

AUTOREFERAT PRACY DOKTORSKIEJ

Algorytmy ze skończoną pamięcią
dla przetwarzania sygnałów
w diagnostyce procesów.

1. Tezy i zakres rozprawy

W pracy przedstawiono analizę diagnostyczną dynamicznych zachowań ciągłych układów liniowych, w których zachodzą skokowe zmiany ich parametrów. Zmiany te mogą być traktowane, jako stany awaryjne systemu, czyli uszkodzenia. Zdefiniowano różne klasy struktur systemów. Dla tych klas zaproponowano różne metodologie do wykrywania tych zmian. Wykorzystując niestandardowe przetwarzanie sygnałów i możliwości, jakie dają modele matematyczne, postawiono tezę, że zastosowanie podejścia w oparciu o model (*Model Based Approach*) i użycie zaawansowanych algorytmów do dokładnej identyfikacji parametrów oraz metod dokładnego odtwarzania stanu pozwoli zidentyfikować w strukturze uszkodzony parametr i określić jego nową wartość, a co najmniej wskazać miejsce awarii. Zaproponowane algorytmy nie wprowadzają ograniczeń, co do rzędu układu i mogą być użyte do identyfikacji stanu i parametrów dla układów ciągłych – teoretycznie dowolnego rzędu. Takie podejście odróżnia pracę od innych opracowań.

Z literatury przedmiotu wynika, że badania diagnostyki systemów dynamicznych z wykorzystaniem modelu, koncentrują się w większości wokół liniowych układów dynamicznych w wersji dyskretniej, a do analizy wykorzystuje się różnego typu algorytmy rekurencyjne wynikające z metodologii rozwiązywania równań różnicowych. Dotyczy to zarówno metod identyfikacji parametrów (rekurencyjne metody najmniejszych kwadratów RLS) jak i metod asymptotycznej estymacji nieznanego (niemierzonego) stanu układu (filtr Kalmana). Wszystkie te metodologie dają efekt asymptotycznej zbieżności rozwiązań w czasie do wartości rzeczywistych (kształt eksponenty w wersji ciągłej), mocno zależne od nieznanymi warunków początkowych. Wprowadza to dodatkową niepewność oceny rzeczywistości, zarówno, co do czasu wystąpienia awarii, wartości nowych parametrów jak i miejsca wystąpienia awarii.

Do wykrycia awarii parametrycznej systemu liniowego opisywanego ciągłym skalarnym równaniem różniczkowym n-tego rzędu lub macierzową wersją równania stanu i wyjścia, w pracy zaproponowano zastosowanie mało znanych algorytmów przetwarzania sygnałów, opartych o procedury całkowe operujące na skończonych, przesuwanych oknach pomiarowych. Do metod tych należą splotowe procedury identyfikacji parametrów, wykorzystujące funkcje modulujące oraz dokładne, całkowe obserwatory stanu początkowego lub końcowego przesuwne okna o zadanej szerokości. Efekt działania tych algorytmów nie zależy od nieznanymi warunków początkowych (tak parametrów jak i stanu) i dostarcza

wyników dokładnie po czasie równym szerokości okna. Cecha ta jest więc szczególnie cenna w zastosowaniach dla systemów czasu rzeczywistego.

Zagadnienia naukowe, które przy okazji pojawiają się w pracy, są związane z badaniami nad jednoznacznością odtworzenia wartości parametrów rzeczywistych, w oparciu o znajomość identyfikowanych parametrów zagregowanych, występujących w równaniu różniczkowym n -tego rzędu, opisującym dynamikę toru wejście-wyjście.

