem $w = 0,75$. Średni błąd kwadratowy MSE wyniósł 0,00129 przy $n = 30\ 200$.

Poniżej przedstawiono model adaptacyjny z trendem pełzającym i wagami harmonicznymi, podstawiając dane do modelu trendu pełzającego [Hellwig 1967] z wagami harmonicznymi biorącego pod uwagę zmienność tendencji rozwojowej, podobnie jak we wcześniejszym modelu. Pod uwagę wzięto dwanaście wartości wstecz. Zastosowano czteroelementową długość segmentu ($k = 4$) [Dziechciarz 2003]. Wzory wyznaczające cząstkowe trendy można zapisać:

$$a_1 = \frac{\sum_{t=1}^{l+k-1} (Z_t - \bar{Z})(t - \bar{t})}{\sum_{t=1}^{l+k-1} (t - \bar{t})}, \quad (13)$$

$$a_0^l = \bar{Z}_l - a_1^l \bar{t}_l, \quad (14)$$

gdzie $l = 1, 2, \dots, n - k + 1$.

Średnie arytmetyczne teoretycznej wartości Z w kolejnych jednostkach czasu wyznacza się według wzoru:

$$\bar{Z}_t = \frac{1}{u} \sum_{l=1}^{n-k+1} \hat{z}_l, t = 1, 2, \dots, n, \quad (15)$$

Wagi harmoniczne z przedziału $(0,1]$ wyznacza się według wzorów:

$$C_2^n = \frac{1}{(n-1)^2}, \quad (16)$$

$$C_t^n = C_{t-1}^n + \frac{1}{(n-1)(n-t+1)}, \quad (17)$$

Prognozę punktową wyznacza się zgodnie z wzorem:

$$Z_t^* = \bar{Z}_n + (T - n)\bar{w}, \quad (18)$$

gdzie średnia przyrostów cząstkowych to $\bar{w} = \sum_{t=1}^{n-1} C_{t+1}^n + w_{t+1}$, T i n są numerami obserwacji.

Opracowana konstrukcja modelowa jest mechanizmem pozwalającym na uzyskanie modelu adaptacyjnego dynamicznie reagującego na zmiany wartości parametrów procesu produkcyjnego.

Prognozy wykazały dużą trafność. Średni błąd kwadratowy MSE wyniósł 0,00061 przy $n = 30\ 200$. Wynik ten wskazuje właściwy wybór modelu adaptacyjnego do zastosowania w dalszym postępowaniu.

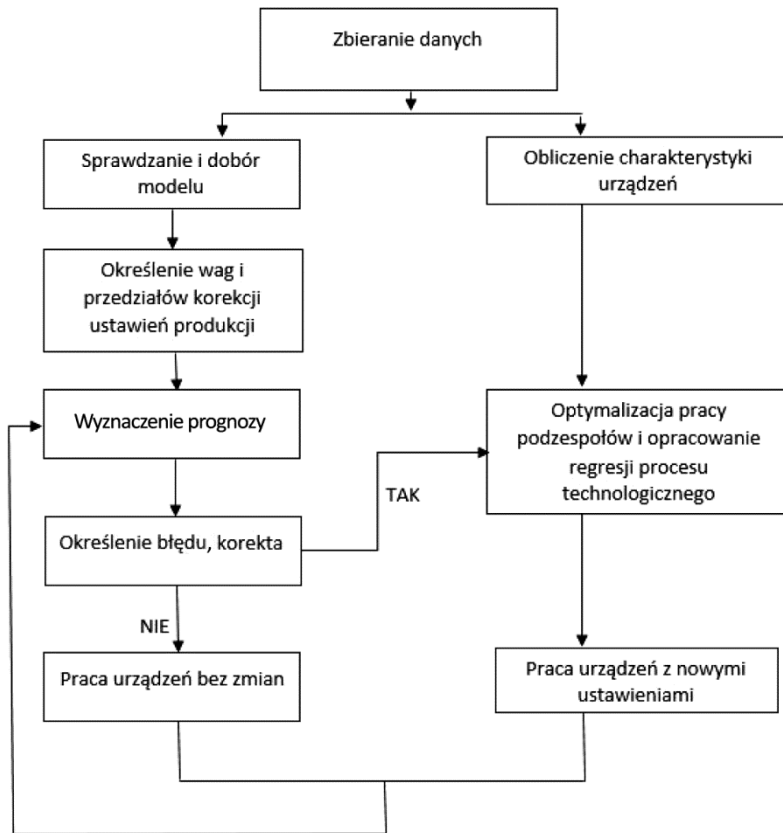
5. Weryfikacja i regulacja stosowanego rozwiązania

