
KOMITET TECHNIKI ROLNICZEJ PAN
POLSKIE TOWARZYSTWO INŻYNIERII ROLNICZEJ

INŻYNIERIA ROLNICZA

Rok **XII**

8(106)

Kraków 2008

RADA PROGRAMOWA

czł. rzecz. PAN prof. dr hab. inż. Janusz Haman – przewodniczący
czł. rzecz. PAN prof. dr hab. inż. Rudolf Michałek – wiceprzewodniczący
prof. dr hab. inż. Małgorzata Bzowska-Bakalarz
prof. dr hab. inż. Stanisław Pabis
prof. dr hab. inż. Tadeusz Rawa
prof. dr hab. inż. Józef Szlachta
prof. dr hab. inż. Zdzisław Wójcicki
prof. dr hab. inż. Jan Dawidowski
prof. dr hab. inż. Jerzy Weres

CZŁONKOWIE ZAGRANICZNI

prof. Gerard Wiliam Isaacs (USA) – czł. zagr. PAN
prof. Stefan Cenkowski (Kanada)
prof. Jürgen Hahn (Niemcy)
prof. Radomir Adamovsky (Rep. Czeska)
prof. Oleg Sidorczuk (Ukraina)

KOMITET REDAKCYJNY

czł. rzecz. PAN prof. dr hab. inż. Rudolf Michałek – redaktor naczelny
czł. rzecz. PAN prof. dr hab. inż. Janusz Haman
prof. dr hab. inż. Janusz Laskowski
dr inż. Maciej Kuboń – sekretarz

RECENZENCI

Prof. dr hab. inż. Bogusław Cieślowski – UR Kraków
Prof. dr inż. Zdzisław Kośmicki – PIMR Poznań

Wydawca

Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej

Praca wykonana

w Przemysłowym Instytucie Maszyn Rolniczych w Poznaniu

Druk i oprawa:

S.C. DRUKROL (Kraków, al. 29 Listopada 46) tel. (012) 412 46 50
Nakład: 150 egzemplarzy

Rozprawy habilitacyjne

Nr 28

Jan Szczepaniak

**SYMULACJA ZACHOWAŃ DYNAMICZNYCH
MASZYN ROLNICZYCH Z UWZGLĘDNIENIEM
KRYTERIUM STATECZNOŚCI
DLA POTRZEB BEZPIECZEŃSTWA RUCHU**

(rozprawa habilitacyjna)

Spis treści

WYKAZ SYMBOLI I OZNACZEŃ.....	7
1. WSTĘP.....	9
2. STABILNOŚĆ RUCHU – PODSTAWOWE POJĘCIA.....	13
3. POJĘCIE STABILNOŚCI RUCHU POJAZDU I KIEROWALNOŚCI POJAZDU	15
3.1. Stateczność kierunkowa.....	17
3.2. Stateczność w ruchu po drodze o znacznym nachyleniu.....	17
4. DYNAMIKA POPRZECZNA POJAZDÓW KOŁOWYCH – RUCH POJAZDÓW PO ŁUKU	21
4.1. Jazda po łuku z małą prędkością.....	21
4.2. Jazda po łuku z działaniem sił bocznych	22
4.3. Równania opisujące ruch pojazdu po łuku w warunkach ustalonych	23
5. ANALIZA PROBLEMATYKI STABILNOŚCI POJAZDÓW KOŁOWYCH W BADANIACH.....	31
5.1. Historia badań stabilności ruchu pojazdów kołowych.....	31
5.2. Analiza problematyki stabilności pojazdów kołowych.....	34
6. MATEMATYCZNA ANALIZA STABILNOŚCI POJAZDÓW	39
6.1. Analiza stabilności prostego pojazdu w inercjalnym i ruchomym układzie współrzędnych	39
6.1.1. Inercjalny układ współrzędnych	39
6.1.2. Ruchomy układ współrzędnych związany z pojazdem.....	44
6.2. Obliczenia wartości własnych.....	46
6.2.1. Ogólna postać rozwiązania równań ruchu i jej wykorzystanie w analizie stabilności	46
6.2.2. Wykorzystanie teorii Lapunowa do badania stabilności	48
7. MODELOWANIE RUCHU POJAZDU	51
7.1.1. Wybór metody zapisu równań ruchu.....	52
7.1.2. Ogólne założenia i układy współrzędnych	53
7.1.3. Kinematyczne charakterystyki bezwzględnego ruchu kół.....	54
7.1.4. Budowa modelu strukturalnego.....	58
7.2. Liniowe równania ruchu pojazdu.....	64
8. BUDOWA MODELU I JEGO IMPLEMENTACJA W SYSTEMIE MATLAB ...	69
8.1. Opis agregatu ciągnik – sadzarka do ziemniaków	69
8.2. Zastosowany model symulacyjny.....	70

