

ZACHODNIOPOMORSKI UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNY
W SZCZECINIE

WYDZIAŁ INFORMATYKI

mgr inż. Paweł Krutys

STRESZCZENIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

*Algorytm adaptacyjnej estymacji wektora stanu
z niemierzonymi współrzędnymi
dla obiektów o strukturze szeregowej*

Promotor rozprawy:

dr hab. inż. Tadeusz Kwater, prof. UR

Katedra Inżynierii Komputerowej

Wydział Matematyczno-Przyrodniczy, Uniwersytet Rzeszowski

Recenzenci rozprawy:

Prof. dr hab. inż. Jacek Kluska

Katedra Informatyki i Automatyki

Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Rzeszowska

dr hab. inż. Marcin Korzeń

Katedra Metod Sztucznej Inteligencji i Matematyki Stosowanej

Wydział Informatyki, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Szczecin, 2017

Spis treści

1. Wprowadzenie	str.3
1.1 Cel i teza pracy	str. 3
1.2 Przegląd aktualnej wiedzy i literatury	str.5
1.3 Struktura pracy	str.7
2. Zawartość pracy	str.8
2.1 Estymacja stanu obiektu filtrem Kalmana-Bucy	str.8
3. Adaptacyjny algorytm wzmocnienia filtra generującego estymatę stanu	str.11
4. Badania symulacyjne algorytmu	str.18
5. Wnioski końcowe i podsumowanie	str. 21
6. Wybrane pozycje literaturowe	str.23
7. Spis publikacji własnych	str.24

1. Wprowadzenie

Jednym z głównych problemów przetwarzania sygnałów jest zagadnienie estymacji polegające na odtworzeniu użytecznego sygnału na podstawie innego sygnału obciążonego niepożądanym zakłóceniem. Zastosowanie klasycznej filtracji do eliminacji zakłóceń może spowodować usunięcie części sygnału użytkowego, dlatego stosuje się filtry optymalne, wykorzystujące statystyczne właściwości sygnałów. Do takich filtrów należy filtr Kalmana rekurencyjnie wyznaczający minimalno-wariancyjną estymatę wektora stanu modelu liniowego układu dynamicznego na podstawie pomiarów wyjścia tego układu. Przyjmuje się założenie, że zarówno pomiar jak i proces przetwarzania wewnątrz układu jest obciążony błędem o rozkładzie gaussowskim.

Taki przypadek rozważań dotyczy zagadnień estymacji dla układów stochastycznych. Głównym aspektem badań w filtrze Kalmana jest równanie różniczkowe estymaty stanu, w którym występuje współczynnik wzmocnienia zależny od macierzy kowariancji błędu estymacji. Wartość tego współczynnika wyznacza się z nieliniowego równania różniczkowego Riccatiego, uwarunkowanego od charakterystyk sygnałów oddziaływujących na badany obiekt i pomiar. Zatem przebieg wektora estymaty stanu zależy od dokładności określenia sygnałów stochastycznych.

W ogólności filtr Kalmana generuje zadawalające rezultaty estymacji stanu pod warunkiem, że charakterystyki sygnałów wymuszających są poprawnie określone. Dla niektórych przypadków sygnałów wyznaczenie ich charakterystyk losowych jest zadaniem trudnym, np. przy określeniu wpływu zjawisk atmosferycznych, jako wymuszeń na stan zbiorników wodnych. Inne podejścia do zagadnień estymacji nie wymagają konieczności charakteryzowania sygnałów losowych. Można tutaj wskazać cieszące się powodzeniem metody adaptacyjne. W pracy zaproponowano algorytm adaptacyjny estymacji stanu o strukturze jak w filtrze Kalmana, przy czym jego współczynnik wzmocnienia jest obliczany dla każdej chwili czasowej. Dzięki temu zmienna wartość współczynnika wzmocnienia filtru jest rodzajem odpowiedzi na zmianę charakterystyk sygnałów losowych. Prawidłowe wartości wzmocnień filtru powinny być takie, aby nie destabilizować rozwiązań całościowe, a ich zmiany to rodzaj „przybliżania się” do optymalnych rozwiązań filtru Kalmana. W pracy zaproponowano rozwiązanie, w którym wprowadza się oryginalny mechanizm wyznaczania współczynnika wzmocnienia filtru w procesie estymacji stanu obiektu, którego właściwości wskazują na szeregowość.

1.1 Cel i teza pracy

Najważniejszym wyzwaniem i jednocześnie wiodącym elementem badawczym było opracowanie nowego podejścia algorytmicznego procesu adaptacji, w którym możliwe byłoby pominięcie konieczności określenia charakterystyki sygnałów wymuszających. Jak już wcześniej wspomniano, w pewnych przypadkach takie określenie może być niezwykle trudne, dlatego w podjętych badaniach postawiony został cel, który należy sformułować w następujący sposób:

Cel pracy:

- **Opracowanie algorytmu adaptacyjnej zmiany współczynnika wzmocnienia filtra do estymacji wektora stanu z niektórymi niemierzonymi współrzędnymi dla obiektów o strukturze szeregowej.**

Zastosowanie proponowanego algorytmu adaptacyjnego do wyznaczenia wartości współczynnika wzmocnienia filtra pozwala ominąć niedogodności wynikające z konieczności oszacowania charakterystyk sygnałów oddziałujących na rozważany obiekt.

Wykonując tak postawione zadanie zrealizowano następujące cele cząstkowe:

- sformułowano modele matematyczne obiektu opisanego równaniami różniczkowymi zwyczajnymi lub cząstkowymi dla potrzeb weryfikacji algorytmu,
- dokonano doboru metod numerycznych oraz przeprowadzenie odpowiednich badań symulacyjnych,
- przeprowadzono badania symulacyjne estymacji z wykorzystaniem filtra Kalmana,
- zaproponowano algorytm adaptacyjny doboru współczynnika wzmocnienia filtra,
- rozszerzono adaptacyjny algorytm o zadany horyzont obserwacji,
- wykonano szereg badań uwzględniając zmienność parametrów i warunków pracy mechanizmu adaptacji.

Podjmując powyższe cele i zadania badawcze, w ramach niniejszej pracy starano się wykazać prawdziwość następującej tezy:

Teza pracy:

Stosując zaproponowany algorytm adaptacyjny wyznaczania zmian wartości współczynnika wzmocnienia filtra można realizować estymację stanu z niemierzonymi współrzędnymi dla wybranej klasy obiektów z efektywnością porównywalną lub lepszą niż w przypadku metod klasycznych. Czas realizacji i złożoność obliczeniowa będą korzystniejsze od standardowego rozwiązania filtra Kalmana.

Na podstawie zaproponowanego podejścia mogą być realizowane rzeczywiste systemy do estymacji stanu. Jest to niezwykle istotne dla potrzeb sterowania zwłaszcza takimi obiektami, w których pomiary niektórych współrzędnych wektora stanu wymagają obsługi laboratoryjnej. Obecnie dostępne środki techniczne i metody pozwalają wykonać zadanie adaptacyjne w krótkim czasie i przy nieznanymi charakterystykach zakłóceń. Zaprezentowane w pracy podejście można zakwalifikować do tej kategorii zadań. Autorski algorytm adaptacyjny, jaki proponuje się w niniejszej rozprawie daje możliwość uzyskania poprawnej estymacji stanu obiektu funkcjonującego w warunkach o nieznanymi charakterystykach sygnałów stochastycznych.

1.2 Przegląd aktualnej wiedzy i literatury

Współczesne badania inżynieryjne i badania systemowe ukierunkowane na zagadnienia konstrukcji nowych algorytmów zmieniają w obecnym czasie swój kierunek. Przede wszystkim w badaniach tych zmienił się charakter zadań badawczych związany z ich metodyką oraz sposobem rozwiązywania przy wykorzystaniu wszechobecnej techniki komputerowej. W poprzedniej dekadzie w badaniach naukowych dominowały różnorodne zagadnienia często pokrewne optymalizacji i badaniom operacyjnym, ściśle sformalizowane najczęściej w ujęciu deterministycznym, z dodatkiem elementów probabilistyki. Stanowiły one tzw. „zadania twarde”, w których uwarunkowania problemu, w tym cel działań, modele i ograniczenia, były dokładnie określone i zdeterminowane. Typowe w tej sytuacji postępowanie polegało na znalezieniu najlepszego rozwiązania, albo opracowania wariantów wspomagających dalszy proces decyzyjny. Metodyka rozwiązywania tego typu zagadnień polegała raczej na wyszukaniu i użyciu odpowiedniego aparatu matematycznego oraz stosowanej identyfikacji postaci modelu wraz z jego deterministycznymi parametrami. Tymczasem zarówno współczesny wzrost wymagań formułowanych wobec badań, jak i rozwój dostępnych metod, a nawet powstawanie nowatorskich koncepcji spowodowały, że obecnie dominują tzw. „zadania miękkie”, których istotę stanowią: metody probabilistyczne, zbiory przybliżone, zmienne niepewne, logika rozmyta, sieci neuronowe i algorytmy adaptacyjne. Zapewniają one wysoce zróżnicowany aparat formalny, zwłaszcza, że w/w metody mogą być łączone [12].

Analizując pokrewną tematykę spotykaną w literaturze dokonano przeglądu badań związanych z rozwiązywaniem i realizacją problematyki prezentowanej w niniejszej dysertacji.

Metodyka rozwiązania zadań systemowych wyraźnie zmieniła swój charakter z analitycznych metod matematycznych na procedury związane z wykorzystaniem najnowszych technik komputerowych i metod numerycznych. Należy jednak podkreślić, że istotą rzeczy nie jest tu rozwój w zakresie tradycyjnych metod numerycznych wspomagających klasyczne problemy matematyczne, lecz przede wszystkim rozwój specjalistycznych algorytmów, czyli technik komputerowych, dzięki którym procesy automatyzacji pomiarów oraz globalizacji systemów informatycznych są efektywniejsze. Zmiany paradygmatu badań naukowych, zwłaszcza w modelowaniu zjawisk o globalnym znaczeniu są uzasadnione szybkim rozwojem nowych technik komputerowych wykorzystujących informację rozpowszechnioną w sieciach oraz sposobem selekcji i doboru danych [12].

Zagadnienia rozważane w [9] wskazują, iż w ciągu ostatnich lat, filtry cząsteczkowe były stosowane z wielkim powodzeniem w problemach estymacji stanu. Metodę, jaką proponuje się w celu wyznaczania błędu aproksymacji nazwano metodą KLD (Kullback-Leiblera Distance). Jej kluczową ideą jest określony błąd aproksymacji wyznaczony na podstawie filtru cząsteczkowego. Zaprezentowane tam statystyczne podejście do zwiększenia skuteczności filtrów cząsteczkowych poprzez dostosowanie wielkości zestawów próbek w procesie wyznaczania błędu obarczone jest jednak dodatkowymi wymaganiami w postaci mocy obliczeniowej.

