

PARAMETERS IDENTIFICATION OF AGRICULTURAL COMBINATION TRACTOR – POTATO PLANTER MODEL

Summary

The paper includes description of parametrical identification process of agricultural combination tractor – potato planter model. The minimization of loss function is used as identification method. The function depends on difference between results obtained by simulation and by identification experiment. The combination model and identification test were described in short. Problem of optimization algorithm selection and results of identification were presented.

IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW MODELU AGREGATU ROLNICZEGO CIĄGNIK – SADZARKA DO ZIEMNIAKÓW

Streszczenie

Artykuł zawiera opis procesu identyfikacji parametrycznej modelu agregatu rolniczego ciągnik – sadzarka do ziemniaków. Jako metodę identyfikacji zastosowano minimalizację funkcji strat, zależnej od różnicy między wartościami otrzymanymi z obliczeń symulacyjnych i z eksperymentu identyfikacyjnego. W skrócie opisano model matematyczny agregatu oraz eksperyment identyfikacyjny. Przedstawiono zagadnienie wyboru algorytmu optymalizacyjnego oraz wyniki identyfikacji.

1. Wprowadzenie

W ogólnym przypadku proces identyfikacji przebiega w następujących fazach:

- przeprowadzenie eksperymentu identyfikacyjnego,
- wybór typu oraz struktury modelu,
- przeprowadzenie identyfikacji modelu,
- walidacja modelu.

Eksperyment identyfikacyjny polega na obserwacji wyjścia podczas pobudzania analizowanego układu znanym sygnałem wejściowym (np. sinusoidalnym lub impulsowym).

Następnie, na podstawie wyników eksperymentu identyfikacyjnego, dokonywany jest wybór typu i postaci modelu. Identyfikacja polega na znalezieniu modelu wybranego uprzednio typu, który, według wybranego kryterium, możliwie najlepiej opisuje zachowanie modelowanego obiektu.

Walidacja jest ostatnim etapem procesu identyfikacji. Polega ona na ocenie jego przydatności z punktu widzenia osiągnięcia celów modelowania. Zależnie od oceny może on zostać przyjęty, przeznaczony do poprawy lub odrzucony.

Model parametryczny można zapisać na przykład w następującej postaci:

$$\frac{d}{dt}u(t) = f[u(t), b(t), t], \quad u(t_0) = u_0, \quad (1)$$

gdzie:

$u(t)$ – wektor stanu,

$b(t)$ – wektor parametrów modelu.

W przypadku uzyskania modelu parametrycznego opisanego zależnościami postaci (1) praca nad modelem prowadzi do estymacji wartości wektora parametrów b (mogącego w ogólnym przypadku zależeć od czasu). Innymi słowy, należy znaleźć wektor β , który w najlepszy sposób przybliżałby wektor b . W naturalny sposób rodzi się zatem pytanie o kryterium, według którego należy dokonywać wyboru wektora β . Często spotykaną postacią takiego kryterium jest norma określająca tę różnicę:

$$\varepsilon(\beta) = \|y_p - y_m(\beta)\|, \quad (2)$$

gdzie:

β – wektor identyfikowanych parametrów,

y_p – wektor parametrów stanu uzyskany na podstawie pomiarów,

y_m – wektor parametrów stanu uzyskanych na podstawie obliczeń symulacyjnych.

Wybór kryterium postaci (2) umożliwia sprowadzenie zadania identyfikacji do zadania optymalizacji jednokryterialnej.

2. Opis modelu agregatu ciągnik – sadzarka do ziemniaków

Przedmiotem identyfikacji był model agregatu rolniczego ciągnik – sadzarka do ziemniaków. Budowa modelu oparta jest na spotykanym w literaturze, płaskim modelu dwukołowym, tzw. model rowerowy [3], [5]. Został on istotnie zmodyfikowany przez dodanie trzeciego koła reprezentującego oś sadzarki.

