

Recenzja

rozprawy doktorskiej Pawła Mielcarka

Nieparametryczne metody identyfikacji w optymalizacji procesów produkcyjnych

Promotor: dr hab. inż. Grzegorz Mzyk, prof. uczelni

1. Przedmiot rozprawy doktorskiej

Zgodnie z zapisem Doktoranta w podrozdziale 2.2 „Teza i cele pracy”, „rozprawa ma na celu zaproponowanie rozwiązań problemu stosowalności teoretycznych metod identyfikacji systemów w problemach praktycznych, z naciskiem na środowisko przemysłowe i badawczo-rozwojowe”. Pomimo tak szerokiego postawienia celu, rozprawa ogranicza się jednak prawie wyłącznie tylko do nieliniowych modeli blokowych Wienera-Hammersteina lub ich uproszczonych wersji. W podpunktach 2.4.1 do 2.4.4 Doktorant omawia, jakie trudności związane z praktycznym stosowaniem identyfikacji tych modeli poruszył w rozprawie i jakie zaproponował rozwiązania tych trudności. Są one związane ze zbyt restrykcyjnymi założeniami o sygnale wejściowym, dużą wielowymiarowością problemu identyfikacji nieparametrycznej w omawianych systemach blokowych, braku wiedzy wstępnej oraz dużą złożonością obliczeniową algorytmów komputerowych. Te zagadnienia są poruszane w trzech kolejnych rozdziałach, zaś dwa następne rozdziały są poświęcone opisowi wyników identyfikacji dla danych z pomiarów wykonanych w czasie działania rzeczywistych procesów technicznych.

Rozprawa zawiera też dwa dodatki: jeden z dowodami twierdzeń i wyprowadzeniami technicznymi, a drugi z definicjami używanymi w rozprawie pojęć oraz opisami używanych algorytmów.

Poszczególne rozwiązania szczegółowe, przede wszystkim w rozdziałach 3 i 5, mają w zasadzie charakter przyczynkowy do wcześniej zaproponowanych metod. Jednak są to istotne modyfikacje lub rozszerzenia, które kończą się twierdzeniami i dowodami wykazującymi poprawność zastosowanych nowych algorytmów. Wymagały one dosyć zaawansowanych rozważań teoretycznych. Właściwie każdy z trzech rozdziałów 3, 4 i 5 można uważać za materiał na artykuł, który po dopracowaniu można by było wysłać do opublikowania. W sumie rozprawa jest więc nieco zbliżona charakterem do zbioru artykułów o podobnej tematyce. Tyle że nie zostały one jeszcze zredagowane w formie artykułów, nie mówiąc o ich opublikowaniu. Biorąc pod uwagę zakres wykonanych prac, a przede wszystkim istotnie nowe rozwiązania zaproponowane w rozprawie, uważam opisane wyniki za odpowiednie jako przedmiot rozprawy doktorskiej.

Jednak materiał przedstawiony w rozprawie jest niedopracowany. Uwagi na ten temat są przedstawione w dalszych punktach recenzji. Mam nadzieję, że pomogą one w przygotowaniu końcowej wersji artykułów zgłaszanych do publikacji.

Mam też wątpliwości do tego sformułowania w tytule, które dotyczy optymalizacji procesów produkcyjnych. W rozprawie optymalizacja procesów produkcyjnych jako taka nie jest rozpatrywana. Są tylko użyte pomiary z procesów technologicznych, które służą głównie do identyfikacji modeli tych procesów.

2. Uwagi do rozdziału 3

Chociaż nie jest to wprost napisane, to początek tego rozdziału wywołuje wrażenie, że są tu wprowadzone podstawowe informacje o identyfikacji modeli Wienera-Hammersteina i stosowanych w tym celu algorytmach, a także przyjęte oznaczenia i założenia. Jednak zmiany oznaczeń dalszych rozdziałach powodują, że nie wiadomo, czy oznaczenia i założenia obowiązują w całej rozprawie, czy też mają charakter lokalny.

W dalszej części rozdziału jest natomiast opisany algorytm identyfikacji z istotnymi modyfikacjami wprowadzonymi przez Doktoranta dotyczącymi uproszczenia tego algorytmu, co jest głównym osiągnięciem naukowym tego fragmentu rozprawy. Poniżej przedstawiam kilka uwag szczegółowych.

Podrozdział 3.1. Przydałaby się informacja, czy sygnały są jednowymiarowe, czy też mogą być wielowymiarowe.

W podrozdziale 3.3., na str. 17, jest mowa o dwóch eksperymentach: losowym i aktywnym. W rzeczywistości oba eksperymenty są losowe i aktywne, a różnią się tylko użytymi do identyfikacji sygnałami.

Punkt 3.3.1. Krok 1 jest w zasadzie podstawowy dla zrozumienia całości algorytmu. A tymczasem wzoru (3.6) nie ma w publikacji [38], a zupełnie nie jest oczywiste, skąd on się bierze. Dlaczego nie ma w nim wpływu bloku Hammersteina? Do tego we wzorze (3.5) powinno być $|v| > 1$.