Zbliżoną tematykę przedstawia się w [13], w pracy tej obliczenia adaptacyjne i odpowiednie techniki są stosowane do analizy sekwencji obrazów cyfrowych, nie mniej jednak problem dotyczył adaptacji dynamicznych sekwencji oraz odpowiednio zaprojektowanych algorytmów, gdzie rozwiązanie bazuje na ANN-learningu. Takie rodzaje biologicznie uzasadnionych metod mogą być zastosowane, jako obliczeniowy odpowiednik i mechanizm percepcji wzrokowej. Implementacja tego typu algorytmu jest zaliczana do kategorii adaptacyjnego rozpoznawania obiektów. Realizacja takiego podejścia wymaga jednak konieczności przeprowadzenia procesu uczenia, co wiąże się z preprocesingiem danych uczących [11].

Istnieje wiele podejść związanych z zastosowaniem metod numerycznych do projektowania nowych algorytmów zaprezentowanych między innymi w [4], [8], [10].

Zaproponowane w pracy podejście autorskie algorytmu zostało weryfikowane na podstawie badań symulacyjnych, a realizację tego wykonano w oparciu ideę modelowania matematycznego z wykorzystaniem metod numerycznych oraz maszyny cyfrowej. Zaprojektowany algorytm ukierunkowany jest na obiekty o strukturze szeregowej, do których można zaliczyć różnego rodzaju wymienniki ciepła, piece przepychowe, reaktory chemiczne pracujące w układzie szeregowym, czy rzeki zanieczyszczone.

W szczególności w pracy do rozważań przyjęto model biochemicznie zanieczyszczonej rzeki. Zagadnienia modelowania matematycznego zjawisk zanieczyszczonej rzeki podjęto w wielu opracowaniach [2], [5], [6], [19], [20]. Ze względu na złożoność zjawisk opisywane modele posiadają różną strukturę i komplikację. W pracy [18], zaprezentowano numeryczne modelowanie przepływów nieustalonych w sieci koryt otwartych. Dotyczy to w szczególności dobrze znanych i wykorzystywanych w praktyce inżynierskiej jednowymiarowych modeli numerycznych bazujących na układzie równań de Saint Venanta. Coraz częściej stosowane są także dwuwymiarowe równania płytkiej wody [20]. Rozwój metod numerycznych i mocy obliczeniowych współczesnych komputerów sprawił, że algorytmy rozwiązywania równań transformacji przepływu stały się powszechnie dostępne i nie istnieje już bariera czasu realizacji obliczeń oraz ilości danych niezbędnych do uzyskania poprawnego rozwiązania. Stąd też przy próbie modelowania odcinka rzeki należy przede wszystkim podjąć decyzję o wyborze równań transformacji i algorytmów ich rozwiązania.

Istotnym czynnikiem jest możliwość pozyskania oprogramowania implementującego algorytmy rozwiązywania równań transformacji przepływu. Ze względu na kryterium odtworzenia w modelu zmienności przestrzennej stanu układu i parametrów obiektu modele dzieli się na dwie grupy [21].

- modele o parametrach skupionych,
- modele o parametrach rozłożonych.

Pierwsza grupa modeli posługuje się pojedynczymi wartościami liczbowymi wyrażającymi skumulowane parametry obiektu. Natomiast modele o parametrach rozłożonych cechują się przestrzenną zmiennością parametrów i odwzorowują taką samą zmienność modelowanego obiektu [18].

Podobne podejście jest prezentowane w [3], gdzie model budowany jest w oparciu o zagadnienie różnic skończonych w metodzie niejawnej na podstawie trójwymiarowych płytkich równań wody i zmodyfikowany do wykorzystania niestrukturalnych siatek.

Tak otrzymany rezultat posiada wiele zalet, lecz pojawiają się problemy o skomplikowanej geometrii. Otrzymane modele są stosunkowo proste, oparte na bilansie masowym. Praktyczne metody numeryczne do rozwiązywania dwuwymiarowych równania wody zostały sformułowane przy użyciu skończonej różnicy dyskretyzacji przestrzennej.

W pracy stosowano model matematyczny biochemicznie zanieczyszczonej rzeki opisany równaniami różniczkowymi typu hiperbolicznego z podziałem na odcinki. Dla tak przyjętego modelu dokonano transformacji polegającej na zamianie równań różniczkowych cząstkowych na zbiór równań różniczkowych zwyczajnych na tzw. charakterystykach związanych z prędkością przepływu. Taka transformacja nie wpływa na dokładność opisu zjawisk.

Opracowanie obecnej pracy doktorskiej stanowi pewien rodzaj uzupełnienia badanej tematyki i pozycji literaturowych. Przyjęte w badaniach cele i założenia znajdują swoje odzwierciedlenie w strukturze pracy.

1.3 Struktura pracy

Praca zawiera 131 stron oraz 66 cytowań pozycji literaturowych. Praca przedstawia zagadnienia dotyczące adaptacyjnego algorytmu do wyznaczenia współczynnika wzmocnienia filtra do estymacji stanu dla obiektów wykazujących się właściwościami szeregowymi. Przedstawiono autorski projekt algorytmu oraz jego rozszerzenie, a także wyniki symulacyjne dla modelu obiektu reprezentującego rzekę zanieczyszczoną biochemicznie. W szczególności dla celów testowych rozważano zmieniające się warunki wymuszeń obiektowych i różne parametry algorytmu. Powyższą tematykę przedstawiono w siedmiu rozdziałach. Poszczególne rozdziały zawierają następujące treści:

- 1. Wprowadzenie.** W rozdziale tym przedstawiono tematykę rozprawy, cel i tezę pracy oraz przegląd wybranych pozycji literaturowych związanych z rozważanym zagadnieniem. Opisano zakres pracy i skróconą charakterystykę prowadzonych badań.
- 2. Metody numeryczne w zagadnieniach modelowania matematycznego.** Rozdział ten zawiera krótki opis metod numerycznych, które posłużyły do rozwiązywania modeli matematycznych. Przedstawiono sposoby rozwiązywania złożonych problemów matematycznych za pomocą narzędzi obliczeniowych udostępnianych przez popularne języki programowania. Obecnie metody numeryczne są jedną z tych dziedzin matematyki stosowanej, których zastosowanie w praktyce jest powszechne.
- 3. Modele matematyczne obiektu o strukturze szeregowej.** Rozdział zawiera opis modelu matematycznego zanieczyszczonej biochemicznie rzeki reprezentowany równaniami różniczkowymi cząstkowymi typu hiperbolicznego. Wykorzystując naturę przepływu wody w rzekach dokonano przekształcenia modelu do zbioru charakterystyk danych w postaci równań różniczkowych zwyczajnych. Dla takiego podejścia sformułowano zagadnienie estymacji wskaźników, jakości wody. W rozdziale tym zawarto również opis i analizę zastosowanych metod numerycznych.

4. **Estymacja stanu obiektu filtrem Kalmana.** W rozdziale tym przedstawiono zagadnienie estymacji stanu rzeki z wykorzystaniem filtra Kalmana. Zaprezentowano kryteria estymacji. Podano kowariancję błędu i równania pozwalające wyznaczyć estymaty stanu obiektu. Wskazano na brak pomiarów współrzędnej wektora stanu w procesie estymacji.
5. **Projekt adaptacyjnego algorytmu estymacji stanu obiektu szeregowego.** W oparciu o podstawowe paradygmaty algorytmów przedstawiono propozycję algorytmu, który w sposób adaptacyjny wyznacza współczynnik wzmocnienia filtra estymującego stan obiektu. Istota zmian wartości współczynnika wzmocnienia bazuje na uwzględnieniu zdefiniowanej dla potrzeb obliczeniowych aktualnej wielkości błędu estymacji dla mierzonej współrzędnej stanu. Zaprezentowano rezultaty badań symulacyjnych zmian wartości tego współczynnika oraz błędy estymacji uwzględniające wpływ zmian parametrów algorytmu.
6. **Rozszerzony adaptacyjny algorytm estymacji stanu.** Rozdział zawiera opis kolejnego ulepszenia mechanizmu adaptacyjnego poprzez wyznaczenie korekty wzmocnienia filtra na podstawie kilku poprzednich pomiarów, przy czym obliczenia tej korekty dokonuje się w każdym momencie otrzymania pomiaru. Wskazano, że przedstawione wyniki badań symulacyjnych dla różnych wartości parametrów charakteryzujących proces adaptacji wykazują się większą poprawnością generowania estymaty stanu w porównaniu z algorytmem uwzględniającym tylko bieżący pomiar.
7. **Wnioski końcowe i podsumowanie.** Rozdział zawiera rozważania dotyczące zagadnień prawidłowości sformułowanej tezy pracy związanej z adaptacyjnym algorytmem obliczania współczynnika wzmocnienia filtra estymującego stan obiektu.

2. Zawartość pracy

2.1. Estymacja stanu obiektu filtrem Kalmana-Bucy

W ogólności filtr Kalmana jest algorytmem rekurencyjnym do wyznaczania estymaty wektora stanu modelu układu dynamicznego, wykorzystując pomiary tego układu [1]. W klasie estymatorów liniowych filtr Kalmana daje najmniejszą macierz kowariancji bezwarunkowej błędu. Wynika z tego, że średniokwadratowy błąd estymacji jest minimalny.

Algorytm ten bazuje na minimalizowaniu kwadratu błędu estymacji. Ponadto zakłada się, że na rozważany model oddziałują zakłócenia o charakterze stochastycznym, tzn. przyjmuje się założenie, że zarówno pomiar, jak i proces przetwarzania wewnątrz układu-modelu jest obciążony błędem o rozkładzie gaussowskim. Rezultatem tego algorytmu jest estymata stanu uwzględniająca kryterium estymacji, co powoduje, iż rozwiązanie jest optymalne. W praktyce może wystąpić sytuacja, że pomiar nie obejmuje wszystkich współrzędnych wektora stanu.

Do badań przyjęto obiekt reprezentujący jakość wody w akwenach wodnych, w szczególności w rzekach. Stopień zanieczyszczenia wód można określić za pomocą tzw. wskaźników jakości [14]. Są to np.:

- **Biochemiczne zapotrzebowanie na tlen (BZT)** – określa ilość tlenu potrzebną do utlenienia związków organicznych w wodzie w procesach biochemicznych w warunkach aerobowych.
- **Rozpuszczony tlen (RT)** – stężenie rozpuszczonego tlenu w wodzie, zależne głównie od temperatury.