Analizowany agregat składa się z ciągnika rolniczego oraz półzawieszanej automatycznej dwurzędowej sadzarki do ziemniaków. Rama nośna sadzarki oparta jest na 4-kołowym układzie jezdny – na dwóch kołach przednich podporowo – napędowych oraz dwóch kołach tylnych podporowych – samoskrętnych. Sadzarka zaczepiona jest do dolnych cięgien 3-punktowego układu zawieszenia ciągnika, co umożliwia wyniesienie przedniej części sadzarki w górne położenie na pasach uwrócia oraz podczas przejazdów transportowych. Sadzarka opiera się wówczas na tylnych, samoskrętnych kołach podporowych. Należy podkreślić, że sposób połączenia sadzarki z ciągnikiem uniemożliwia obrót sadzarki względem ciągnika wokół osi prostopadłej do powierzchni drogi.

Model ma 7 stopni swobody: liniowe odchylenie środka ciężkości agregatu od osi korytarza Δy , kąt obrotu osi resorowanej agregatu Ψ , boczne przemieszczenia przedniego i tylnego koła ciągnika ζ_1, ζ_2 , kąty znoszenia odpowiednio

przednich i tylnych kół ciągnika γ_1, γ_2 , kąt skrętu kół samoskrętnych θ_k .

Równania modelu, opisujące poszczególne stopnie swobody, uzyskano na podstawie równań dynamiki Newtona oraz teorii Kiełdysza, opisującej toczenie się ogumionego koła po płaskiej powierzchni:

$$\begin{cases} \dot{v}_y = \frac{c_{\xi_1}}{M} \zeta_1 + \frac{c_{\xi_2}}{M} \zeta_2 + \frac{m(k^2 + a_k^2)}{M(a_k + b_k)} \ddot{\theta}_k - v_x \dot{\Psi} \\ \ddot{\Psi} = \frac{ac_{\xi_1}}{I_{zz}} \zeta_1 - \frac{bc_{\xi_2}}{I_{zz}} \zeta_2 - \frac{c}{I_{zz}} \frac{m(k^2 + a_k^2)}{(a_k + b_k)} \ddot{\theta}_k \\ \dot{\zeta}_1 = -v_y - a\dot{\Psi} + v_x\Theta + v_x\gamma_1 \\ \dot{\zeta}_2 = -v_y + b\dot{\Psi} + v_x\gamma_2 \\ \dot{\gamma}_1 = -\dot{\Psi} - \dot{\Theta} - v_x a_1 \left(\zeta_1 + \frac{K_{\delta_1}}{c_{\xi_1}} \gamma_1 \right) \\ \dot{\gamma}_2 = -\dot{\Psi} - v_x a_2 \left(\zeta_2 + \frac{K_{\delta_2}}{c_{\xi_2}} \gamma_2 \right) \\ \ddot{\theta}_k = -\frac{v_x k_k}{K_{\delta_k}} \ddot{\theta}_k - k_k \frac{(a_k + b_k)^2}{m(k^2 + a_k^2)} \dot{\theta}_k - k_k v_x \frac{(a_k + b_k)}{m(k^2 + a_k^2)} \theta_k \end{cases} \quad (3)$$

W równaniach (3) przyjęto następujące oznaczenia: Ψ [rad] – kąt obrotu masy resorowanej agregatu, v_y i v_x [m/s] – składowe poprzeczna i wzdłużna prędkości środka ciężkości agregatu, ζ_1, ζ_2 [m] – boczne przemieszczenia odpowiednio przednich i tylnych kół ciągnika, γ_1, γ_2 [rad] – kąty znoszenia odpowiednio przednich i tylnych kół ciągnika. Θ [rad] – średni kąt skrętu koła kierowanego, θ_k [rad] – kąt skrętu kół samoskrętnych, a [m] – odległość przedniej osi ciągnika od środka ciężkości agregatu, b [m] – odległość tylnej osi ciągnika od środka ciężkości agregatu, c [m] – odległość osi sadzarki od środka ciężkości agregatu, M [kg] – masa agregatu, m [kg] – masa układu koła samoskrętnego, I_{zz} [kg m²] – moment bezwładności agregatu względem osi pionowej przechodzącej przez środek ciężkości agregatu, c_{ξ_1}, c_{ξ_2} [N/m] – sztywności poprzeczne opon przedniej i tylnej osi oraz osi sadzarki, $K_{\delta_1}, K_{\delta_2}, K_{\delta_k}$ [N/rad] – współczynniki odporności na kątowe znoszenie kół przedniej i tylnej osi oraz osi sadzarki, a_1, a_2 [m⁻²] – współczynniki krzywizny deformacji opon przedniej i tylnej osi ciągnika, a_k [m] – odległość osi obrotu zespołu koła samoskrętnego od jego środka ciężkości, b_k [m] – odległość punktu styku opony koła samoskrętnego z powierzchnią drogi od jego środka ciężkości, k_k [kg/s²] – współczynnik sztywności kontaktu zestawu koła samoskrętnego z podłożem.