Jednym z ważniejszych efektów badań, była koncepcja zastosowania podwójnego obserwatora dla odtwarzania stanu naturalnego. Obserwator składa się z dwóch przesuwanych okien złączonych ze sobą wspólną krawędzią. Lewe okno odtwarza wektor stanu badanego systemu, na swoim prawym końcu, a prawe okno odtwarza ten sam wektor stanu, na swoim lewym początku. Oba pracują w oparciu o sygnały wejścia i wyjścia, ale mierzone w innych przedziałach czasu (prawe okno wyprzedza lewe okno). Dopóki nie wystąpi awaria oba odtwarzane stany mają te same wartości. W chwili wystąpienia awarii, wykonywane obliczenia na wspólnej środkowej krawędzi zaczną wykazywać znaczne rozbieżności. Taki algorytm okazał się być, bardzo czułym wskaźnikiem identyfikacji miejsca awarii. Wykonano wiele przykładów.

Głównymi tezami pracy, było

- wykazanie, że zaproponowane algorytmy identyfikacji dla parametrów zagregowanych równania wejścia-wyjścia i algorytmów dokładnej obserwacji wewnętrznego stanu rzeczywistego, jak również wykorzystanie procedur nieliniowych transformacji pomiędzy parametrami zagregowanymi i rzeczywistymi oraz wielokrotnych procedur symulacji, dla wygenerowania residuów, pozwala na jednoznaczne zidentyfikowanie miejsca i wartości rzeczywistych parametrów przed i po awarii, oraz
- wykazanie, że zastosowanie nowego typu obserwatora o podwójnym oknie, odtwarzającego dokładnie stan naturalny (który tworzą kolejne pochodne sygnału wyjścia) i szczegółowa analiza tego stanu na wspólnej krawędzi w chwili awarii, pozwala na zaobserwowanie skokowych nieciągłości w niektórych zmiennych stanu, a stąd na jednoznaczne zidentyfikowanie miejsca awarii.

Większość analiz i testów wykonanych w pracy, oparto o różne struktury połączeń układów zbiornikowych. Procesy tego typu są często przedmiotem badań dla oceny jakości algorytmów diagnostyki i sterowania.

2. Zawartość rozprawy i uzyskane wyniki.

2.1. Krótki opis struktury pracy

Rozdział 1 i 2 pracy zawiera opis celu naukowego pracy i sformułowanie dwóch tez. Rozdział trzeci zawiera prezentację klasycznych narzędzi stosowanych w diagnostyce systemów, a rozdział czwarty dokładną prezentację nowych narzędzi zaproponowanych przez autora, do rozwiązania tego zagadnienia. Rozdział piąty zawiera pełną analizę dynamiki wybranych struktur i dyskusję nad możliwościami odtworzenia parametrów rzeczywistych z parametrów zagregowanych. Zawiera też opis eksperymentów praktycznych i symulacyjnych

na laboratoryjnej instalacji trzech rzeczywistych zbiorników wodnych. Rozdział szósty prezentuje matematyczną wiedzę z teorii liniowych transformacji stanu układu.

We wszystkich tych rozdziałach, prezentowane opisy i metodologie są udokumentowane bogatą literaturą, do której autor podaje odwołania. W sumie bibliografia liczy 167 pozycji.

2.2. Szczegółowe wyniki uzyskane w poszczególnych rozdziałach

W Rozdziale 1 (Wstęp) omówiono ogólnie problematykę pracy, osadzając ją w dyscyplinie nauk informatyczno-systemowych. Zamieszczono ogólne uwagi na temat obszerności problematyki komputerowego modelowania systemów technicznych i ważności zadań diagnozowania prawidłowości ich pracy oraz detekcji sytuacji awaryjnych.