Punkt 3.3.2. W kroku 2 niezrozumiały jest wybór L opisany w ostatnim skończonym zdaniu na str. 19. O ile dobrze rozumiem, chodzi o L wartości wyjść w ustalonym punkcie x zmierzonych dla różnych realizacji zakłócenia z . Ale w jaki sposób estymator jądrowy wybiera L ?

Punkt 3.3.4. W kroku 4 wprowadzono sygnał pomocniczy r_k . Szukając w rozdziałach 3 i 4 użycia zmiennych instrumentalnych jako nowego rozwiązania zapowiedzianego w p. 2.4.1 wydaje mi się, że jest to jedyna zmienna, którą można podciągnąć pod umieszczony w p. 2.4.1 opis. Nie umniejszając ciekawego rozwiązania związanego z wprowadzeniem sygnału r_k , rozwiązanie to nie jest klasycznym użyciem metody zmiennych instrumentalnych stosowanych do pozbycia się obciążenia estymatorów w liniowej metodzie najmniejszych kwadratów przy skorelowaniu regresorów z zakłóceniem, jak między innymi opisane w pozycji [12]. Być może odwołując się do pozycji [12] i [25] doktorant miał na myśli użycie liczb losowych zamiast właściwego sygnału. Ale to należałoby dokładnie objaśnić. Chyba że jest to nieporozumienie i zapowiedź w p. 2.4.1 dotyczy innego fragmentu w rozdziale 3 lub 4.

Prócz tego, opis uzyskania ocen parametrów \hat{a} za pomocą metody SVD jest tu ogólny, a nie jest także dostatecznie dobrze wytłumaczony w dodatku B.5. Albo go trzeba dokładnie opisać, albo tylko odwołać się do tej literatury, gdzie jest on przedstawiony.

3. Uwagi do rozdziału 4

W tym rozdziale opisano metodę identyfikacji ogólnego dynamicznego systemu nieliniowego o skończonej odpowiedzi impulsowej za pomocą metody jądrowej. Bezpośrednie stosowanie tej metody powoduje, że dla utrzymania dokładności estymacji przy wzroście długości odpowiedzi impulsowej jest potrzebny wykładniczy wzrost liczby generowanych wektorów wejść, co bezpośrednio wpływa na wydłużenie czasu obliczeń potrzebnego do uzyskania założonej dokładności estymacji. Doktorant proponuje rozwiązanie tego problemu przez skwantowanie wektorów wejść i okresowe ich powtarzanie, a następnie formułuje twierdzenie o szybkości zbieżności średniokwadratowej zaproponowanego algorytmu, którego dowód znajduje się w dodatku A.3.

Podrozdział 4.4. W punkcie 4.4.2 (z okresowym wejściem) początkowa kolejność N_0 punktów jest ustalona lub przypadkowa, ale później kolejne pomiary są po prostu powtarzane w tych punktach w tej początkowej kolejności. Można by było ciągle losować punkty zgodne z rozkładem jednostajnym zamiast je powtarzać, co nie powinno mieć raczej wpływu na własności asymptotyczne w stosunku do ustalonego wyboru punktów. Być może ma to wpływ na właściwości dla skończonych prób, ale tego się w rozprawie nie rozważa. Brak mi więc dyskusji, dlaczego wybrano właśnie okresowe powtórzenia zamiast losowania, co byłoby chyba pierwszym pomysłem.

W podrozdziale 4.7 przedstawiono, jak z otrzymanego modelu nieparametrycznego można wyznaczyć model parametryczny. Jednak w tym podrozdziale, oprócz niezbyt udanego tytułu, gdyż trudno nazwać podaną metodę zastosowaniem, są także niezręczne zapisy matematyczne. We wzorze (4.24) zamiast znaku \subset powinien być znak \in . We wzorze (4.25) jest zapisana równość funkcjonału (pojedynczego systemu) i klasy systemów (czyli zbioru systemów). Także w dalszych wzorach powinien występować element należący do klasy $F(u_k^{(s)}, \theta)$, a nie klasa.

4. Uwagi do rozdziału 5

W tym rozdziale Doktorant przedstawia modyfikację niedawno opublikowanej rekurencyjnej metody identyfikacji modelu Hammersteina. Modyfikacja polega na zamianie modelu bloku liniowego ze skończonej odpowiedzi impulsowej (model MAX) na model autoregresji (ARX).

Podrozdział 5.1. W założeniach o zakłóceniach z_k zabrakło założenia $E(z_k | u_k) = 0$.

W ostatnim przekształceniu w (5.2) przyjęto $\gamma_0 = 1$ bez wspomnienia o tym w tekście. Jak to się ma do założenia 4 na stronie 17, gdzie założono $\sum_{j=0}^q \gamma_j = 1$? Czy to oznacza, że w każdym rozdziale są przyjmowane niezależne założenia?