Prognozy krótkoterminowe uzyskiwane w wyniku zastosowania modelu adaptacyjnego dają możliwość oceny zachowania się obiektu regulacji w nadchodzących czterdziestu sekundach. Różnica wartości prognozowanej od oczekiwanej daje wartość, o jaką należy zmienić parametry wyjściowe z segmentów składowych kotłów parowych. Duże znaczenie praktyczne ma informacja o wartości błędu prognozy, którą wykorzystuje się w dalszych obliczeniach. Równoległe do określania błędu prognozy liczymy regresję liniową wartości ciśnienia pary w krótkim okresie. Następnie oblicza się wartość błędu prognozy w czasie rzeczywistym. Wielkość ta, po podstawieniu do wyznaczonej funkcji regresji, daje informację, o ile powinna zmienić się wielkość wytwarzania pary, tak aby wartość ciśnienia osiągnęła wartość wymaganą w procesie technologicznym.

Jednocześnie z prognozowaniem wartości ciśnienia pary przeprowadza się wyznaczanie wartości zmiennych objaśniających modelu opisującego mechanizm generowania wartości zmiennej regulowanej.

Przy kilkunastoprocentowych zmianach obciążenia w przedziale kilkusekundowym, co oznacza dużą zmienność, może wystąpić potrzeba zastosowania nieliniowej funkcji regresji. Po ustabilizowaniu ciśnienia ponownie może być przeliczona i sto-

sowana funkcja regresji liniowej. Sygnałem do zmiany wielkości produkcji pary może być zastosowanie granic przedziału zmienności. Wówczas wyznaczane są nowe regresje progowe, za każdym razem po przekroczeniu zadanej wartości. Tok postępowania przedstawiono w poniższym algorytmie (rys. 2).



Rys. 2. Algorytm toku obliczeń

Źródło: opracowanie własne.

Przyjęta w tym opracowaniu zasada wykorzystywania danych mierzonych w odstępach dwudziestu sekund umożliwia wykorzystywanie danych międzyokresowych jako podstawę do ustalania regresji chwilowych.

Zadaniem praktycznym jest zmiana wydajności kotłów parowych. Wielkość zmiany produkcji powinna być podzielona w równym stopniu na wszystkie kotły parowe zasilające układ kolektorów. Ustawienia jednostkowe podzespołów kotłów muszą być przeprowadzone zgodnie ze wspomnianą mapą obciążeń jednostkowych uzyskanych w postępowaniu programowania liniowego. Wyprzedzenie ustawień,

połączone z optymalnymi ustawieniami, daje działanie bardzo komfortowe. Wyeliminowany zostaje element opóźnienia reakcji na zmianę, a przez to zostaje wyeliminowana konieczność nadrabiania spóźnionej reakcji.

W tabeli 1 przedstawiony jest przykład zastosowania nowatorskiego postępowania proponowanego przez autora opracowania. Przedstawiono wycinek tabeli przeliczeniowej z pominięciem kolumn pomocniczych.

Tabela 1. Tabela obliczeniowa (fragment)