W Rozdziale 2 przedstawiono historyczny rozwój różnych zadań monitoringu oraz najważniejsze zadania dzisiejszych wielopoziomowych komputerowych systemów nadzoru i sterowania. Na tle tych zadań umiejscowiono zadania diagnostyczne i omówiono bardziej szczegółowo problematykę detekcji i diagnostyki oraz odporności na błędy addytywne i multiplikatywne występujące w systemie. Zwrócono uwagę na różnice w procedurach rekurencyjno-asymptotycznych i w procedurach ze skończoną pamięcią, realizowanych, jako okna przesuwne i zaakcentowano przewagę tych drugich metod. Opisano obszernie cel pracy, przedstawiając idee jednoczesnego użycia algorytmów z oknami przesuwными do dokładnej identyfikacji parametrów i dokładnej obserwacji stanu. Zaanonsowano zalety takiego podejścia nie tylko dla dokładnej identyfikacji momentu awarii, ale również dla możliwości wykorzystania dokładnych symulatorów dynamiki identyfikowanego modelu (za pomocą metod Rungego-Kutty), dla których koniecznym jest informacja o dokładnej wartości stanu początkowego. Wykorzystywanie obserwatorów asymptotycznych (Luenbergera, filtru Kalmana) od razu wprowadza dodatkową niepewność, co do wartości tego stanu. Na końcu sprecyzowano dwie tezy pracy.

W Rozdziale 3 zawarto opis klasycznych metod używanych w systemach detekcji i diagnostyki błędów. Opisano generatory residuów oparte na równaniach parytetów oraz na identyfikatorach parametrów w systemach dyskretnych i na asymptotycznych obserwatorach stanu i wyjścia (filtr Kalmana). W celu dyskusji i uzupełnienia znanej wersji algorytmu najmniejszych kwadratów dla identyfikacji systemów dyskretnych, przedstawiono też wyprowadzenie nowej teoretycznej jego wersji dla identyfikacji parametrów układu ciągłego, w oparciu o minimalizację błędu wyjścia - *Output Error*. Przedstawiono wady obserwatorów asymptotycznych i zaanonsowano zalety dokładnych obserwatorów stanu układów ciągłych, opartych na przesuwanych oknach pomiarowych.

Rozdział 4 jest ważnym rozdziałem w pracy, w którym przedstawiono wszystkie algorytmy ze skończoną pamięcią, jakie były wykorzystane do celów diagnostyki.

W szczególności:

- przedstawiono teorię i podstawy matematyczne metody identyfikacji parametrów układów ciągłych metodami funkcji modulujących i transformacji splotowych, w oparciu o minimalizację błędu równania – *Equation Error* wykorzystując okno przesuwne o wybranej szerokości T_{ID} , (Rozdz.4.2.1.),

- stosując transformację splotową, wyprowadzono nową aplikacyjną wersję nierekurencyjnej metody najmniejszych kwadratów (do wersji teoretycznej przedstawionej w Rozdziale 3), zastosowanej do identyfikacji parametrów układu ciągłego w oparciu o minimalizację błędu wyjścia - *Output Error*, (Rozdz.4.2.4.),
- przedstawiono teorię dokładnych i optymalnych całkowych obserwatorów stanu układu ciągłego, na skończonym przedziale T, (Rozdz.4.3.)
- wyprowadzono efektywne wzory na dokładny całkowy obserwator stanu początkowego, (4.15),
- wyprowadzono efektywne wzory na dokładny całkowy obserwator stanu końcowego, (4.22), (4.23),
- omówiono pracę obserwatorów dokładnych na oknie przesuwным (*Moving Window Observer*),
- przedstawiono, całkowicie nową koncepcję wykorzystania obserwatora dokładnego o podwójnym oknie obserwacji, (4.26, 4.27), do detekcji momentu awarii, do ciągłego i prawidłowego odtwarzania stanu (bez względu na awarię) i do detekcji skoków w wektorze stanu – co daje informację o miejscu awarii w pewnych strukturach układu.

Rozdział 5 jest obszernym rozdziałem poświęconym modelowaniu procesów liniowych ciągłych i problemom identyfikacji ich parametrów zagregowanych i rzeczywistych. Dużo uwagi poświęcono nieliniowym transformacjom łączącym te parametry i możliwości jednoznacznego rozwiązania diagnostycznego dla parametru rzeczywistego, jeśli identyfikacji podlegają parametry zagregowane.