9. BADANIE WŁASNOŚCI OPON	79
9.1. Problematyka modelowania kontaktu pojazd-podłoże.....	79
9.1.1. Modelowanie styku koła z gruntem	79
9.1.2. Modele koła	80
9.1.3. Model terenu.....	81
9.2. Wyznaczenie współczynników sztywności opon.....	81
9.2.1. Przedmiot badań	81
9.2.2. Przygotowanie do badań.....	81
9.2.3. Urządzenie do pomiaru statycznej sztywności opon.....	81
9.2.4. Pomiary.....	83
9.2.5. Wyniki pomiarów	85
10. BADANIA TRAKCYJNE AGREGATU CIĄGNIK-SADZARKA DO ZIEM- NIAKÓW	89
11. IDENTYFIKACJA MODELU AGREGATU CIĄGNIK – SADZARKA DO ZIEMNIAKÓW.....	95
11.1. Wprowadzenie do metod identyfikacji.....	95
11.1.1. Identyfikacja nieparametryczna	96
11.1.2. Identyfikacja parametryczna	97
11.2. Metody bezpośrednie oraz ewolucyjne identyfikacji.....	99
11.3. Dobór metody identyfikacji dla stosowanych modeli - studium metod.....	101
11.4. Przeprowadzenie prób identyfikacji parametrycznej dla wybranych rodzajów badań testowych.....	102
12. IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW MODELU AGREGATU CIĄGNIK – SADZARKA DO ZIEMNIAKÓW.....	111
13. SYMULACJA PROGNOSTYCZNA.....	115
14. WNIOSKI.....	121
BIBLIOGRAFIA	123
BIBLIOGRAFIA UZUPEŁNIAJĄCA.....	125
SUMMARY	129