Wymienione wskaźniki reprezentują stężenie wyrażone w [mg/l]. Należy podkreślić, że zużycie tlenu przebiega zgodnie z kinetyką reakcji fizyczno-chemicznej pierwszego rzędu [21]. Uwzględniając zjawiska zmian BZT i RT, tj. adwekcji, dyfuzji oraz samooczyszczanie, ogólny model matematyczny przyjmuje następującą postać:

$$\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial t} - \text{div}(\mathbf{V}\mathbf{x} - D \text{grad}\mathbf{x}) - \mathbf{A}\mathbf{x} + \delta = 0 \quad (1)$$

w którym \mathbf{x} – reprezentuje wektor stanu (BZT, RT), δ – gęstość źródła wewnętrznego, która określa intensywność wytwarzania lub pochłaniania przenoszonego czynnika, D – współczynnik dyfuzji w środowisku izotropowym, \mathbf{V} – macierz prędkości strumienia, \mathbf{A} – macierz współczynników reakcji BZT-RT, div – oznacza operator dywergencji, a grad (gradient) to wektorowy operator różniczkowy. Powyższe równanie opisuje trójwymiarowy przypadek transportu adwekcyjno-dyfuzyjnego w czasie. Oznacza to przenoszenie substancji (BZT, RT) oraz rozprzestrzenianie się w kierunku zmniejszającej się koncentracji. W praktyce przyjmujemy się pewne uproszczenia pozwalające na prostszy zapis równania (1). Zakładając ponadto umowny podział rzeki na odcinki oraz takie wartości parametrów, przy których udział dyfuzji staje się niewielki, otrzymuje się równanie modelu matematycznego zanieczyszczonej rzeki dla i -tego odcinka w postaci:

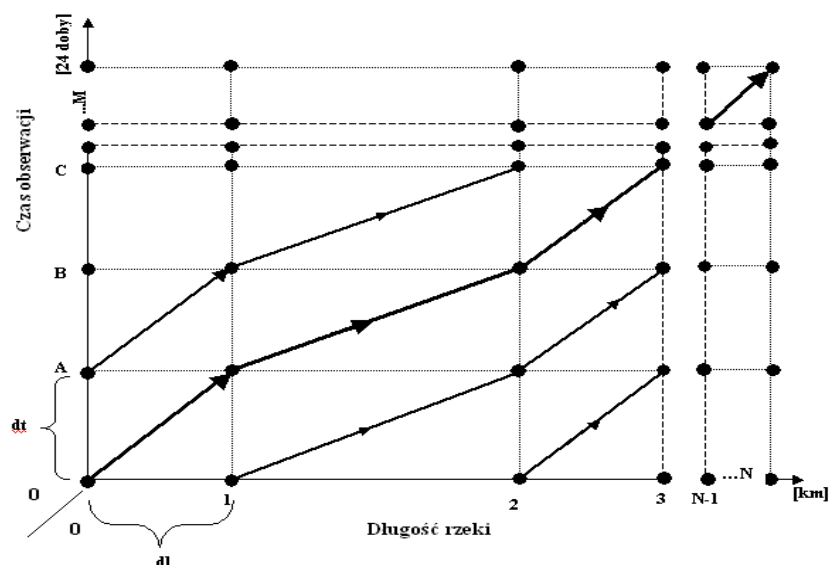
$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{x}_i(z, t) + \mathbf{V}_i(z) \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{x}_i(z, t) = \mathbf{A}_i(z) \mathbf{x}_i(z, t) + \mathbf{w}_{ri}(z, t) \quad (2)$$

z warunkami granicznymi:

$$\text{W.B.} \quad \mathbf{x}_i(0, t) = \mathbf{M}_i \mathbf{x}_{i-1}(1, t) + \mathbf{w}_{bi}(t) + \mathbf{R}_{bi} u_{bi}(t)$$

$$\text{W.P.} \quad \mathbf{x}_i(z, t_0) = \mathbf{x}_{i0}(z), \quad i = 1, \dots, N$$

Rozwiązanie równania (2) można sprowadzić do równań różniczkowych zwyczajnych, stosując metodę charakterystyk. Idea tej metody polega na zapisaniu równań, tak aby możliwe było wykorzystanie właściwości występujących wzdłuż charakterystycznych, tj. prędkości przepływu. Efektem tego jest zbiór charakterystyk obejmujących cały odcinek rzeki. Interpretację tego podejścia przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Charakterystyki dla i -tego odcinka rzeki.

Charakterystyki zdefiniowane są zależnością:

$$\frac{d}{dt} z_i(t) = v_i(z_i(t)) \quad (3)$$

co powoduje, że równania (2) wzdłuż charakterystyk możemy zapisać jako:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x}(z_i(t), t) = \mathbf{A}(z_i(t)) \mathbf{x}(z_i(t), t) + \mathbf{D} w_r(z_i(t), t) \quad (4)$$

$$\text{W.P.} \quad \mathbf{x}_i(z_i(t_0), t_0) = \mathbf{x}_0(z_{i0}), \quad i = 1, 2, \dots$$

Oznacza to, że stężenie BZT i RT w punktach określonych zależnością (3) będzie przyjmować wartości wyznaczone za pomocą prawej strony równania (2). Warunki brzegowe znikają, gdyż charakterystyka dotyczy całej rzeki. Jeśli przepływ w rzece jest ustalony i jednostajny, to metoda charakterystyk prowadzi do prostszych równań. Obliczanie stężenia BZT, RT dla niejednostajności przepływu staje się bardziej skomplikowane.

Interesujące jest rozwiązanie zagadnienia estymacji stanu, stosując metodę charakterystyk. Przy takim podejściu zakłada się, że pomiary dokonywane są również wzdłuż charakterystyk i opisane są następująco:

$$y(t) = \mathbf{C}x(t) + \mathbf{v}_p(t) \quad (5)$$

gdzie: macierz $\mathbf{C} = [0 \ 1]$, a wektor stanu $\mathbf{x}(t) = \text{col}[x_1(t), x_2(t)]$ i zakłócenie pomiarowe $\mathbf{v}_p(t)$.

Należy zaznaczyć, że pomiary dokonuje się tylko dla wskaźnika RT, gdyż pomiary BZT obarczone są długim czasem opóźnienia (w warunkach laboratoryjnych 5–20 dni) [16]. Zagadnienia estymacji stanu $\mathbf{x}(t)$ sprowadza się do poszukiwania estymaty stanu $\hat{\mathbf{x}}(t)$, określonej na podstawie pomiarów (5), minimalizując macierz kowariancji błędu estymacji

zdefiniowanej jako: $\mathbf{P}(t) = E\{\tilde{\mathbf{x}}(t)\tilde{\mathbf{x}}(t)^T\}$ w której błąd estymacji oznaczono jako $\tilde{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{x}(t) - \hat{\mathbf{x}}(t)$. Prowadzi to do następującego równania różniczkowego:

$$\frac{d}{dt}\hat{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}_F(t)[y(t) - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}(t)], \quad \hat{\mathbf{x}}(t_0) = 0 \quad (6)$$

w którym współczynnik wzmocnienia filtra K_F określony jest wzorem:

$$\mathbf{K}_F(t) = \mathbf{P}(t)\mathbf{C}^T\mathbf{V}^{-1} \quad (7)$$

gdzie \mathbf{V} jest kowariancją błędu pomiarowego, a macierz kowariancji błędu estymacji $\mathbf{P}(t)$ spełnia równanie różniczkowe typu Riccatiego:

$$\frac{\partial \mathbf{P}(t)}{\partial t} = \mathbf{A}\mathbf{P}(t) + \mathbf{P}(t)\mathbf{A}^T - \mathbf{P}(t)\mathbf{C}^T\mathbf{V}^{-1}\mathbf{C}\mathbf{P}(t) + \mathbf{D}\mathbf{W}\mathbf{D}^T \quad (8)$$

z warunkiem początkowym $\mathbf{P}(t_0)$. Macierz \mathbf{W} to macierz kowariancji zakłóceń systemowych \mathbf{w}_r , występujących w równaniu (2). Zatem, aby otrzymać estymatę stanu $\hat{\mathbf{x}}(t)$, należy w pierwszej kolejności rozwiązywać równanie Riccatiego (8), następnie na podstawie jego rozwiązania określić współczynnik wzmocnienia filtra $K_F(t)$ – zależność (7) oraz rozwiązywać równanie estymat (6). Takie obliczenia należy prowadzić dla każdej chwili czasowej t . Wartość estymaty jest „poprawiana” nowym pomiarem ze wzmocnieniem $K_F(t)$. Rezultat rozwiązania równania (6) jest zależny pośrednio od charakterystyk sygnałów stochastycznych, oddziałujących na badany obiekt.

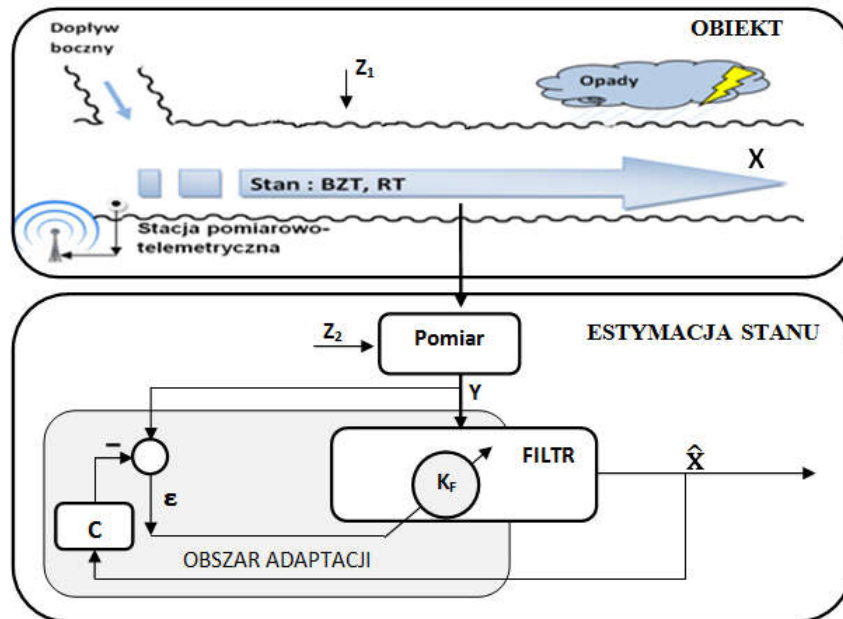
W warunkach rzeczywistych określenie powyższych charakterystyk może sprawić trudności. Uwzględniając powyższe jak i dalsze, rozważania prowadzić będą do poszukiwania estymaty stanu obiektu określonego równaniem (6) z pomiarami (5). Przewiduje się, że równanie estymaty jest określone zależnością (7), w którym uwzględnia się właściwości procesu samooczyszczania się wody, dane elementami macierzy \mathbf{A} .

W równaniu (2) uwzględniono też wpływ zakłóceń systemowych w i pomiarowych v . W praktyce precyzyjne określenie charakterystyk tych sygnałów losowych wymaga dużego nakładu pracy. Jednak jest to niezbędne, aby wyznaczyć współczynnik wzmocnienia K_F przez rozwiązanie równania Riccatiego. Ominięcie tej trudności jest możliwe przez zastosowanie adaptacyjnego wyznaczenia tego współczynnika.

3. Adaptacyjny algorytm wzmocnienia filtra generującego

estymatę stanu

Adaptacyjność w proponowanym filtrze polega na modyfikacji współczynnika wzmocnienia K_F (struktura filtra podobna jest do filtra Kalmana) w każdej chwili czasowej dokonywania pomiaru w zależności od aktualnie wyznaczonej estymaty stanu. Realizacja korekty wzmocnienia dokonuje się bez znajomości zakłóceń obiektowych i pomiarowych, oraz ich charakterystyk, pomimo, iż istotnie wpływają one na wartości stanu i pomiarów.