W szczególności:

- wyprowadzono końcowe wzory dla parametrów rzeczywistych dla układów kaskadowych i szeregowych (do trzeciego rzędu) i przeprowadzono pełną analizę algorytmiczną dla układów dowolnego rzędu,
- przedstawiono wyniki testów awarii na rzeczywistym układzie zbiorników, wchodzących w skład profesjonalnego stanowiska komputerowego sterowania zespołem zbiorników oraz wyniki symulacyjne dla tych zbiorników,
- przedstawiono analizę złożoności obliczeniowej algorytmu diagnostyki,
- zaanonsowano nowy pomysł algorytmu diagnostyki dla lokalizacji awarii z wykorzystaniem dokładnego obserwatora z podwójnym oknem obserwacyjnym, zastosowanego do stanu naturalnego.

W Rozdziale 6 przedstawiono matematyczne podstawy liniowych transformacji stanu, które umożliwiają przejście od początkowego modelu z oryginalnymi zmiennymi stanu reprezentującymi rzeczywiste zmienne procesowe oraz parametry rzeczywiste, na naturalne zmienne stanu reprezentujące kolejne pochodne sygnału wyjściowego i korzystające z parametrów zagregowanych. Ta metodologia umożliwia uproszczenie procedur obliczeniowych dla zadań diagnostyki, wszędzie tam, gdzie stosowane są dokładne obserwatory stanu, zarówno z pojedynczym jak i z podwójnym oknem. Wyprowadzono modele systemów kaskadowych i szeregowych w zapisie naturalnych zmiennych stanu. Wykazano

ważną własność zachowania się kolejnych pochodnych sygnału wyjściowego $y(t)$, występującą w wybranych strukturach systemach liniowych, w razie skokowych awarii parametrów.

Rozdział 7 zawiera opis dwóch metodologii i procedur użytych w algorytmach diagnostyki. Pierwsza metodologia, związana z pierwszą tezą dysertacji pozwala na detekcję miejsca awarii (numer zaworu) i wartości nowej przepływności, wykorzystując identyfikatory parametrów zagregowanych i dedykowane procedury diagnostyki miejsca awarii. Do tego celu (w razie niejasności) wykorzystuje się symulatory modelujące proces w różnych jego wersjach stanu oryginalnego (rzeczywistego) i odpowiedni zestaw obserwatorów dokładnych dla odtwarzania oryginalnych stanów początkowych - dla każdej hipotetycznej wersji procesu, inny. Przedstawiono uproszczenie tych wielokrotnych przeliczeń całkowych procedur obserwacyjnych, gdyż jak wykazano różne oryginalne stany początkowe dla różnych modeli, można otrzymać w oparciu o jednokrotną obserwację początkowego stanu naturalnego (model zagregowany), a odpowiedni stan rzeczywisty, można otrzymywać z odpowiedniej transformacji macierzowej stanu.

Druga metodologia związana jest z drugą tezą i nie zajmuje się procedurami odtwarzania nowych wartości parametrów rzeczywistych po awarii, ale w oparciu o obserwatory z podwójnym oknem dostarcza informacji na temat miejsca awarii w naturalnym wektorze stanu systemu kaskadowego lub szeregowego. Procedury identyfikacji parametrów zagregowanych dostarczają danych modelowych dla konstrukcji obserwatora dokładnego stanu naturalnego i ewentualnie mogą wspomagać detekcję momentu awarii. W metodzie tej nie potrzeba procedur weryfikacji wielu hipotez. W rozdziale przedstawiono również i przeanalizowano stosowalność obu tych metodologii dla systemów wysokiego rzędu. W zakończeniu rozdziału zawarto ważny podrozdział omawiający szczegóły użytych w pracy procedur numerycznych, które z racji niestacjonarności problematyki (zmiennosc parametrów) muszą uwzględniać zmodyfikowane wersje równań stanu, gwarantujące poprawność wyników symulacji.