3. Badania eksperymentalne agregatu ciągnik-sadzarka do ziemniaków

Pomiary wykonano podczas przejazdów transportowych po powierzchni utwardzonej na placu manewrowym. Miały one na celu uzyskanie informacji o zachowaniu agregatu podczas jazdy z różnymi prędkościami i wykonywania rozmaitych manewrów (zmiana pasa ruchu, wymijanie, wykonywanie skrętów o różnych promieniach) oraz o siłach działających wówczas na koła ciągnika. Parametry wykonywanych manewrów (prędkość, szerokość pasa ruchu, promienie skrętów itp.) były zgodne z zaleceniami ISO.

Do badań wykorzystano aparaturę pomiarową firm DATRON i Hottinger specjalnie uzupełnioną i przystosowaną do specyfiki przeprowadzanych pomiarów. Między innymi wykorzystano bezstykowy czujnik firmy DATRON

do pomiaru prędkości oraz pomiarowy do pomiaru położenia koła kierowanego podczas jazdy (rys. 1). Wykorzystano także własne rozwiązania PIMR takie jak wielokanałowy mobilny układ do lokalnej akwizycji danych umożliwiający ich zbieranie z ruchomych części maszyn (np. z obracających się kół - rys. 2) oraz czujnik do pomiaru obciążenia występującego na kole ciągnika.

Mierzono także pełne obciążenia (momenty i siły) działające na koła ciągnika oraz ich prędkość kątową.

Przeprowadzono też badania własności opon będących na wyposażeniu wchodzącego w skład badanego agregatu ciągnika Massey Ferguson. Do badań wykorzystane zostało urządzenie do pomiaru statycznej sztywności wielokierunkowej opon, opracowane przez Ośrodek Badawczo Rozwojowy Przemysłu Oponiarskiego „Stomil” w Poznaniu. Przeprowadzono serie pomiarów sztywności wzdłużnej, bocznej oraz skrętnej dla obu badanych opon.

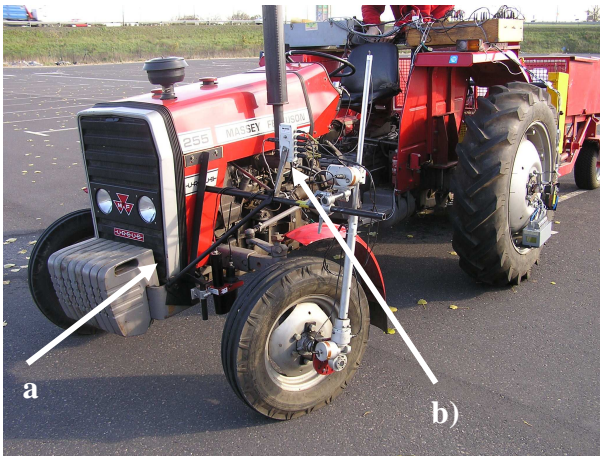
4. Wybór metody optymalizacyjnej

Podczas stosowania metod minimalizacji do rozwiązania zadania identyfikacji z zastosowaniem kryterium (2) minimalizacja stosowana jest do funkcji różnicy między sygnałem uzyskanym z badań eksperymentalnych a sygnałem uzyskanym na podstawie obliczeń symulacyjnych. Rozwiązanie tak postawionego zadania wymaga na ogół zastosowania numerycznych procedur optymalizacyjnych. Zaletą ich jest duża ogólność; można je stosować do szerokiej klasy, nawet bardzo złożonych modeli [4].