W (5.2) występuje wyrażenie $E[\sum_{i=1}^q \gamma_i v_{k-i} | u_k = u]$, które jest później zastąpione przez (5.3). Powstaje pytanie, względem której zmiennej losowej jest liczona wartość oczekiwana. Z przekształcenia pierwszego składnika wynikałoby, że jest to zmienna losowa z_k . Ale w takim razie powyższa wartość pod funkcjonałem wartości oczekiwanej nie jest losowa. Dalej, według wcześniej zapisanego objaśnienia (2-3 wiersz od góry strony) k jest numerem pomiaru, ale nie do końca wiadomo, co przez to należy rozumieć, bo w opisywanych metodach mamy też do

czynienia z wieloma powtórzeniami losowej generacji sygnałów wejściowych. Należy jednak chyba przyjąć, że jest to pomiar w kolejnym czasie, tak jak zapisano w (5.1). Niezależnie od interpretacji, składniki pod sumą nie zależą od u_k . W związku z tym, (5.3) powinno chyba wyglądać następująco $d = \sum_{i=1}^q \gamma_i v_{k-i}$? To wyprowadzenie trzeba lepiej objaśnić, aby nie budziło wątpliwości.

W (5.4) powinno być $P(v_k; \{u_k, y_k\}_{k=1}^N)$. A średnik jest chyba rozumiany tak, jak wcześniej pionowa kreska? Nie dopowiedziano, co oznacza $\hat{R}(u_k)$. Z wcześniejszego wyprowadzenia można przypuszczać, że pomiary wyjść y_k nie są wykorzystywane do predykcji zmiennych v_k . Wystarczy, że jest znana oceny charakterystyki μ raz współczynników γ . Ale oczywiście do estymacji tych wielkości są potrzebne pomiary wyjść. I warto by było to wyraźnie napisać oraz przynajmniej odwołać się do rozdziału 3, gdzie te metody są opisywane, aby ułatwić czytelnikowi śledzenie rozumowania.

Nie rozumiem, jak to jest, że w (5.5) minimalizuje się wskaźnik Q po c i po $\hat{\gamma}$. Wcześniej parametry $\hat{\gamma}$ były bowiem estymowane metodą najmniejszych kwadratów. Jeżeli tu są one zmieniane w procesie optymalizacji, to po co było je wcześniej estymować? Same algorytmy minimalizacji są, co prawda, opisane dalej. Jednak opis wprowadzający w tym podrozdziale jest potraktowany zbyt skrótowo i za mało precyzyjnie, co utrudnia zrozumienie nie tylko tego, ale i dalszych podrozdziałów. Należałoby to rozumowanie lepiej objaśnić.

Podrozdział 5.2. Oznaczenia nie są tu dostatecznie precyzyjnie wytłumaczone. Można się domyślić, że \bar{u}_k jest zdefiniowane analogicznie do \bar{v}_k^p , które jest objaśnione tylko słownie. Ale wygląda na to, że tu k jest numerem wygenerowanego losowo ciągu wejść. A więc ma inne znaczenie niż k używane w poprzednim podrozdziale. Wprowadza to zamieszanie i utrudnia zrozumienie wyprowadzenia algorytmu.

Wypukłość kryterium (5.5) trzeba przyjąć na wiarę, bo pozycja [42] jest w bibliografii nieokreślona.

Co to jest V_N w zależności (5.14)?

Podrozdział 5.3. Stwierdzenie w pierwszym zdaniu na str. 42 jest nieprecyzyjne, bo potrzebne jest przechowywanie ostatnich ocen c (zgodnie z przyjętym oznaczaniem ocen chyba powinno być \hat{c} ?) oraz $\hat{\gamma}$.

Zrozumienie następującego zdania w drugim akapicie „W reprezentowanej procedurze N jest ostatnim pomiarem, a cały proces rozpoczyna się od $N = 1$, gdzie dla części zmiennych $N = 0$ oznacza wartości początkowe” wymaga dużej wyobraźni.

Zapis algorytmu jako przedstawionych tu kroków postępowania, bez żadnych objaśnień, jest trochę jak przedstawienie zakodowanego programu komputerowego bez komentarzy co i jak ma on robić. Można oczywiście mozolnie sprawdzać całą procedurę, ale wymaga to sporego nakładu pracy. Do tego, wiele oznaczeń w algorytmie budzi wątpliwości.

Wzór (5.18) i (5.20). Z definicji (5.8) $\hat{R}(\bar{u}_k)$ jest wektorem $(q + 1)$ -wymiarowym. Ale w wymienionych wzorach wektor $\hat{R}(\bar{u}_{k+(N-1)})$ musi być wektorem N -wymiarowym, aby było poprawnie określone mnożenie z wektorem L^{N-1} , który ma chyba wymiar taki, jak L_0 , czyli N (nie jest to, co prawda, całkowicie wyjaśnione).