Rys.2. Idea i mechanizm filtru adaptacyjnego z pomiarami zanieczyszczonej rzeki.

X – wektor stanu

C – macierz pomiarowa

Y – pomiar

Z_1, Z_2 – zakłócenia systemowe i pomiarowe

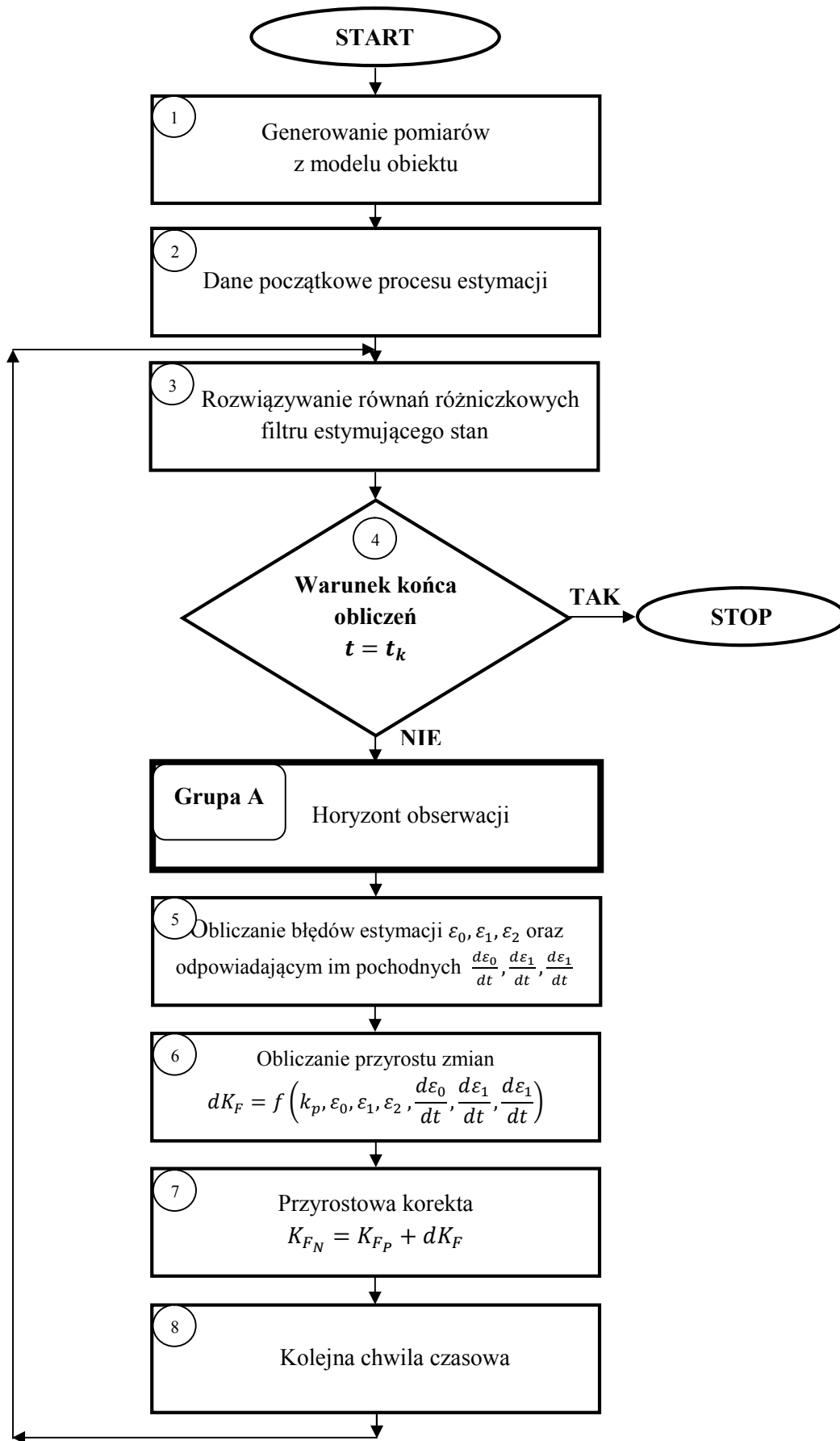
\hat{X} – estymata stanu

K_F – współczynnik wzmocnienia filtru

Ilustracja 2 przedstawia ogólne podejście autorskie do rozwiązania postawionego zagadnienia określania wartości współczynnika wzmocnienia filtru metodą adaptacyjną.

Idea adaptacji polega na modyfikacji wzmocnienia filtru Kalmana K_F na podstawie różnicy pomiędzy pomiarem $y(t_k)$, a aktualną jemu odpowiadającą współrzędną estymaty stanu $\hat{x}(t_k)$. W tym podejściu dokonuje się zmiany K_F zgodnie z napływem nowych pomiarów. Należy pamiętać jednak, iż modyfikacja K_F następuje przyrostowo tak jak korekta wag podczas uczenia w sieciach neuronowych.

W dysertacji zaprezentowano dwa algorytmy adaptacyjne. W pierwszym algorytmie wykorzystuje się tylko bieżące pomiary natomiast w drugim bazuje na kilku poprzednich pomiarach w stosunku do aktualnych. W wariantie pierwszym zakłada się ponadto znajomość wartości początkowych wzmocnienia filtru [17]. Należy zauważyć, że mechanizm obliczania wzmocnienia filtru funkcjonuje w oparciu o sprzężenie zwrotne, w którym wartość estymaty jest wykorzystywana do aktualizacji wartości wzmocnienia filtru K_F oraz do wyznaczenia estymacji stanu. W niniejszym streszczeniu zaprezentowano tylko algorytm wielokrokowy zwanym rozszerzony. Realizuje się to w kolejnych krokach czasowych (zob. rys. 3).



Rys. 3. Adaptacyjny algorytm z zadanyh horyzontem obserwacji.

W prezentowanym algorytmie pierwsze początkowe bloki dotyczą rozwiązywania zagadnienia estymacji stanu przy pomocy filtru. Kolejne etapy w algorytmie związane są z obliczaniem współczynnika wzmocnienia filtru metodą przyrostową. Precyzyjny opis wyznaczania błędu estymacji i jego pochodnej prezentuje blok 5 na rys.3. Podobnie prezentowane są bloki 6 i 7 na tym rysunku, których szczegóły będą podane w dalszej części opisu. Obliczenia są prowadzone dla każdego momentu pomiarowego. Koniec obliczeń ustala się w bloku decyzyjnym 4.

W proponowanym podejściu rozważany proces będzie dotyczył obiektu opisanego równaniami różniczkowymi zwyczajnymi z ciągłymi pomiarami reprezentujący stan zanieczyszczeń rzeki wykorzystując interpretację „wzdłuż charakterystyk”. Estymatę stanu wyznacza się z równania (6), w którym współczynnik wzmocnienia filtru K_F jest określany w sposób adaptacyjny. Ponadto zakłada się, że na rozważany proces reprezentujący stan zanieczyszczeń rzeki opisany modelem matematycznym oddziałują zakłócenia o charakterze stochastycznym, tzn. przyjmuje się założenie, że zarówno pomiar, jak i model obarczone są nieznanym sygnałem zakłócającym [15].

Aby zastosować ideę adaptacyjności posłużono się różnicą pomiędzy pomiarem, a współrzędną wektora estymaty stanu, w tym przypadku jest to wskaźnik rozpuszczonego tlenu RT.

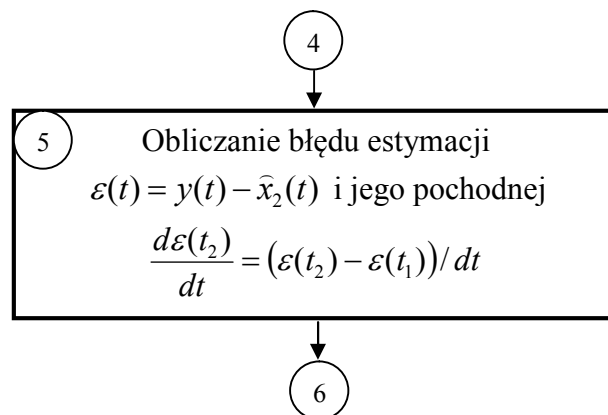
Błąd $\varepsilon_0(t)$ określono zależnością:

$$\varepsilon(t) = y(t) - \hat{x}_2(t) \quad (9)$$

gdzie: $y(t)$ – pomiar w chwili czasowej t , $\hat{x}_2(t)$ – estymata stanu wskaźnika RT.

Do obliczeń korekty wzmocnienia użyto również pochodnej błędu, który przyjmuje następującą postać:

$$\frac{d\varepsilon(t_2)}{dt} = (\varepsilon(t_2) - \varepsilon(t_1)) / dt, \quad t_2 > t_1 \quad (10)$$



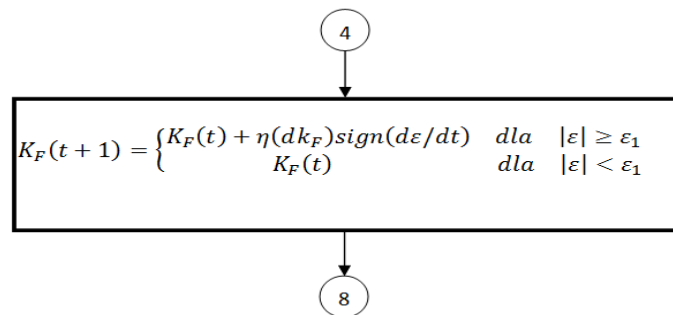
Rys.4. Obliczanie błędu estymacji i jego pochodnej.

Pochodna błędu pełni rolę rodzaju informacji o zachowaniu się błędu estymaty i pozwala stwierdzić, czy jego tendencja maleje czy rośnie w stosunku do momentu z poprzedniego pomiaru. Przyrost wartości współczynnika wzmocnienia dK_F przyjęto określać proporcjonalnie do aktualnego błędu ε , a korekty jego wartości dokonuje się jak w sieciach neuronowych metodą przyrostową zgodnie z zależnością:

$$K_{F_N} = K_{F_P} + \eta \, dK_F \quad (11)$$

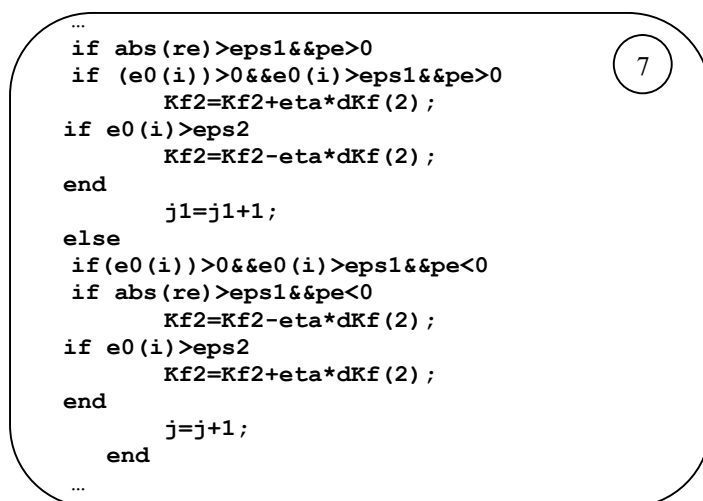
gdzie: K_{F_N} – nowa wartość współczynnika wzmocnienia filtru,
 dK_F – przyrost wzmocnienia filtru,
 K_{F_P} – wartość początkowa współczynnika wzmocnienia filtru
 η – współczynnik ostrożności zmian

Ideę zmian wzmocnienia filtru reprezentują bloki 6 i 7 na schemacie podanym na rys.3. Szczegóły tych operacji podane zostały na rys.5.