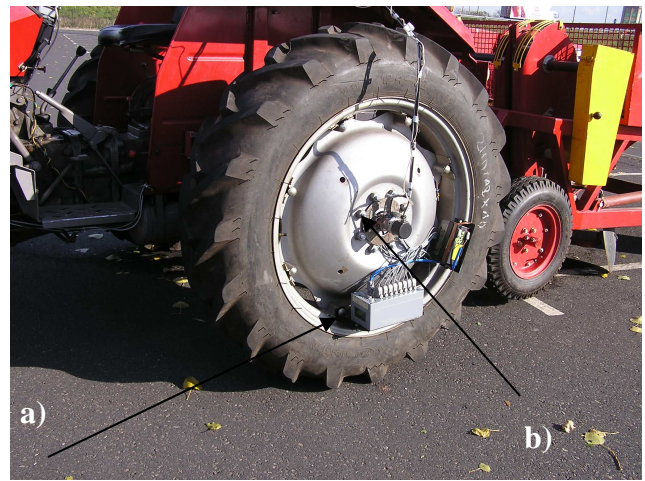
W procesie rozwiązywania zadania identyfikacji za pomocą metod optymalizacyjnych bardzo istotny jest wybór odpowiedniego algorytmu. Jest to zwykle zadanie trudne, a jego rozwiązanie zależy najczęściej od dokładnej znajomości matematycznych i numerycznych własności minimalizowanej funkcji. Wiele algorytmów optymalizacyjnych wymaga, by funkcja kryterialna była ciągła, różniczkowalna jedno lub dwukrotnie. Na skuteczność algorytmów wpływa też położenie punktu optymalnego względem występujących ograniczeń.

Istnieje bogata literatura dotycząca badań porównawczych rozmaitych procedur optymalizacyjnych. Wyciągnięto też pewne ogólne wnioski dotyczące ich jakości oraz wpływu poszczególnych elementów metod na wynik końcowy. Można powiedzieć, że zwykle większe wymagania wobec własności funkcji kryterialnej idą w parze z wymaganą większą szybkością i dokładnością algorytmu optymalizacyjnego. Jednak w przypadku funkcji, które nie spełniają wymaganych często założeń o różniczkowalności, o silnej nieliniowości i z możliwymi nieciągłościami, lepiej radzą sobie niejednokrotnie algorytmy prostsze, nie korzystające z pochodnych minimalizowanych funkcji.

Ponieważ nie zawsze dobrze znamy własności złożonych funkcji kryterialnych (szczególnie takich, które zależą od rozwiązania modelu), w praktyce wygodniej jest zastosować metodę prostszą, o wolniejszej zbieżności i większym koszcie obliczeniowym, ale stawiającą mniej wymagań co do własności funkcji kryterialnej. Istotna jest też oczywiście faktyczna dostępność procedur optymalizacyjnych. Metody te pozwalają uzyskać pewną informację o całej przestrzeni parametrów i zachowaniu się w niej funkcji kryterialnej. Może to ułatwić rozwiązanie problemu uniknięcia minimum lokalnego dzięki odpowiedniemu doborowi punktu startowego.



Rys. 1. Przednie koło ciągnika z widoczną aparaturą pomiarową: a) czujnik do pomiaru prędkości, b) układ do pomiaru położenia koła kierowanego podczas jazdy
Fig. 1. Testing equipment on the tractor front wheel: a) velocity sensor, b) system for measuring of steered wheel position



Rys. 2. Tylnie koło ciągnika z czujnikami i urządzeniem gromadzącym dane pomiarowe: a) wielokanałowy mobilny układ pomiarowy do pomiaru naprężeń, na podstawie których obliczane są siły działające na koła; b) impulsowy czujnik pomiaru kąta obrotu koła
Fig. 2. Rear tractor wheel with the sensors and measurement device: a) multi-channel, mobile measurement system for stress acquisition; the stresses are used to calculate forces acting on the wheels; b) impulse sensor for angle of wheel rotation measurement

W zastosowanym modelu agregatu ciągnik – sadzarka (3) można wskazać 17 parametrów. Część z nich, przede wszystkim opisujących własności geometryczne agregatu, można uznać za znane. Ustalono, że parametrami wyznaczanymi w procesie identyfikacji będą:

- I_{zz} [kg m²] – moment bezwładności agregatu względem osi pionowej przechodzącej przez środek ciężkości agregatu,
- c_{z1}, c_{z2} [N/m] – sztywności poprzeczne opon przedniej i tylnej osi oraz osi sadzarki,
- $K_{\delta 1}, K_{\delta 2}, K_{\delta k}$ [N/rad] – współczynniki odporności na kątowne znoszenie kół przedniej i tylnej osi oraz osi sadzarki,
- κ [kg m²] – moment żyroskopowy układu koła samoskrętnego,
- a_1, a_2 [m⁻²] – współczynniki krzywizny deformacji opon przedniej i tylnej osi ciągnika,
- k_k [kg/s²] – współczynnik sztywności kontaktu zestawu koła samoskrętnego z podłożem.

Przeprowadzona identyfikacja parametryczna polegała na znalezieniu takich wartości wymienionych wyżej parametrów, które zapewniłyby zgodność wielkości wyjściowych otrzymywanych z modelu oraz wyników pomiarów identyfikacyjnych.

Przyjęto, że funkcja opisująca błędy estymacji powinna być nieujemną funkcją estymowanych parametrów. Przyjęto jej następującą ogólną postać:

$$F_{kryty}(par) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n \alpha_k (y_{mk}(t_i) - y_{pk}(t_i))^2, \quad (4)$$

gdzie:

- n – liczba kroków symulacji,
- par – wektor identyfikowanych parametrów modelu,
- t_i – chwile kolejnych kroków symulacji i pomiaru,
- y_m – m wymiarowy wektor wartości parametrów stanu modelu uzyskanych na podstawie symulacji,

y_p – m wymiarowy wektor wartości parametrów stanu agregatu uzyskanych na podstawie eksperymentu identyfikacyjnego.

Aby umożliwić porównywanie wartości wybranych parametrów modelu otrzymanych na podstawie obliczeń symulacyjnych oraz na podstawie pomiarów, wymuszono by wyniki rozwiązania równań modelu były podawane przez procedurę Matlaba w tych samych chwilach t_i , co wartości otrzymane z pomiarów.

Sygnałem wymuszającym w modelu był kąt skrętu przedniego koła ciągnika uzyskany podczas pomiaru.

Zagadnienie identyfikacji modelu agregatu ciągnik – sadzarka do ziemniaków sprowadzono zatem do zadania optymalizacji funkcji (4) w dziesięciowymiarowej przestrzeni parametrów modelu. Własności funkcji kryterialnej, decydujące o wyborze obliczeniowej metody optymalizacji, są trudne do określenia, gdyż w celu jej obliczenia należy rozwiązać każdorazowo układ równań różniczkowych modelu dla aktualnych wartości identyfikowanych parametrów.

Wobec tego, w pierwszym podejściu, do obliczeń optymalizacyjnych zastosowano metodę Nelder – Meada (funkcja *fminsearch* w Optimization Toolbox Matlab [2]). Jest to bezgradientowa metoda minimalizacji bez ograniczeń. Nie nakłada żadnych założeń co do różniczkowalności funkcji kryterialnej. Dobrze nadaje się do zadań z silną nieliniowością, a nawet nieciągłością funkcji kryterialnej.

Dodatkowo, dla sprawdzenia efektywności obliczeń, przetestowano także dwie inne procedury dostępne w Optimization Toolbox systemu Matlab [2].

Pierwsza z nich o nazwie *fmincon*, to procedura minimalizacji nieliniowej funkcji wielu zmiennych z nieliniowymi ograniczeniami. W trakcie obliczeń korzysta ona z hejsjanu obliczanego przez procedurę dostarczoną przez użytkownika lub oblicza jego aproksymację. Wymaga, by funkcja kryterialna i jej pochodna były ciągłe.

Druga, o nazwie *lsqnonlin*, rozwiązuje zadanie minimalizacji funkcji kryterialnej postaci:

$$\min_x f(x) = \frac{1}{2} (f_1^2(x) + f_2^2(x) + \dots + f_m^2(x)) = \frac{1}{2} \|F(x)\|_2^2, \quad (5)$$

Zastosowany algorytm jest połączeniem metody quasi-newtonowskiej i tzw. metody liniowej (*line search*). Wybrano tę procedurę, gdyż postać funkcji kryterialnej (4) jest zgodna z postacią funkcji (5). Przetestowano ją w dwóch wersjach. Dla tzw. algorytmu 'LargeScale' oraz 'MediumScale'. Algorytmy pierwszego rodzaju przeznaczone są do rozwiązywania wielowymiarowych zadań o złożonej strukturze. Wykorzystują one specjalne techniki optymalizacji takie jak metody obszaru zaufania (trust region methods), gradientu sprzężonego, metody rzutowania dla ograniczeń równościowych.