Wzór (5.21). G_0 to jest chyba G_N dla $N = 0$? Tymczasem wymiar tej macierzy jest $N \times N$. Jak więc rozumieć macierz o wymiarze 0×0 ?

Wzór (5.22). L_0 to chyba jest L^N dla $N = 0$? Jeżeli jednak tak jest, to znów jest problem z wymiarem, gdyż jest to wektor N -wymiarowy.

Po co jest wprowadzona macierz $M_{(q+1) \times (q+1)}$ w (5.25)?

Wzór (5.26). Macierz M_0 to jest chyba M^N dla $N = 0$? Ale jej wymiar powinien chyba być $(q + 1) \times (q + 1)$, a nie $M + 1 \times Q + 1$.

Jaka jest początkowa wartość \mathcal{L}_N (chyba dla $N = 1$)?

Wzór (5.32). Zupełnie nie rozumiem, co oznacza L_0^{N-1} , jeżeli N jest kolejnym numerem iteracji.

Jaka jest początkowa wartość \mathcal{M}_N (dla $N = 0$ lub $N = 1$) w (5.33)?

Wzór (5.34). g_N i L^{N-1} są wektorami N -wymiarowymi. Jak więc rozumieć mnożenia w tym wzorze, jeżeli w środku są macierze jedynek o wymiarze $(q + 1) \times (q + 1)$?

Wzór (5.35). Tutaj w liczniku jest \mathcal{M}_N , a w (5.17) K_N .

Własność 5.3.1. Tutaj brakuje wykazania lub założenia, że podany algorytm iteracyjny jest zbieżny.

Podrozdział 5.4. Powszechnie przyjmuje się, że model ARMA ma postać

$$x_n + a_1 x_{n-1} + \dots + a_r x_{n-r} = \varepsilon_n + c_1 \varepsilon_{n-1} + \dots + c_s \varepsilon_{n-s}$$

dla $s \geq 0$, gdzie ε_n dla dowolnego n jest białym szumem niezależnym od x_n . Jeżeli $s = 0$, to jest to model AR.

Jeżeli teraz dodamy składową wymuszającą (wejście) u , to model

$$x_n + a_1 x_{n-1} + \dots + a_r x_{n-r} = b_0 u_n + b_1 u_{n-1} + \dots + c_p u_{n-p} + \varepsilon_n + c_1 \varepsilon_{n-1} + \dots + c_s \varepsilon_{n-s}$$

dla $s \geq 0$ nazywa się modelem ARMAX, a dla $s = 0$ modelem ARX.

W rozprawie rozważa się model z $s = 0$, co w tym podrozdziale wymaga nieznacznego zastanowienia, ale jest wyraźnie widoczne w równaniu (7.1). Różnica między modelem ARX i ARMAX jest istotna, bo o ile w tym pierwszym stosowanie wprost liniowej metody najmniejszych kwadratów prowadzi do estymatorów asymptotycznie zgodnych (a więc asymptotycznie nieobciążonych), to w tym drugim użycie tej metody daje w ogólności estymatory asymptotycznie obciążone. Pisanie, że rozważa się model ARMAX, gdy właściwie jest to model ARX, jest mylące i obiecuje rozwiązanie bardziej zaawansowanego problemu.

Punkt 5.5.2. W tabl. 5.1 podano, że błąd estymacji parametrów γ dla $N = 6000$ jest rzędu 10^{-4} a na rys. 5.5 jest on rzędu 10^{-3} .

5. Uwagi do rozdziału 7

W rozdziale tym rozważono wyniki analizy termicznej z badań starzeniowych szkieł chalkogenidkowych. Bada się w niej zmianę w czasie różnicy strumienia cieplnego między próbką badaną i próbką referencyjną. W rozdziale porównano wyniki aproksymacji tej różnicy przy użyciu modelu Hammersteina i metody identyfikacji opisanej w rozdziale 5 z wynikami

uzyskanymi innymi modelami opisanymi w literaturze. Uzyskano lepszą aproksymację przy zastosowaniu metody opisanej w rozprawie.

Jednak opis przyjętego postępowania i wyników nie jest zadowalający. Przede wszystkim element liniowy jest opisany modelem ARX, a nie ARMAX, o czym już pisałem wcześniej. Co ciekawe, w tabl. 7.1 podano błąd aproksymacji nie tylko dla modelu zwanego w rozprawie ARMAX, ale także dla modelu ARX, nie precyzując jednak, jak ten drugi model wygląda. Z tych mniejszych niedociągnięć wspomnę też od razu o rysunkach, na których nie podano wymiarów zmiennych, a w szczególności interesujących czasów trwania sygnałów (w sekundach, minutach, godzinach?). Do tego na osiach czasu są początkowo podawane wartości k , czyli kolejne numery pomiarów zmiennych w czasie, później wartości t , a więc chyba w przeliczeniu na czas rzeczywisty, a na ostatnich rysunkach chyba pomyłkowo u_k . I co oznacza powołanie na pozycje literatury [7] i [10] zaczynające podrozdział 7.2?