Rys.5. Obliczanie przyrostu zmian wzmocnienia filtru i jego korekty.

Dodatkowym elementem wpływającym na wartość wzmocnienia filtru jest współczynnik nazwany w tej pracy współczynnikiem ostrożności zmian określający, jaka część przyrostu ma być dodawana do wartości początkowej współczynnika wzmocnienia filtru. W algorytmie uwzględnia się ponadto zależność korekty wzmocnienia dK_F z pewnym „progiem” wartości błędu $\varepsilon(t)$.

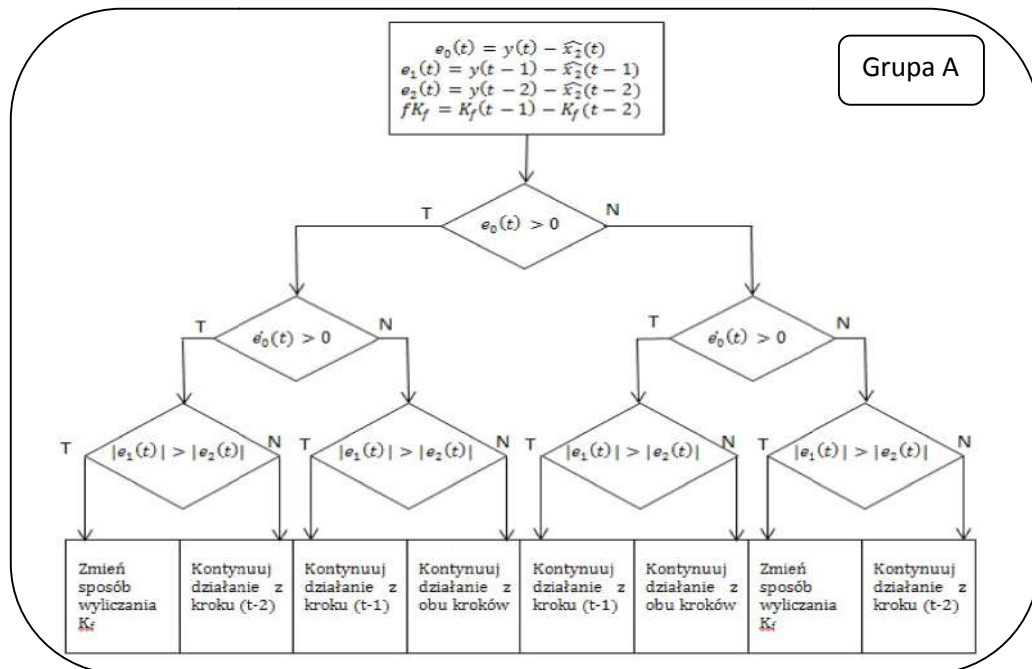


Rys.6. Przyrostowa korekta wzmocnienia filtru.

Fragment programu realizujący zmiany wzmocnienia w zależności od wartości błędu i jego pochodnej podano na rys.5, który odpowiada blokowi 7 przedstawionemu na rys. 3 [7].

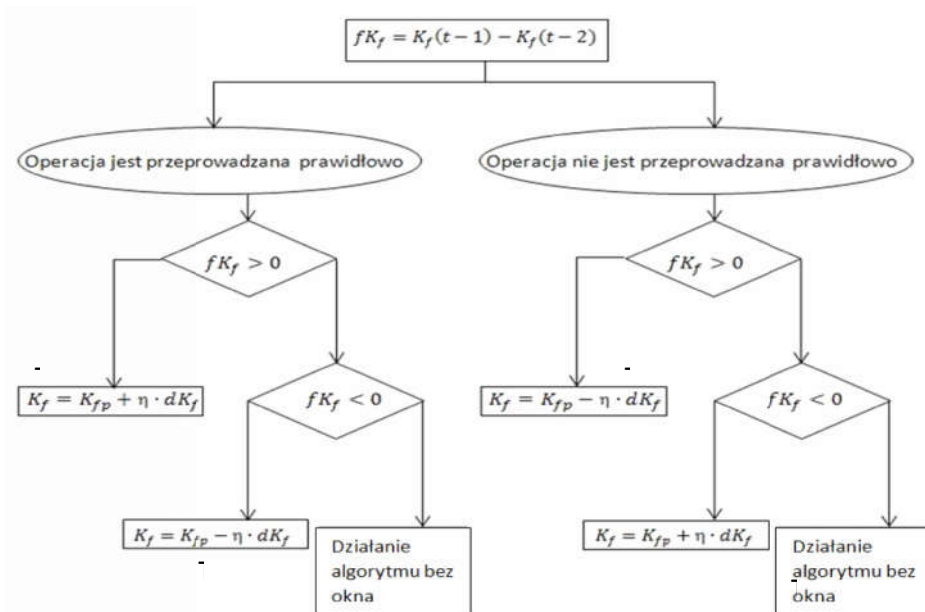
Korekta wartości K_F jest dokonywana w każdej chwili czasowej, w której dokonują się obliczenia z pewną ostrożnością stosując współczynnik η o wartościach z przedziału $(0...1)$. W przypadku dużych błędów ε przyjmuje się mniejsze wartości współczynnika ostrożności η , które wpływają na stabilność pracy algorytmu. Wartości η w algorytmie dobrano metodą eksperymentalną tabelaryzując zakresy błędów ε i współczynnika η . Sposób tabelaryzacji wynika z wiedzy eksperckiej.

Opisany dotychczas wariant algorytmu dotyczył tylko adaptacyjnego algorytmu jednokrokowego. W algorytmie rozszerzonym do wyznaczenia wzmocnienia wykorzystuje się aktualny i kilka poprzednich pomiarów. W rozważaniach używa się zamiennie terminu horyzont obserwacji i okno pomiarowe. Całość działań algorytmu stosującego horyzont obserwacji obrazuje rys. 3. W szczególności fragment schematu blokowego oznaczonego jako **Grupa A** dotyczącego okna obserwacji przedstawia rys. 7.

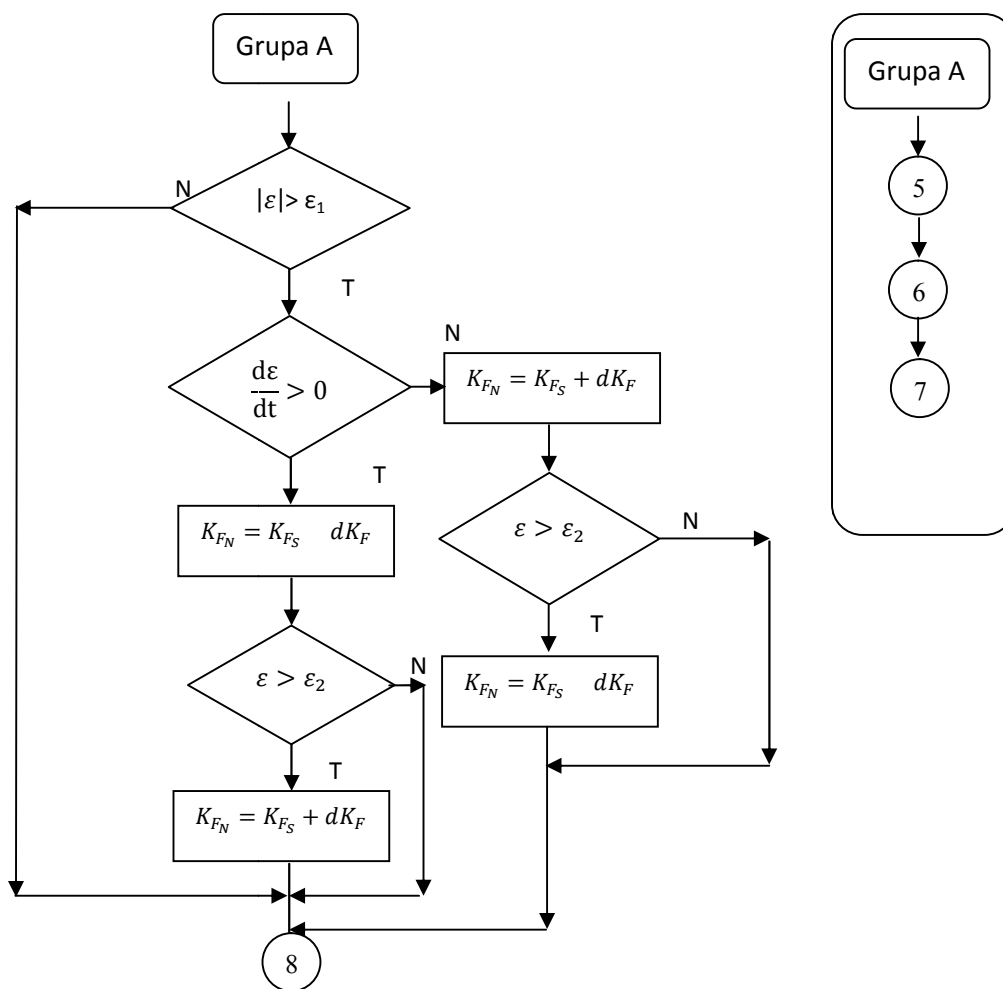


Rys.7. Schemat działania okna obserwacji.

Po sprawdzeniu działania algorytmu, program rozpoczyna operację sprawdzania jak zmienił się współczynnik wzmocnienia w filtrze w zadanej chwili czasowej rozpatrywanej w horyzoncie obserwacji. Do tego celu wykorzystywany jest algorytm rozpoznający czy wartość współczynnika wzmocnienia K_F filtra wzrosła, zmalała czy też nie zmieniła swojej wartości. Po sprawdzeniu założonych warunków następuje przeprowadzenie operacji zmiany wartości wzmocnienia filtra wykonywane według schematu na rys. 8.