Badanie przydatności wybranych metod optymalizacji do zadania identyfikacji przeprowadzono za pomocą eksperymentów numerycznych. Testową identyfikację przeprowadzono na podstawie danych otrzymanych w oparciu o symulacje komputerowe, a nie na podstawie danych zebranych podczas eksperymentu identyfikacyjnego. W tym celu najpierw ustalono wartości wzorcowe parametrów modelu podlegających identyfikacji, a następnie przeprowadzono dla nich obliczenia symulacyjne za pomocą modelu (3). Ich wyniki były wielkościami wzorcowymi, odpowiadającymi wynikom pomiarów w rzeczywistym procesie identyfikacji.

Wykorzystanie tego samego modelu jako modelu wzorcowego oraz jako modelu zidentyfikowanego ma dwie podstawowe zalety. Przede wszystkim znane były optymalne wartości identyfikowanych parametrów. Poza tym uniknięto problemów związanych z niedokładnościami pomiarów i uproszczeniami modelu. Dzięki zastosowanemu podejściu możliwa jest minimalizacja błędu identyfikacji do zera, co pozwala na porównanie i dokładną ocenę efektywności proponowanych metod optymalizacji a także na ocenę różnych wariantów funkcji celu.

Zmierzony podczas eksperymentu identyfikacyjnego kąt skrętu przedniego koła agregatu przyjęto jako dane sterujące przebiegiem symulacji. W ten sposób starano się uzyskać podczas przeprowadzanego eksperymentu numerycznego warunki zbliżone do rzeczywistych obliczeń identyfikacyjnych. W celu lepszego sprawdzenia skuteczności pracy badanych algorytmów obliczenia przeprowadzono dla różnych punktów startowych.

W wyniku przeprowadzonego eksperymentu stwierdzono, że najgorzej zachowuje się algorytm *fmincon*. Dla niektórych punktów startowych optymalizacja zatrzymywała się na pierwszej iteracji, dla innych procedura nie mogła zakończyć pracy (nie występowała zbieżność) nawet po bardzo długim czasie obliczeń i ustaleniu się końcowego punktu optymalizacji. Gdy wymuszano zakończenie procesu, np. przez określenie maksymalnej liczby iteracji, okazywało się, że wartości estymowanych parametrów ulegały tylko niewielkim zmianom. Lepiej spisały się funkcje *fminsearch* i *lsqnonlin* w wersji LargeScale. Obie uzyskiwały dobre przybliżenie zidentyfikowanych parametrów i charakterystyk wykorzystywanych do identyfikacji. W tab. 1 pokazano wyniki identyfikacji przeprowadzonej za pomocą procedury *fminsearch* (metody Neldera Meada), a w tab. 2 dla procedury *lsqnonlin*.

Dokładniejsza analiza i porównanie wyników dla obu analizowanych procedur wykazało, że wprawdzie procedu-

ra *lsqnonlin* działa szybciej, ale daje ona dobre wyniki tylko dla startowych wartości parametrów niezbyt oddalonych od wartości przyjętych jako optymalne.

Tab. 1. Przykładowe wyniki testu identyfikacyjnego dla procedury *fminsearch* (algorytm Neldera Meada)
Table 1. Sampled results of identification test for *fminsearch* procedure (Nelder Mead algorithm)

Parametr	Wartość wzorcowa	Wartość startowa	Wynik identyfikacji
I_{zz}	4000	4500	4118
$K_{\beta 1}$	55000	100000	55599
$K_{\beta 2}$	438312	428312	439909
$K_{\beta k}$	9000	14000	9344
κ	5	5.5	5.1
k_s	99500	69650	102630
c_{z1}	174000	208800	173313
c_{z2}	242000	217800	243241
a_1	200	250	204
a_2	200	250	207