Ważniejsze niedociągnięcie, to brak postawienia celu budowy modelu z punktu widzenia praktycznego jego zastosowania. Dokładność aproksymacji bywa czasami celem identyfikacji modelu. Na przykład jest to ważne, gdy model służy do kompresji sygnałów. Ale tu nie bardzo widzę, dlaczego dokładność aproksymacji jest tak ważna w zastosowaniu modelu, szczególnie że nie wyjaśniono do czego ten model może służyć.

Do tego jest sprawą oczywistą, że błąd aproksymacji będzie w zasadzie malał wraz z rozbudową modelu, co widać wyraźnie w tabl. 7.2, gdzie błąd szybko maleje ze wzrostem s . Tak że błąd zależy mocno od tego, jak rozbudowany jest model i wobec tego przyjęcie dopasowania modelu do pomiarów jako kryterium porównania modeli budzi wątpliwości. Przypuszczam, że zastosowanie sieci neuronowej, takiej jak w rozdz. 8, mógłby dać jeszcze lepsze dopasowanie niż przedstawione w tabl. 7.2. Czy ten model neuronowy byłby uważany za jeszcze lepszy?

Na ogół do porównywania modeli stosuje się bardziej skomplikowane wskaźniki niż sam błąd średniokwadratowy. A między innymi stosuje się postępowanie (użyte zresztą w rozdziale 8), w którym dane są dzielone na dwie części. Jedna z nich służy do estymacji modelu, a druga do jego walidacji (testowania poprawności modelu). Dopiero błąd dopasowania wyjść modelu do rzeczywistych pomiarów w etapie walidacji decyduje o jakości modelu i pozwala na porównywanie modeli. Oczywiście jest to potrzebne, gdy model ma być wielokrotnie stosowany z innymi pomiarami niż te użyte do estymacji. O tym problemie doboru struktury modelu Doktorant zupełnie nie wspomina, być może dlatego, że nie wiadomo, czy model z rozdziału 7 ma być używany dla innych pomiarów. A może są tego inne przyczyny? Ale brak poruszenia tego problemu rzuca się w oczy, a także powoduje wątpliwości co do poprawności porównania modeli w tabl. 7.2.

Warto jeszcze dodać, że w tym rozdziale nie ma mowy o optymalizacji procesu, co jest obiecywane w tytule rozprawy. Jest tylko porównanie aproksymacji wyników pomiarowych z procesu dla różnych metod.

6. Uwagi do rozdziału 8

W tym rozdziale rozpatrywanym procesem jest proces skrawania za pomocą obrabiarek sterowanych numerycznie (NCN), przy czym pomiary są zebrane dla tokarki NCN. Pomiary te to natężenia pobieranego prądu przez obrabiarkę (prawdopodobnie proporcjonalnego do pobieranej mocy). Tu Doktorant formułuje hipotezę badawczą, że za pomocą tych pomiarów

„można weryfikować proces technologiczny i, dysponując odpowiednim modelem, oceniać jakość procesu”. Niezbyt rozumiem, co Doktorant rozumie przez weryfikację procesu technologicznego. Ten termin jest użyty ponownie na początku podrozdziału 8.3 „Model został nauczony na pierwszej operacji po zweryfikowaniu poprawności procesu”, ale to także nie wyjaśnia, o co chodzi w tej weryfikacji. Dalej słowo weryfikacja jest używane w kontekście wcześniej wspomnianej walidacji modelu dla innych danych, co także nie wyjaśnia wcześniejszego pojęcia.

Praca tokarki składa się z charakterystycznych faz. Pomijając fazę początkowego dojazdu i końcowego odjazdu imaka z zamontowanymi narzędziami skrawającymi do obrabianej części, to są to dwie główne fazy: faza obróbki (skrawania) i faza przejazdu między kolejnymi obróbkami, w której często następuje zmiana narzędzia, chociaż czasami może tak nie być. Moc pobierana w fazie przejazdu jest znacznie mniejsza od mocy pobieranej w czasie skrawania, stąd charakterystyczne następujące po sobie fazy wysokiego i niskiego poboru mocy (natężenia prądu) na wykresach. Te fazy są w modelu rozpatrywanym w rozprawie wykrywane w ramach tak zwanej identyfikacji procesu deterministycznego, w którym jest dopasowywany model w postaci szeregu Fouriera. Po odjęciu wartości tego modelu od pomiarów uzyskuje się składową zwaną w rozprawie składową stochastyczną, do której jest dopasowywany model nieliniowej autoregresji. W rezultacie są to inne modele niż omawiane we wcześniejszych rozdziałach.

Pobór mocy w fazie przejazdu jest w zasadzie mało istotny dla modelowania, bo jest on zależny tylko od zaplanowanego ruchu imaka w tym czasie i wymiany narzędzia, a to jest uwarunkowane właściwie względami technologicznymi (mogą tu wystąpić zagadnienia optymalizacji drogi i szybkości ruchu, ale to rozwiązuje raczej technolog). Tak że w rezultacie ciekawa do zamodelowania jest tylko faza skrawania. Jednak w rozprawie jest wyznaczany jeden model dla całości procesu.