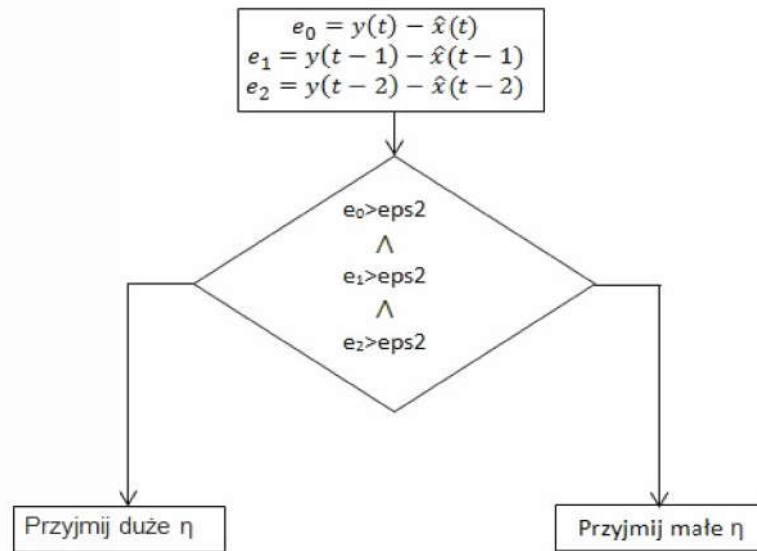
Rys. 8. Schemat algorytmu dokonującego zmiany wzmacnienia w filtrze.



Rys. 9. Schemat algorytmu sprawdzającego zmiany współczynnika wzmacnienia.

Algorytm przedstawiony na schemacie (rys.7) wykonuje działania zmiany K_F jedynie, gdy w przynajmniej jednej chwili czasowej sprawdzanej w oknie obserwacji błąd estymacji nie rośnie. W przypadku, gdy błąd ε rośnie w przeciągu dwóch chwil czasowych następuje wykonywanie działań według schematu na rys. 9 jednak z pominięciem współczynnika ostrożności zmian.

Do mechanizmu estymacji stosującego okno obserwacji została dodana opcja zmiennego współczynnika ostrożności zmian K_F rys.10.



Rys.10. Schemat algorytmu zmiany współczynnika ostrożności zmian:

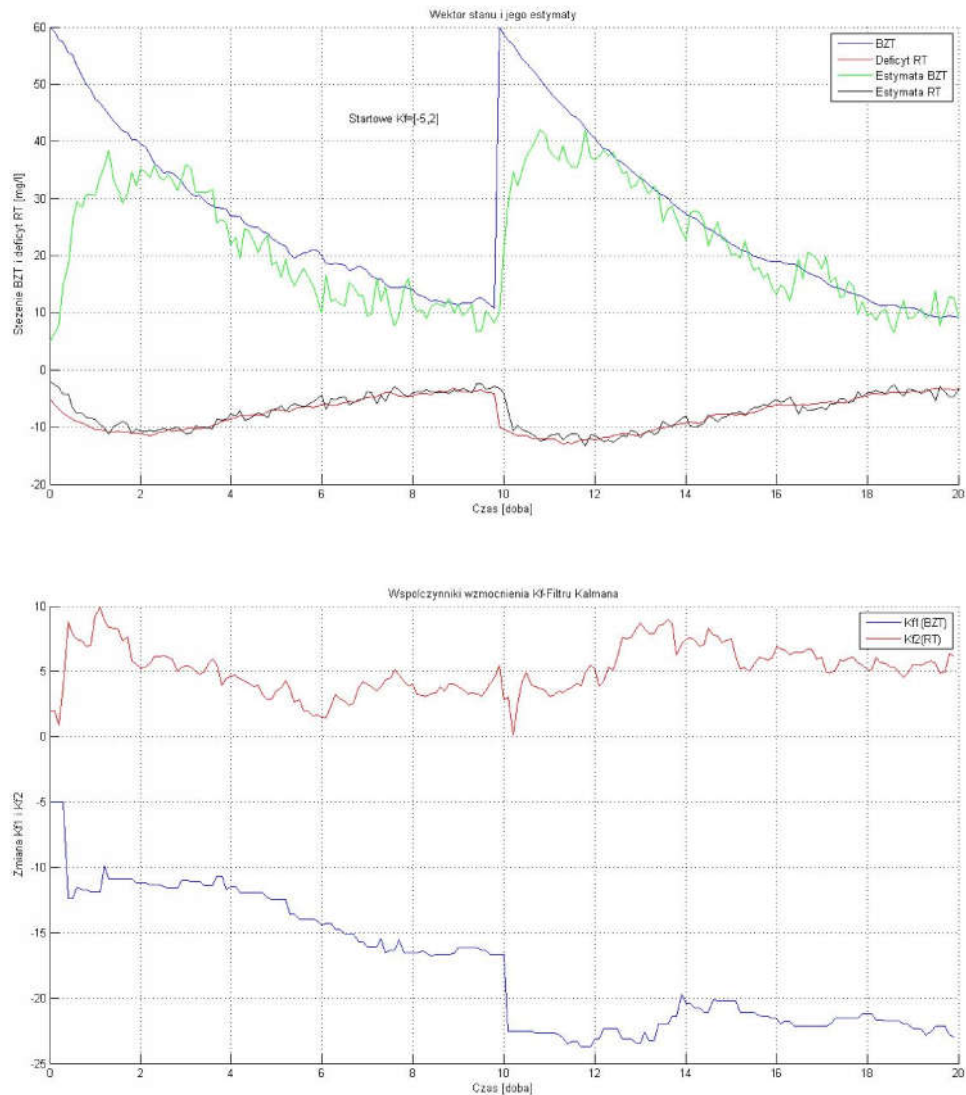
eps2 – górna granica błędu estymacji, η – współczynnik ostrożności zmian.

W przypadku, gdy spełniony jest warunek mówiący, że pomiary błędu estymacji z trzech chwil czasowych są większe od założonej górnej granicy błędu estymacji, następuje ustawienie dużej wartości współczynnika ostrożności zmian w celu przyśpieszenia reakcji programu na nieprawidłowe wyniki. Gdy warunek ten nie jest spełniony następuje ustawienie małej wartości współczynnika ostrożności zmian, aby ograniczać wahnięcia estymaty.

4. Badania symulacyjne algorytmu

W celu sprawdzenia słuszności stosowania algorytmu wykorzystującego horyzont obserwacji zostały przeprowadzone badania określające, w jaki sposób przebiega proces tworzenia estymaty stanu. Obiektem badań algorytmu jest model zanieczyszczonej biochemicznie rzek. Szybkość reakcji samooczyszczania tej rzeki została przedstawiona w postaci macierzy stanu $A = \begin{bmatrix} -k_1 & 0 \\ -k_2 & -k_3 \end{bmatrix}$. Zarówno intensywność dopływu zanieczyszczeń jak i zakłócenie pomiaru zostały przedstawione, jako szum o rozkładzie gaussowskim, przez co każda symulacja przedstawia inne rezultaty. Takie podejście powoduje, że wyniki symulacji są przybliżone do warunków rzeczywistych

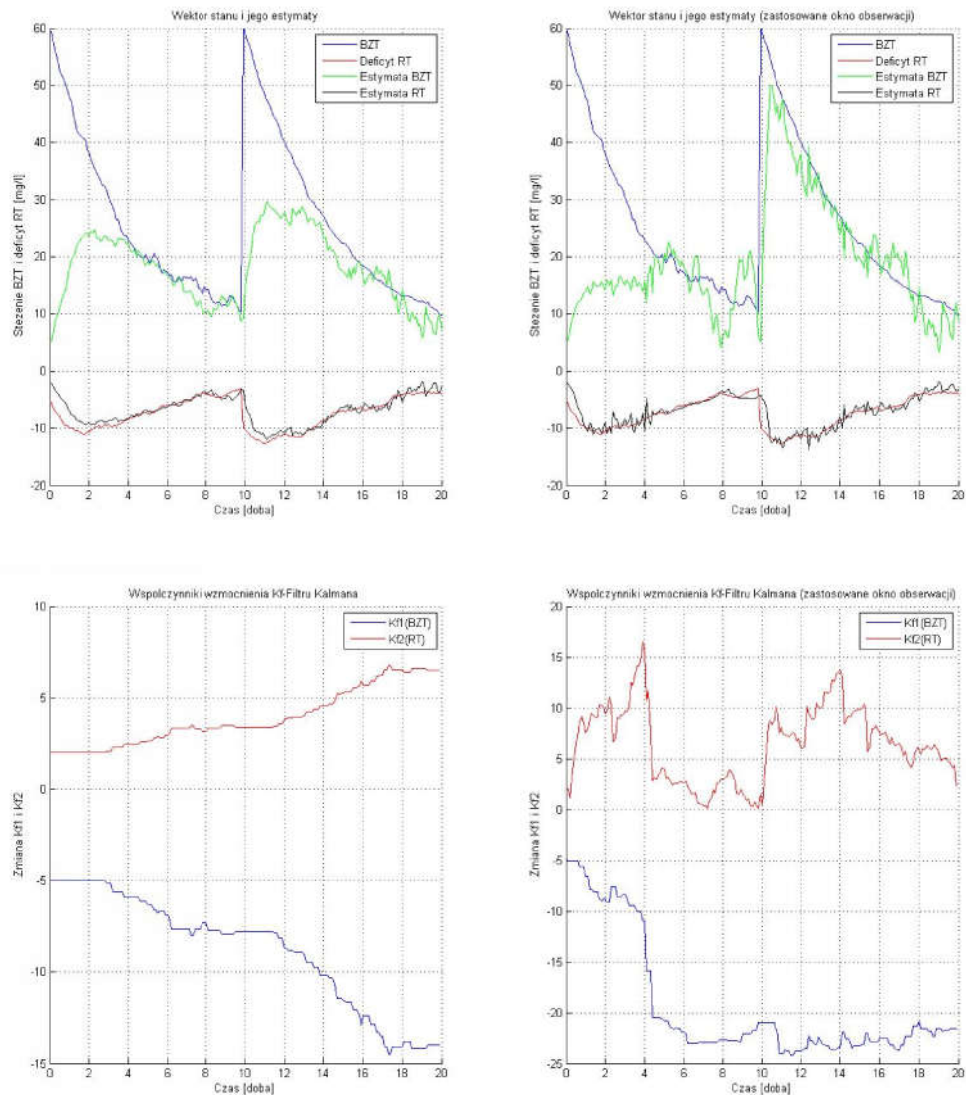
Badania przeprowadzono dla następujących warunków: $x = [60; -5]$ – początkowy wektor stanu, $\hat{x} = [5; -2]$ – estymata stanu, $K_F = [-5; 2]$ – współczynnik wzmocnienia filtru, $k_p = [5; 1]$ – indywidualny współczynnik proporcjonalności zmian wzmocnienia dK_F zwany „regulatorem indywidualnym”, $\text{eps1}=[0.001]$ – dolna granica błędu estymacji, $\text{eps2} = [1.0]$ – górna granica błędu estymacji. Współczynnik ostrożności zmian zgodnie ze schematem rys. 10 mógł przyjmować wartości 0.75 lub 0.25. Wartości te uznaje się za domyślne do prowadzenia badań. Badania zostały przeprowadzone dla czasu odpowiadającemu 20-tu dobom przy założeniu wykonywania 10-ciu pomiarów na dobę. Przyjęto, że badana rzeka posiada dopływ boczny pojawiający się w czasie 10 doby.