Tab. 2. Przykładowe wyniki testu identyfikacyjnego dla procedury *lsqnonlin*
Table 2. Sampled results of identification test for *lsqnonlin* procedure

Parametr	Wartość wzorcowa	Wartość startowa	Wynik identyfikacji
I_{zz}	4000	4500	3999
$K_{\beta 1}$	55000	53350	54350
$K_{\beta 2}$	438312	435212	438212
$K_{\beta k}$	90000	91500	90199
κ	5	5.5	5.01
k_s	99500	89550	96550
c_{z1}	174000	175740	173541
c_{z2}	242000	239580	23958
a_1	200	210	211
a_2	200	197	197

Podsumowując, stwierdzono, że ponieważ nie wiemy, jak bardzo punkt startowy identyfikacji parametrów modelu agregatu ciągnik – sadzarka do ziemniaków różni się od ich poszukiwanych wartości rzeczywistych, proces identyfikacji należy oprzeć przede wszystkim na procedurze *fminsearch* realizującej algorytm Neldera Meada. Procedura *lsqnonlin* może zostać wykorzystana do celów kontrolnych, szczególnie po wstępnym zlokalizowaniu wartości zidentyfikowanych parametrów.

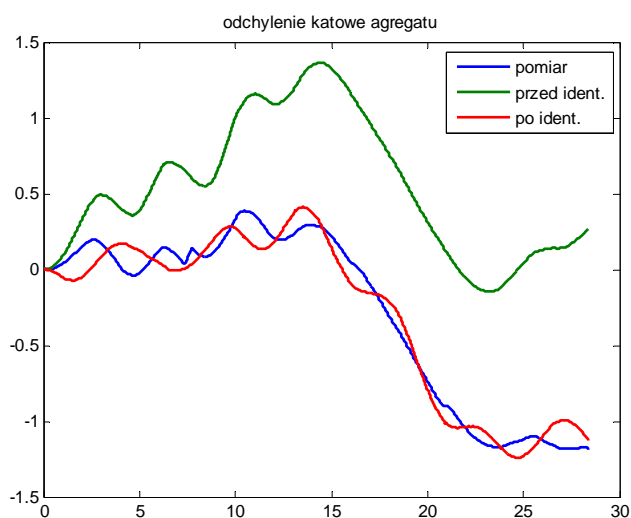
5. Obliczenie parametrów modelu agregatu ciągnik – sadzarka do ziemniaków

Po przeprowadzeniu, opisanych w rozdz. 4, testów numerycznych przystąpiono do właściwej identyfikacji wartości parametrów modelu agregatu ciągnik – sadzarka do ziemniaków

Ocenę wyników estymacji przeprowadzono, zgodnie z postacią przyjętej funkcji kryterialnej, na podstawie porównania zmian zmiennych modelu takich jak prędkość przemieszczenia poprzecznego lub kąt skrętu agregatu, a przede wszystkim porównania trajektorii ruchu agregatu uzyskanych na podstawie eksperymentu identyfikacyjnego (pomiarów) oraz na podstawie obliczeń symulacyjnych.

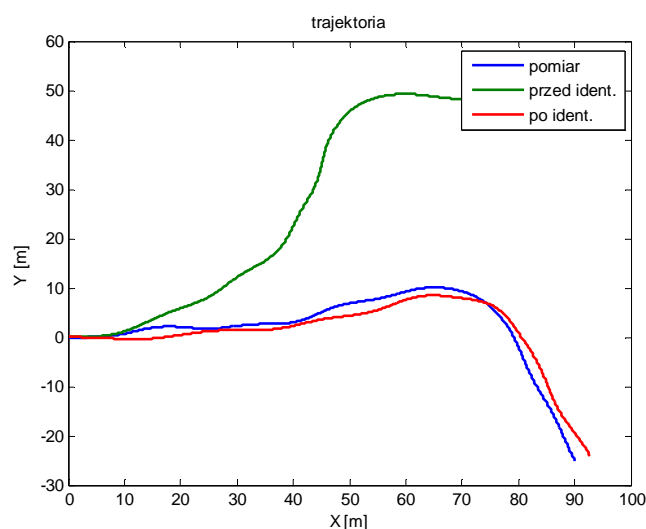
Na rys. 3-5 przedstawiono przykładowe wyniki procesu identyfikacji. Na każdym rysunku przedstawiono trzy krzywe reprezentujące: wartości uzyskane dzięki badaniom identyfikacyjnym, wyniki obliczeń symulacyjnych przed przeprowadzeniem identyfikacji (dla spodziewanych, sza-

cowanych wartości identyfikowanych parametrów) oraz wyniki obliczeń symulacyjnych dla wartości parametrów uzyskanych w wyniku identyfikacji.