WYKAZ SYMBOLI I OZNACZEŃ

a	– odległość przedniej osi pojazdu (ciągnika) od środka ciężkości agregatu [m],
a_1, a_2	– współczynniki krzywizny deformacji opon przedniej i tylnej osi ciągnika [m^{-2}],
a_d	– przyspieszenie odśrodkowe pojazdu podczas jazdy po łuku [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$],
a_s	– odległość osi obrotu zespołu koła samoskrętnego od jego środka ciężkości [m],
a_x	– wzdłużne przyspieszenie środka ciężkości pojazdu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$],
a_y	– poprzeczne przyspieszenie środka ciężkości pojazdu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$],
b	– odległość tylnej osi pojazdu (ciągnika) od środka ciężkości agregatu [m],
b_k	– rozstaw kół pojazdu [m],
b_s	– odległość punktu styku opony koła samoskrętnego z powierzchnią drogi od jego środka ciężkości [m],
C_a	– współczynnik oporu znoszenia koła [$\text{N}\cdot\text{rad}^{-1}$],
CC_a	– jednostkowy współczynnik oporu znoszenia koła [rad^{-1}],
$c_{\xi 1}, c_{\xi 2}$	– sztywności poprzeczne opon przedniej i tylnej osi ciągnika [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$],
d_k	– połowa odległości między kołami pojazdu [m],
F_y	– siła poprzeczna powodująca znoszenie koła [N],
F_z	– obciążenie normalne koła [N],
G_n	– ciężar nadwozia pojazdu [N],
h_s	– wysokość położenia środka ciężkości pojazdu [m],
I_z	– moment bezwładności względem osi pionowej przechodzącej przez środek ciężkości pojazdu (agregatu) [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$],
$I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}, I_{xz}$	– momenty bezwładności w układzie o początku w środku ciężkości pojazdu (agregatu) [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$],
K	– gradient podsterowności [stopień $\cdot\text{g}^{-1}$],
$K_{\delta 1}, K_{\delta 2}, K_{\delta s}$	– współczynniki odporności na kątowe znoszenie kół przedniej i tylnej osi oraz osi sadzarki [$\text{N}\cdot\text{rad}^{-1}$],
k_1, k_2	– sztywność sprężyn zawieszenia [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$],
k_s	– współczynnik sztywności kontaktu zestawu koła samoskrętnego z podłożem [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$],
k_{stab}	– sztywność stabilizatora przechyłów poprzecznych [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$],
L	– odległość między osiami pojazdu [m],
M, m	– masa pojazdu (agregatu) [kg],
m	– masa układu kół samoskrętnych [kg],
q_j	– współrzędne uogólnione,
Q^A	– uogólniona siła reakcji drogi i aktywnych sił zewnętrznych,
Q^B	– uogólniona siła bezwładności nadwozia,
Q^Z	– uogólniona siła zachowawcza i dyssypatywnych sił zawieszenia,
r	– prędkość odchyłania pojazdu [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$],
r_i	– średni promień kół i -tej osi [m],
R	– promień toru ruchu środka ciężkości pojazdu [m],

R_{dys}	– funkcja dyssypacji,
T_x	– siły wzdłużne działające na koła pojazdu [N],
U	– prędkość wzdłużna środka ciężkości pojazdu (agregatu) [$m \cdot s^{-1}$],
V	– prędkość poprzeczna środka ciężkości pojazdu (agregatu) [$m \cdot s^{-1}$],
V_S	– średnia prędkość pojazdu [$m \cdot s^{-1}$],
v_x	– prędkość wzdłużna agregatu [$m \cdot s^{-1}$],
x	– przemieszczenie wzdłużne środka ciężkości pojazdu (agregatu) [m],
y	– przemieszczenie poprzeczne środka ciężkości pojazdu (agregatu) [m],
Z_i	– ciężar przypadający na przednią ($i=1$) lub tylną ($i=2$) oś pojazdu [N],
$\alpha, \alpha_f, \alpha_r$	– kąt znoszenia koła, kąt znoszenia przedniego koła, kąt znoszenia tylnego koła [rad],
α_{max}	– maksymalny kąt dopuszczalny podczas jazdy pojazdu po wzniesieniu [rad],
α_{Dmax}	– maksymalny kąt dopuszczalnego przechylenia poprzecznego pojazdu podczas jazdy w poprzek wzniesienia [rad],
α_y	– przyspieszenie poprzeczne pojazdu [$m \cdot s^{-2}$],
β	– kąt bocznego znoszenia pojazdu [rad],
γ_1, γ_2	– kąty znoszenia odpowiednio przednich i tylnych kół ciągnika [rad],
δ	– kąt skrętu koła kierowanego [rad],
$\delta_{zew}, \delta_{wew}$	– kąty skrętu kół kierowanych (zewnątrznego i wewnętrznego) wynikające z geometrii Ackermana [rad],
δ_k	– względna prędkość poprzecznego poślizgu kół [$m \cdot s^{-1}$],
δ_s	– względna prędkość wzdłużnego poślizgu kół [$m \cdot s^{-1}$],
ζ_{ij}	– przemieszczenia kół pojazdu związane z niezależnymi współrzędnymi uogólnionymi,
Θ	– średni kąt skrętu koła kierowanego [rad],
θ_k	– kąt skrętu kół samoskrętnych [rad],
φ	– kąt bocznego przechyłu pojazdu [rad],
φ_N	– kąt pochylenia geometrycznych osi kół do płaszczyzny drogi [rad],
Ψ	– kąt odchylenia środka ciężkości pojazdu (agregatu) [rad],
ζ_1, ζ_2	– boczne przemieszczenia odpowiednio przednich i tylnych kół ciągnika [m].