Lp.	Czas	Wydajność	Ciśnienie	Prognoza $t + 2$	Odchylenie	Wartość korekty	Wydajność po korekcie
		m ³ /min	MPa	MPa	MPa	m ³ /min	m ³ /min
14	00:04:20	245,00	6,87	6,87	0,03	1,03	246,03
15	00:04:40	244,00	6,84	6,82	0,08	0,00	246,03
16	00:05:00	244,00	6,81	6,78	0,12	3,87	247,87
17	00:05:20	245,00	6,79	6,75	0,15	0,00	247,87
18	00:05:40	245,00	6,77	6,74	0,16	0,00	247,87
19	00:06:00	243,00	6,73	6,72	0,18	0,00	247,87
20	00:06:20	243,00	6,70	6,67	0,23	8,72	251,72
21	00:06:40	242,00	6,70	6,65	0,25	0,00	251,72
22	00:07:00	243,00	6,67	6,65	0,25	0,00	251,72
23	00:07:20	242,00	6,66	6,63	0,27	0,00	251,72
24	00:07:40	240,00	6,66	6,62	0,28	0,00	251,72
25	00:08:00	241,00	6,63	6,62	0,28	0,00	251,72
26	00:08:20	241,00	6,61	6,60	0,30	11,26	252,26
27	00:08:40	241,00	6,60	6,57	0,33	0,00	252,26
28	00:09:00	242,00	6,60	6,57	0,33	0,00	252,26
29	00:09:20	241,00	6,58	6,57	0,33	0,00	252,26
30	00:09:40	241,00	6,58	6,56	0,34	0,00	252,26
31	00:10:00	240,00	6,58	6,56	0,34	0,00	252,26
32	00:10:20	240,00	6,58	6,57	0,33	0,00	252,26
33	00:10:40	239,00	6,57	6,57	0,33	0,00	252,26
34	00:11:00	239,00	6,56	6,56	0,34	0,00	252,26
35	00:11:20	240,00	6,54	6,55	0,35	0,00	252,26
36	00:11:40	240,00	6,50	6,52	0,38	0,00	252,26
37	00:12:00	242,00	6,47	6,47	0,43	15,82	255,82
38	00:12:20	243,00	6,44	6,43	0,47	0,00	255,82
39	00:12:40	242,00	6,42	6,39	0,51	18,64	261,64
40	00:13:00	243,00	6,42	6,38	0,52	0,00	261,64

Źródło: opracowanie własne.

Podsumowane efekty zastosowania rozwiązania opartego na modelach ekonometrycznych przemawiają za jego stosowaniem. Rozwiązanie może być użyte w sterowaniu obiektów o stosunkowo krótkim czasie inercji. Dane zastosowane do przeliczeń dotyczyły procesów w elektrociepłowni.

Na podkreślenie zasługuje wielkość potencjalnego efektu ekonomicznego. Symulacja zastosowania proponowanego przez autora rozwiązania wykazuje możliwość oszczędności opału o ponad 5%.

Dalszym pozytywnym efektem jest zmniejszenie emisji zanieczyszczeń do otoczenia.

W kolumnie „wydajność” przedstawione są rzeczywiste wartości produkcji pary w dotychczasowym sposobie sterowania. Natomiast w kolumnie „wydajność po korekcie” przedstawione są wartości produkcji pary, jakie powinny występować w danym momencie, aby proces technologiczny (w tym przypadku: ciśnienie pary) przebiegał zgodnie z wymaganiami. Kolumna „korekta” uwidacznia nam, o jakie wartości należy zmieniać ustawienia obciążenia kotłów, aby utrzymywać żądane ciśnienie pary. Poszczególne wiersze odnoszą się do jednego punktu czasu.

6. Podsumowanie

Opisana metoda jest autorską propozycją zastosowania modelu ekonometrycznego w procesie sterowania. Celem zastosowania jest maksymalizacja korzyści z produkcji. W badanym, przykładowym procesie towarzyszy temu korzyść ekologiczna, polegająca na zmniejszeniu szkodliwych emisji.

Zamierzeniem autora było opracowanie metody pozwalającej na dostarczenie dokładnie takiej ilości surowca (pary), jaka jest konieczna, w danej jednostce czasu. Rozwiązanie to jest alternatywą dla obecnie stosowanych regulatorów w produkcji, reagujących z opóźnieniem na już zaistniałą zmianę.

W opracowanej przez autora metodzie ujęte są charakterystyki poszczególnych, składowych elementów procesów technologicznych, a optymalizacja ustawień następuje w sposób ciągły, dynamicznie reagujący na prognozę odchylenia od wartości zadanych.

W artykule pominięto szczegółowe dane urządzeń technicznych, dla których obliczenia zostały wykonane, z powodu klauzuli poufności danych.

Literatura

- Aczel A.D., 2011, *Statystyka w zarządzaniu*, PWN, Warszawa.
- asimo.pl, 2013, http://www.asimo.pl/teoria/regulatory_dzialanie_ciagle.php [dostęp: 27.03.2013].
- Dziechciarz J., 2003, *Ekonometria*, AE, Wrocław.
- Hellwig Z., 1967, *Schemat budowy prognozy statystycznej metodą wag harmonicznych*, Przegląd Statystyczny, nr 4.
- Kowal J., 2012, *Podstawy automatyki, część I*, AGH, Kraków.
- Rumanowski K., 2004, *Podstawy automatyki*, Politechnika Poznańska, Poznań.
- Sikora W., 2008, *Badania operacyjne*, PWE, Warszawa.