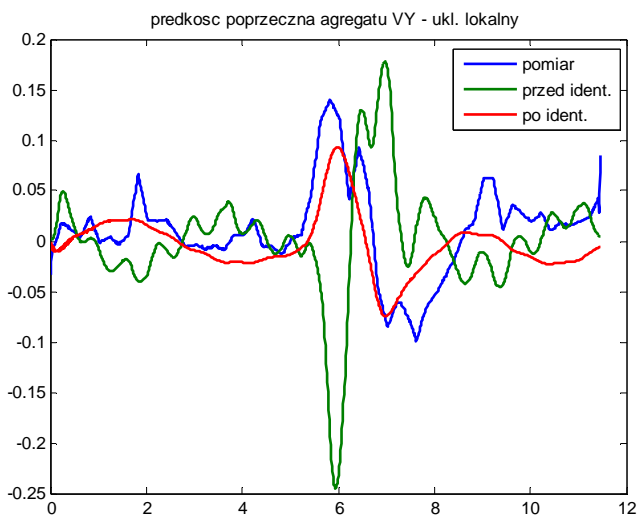
Rys. 3. Wykresy odchylenia katowego środka ciężkości agregatu uzyskane za pomocą pomiarów oraz za pomocą obliczeń symulacyjnych

Fig. 3. Charts of combination centre of gravity rotation angle obtained from measurement and from simulation



Rys. 4. Trajektorie agregatu uzyskane za pomocą pomiarów oraz za pomocą obliczeń symulacyjnych

Fig. 4. Charts of combination trajectory obtained from measurement and from simulation



Rys. 5 Prędkość poprzeczna środka ciężkości agregatu uzyskana za pomocą pomiarów oraz za pomocą obliczeń symulacyjnych

Fig. 5. Lateral velocity of combination centre of gravity obtained from measurement and from simulation

6. Uwagi końcowe

Długofalowym celem prac, których początek został tutaj przedstawiany, jest dostarczenie konstruktorom maszyn rolniczych modeli umożliwiających symulację ruchu maszyn po różnorodnym podłożu (pole, droga gruntowa) już na stosunkowo wczesnym etapie projektowania, przed budową prototypu. Pozwoli to uwzględnić wpływ cech konstrukcyjnych na sposób poruszania się maszyny rolniczej i zmniejszyć niebezpieczeństwo wystąpienia takich zachowań jak niespodziewana utrata stateczności ruchu lub wrócenie.

7. Literatura

- [1] Chaczurow A. A. (red.), 1976: *Dinamika sistemi doroga-szina-abtomobil-woditiel*. Maszynostrojenie. Moskwa.
- [2] Coleman T., Branch M. A., Grace A., 1999: *Optimization Toolbox For Use with Matlab. User Guide version 2*, The Math Works Inc..
- [3] Feng, L., He, Y., 2005: *Study on Dynamic Model of Tractor System for Automated Navigation Applications*, Journal of Zhejiang University of Science, 6A(4), 270–275.
- [4] Findeisen W., Szymanowski J., Wierzbicki A., 1980: *Teoria i metody obliczeniowe optymalizacji*, PWN, Warszawa.
- [5] Karnopp D., 2004: *Vehicle Stability*, Marcel Dekker, Inc, New York.
- [6] Polska Norma PN-87/S-47350: *Pojazdy samochodowe. Metoda badań w ustalonych stanach ruchu na torze kołowym*.
- [7] TurboLab Dynamics Data Acquisition Software. Preliminary User Manual, CORRSYS-DATRON Sensorsysteme GmbH, Wetzlar, Germany, 2003.