Rys.11. Przebiegi sygnałów w algorytmie z mechanizmem estymacji wykorzystującym okno obserwacji

Przeprowadzona symulacja wygenerowała bardzo obiecujące wyniki rys.11. Estymata jest porównywalna do wektora stanu. Osiąga w bardzo szybkim tempie wartości z pobliża wektora stanu. Współczynnik wzmocnienia filtru zmienia się w sposób proporcjonalny do błędu estymacji. W przypadku, gdy różnica pomiędzy estymatą a stanem jest większa filtr

przyjmuje większe wartości K_F , aby zniwelować tę różnicę. Gdy różnica pomiędzy estymatą a wektorem stanu maleje współczynnik wzmocnienia obniża swoją wartość.



Rys. 12. Porównanie wyników badań symulacyjnych algorytmu bez okna obserwacji oraz algorytmu z oknem obserwacji.

W wyniku przeprowadzonych badań okazało się że przy założeniach zerowych wartości zarówno estymaty jak i współczynnika wzmocnienia filtra, algorytm bez okna pomiarowego nie jest w stanie wygenerować estymaty zbliżonej do wektora stanu w przeciwieństwie do algorytmu wykorzystującego horyzont obserwacji.

Obliczenia i eksperymenty symulacyjne w dysertacji przeprowadzone zostały w środowisku Matlab (ver. 7.10.0.499 R2010a), a czasy realizacji obliczeń algorytmów adaptacyjnych dla różnych wariantów danych, liczone poleceniami 'tic', 'toc' osiągały wartości około 0.11 sekundy. Przypadki dla klasycznego filtra Kalmana (rozwiązanie równań stanu, Riccatiego i filtra) osiągnęły w przybliżeniu podobne wartości. Niemniej jednak uzyskana zależność czasowa dla filtra z adaptacyjnym doborem wzmocnienia generowała wyniki o lepszej jakości.

5. Wnioski końcowe i podsumowanie

W niniejszej pracy starano się wykazać słuszność tezy, którą sformułowano we wprowadzeniu:

Stosując zaproponowany algorytm adaptacyjny wyznaczania zmian wartości współczynnika wzmocnienia filtra można realizować estymację stanu z niemierzonymi współrzędnymi dla wybranej klasy obiektów z efektywnością porównywalną lub lepszą niż w przypadku metod klasycznych. Czas realizacji i złożoność obliczeniowa będą korzystniejsze od standardowego rozwiązania filtra Kalmana.

Rozprawa dotyczy algorytmu adaptacyjnej estymacji stanu obiektów szeregowych. Obiektem, dla którego realizowano badania był model rzeki biochemicznie zanieczyszczonej, którą interpretowano, jako zbiór reaktorów z ciągłym mieszaniem.

Model rzeki został opisany równaniami różniczkowymi cząstkowymi sprowadzonymi do równań różniczkowych zwyczajnych na charakterystykach z uwzględnieniem prędkości przepływu. Przy takim podejściu wykorzystano naturę rzeki i wówczas opis sprowadzono do licznego zbioru równań różniczkowych zwyczajnych bez straty dokładności rozważanych procesów. Zatem model reprezentowany jest zbiorem równań różniczkowych zwyczajnych.

Rozważono także realizację pomiarów ciągłych w czasie tylko jednej zmiennej wektora stanu. W naszym przypadku był to deficyt rozpuszczonego tlenu.

W warunkach rzeczywistych uzyskanie obrazu stanu, jakości wody jest zagadnieniem wymagającym ciągłej aktualizacji danych w oparciu o zmieniające się warunki zewnętrzne. Obraz ten może być podstawą do podejmowania decyzji o stanie alarmowym i generowaniu sygnałów sterujących. Na podstawie wyznaczonej estymaty można wygenerować sterowanie w postaci napowietrzania, którego reakcja „wyprzedzałaby” istnienie krytycznie dużego deficytu tlenu w wodzie.

Dla uzyskania pełnego obrazu wykonano estymacje stanu filtrem, ponieważ realizacja układu estymacji bazująca wyłącznie na pomiarach RT nie jest w stanie „zauważyć” wystąpienia dużych deficytów RT pojawiających się z opóźnieniem na skutek aktualnie dużych wartości BZT. Dla takiego układu zaproponowano także klasyczne podejście rozwiązania zagadnienia estymacji stanu filtrem Kalmana w celach porównawczych z filtrem o adaptacyjnym wyznaczaniu jego wzmocnienia.

Główne badania dotyczą zagadnień związanych z określeniem wpływu współczynnika wzmocnienia filtra na proces estymacji stanu, jakości wody w rzekach. Zagadnienie estymacji polega na określeniu wszystkich współrzędnych wektora stanu na podstawie mierzonych, nie wszystkich jego współrzędnych. Rozwiązano ten problem, modelując stan hipotetycznej rzeki równaniami różniczkowymi zwyczajnymi. Dla takiego podejścia przedstawiono zagadnienie estymacji stanu obiektu dla pomiarów ciągłych tylko jednej współrzędnej wektora stanu tj. RT. Zastosowano filtr Kalmana do rozwiązania tego zadania uzyskując dwuelementowy wektor estymaty. Ponadto zaproponowano adaptacyjny algorytm zmiany współczynnika wzmocnienia filtra.

Jako autorskie rozwiązanie zastosowano podejście adaptacyjne, którego idea adaptacji wykorzystuje równanie filtru estymującego (podobnego do równania filtru Kalmana) i w którym wartość bieżąca współczynnika wzmocnienia modyfikowana jest na podstawie różnicy pomiarów i odpowiadającym im współrzędną wektora estymaty stanu. Ta zmiana określana jest w zależności od błędu między pomiarem, a odpowiadającą współrzędną estymaty stanu oraz jej tendencją zmian. W adaptacyjnym algorytmie modyfikowano wartości korekt tego współczynnika zależnego od wielkości i tendencji (pochodnej) zmian błędu. Można, więc stwierdzić, że:

Wprowadzenie algorytmu adaptacyjnego omija niedogodności wynikające z oszacowania charakterystyk sygnałów oddziałujących na badany obiekt oraz jego dynamika dostrajania do powstałych warunków pozwala na uzyskanie poprawnych wyników wartości współczynnika wzmocnienia filtru w procesie estymacji stanu.

W pracy zaprezentowano rezultaty badań symulacyjnych adaptacyjnego algorytmu doboru współczynnika wzmocnienia filtru, gdzie rozważono model matematyczny opisany równaniami różniczkowymi. W przeprowadzonych badaniach symulacyjnych uzyskano poprawne wyniki estymacji otrzymanych za pomocą adaptacyjnego algorytmu doboru współczynnika wzmocnienia filtru.

W pracy również uwzględniano wykorzystanie kilku pomiarów w każdym etapie obliczeń współczynnika wzmocnienia, K_F , które nazywano oknem pomiarowym, służące do aktualizacji współczynnika wzmocnienia. W wyniku badań okazało się, iż wykorzystanie informacji o błędzie estymacji z chwil wcześniejszych nazywane oknem obserwacji ma istotny wpływ na działanie algorytmu estymacji. Adaptacyjny algorytm wykorzystujący okno obserwacji tworzy estymatę stanu w sposób prawidłowy, a w porównaniu z algorytmem niewykorzystującym historii błędu reaguje szybciej na zmiany wektora stanu. Wykorzystanie okna obserwacji daje możliwość prawidłowego tworzenia estymaty w przypadku, gdy nie są znane wartości początkowe zarówno estymaty jak i współczynnika wzmocnienia filtru. Algorytm charakteryzuje się uniwersalnością w dostrajaniu do odpowiednich warunków funkcjonowania poprzez odpowiednie zmiany parametrów określonych przez eksperymentującego, co może powodować uzyskanie dużej wrażliwości na poszczególne współrzędne wektora estymaty stanu. Zastosowanie okna obserwacji sprawiło, że wartości współczynnika wzmocnienia filtru dostosowują się, czym potwierdzają adaptacyjność mechanizmu i jego możliwości zmian do panujących warunków.

Okno obserwacji bazuje na określonej liczbie chwil czasowych w badanym algorytmie. Istnieje możliwość, aby kolejne wersje algorytmu uwzględniały większe okno czasowe. Zastosowanie większej ilości pomiarów na każdym etapie obliczeń K_F wpływa pozytywnie na otrzymywane wyniki badań.

Opracowanie adaptacyjnego algorytmu wyznaczającego, estymatę wektora stanu, w przypadku braku pełnej informacji o wektorze przysporzyły wiele trudności. Jednak zaprojektowano i zaprogramowano adaptacyjny algorytm, jako autorskie rozwiązanie. W szczególności algorytm ukierunkowany jest na strukturę szeregową obiektów opisanych równaniami różniczkowymi zwyczajnymi. Zaproponowany algorytm estymacji stanu

obiektu generuje wartości współczynnika wzmocnienia w równaniu filtru o strukturze jak filtr Kalmana, posiadając cechy uniwersalności zastosowania w obiektach danej klasy.

Otrzymane rezultaty badań upoważniają do stwierdzenia, że cel pracy został osiągnięty gdyż zaproponowany adaptacyjny algorytm generuje poprawne wartości estymat. Dalsze badania mogą dotyczyć zagadnień związanych z ilością pomiarów i urządzeń sterujących, a także projektowaniem układu monitorującego stan, jakości wody.

Przedstawione w rozprawie zagadnienia stanowią doskonały fundament do rozwijania tematyki modelowania matematycznego stanu rzek, w którym do uzyskania pełnego obrazu obiektu stosuje się adaptacyjny algorytm estymacji stanu ze względu na wymuszenia zakłócające, które wynikają głównie ze zmian pogody. Można też śmiało stwierdzić, iż projektowany w przyszłości system monitorująco-sterujący, jakością wody, przyczyni się do ochrony środowiska naturalnego i podniesie bezpieczeństwo ekologiczne.

6. Wybrane pozycje literaturowe

- [1] Anderson B, Moore J. *Filtracja optymalna*. WNT, Warszawa 1984.
- [2] Anielak A. *Chemiczne i fizykochemiczne oczyszczanie ścieków*. PWN Warszawa 2002.
- [3] Casulli V., Walters R. A., *An unstructured grid, three-dimensional model based on the shallow water equations*. International Journal for Numerical Methods in Fluids Vol. 32, pp. 331-348, 2000.
- [4] Dasgupta S., Papadimitriou Ch., Vazirani U. *Algorytmy*. PWN Warszawa 2010.
- [5] Dobbins W. E. *BOD and oxygen relationships in streams*. J. San. Div., Proc. ASCE, 90, s. 53, 1964.
- [6] Dojlido J., Zerbe J. *Instrumentalne metody badania wody i ścieków*. Arkady, Warszawa 1997.
- [7] Donald E. Knuth. *Sztuka programowania*. WNT, 2002-2008.
- [8] Dryja M., Jankowscy J. i M. *Przegląd metod i algorytmów numerycznych*. WNT, Warszawa 1988.
- [9] Fox D., *Adapting the sample size in particle filters through KLD-sampling*. The International Journal of Robotics Methods Research Vol. 22, pp.985-1003, 2003.
- [10] Harel D. *Rzecz o istocie informatyki algorytmika*. WNT, Warszawa 2001.
- [11] Hilfer R. *Fractional diffusion based on riemann-liouville fractional derivatives*. J. Phys. Chem. B 2000 nr 104, s. 3914–3917.
- [12] Kacprzyk J., Hryniewicz O., Kulczycki P. *Techniki informacyjne w badaniach systemowych*. WNT, Warszawa 2007.