STRESZCZENIE

Z danych statystycznych wynika, że przejazdy maszyn rolniczych na miejsce pracy oraz ich przemieszczanie się podczas pracy są źródłem wielu poważnych wypadków. Blisko co trzeci wypadek śmiertelny w rolnictwie następuje w wyniku przejechania, uderzenia, pochwycenia przez środki transportowe i przemieszczające się maszyny. Najgroźniejsze w skutkach okazują się wypadki podczas prac transportowych oraz związanych z manewrowaniem ciągnikami i maszynami (prawie 30% wszystkich wypadków śmiertelnych). Niebezpieczeństwo zwiększane jest jeszcze przez rosnące prędkości robocze maszyn rolniczych i ciągników. Można przypuszczać, że przynajmniej część z tych wypadków została spowodowana pośrednio cechami konstrukcyjnymi maszyn rolniczych niekorzystnie wpływającymi na ich własności trakcyjne, w szczególności na stabilność ruchu pojazdu. Wprawdzie prace dotyczące komputerowej symulacji kierowności i stateczności samochodów prowadzone są już od dawna, ale wyniki te rzadko były przenoszone na maszyny rolnicze. Wymaga to bowiem z jednej strony uwzględnienia specyfiki budowy maszyn rolniczych i ich połączenia z ciągnikiem a z drugiej analizy zachowania maszyny na różnorodnym podłożu (drogi polne, pola) o złożonych i zmiennych właściwościach. Praca dotyczy zagadnień związanych z modelowaniem ruchu pojazdów rolniczych, szczególnie agregatów ciągnik - maszyna rolnicza. Jej celem jest wskazanie na możliwości przeprowadzania takich symulacji już na wczesnych etapach projektowania, gdy nie znamy jeszcze wielu szczegółów konstrukcyjnych. Wobec tego zaproponowano stosunkowo prosty model dwuwymiarowy, będący rozwinięciem, często spotykanych w literaturze, tzw. modeli rowerowych (bicycle model). Oprócz podstawowych wielkości geometrycznych wymaga on tylko parametrów opisujących zachowanie opon. W początkowej części pracy przedstawiono ogólne koncepcje stabilności statycznej i dynamicznej oraz omówiono szczegóły dotyczące stabilności pojazdów w różnych stadiach ruchu (podczas hamowania, jazdy po łuku) i jej utraty. Następnie podano podstawowe zasady, pojęcia i metody matematycznej analizy stabilności w odniesieniu do typowych form modeli matematycznych opisujących pojazdy (korzystając przede wszystkim z teorii Lapunowa).