Głównym rozpatrywanym wykorzystaniem opracowanego modelu jest tak zwane wykrywanie awarii. W jednym z zaprezentowanych przebiegów występuje nietypowy przedłużony okres bardzo niskiego poboru prądu. Tymczasem w tym okresie model przewiduje fazę obróbki z wysokim poborem prądu. Tę niezgodność pomiarów z wartościami modelu po jego estymacji uznano za wykrycie awarii.

Szkoda, że Doktorant nie napisał, co było rzeczywistą przyczyną tego niskiego poboru prądu. Wystąpił on w fazie przejazdu, co stwarza wrażenie celowego wstrzymania pracy tokarki. Awarie w tej fazie to raczej chyba rzadkość. Można się ich bardziej spodziewać w fazie obróbki, jak na przykład awaria związana z uszkodzeniem ostrza narzędzia skrawającego. Być może dałoby się przewidzieć zawnazu prawdopodobieństwo takiej awarii związanej ze zużyciem narzędzia, ale danych dla takiego przypadku nie przedstawiono (czemu się nie dziwię, bo taka awaria to nie byłoby zbyt przyjemne wydarzenie) i pewnie wymagałoby to bardzo szczegółowej analizy niezgodności pomiarów i wyników modelu w fazie skrawania w okresie poprzedzającym awarię oraz analizy powtarzalności zaobserwowanych charakterystycznych cech tych niezgodności. Wykrywanie awarii po fakcie, tak jak zaproponowano w rozprawie, ma chyba mniejszą praktyczną wartość.

W dalszej części rozdziału rozpatrzono jeszcze dwa modele: drzewa regresji i sztucznej sieci neuronowej. Oba te modele dopasowały się lepiej do danych, a model neuronowy właściwie idealnie aproksymował cały przebieg, co może nie jest specjalną niespodzianką, bo był to duży

model z czterdziestoma warstwami ukrytymi (nie podano liczby neuronów w warstwach). Te lepsze dopasowania przyjęto za wadę modeli, gdyż słabiej lub całkiem nie wykryły one nietypowego fragmentu przebiegu. Tu oczywiście powstaje podobne pytanie do tego, które wystąpiło w rozdziale 7, a mianowicie wpływ rozbudowy modelu na wykrywanie nietypowego fragmentu przebiegu. W opisywanym przypadku zapewne do wykrycia zaistniałego nietypowego fragmentu wystarczyłby model procesu deterministycznego (szeregu Fouriera), bo to on chyba wpłynął na dużą niezgodność modelu i pomiarów w nietypowym fragmencie. Jednak dla innego typu nietypowych przebiegów może to wyglądać inaczej. W sumie jestem dosyć sceptyczny co do zaproponowanej metodologii wykrywania rzeczywistych awarii za pomocą modelu, nawet jeżeli będzie się to działo po zaistnieniu awarii, jak w opisanym w rozprawie przypadku. Opracowanie takiej metody wymagałoby znacznie większego zaangażowania wiedzy dziedzinowej w rozwiązaniu tego zagadnienia, w tym wytypowania typu awarii, którą chcemy wykrywać, opracowania modelu nastawionego na jak najbardziej czułe wykrywanie tego typu awarii (zapewne obowiązywałby on tylko dla fazy skrawania) i wyznaczenia teoretycznie lub eksperymentalnie poziomów wskaźników, przy których uznajemy, że zaszła awaria.

Warto też dodać, że wykrywanie awarii trudno nazwać optymalizacją procesu. Aby zastosować model bezpośrednio do optymalizacji, jego wyjścia muszą zależeć od zmiennych, których odpowiedni dobór spowoduje optymalizację wybranego wskaźnika jakości rozpatrywanego procesu. O takim wskaźniku jakości w rozdziale się w ogóle nie wspomina.

Rozpatrywane wcześniej w rozprawie modele należą w zasadzie do modeli opisujących zależność wyjścia od wejścia. Struktura wewnętrzna modelu jest ogólna i w przypadku nieparametrycznej estymacji charakterystyk nieliniowych raczej niezwiązana z rzeczywistym modelem fizycznym rozpatrywanego obiektu (chyba że uda się przeprowadzić dodatkową estymację parametrów takiego modelu na podstawie wartości charakterystyki). Tego typu modele mogą służyć do wyznaczenia optymalnego sterowania lub do innej optymalizacji tylko wtedy, gdy ich wejściem jest zmienna, względem której chcemy optymalizować proces. Jeżeli model nie ma wejść, jak w tym przypadku model z rozdziału 8, to nie nadaje się on do optymalizacji rozumianej w ogólnie przyjętym sensie. W szczególności nie widać, jak mógłby być on używany do optymalizacji względem czynników wymienionych we wstępie do tego rozdziału. Program CAM wspomniany na str. 63 może mógłby być użyty, ale koncepcja połączenia go z modelami opisanymi w pracy jest zupełnie niedopracowana.