- [13] Kasprzak W., *Adaptive computation methods in digital image sequence analysis*. Warsaw University of Technology, Warszawa, No. 127, 2000.
- [14] Krutys P., Kwater T. *Symulacja modelu matematycznego rzeki opisanego równaniami różniczkowymi cząstkowymi*. Technical News 2007, s.142-143.
- [15] Kwater T., Gomółka Z., Krutys P. *Adaptacyjny podejście do wyznaczania wzmocnienia filtru Kalmana*. Technical News, 2010/1(31), 2(32) s.170-172.
- [16] Kwater T., Pękala R., Krutys P. *The mathematical models of water pollution and interpretation of their distribution*. Technical News 2009, s.95-97.
- [17] Kwater T., Twaróg B., Krutys P. *Estymacja stanu filtrem z adaptacyjnym mechanizmem doboru współczynników wzmocnienia*. Przegląd Elektrotechniczny R. 89 NR 12/2013, pp.29-32.
- [18] Laks Ireneusz., *Selected problems of numerical modeling of long section of lowland rivers*. Poznań 2005.
- [19] Ozga - Zielińska M. *Metody opisu i analizy systemów hydrologicznych*. Politechnika Warszawska, Warszawa 1976.
- [20] Świdarska-Bróż M. *Mikrozanieczyszczenia w środowisku wodnym*. Politechnika Wrocławska, Wrocław 1993.
- [21] Szymkiewicz R., *Modelowanie matematyczne przepływów w rzekach i kanałach*. PWN, Warszawa 2000.

7. Spis publikacji własnych

- [1] Kwater T., Krutys P.: *Estimation of pollution of the river by artificial neural networks*, Symbiosis of Engineering and Computer Science Wydawnictwo Uniwersytetu Rzeszowskiego, Rzeszów 2010, ISBN 978-83-7338-620-4, str.37-66.
- [2] Kondratenko Y.P., Kondratenko G.V., Gomółka Z., Krutys P. - *Intelligent models and fuzzy-stochastic approach for routes planning and optimisation - Computing in Science and Technology 2011, MONOGRAPHS IN APPLIED INFORMATICS*
- [3] T. Kwater, P. Krutys, *The approach of implementing control using an adaptive algorithm to generate an estimate for the object described by partial differential equations*, Computing in Science and Technology 2012, MONOGRAPHS IN APPLIED INFORMATICS

- [4] Kwater T., Krutys P. – Symulacja modelu matematycznego rzeki opisanego równaniami różniczkowymi cząstkowymi. Technical News nr 2007/1(25),2(26) Lviv Ukraine, pp.142-143
- [5] Kwater T., Tejchman M., Krutys P. – Identyfikacja parametrów jednofazowego układu prostowniczego realizowana sztuczną siecią neuronową typu BP. – „Pes-6” Postępy w Elektrotechnice Stosowanej Kościelisko 18-22 czerwca 2007r. s.241-244
- [6] Kwater T., Twaróg B., Krutys P. – System przetwarzania informacji z wykorzystaniem sztucznej inteligencji w kontekście międzynarodowej współpracy naukowej. „Współpraca Polsko-Czeska w kontekście globalizacji” Nowa Ruda 16-17 marca 2007r.
- [7] Kwater T., Kwiatkowski B., Krutys P. – Interfejs graficzny do symulacji badań układów dynamicznych w elektrotechnice - Technika – Informatyka – Edukacja, Teoretyczne i Praktyczne Problemy Edukacji Informatycznej, Tom VIII Uniwersytet Rzeszowski - Iwonicz Zdrój, wrzesień 2007r.s.267-272
- [8] Tadeusz Kwater, Robert Pękala, Paweł Krutys, Marek Groń. - Interfejs Matlaba dla prezentacji dynamiki układów opisanych równaniami różniczkowymi zwyczajnymi na przykładzie układu RLC.W :Technika, informatyka, edukacja : teoretyczne i praktyczne problemy edukacji informatycznej. T. 10 / pod red. Wojciecha Walata Rzeszów : Wydaw. Uniwersytetu Rzeszowskiego 2008 S.236-251
- [9] Tadeusz Kwater, Paweł Krutys, Robert Pękala – Modelowanie numeryczne dyfuzji zanieczyszczeń w jeziorze. Technical News Ukraińskie inżynierskie towarzystwo we Lwowie, ISSN 1992-8149,2008/1(27),2(28) S.84-86
- [10] Tadeusz Kwater, Robert Pękala, Paweł Krutys. - Modelowanie numeryczne zjawisk w przepływach zanieczyszczonych z uwzględnieniem dyfuzji. „MODELOWANIE i SYMULACJA” MIS-5 Kościelisko, 23-27 czerwca 2008r. Oddział Warszawski Polskiego Towarzystwa Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej, Wydział Elektryczny Politechniki Warszawskiej, Polska Sekcja IEEE. S.269-271.
- [11] Tadeusz Kwater, Robert Pękala, Paweł Krutys: The mathematical models of water pollution and interpretation of their distribution, Technical News, nr 2009/1(29), 2(30), Ukraińskie Towarzystwo Inżynierskie we Lwowie, ISSN 1992-8149, Lwów 2009r, pp. 130-132
- [12] Twaróg B., Gomółka Z., Krutys P.: Algorithm of parallel distinguishing the edge using the LAM/MPI, Technical News, Ukraińskie inżynierskie towarzystwo we Lwowie, ISSN 1992-8149,2009/1(27),2(28) S.126-129,

- [13] Kwiatkowski B., Krutys P., Twaróg B.: Polowy model matematyczny układu stykowego, Technical News, Ukraińskie inżynierskie towarzystwo we Lwowie, ISSN 1992-8149, 2010/1(31), 2(32) S.177-180,
- [14] Kwater T., Krutys P., Bartman J., Pękala R.: Simulation of diffusion experiments in environment water polluted, 8-th AIMS International Conference on Dynamical Systems, Differential Equations and Applications, Dresden University of Technology, Department of Mathematics, p. 307.
- [15] Kwiatkowski B., Gomółka Z., Koziorowska A., Krutys P.: Influence of the Distribution of the Axial Radial and Circumferential Component of the Magnetic Induction Vector Within the Space between Switches on Rupturing Capacity of Vacuum Switches, 8-th AIMS International Conference on Dynamical Systems, Differential Equations and Applications, Dresden University of Technology, Department of Mathematics, p. 48.
- [16] Bogusław Twaróg, Paweł Krutys, Bogdan Kwiatkowski – The artificial neural network as the inductive engines states analyser. Technical News Lviv Ukraine, ISSN 1992-8149, 2009/1(29), 2(30), s.118-121.
- [17] Buczek K., Krutys P., Kwater T., Twaróg B. – Neuronowy system diagnostyczny dla układów prostowniczych, Przegląd Elektrotechniczny, 8/2011 str. 38-41
- [18] Kwater T., Pękala R., Krutys P. – Modelowanie temperatury wody w rzece jako wskaźnik zanieczyszczenia - Technical News, 2011/1 (33) pp. 119-120
- [19] Tadeusz KWATER, Bogusław TWARÓG, Paweł KRUTYS - Adaptacyjny mechanizm doboru współczynników wzmocnienia filtru Kalmana – Przegląd Elektrotechniczny
- [20] Zbigniew GOMÓŁKA, Bogusław TWARÓG, Paweł KRUTYS - Prediction mechanism for the face tracking algorithm – Przegląd Elektrotechniczny
- [21] R. Pękala, P. Krutys, E. Żesławska: Analysis and visualization of the Wisłok river hydrological measurement, Technical News 2012/1 (35), 2(36), ISSN 1992-8149
- [22] Bogusław Twaróg, Zbigniew Gomółka, Ewa Żesławska, Paweł Krutys - System nadzorujący i sterujący przebieg procesu technologicznego, Edukacja-Technika-Informatyka, Rocznik Naukowy Nr 4/2013 – 2, Rzeszów 2013, s.424-430
- [23] Kwater T., Bogdan Kwiatkowski, Paweł Krutys, Ewa Żesławska - Symulacje komputerowe modelu matematycznego zanieczyszczonej biochemicznie wody z uwzględnieniem zjawiska dyfuzji. Edukacja-Technika-Informatyka, Rocznik Naukowy Nr 4/2013 – 2, Rzeszów 2013, Str. 345-350

- [24] Zbigniew Gomółka, Bogusław Twaróg, Paweł Krutys. Prediction mechanism for the face tracking algorithm, *Przeгляд Elektrotechniczny*. - 2013, R. 89, nr 7, s. 202-205
- [25] Kwater T., Twaróg B., Krutys P. Estymacja stanu filtrem z adaptacyjnym mechanizmem doboru współczynników wzmocnienia, *Przeгляд Elektrotechniczny* R. 89 NR 12/2013, pp.29-32.
- [26] Kwater T., Twaróg B., Żesławska E., Krutys P. - Study of the diffusion effect on the water pollution distribution in the River, *Computing in Science and Technology* 2013/2014, MONOGRAPHS IN APPLIED INFORMATICS, Wyd. UR, pp 55-65
- [27] Kwater T., Gomółka Z, Zesławska E, Krutys P. - Integracja metod sztucznej inteligencji i filtru Kalmana-Bucy w procesie estymacji stanu rzeki, *Technical News* 2013/1(37), 2(38), ISSN 1992-8149
- [28] Kwater T., Krutys P, Twaróg B., Bartman J., -Interpolacyjne Metody Rozwiązania równań różniczkowych cząstkowych na podstawie zbioru równań różniczkowych zwyczajnych, *Technical News* 2013/1(387), 2(38), ISSN 1992-8149
- [29] Metody i środki zarządzania infrastrukturą sieciową w złożonym środowisku laboratoryjnym Paweł Krutys, Marek Bolanowski *Education - Technology - Computer Science (Edukacja - Technika - Informatyka)*, issue: No06/Part3 /2015, pages: 238-243.
- [30] Interfejs graficzny do badań identyfikacji bramek logicznych z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych. Tadeusz Kwater; Paweł Krutys; Marek Bolanowski *Education - Technology - Computer Science (Edukacja - Technika - Informatyka)*, issue: No06/Part3 /2015, pages: 333-338.
- [31] The influence of the separation screen on the decay of electromagnetic field in the area between points of contact Bogdan Kwiatkowski, Paweł Krutys, Jacek Bartman, Ewa Żesławska *Computing in Science and Technology* 2015 p.166-183.
- [32] Simulation of anomalous diffusion described by fractional differential equation. Tadeusz Kwater, Robert Pękała, Paweł Krutys, Marek Bolanowski *Computing in Science and Technology* 2015 p.184.
- [33] The simulations of sequential of estimators for objects with a serial structure T. Kwater, P. Krutys „Information Systems In Management” Warszawa 2015r.

22.05.2017
Paweł Krutys