Przedstawiono podstawowe modele spotykane w literaturze oraz wielkości fizyczne zalecane do analizy ruchu pojazdu. Zaprezentowano ogólną metodę wyprowadzania równań ruchu dla modelu strukturalnego pojazdu, ze szczególnym uwzględnieniem kinematycznych charakterystyk ruchu kół. Na podstawie uzyskanych wyników oraz przyjętych założeń upraszczających wyprowadzono układ równań różniczkowych opisujących model strukturalny agregatu ciągnik - sadzarka do ziemniaków o 7 stopniach swobody. Istotną częścią pracy jest opis badań niezbędnych do przeprowadzenia identyfikacji. Do badań wykorzystano specjalnie opracowany zestaw nowoczesnej aparatury zawierający m.in. urządzenie do pomiaru położenia koła kierowanego, bezstykowe czujniki do pomiaru prędkości. Mierzono także pełne obciążenia (momenty i siły) działające na koła ciągnika oraz ich prędkość kątową. Opisano kryteria identyfikacji oraz stosowane metody. Przedstawiono przykłady symulacji prognostycznych uzyskanych za pomocą proponowanego modelu. Długofalowym celem przedstawionych prac, jest dostarczenie konstruktorom maszyn rolniczych narzędzi (odpowiednich modeli) umożliwiających symulację ruchu 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, ze szczególnym uwzględnieniem stateczności ruchu. Opracowana metoda jest przydatna również do oceny stateczności i sterowności różnorodnych zestawów ciągnik - maszyna rolnicza w różnych warunkach eksploatacji (np. różne warunki przyczepności z uwagi na zmienność zwięzłości podłoża i pochylenia drogi).

Słowa kluczowe: maszyny rolnicze, stateczność, modelowanie, symulacja komputerowa, identyfikacja

SIMULATION OF AGRICULTURE MACHINE DYNAMIC BEHAVIOR INCLUDING STABILITY CRITERION FOR MOTION SAFETY NEEDS

Abstract. It is evident from statistical data that many serious accidents take place during the transfer of agricultural machines to the working site and during their movement while working. Nearly every third fatal accident in agriculture is caused by driving over, hitting or catching by vehicles and moving machines. The most serious effects occur in accidents during transport and those related to manoeuvring with tractors and machines (nearly 30% of all fatal accidents). The danger is additionally increased by the growing working speeds of agricultural machines and tractors. One may assume that at least some of these accidents are caused indirectly by the design features of agricultural machines which unfavourably influence their traction properties, especially vehicle stability. Research concerned vehicles steerability and stability simulation were conducted for a long time. However the results were rarely transferred into the agricultural machine field. It demands taking into consideration specificity of agricultural machine construction and its combination with tractor on the one hand. On the other hand it demands analysis of machine behavior on diverse grounds (field ways, fields) possesses complex and changeable properties. The paper concerns problems connected with agricultural vehicle modeling, particularly tractoragricultural machine combination. The goal of the study is to show possibility of such modeling already on the relatively early stage of designing, when many construction details are unknown. In that case comparatively simple model 2D was proposed. It is a model based on the so called bicycle models (two-wheeled) that are often referred to in the literature. Side from basic geometrical quantities it requires only knowledge of parameters describing tires behavior. The general conceptions of static and dynamic stability and details concerned vehicle stability during various stages of motion (braking, cornering) were presented in the first part of the study. The basic principles, conceptions and mathematical methods of stability analysis were shown with reference to standard mathematical model of vehicle (the Lapunov theory was mainly applied). The basic models met in literature and physical quantity used in vehicle motion analysis were presented. The general method of vehicle motion equations derivation for structural model was shown. On the basis of obtained results and simplifying assumptions the system of differential equations describing 7 dof structural model of tractor - potato planter was derived. Description of tests necessary to model identification is important part of the paper. The modern, specially worked out apparatus kit was using during tests. It contains among other things sensor for simultaneous measurement of wheel position and orientation and microwave sensors for speed and distance measurement. All loads (forces and moments) acting on tractor wheels and its angle velocity were measured too. The identification criterion and applied methods were described. Long-term goal of presented work is providing agricultural machine constructors with tools (adequate models) making possible machine traffic on the diverse ground simulation on the relatively early stage of designing, before prototype construction. It will allow taking into consideration construction properties influence on agricultural machine way of motion, particularly on motion stability. The elaborated method is useful to evaluation of stability and steerability of various sets tractor - agricultural machine in diverse operation conditions (for example diverse conditions of adhesion owing to compaction of soil changeability and road grade)

Key words: agricultural machines, stability, modelling, computer simulation, identification