Rozdział 8 zawiera opisy trzech algorytmów diagnostyki FDI, które stanowiły podstawę do implementacji procedur obliczeniowych i stworzenia biblioteki programowej w języku C++. Rozdział zakończono dwoma poglądowymi schematami struktury systemu diagnostyki, przedstawiającymi powiązania funkcjonalne poszczególnych bloków i ich współdziałanie.

W Rozdziale 9 przedstawiono niektóre wybrane wyniki testów numerycznych wykonane z pomocą tego oprogramowania i pakietu Matlab/Simulink.

3. Oryginalne wyniki rozprawy

Głównym zamierzeniem pracy, była analiza i przedstawienie nowych, oryginalnych koncepcji metodologicznych dla diagnostyki ciągłych liniowych systemów dynamicznych, w oparciu o identyfikację i dokładną obserwację stanu oryginalnego i naturalnego, oraz wykorzystanie różnych modeli dynamiki systemu.

Szczegółowymi oryginalnymi wynikami pracy są:

1. udane zastosowanie metody identyfikacji parametrów układów ciągłych, metodą minimalizacji błędu równania *Equation Error*, z wykorzystaniem funkcji modulujących i transformacji splotowych, do celów diagnostyki,

2. nowa aplikacyjna wersja nierekurencyjnej metody najmniejszych kwadratów zastosowanej do identyfikacji parametrów układu ciągłego, w oparciu o minimalizację błędu wyjścia - *Output Error*,
3. udane zastosowanie teorii dokładnych, całkowych obserwatorów stanu układu ciągłego, na skończonym przedziale T (z wyprowadzeniem efektywnych wzorów na obserwator stanu początkowego i obserwator stanu końcowego), do celów diagnostyki,
4. całkowicie nowa koncepcja wykorzystania obserwatora dokładnego o podwójnym oknie obserwacji, do detekcji momentu awarii, jak również do ciągłego i prawidłowego odtwarzania stanu (bez względu na awarię) oraz do detekcji skoków w wektorze stanu – co daje informację o miejscu awarii w pewnych strukturach układu.
5. wyprowadzenie z pomocą parametrów zagregowanych, końcowych wzorów na parametry rzeczywiste, dla układów kaskadowych i szeregowych (do trzeciego rzędu) i przeprowadzenie analizy algorytmicznej dla układów dowolnego rzędu,
6. przebadanie złożoności obliczeniowej algorytmu diagnostyki,
7. przedstawienie wyników testów awarii na rzeczywistym układzie zbiorników, laboratoryjnych, oraz wyników wielu testów symulacyjnych.
8. Wykonanie oprogramowania modułów obliczeniowych.

Powyższe wyniki są oryginalne, a większość z nich prezentowana jest w pracy po raz pierwszy. Tyko niektóre, takie jak przydatność do detekcji szybkich zmian parametrów przez wykorzystanie identyfikacji splotowej, były wcześniej publikowane przez autora w recenzowanych publikacjach.

4. Podsumowanie

W pracy zostały przedstawione pełne wyprowadzenia wzorów, opisy procedur i wyniki wielu testów, które uzasadniają wnioski wyciągane przez autora. Wszystkie ilustracje i testowe przebiegi funkcji są kolorowe, co ułatwia analizę i sprawdzenie.

Praca stanowi propozycję zastosowania najnowszych metodologii teorii systemów do zagadnień diagnostyki. Oprócz znajomości aspektów algorytmicznych i informatycznych, wymagała od autora poszerzonej wiedzy z teorii systemów. Nowoczesne algorytmy powinny być wdrażane w praktycznych rozwiązaniach, choć są bardziej skomplikowane i mogą wymagać sprzętu o większych mocach obliczeniowych. Użyte algorytmy mogą być realizowane również w wersji obliczeń równoległych na dwóch niezależnych komputerach wykonujących jednocześnie przetwarzanie i obliczenia dla sygnałów wejścia i wyjścia.

Wyniki uzyskane w pracy potwierdzają możliwość stworzenia środowiska obliczeniowego wykorzystującego teorię układów ciągłych, do diagnostyki procesów.

Jędrzej Byrski