7. Uwagi do dodatku A

Dodatek A.2

Co oznacza P we wzorach w (A.3)?

Jak rozumieć zdanie przed wzorem (A.4) „Liczba pomiarów L jest losowa, ale jej wartość oczekiwana zbiega do nieskończoności wraz ze wzrostem pomiarów”? I czy to ma być założenie? Bowiem nigdzie wcześniej nie podano, jak liczba L jest ustalana.

Ostatnie zdanie na str. 84. O jaki warunek chodzi w wariancji warunkowej?

Co oznacza powołanie się na pozycje [37] i [41] literatury na str. 85? Czy oznacza to, że to twierdzenie jest tam udowodnione? Jeżeli by tak było, to po co ten dowód tu powtarzać.

Dodatek A.3

Warunek (A.14) jest chyba założeniem i powinien być zapisany w twierdzeniu lub w założeniach przed twierdzeniem.

Dodatek A.6

Co to jest algorytm IPM?

Przyjęta linearyzacja T_N^{-1} wymaga założenia $\|A^{-1}B\| \ll 1$.

8. Uwagi do dodatku B

Dodatek B.2

We wzorze (B.2) lewa strona jest macierzą o wymiarach $m \times n$, a prawa strona macierzą kwadratową o wymiarze l , co wynika z interpretacji macierzy *diag*. Jak mogą one być równe?

Dodatek B.3

Po lewej stronie wzoru (B.4) powinno być $MSE(\hat{x})$.

Dodatek B.4

Co to jest X ? To twierdzenie wymaga też dodatkowego założenia, na przykład $E|X| < \infty$.

Dodatek B.5

Dlaczego pozmieniano tu wcześniejsze oznaczenia? Poprzednio współczynniki c_i były nazywane a_i , patrz (3.2), a γ_i oznaczały odpowiedź impulsową, patrz p. 3 na str. 17.

Str. 92, 5 wiersz. W [3] transmitancja ma licznik i mianownik, i stąd wynika konieczność rozcięcia macierzy. Tu transmitancja ma tylko licznik i rozcięcie nie jest potrzebne.

Wzór (B.10). Co to jest $\hat{\Theta}_{r,c}^{(LS)}$?

Wzory (B.11) i (B.12). Co to jest κ_{μ_1} ?

Dodatek B.6

Nie wiem, czego dotyczy powołanie na pozycję [36], bo zamieszczony tu algorytm jest dobrze znanym algorytmem z podziałem dychotomicznym. Tyle że ostatni wiersz powinien być wykonywany w każdej iteracji po n , a nie tylko przy okazji drugiego warunku „Jeżeli”. Są zresztą szybciej zbieżne algorytmy minimalizacji funkcji wypukłych: algorytm ze złotym podziałem czy algorytm Fibonacciego. Dlaczego wybrano ten z podziałem dychotomicznym?

9. Uwagi dodatkowe

Doktorant ma dobre rozeznanie w literaturze dotyczącej bezpośrednio tematyki rozprawy, czyli zagadnień związanych z identyfikacją modeli Hammersteina-Wienera i zastosowaniami metod jądrowych, gdzie wiele pozycji literatury powstało przy udziale obecnych i byłych pracowników zakładu, w którym jest przygotowana rozprawa. Doktorant odnosi się jednak we wprowadzeniu także do historii identyfikacji przypisując jej początki pracom Gaussa z początku XIX wieku. Tymczasem początki identyfikacji sięgają znacznie wcześniejszych

prac. Historycy nauki początków szukają w traktacie Galileusza z 1629 roku¹, gdzie napisał on, że w przypadku występowania błędów w pomiarach, aby uzyskać najlepszy wynik należy zrobić w pomiarach możliwie najmniejsze poprawki, tak aby z pomiarów niezgodnych uzyskać pomiary zgodne. W XVIII wieku proponowano różne interpretacje tego stwierdzenia, aby jak najlepiej dopasować do pomiarów model liniowy, aż w 1759 r. Boscovich zaproponował, aby minimalizować sumę wartości bezwzględnych odchyłeń pomiarów od wartości modelu. Dopiero na początku XIX wieku Gauss i niezależnie Legendre zaproponowali, aby była to suma kwadratów, głównie z powodu znacznie łatwiejszych obliczeń – nie było wtedy komputerów. Tak że dosyć zwyczajowe odwoływanie się do prac Gaussa jako początków identyfikacji nie jest ścisłe, chociaż rzeczywiście dopiero metoda najmniejszych kwadratów pozwoliła na efektywne rozwiązywanie problemu estymacji modeli, co wpłynęło na szersze stosowanie estymacji parametrów w problemach praktycznych.

Powołania na pozycje literaturowe zawarte w bibliografii są często kłopotliwe do interpretacji. Kilka przykładów takich powołań podałem wcześniej. Ale dodatkowy kłopot powoduje to, że w wykazie prac część pozycji ma nieokreślony status. I tak pozycje [35], [36], [42] i [49] nie mają podanego źródła, gdzie zostały opublikowane. Nie wiadomo więc, jak czytelnik ma do nich trafić. W dwóch pierwszych z nich Doktorant jest współautorem, a w rozprawie jest do nich sporo odwołań w kontekście dokładniejszego lub szerszego omówienia przedstawianego materiału. Na pewno czytelnik mógłby być zainteresowany tymi uzupełnieniami, a nawet jeżeli nie, to chciałby może wiedzieć, czy są to artykuły opublikowane w recenzowanych wydawnictwach. Do tego pozycja [34] ma status zgłoszonej do publikacji. Z tego wynika, że nie była jeszcze zrecenzowana i nie ma nawet pewności, że zostanie zaakceptowana przez czasopismo. Odwoływanie się do takiej pracy jest ryzykowne, bo nie ma pewności, że się w podanym czasopiśmie rzeczywiście pojawi.

10. Podsumowanie i wniosek końcowy

W rozprawie przedstawiono nowe pomysły ułatwiające praktyczne zastosowania metod identyfikacji nieliniowych modeli dynamicznych, w szczególności typu Hammersteina-Wienera. Obejmują one:

- zastosowanie sekwencji losowych wejść binarnych pozwalających obejść wpływ wejściowego nieliniowego bloku Hammersteina w początkowym etapie estymacji parametrów, co upraszcza procedurę identyfikacji modeli w bloku odpowiedzi impulsowej i w wyjściowym bloku Wienera;
- opracowanie metody identyfikacji nieliniowych systemów dynamicznych o ogólnej strukturze metodą jądrową, z redukcją rzędu zbieżności estymatorów po zmniejszeniu wymiaru problemu przez kwantowanie sygnałów wejściowych;
- uogólnienie algorytmu rekurencyjnej identyfikacji modelu Hammersteina z zastosowaniem estymatora (predyktora) sygnału wewnętrznego na systemy z blokiem liniowym opisanym modelem ARX.

Wszystkie te metody są opracowane od strony matematycznej łącznie z dowodami ich zbieżności. Rozdziały z opisem metod mogą być po dopracowaniu podstawą nowych artykułów

¹ Tłumaczenie angielskie S. Drake'a: Dialogue concerning the two chief world systems, Ptolemaic and Copernican. UCLA Press, 1967.

zgłoszonych do publikacji w renomowanych czasopismach. Te osiągnięcia są z pewnością silną stroną rozprawy.

Słabszą stroną rozprawy są przykłady identyfikacji rzeczywistych systemów opisane w części trzeciej rozprawy. Są one przede wszystkim związane z brakiem przekonujących celów identyfikacji tych systemów. W przypadku szkieł chalkogenidkowych pomiary służą tylko do porównania metody z rozprawy z innymi, wcześniej proponowanymi metodami. W przypadku obrabiarek sterowanych numerycznie przedstawiony problem wykrywania awarii jest słabo umotywowany technologicznie, a podany przykład nie jest przekonujący.

Należy też dodać, że rozprawa sprawia wrażenie pisanej w pośpiechu. W szczególności jest to widoczne w rozdziale 5. Wyprowadzenia wzorów są skrótowe, brakuje definicji zmiennych, a objaśnienia słowne są często niewystarczające, mało precyzyjne, albo nawet niezrozumiałe. Czasami brakuje założeń lub nie jest jasne, które założenia obowiązują.

Zgodnie z wymaganiami obecnie obowiązującej ustawy rozprawa doktorska powinna wykazać umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez doktoranta. Nie mam najmniejszych wątpliwości, że część teoretyczna rozprawy wykazuje umiejętność zdefiniowania nowych nietrywialnych problemów badawczych oraz umiejętność ich rozwiązania, a uzyskane wyniki są znaczące. Ułatwiają one zastosowanie metod w bardziej skomplikowanych zadaniach praktycznych. Czuję jednak niedostatek w umiejętności przedstawiania i redagowania opisu osiągniętych rezultatów. Te usterki dosyć łatwo można jednak usunąć i myślę, że będzie to zrobione przy okazji przygotowania publikacji. Nie jestem natomiast przekonany do wyników uzyskanych w zastosowaniu metod identyfikacji w praktycznych zadaniach. W sumie jestem jednak zdania, że wyniki uzyskane w samej części teoretycznej w stopniu wystarczającym spełniają wymagania ustawy.

Przechodząc do końcowej konkluzji uważam, że ważąc plusy i minusy rozprawy w jej obecnej formie należy stwierdzić, że zawartość rozprawy spełnia wymogi obowiązującej ustawy. Wnioskuje zatem o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie Doktoranta do jej publicznej obrony.



