

ANALIZA STATECZNOŚCI AGREGATU MASZYNOWEGO NA TLE MODELOWANIA JEGO DYNAMIKI

STABILITY ANALYSIS OF A MACHINE UNIT AGAINST THE BACKGROUND OF MODELING ITS DYNAMICS

Do negatywnych zjawisk zachodzących podczas pracy agregatów maszynowych zaliczyć można utratę stateczności, w czasie której dochodzi do ciężkich uszkodzeń ciała, a nawet śmierci ludzi. Aby temu przeciwdziałać, w pracy przedstawiono podstawowe metody badań stateczności pojazdów kołowych, a w tym agregatów maszynowych. Opisano model agregatu maszynowego do badań stateczności, który zweryfikowano w warunkach eksploatacyjnych. Przedstawiono i omówiono wyniki badań symulacyjnych stateczności.

Słowa kluczowe: stateczność, agregat maszynowy, bezpieczeństwo, modelowanie

Negative phenomena occurring during operation of machine units include loss of stability during which severe bodily damage or even death can occur. The paper presents the basic methods of wheeled vehicles stability testing, including machine units to prevent that. A model of machine unit for stability testing was described. That model was verified under operational conditions. Stability simulation tests are presented and discusses.

Keywords: stability, machine unit, safety, modeling

1. Wstęp

Do najważniejszych cech użytkowych agregatów maszynowych zaliczyć można bezpieczeństwo pracy, które powinno być traktowane priorytetowo. Szczególnie duże zagrożenie życia i zdrowia ludzkiego występuje podczas utraty stateczności. Aby przeciwdziałać tego typu negatywnym zjawiskom niezbędna jest właściwa identyfikacja ich przyczyn i rodzajów. Opisane w literaturze metody badań stateczności agregatów maszynowych stosowanych w rolnictwie podzielić można na:

- eksperymentalne [1, 6, 9];
- teoretyczne:
 - w ujęciu quasistatycznym [2, 3, 4, 8];
 - z wykorzystaniem modeli dynamiki [5, 11].

Metody eksperymentalne, ze względu na ryzyko wypadku i duże koszty realizacji, są coraz częściej wypierane przez metody teoretyczne, spośród których najwyższą dokładność zapewniają analizy z wykorzystaniem modeli dynamiki. Opisane w literaturze modele dynamiki [5, 11], ze względu na przyjęte uproszczenia (koła sztywne w kierunku wzdłużnym i osiowym, podłoże nieodkształcalne) uniemożliwiają dokładne badania zachowań agregatów maszynowych, w warunkach polowych. Z tego powodu badania stateczności agregatów maszynowych powinny być realizowane z wykorzystaniem coraz dokładniejszych modeli dynamiki.

2. Model dynamiki agregatu maszynowego do badań stateczności

Model dynamiki agregatu maszynowego do badań stateczności wykonano w oparciu o agregat założony z ciągnika MF235 i sadzarki do ziemniaków S208 zawieszanej na trzypunktowym układzie zawieszenia.

By opracować zastępczy układ mechaniczny (model), przyjęto założenia ograniczające:

1. Introduction

Operational safety that should be treated as the priority, is one of the most important characteristics of machine units. A particularly high threat to human life and health occurs in case of loss of stability. Appropriate identification of their causes and types is necessary to prevent that type of negative phenomena. The machine unit's stability testing methods for machine units used in agriculture described in literature can be divided into:

- experimental [1, 6, 9];
- theoretical:
 - quasi-statistical [2, 3, 4, 8];
 - using the dynamics models [5, 11].

Experimental methods, as a consequence of the risk of accident and high implementation costs, are increasingly frequently substituted by theoretical methods among which analysis using dynamics models assures the highest accuracy of results. The dynamics models described in literature [5, 11], as a consequence of assumed simplifications (wheels longitudinally and axially fast mounted, non-deformable base) make accurate studies on behavior of machine units under field conditions impossible. As a consequence machine units stability tests should be carried out using increasingly accurate dynamics models.

2. Machine unit dynamics model for stability testing

The machine unit dynamics model for stability testing was constructed on the basis of a unit assembled using parts of a MF235 tractor and potato planter S208 suspended on three-point suspension system.

The following limiting assumptions were accepted in preparation of the substitute mechanical unit (model):

- agregat maszynowy jest układem wielomasowym jednolitych członów sztywnych skrzepowanych więzami: holonomicznymi, reonomicznymi, idealnymi, jedno- i dwustronnymi;
- masy członów zredukowano do ich środków ciężkości;
- siły ciężkości, odśrodkowe, bezwładności zredukowano do środków ciężkości członów;
- siły oporu powietrza pominięto, ze względu na małe prędkości jazdy;
- podatność wynikająca z luzów w przegubach została pominięta;
- wibracje pochodzące od funkcjonującego silnika zostały pominięte;
- względne ruchy kierowcy i elementów układu przeniesienia napędu są pomijane (elementy te wchodzi w skład bryły sztywnej agregatu maszynowego);
- podłoże jest jednorodne;
- koła agregatu maszynowego i podłoże posiadają niezależne anizotropowe właściwości mechaniczne.

Agregat maszynowy zamodelowano jako układ wielomasowy złożony z 8 brył sztywnych: kadłuba, osi przedniej, narzędzia zawieszono na trzypunktowy układ zawieszenia, czterech kół jezdnych i kierowcy. Przedstawiony model posiada 16 stopni swobody. Jako bryłę nadrzędną przyjęto kadłub ciągnika, który posiada 6 stopni swobody. Położenie pozostałych brył określono względem kadłuba ciągnika.

W modelu uwzględniono podatność promieniową, osiową i wzdłużną kół jezdnych (model Kelvina), a także podatność podłoża w kierunku pionowym (model Kelvina) oraz wzdłużnym i poprzecznym (model Saint-Venanta).

Model fizyczny agregatu maszynowego przedstawiono na rysunku 1.

Równania ruchu wyprowadzono w oparciu o równanie Lagrange'a drugiego rodzaju w wyjściowej postaci [7]:

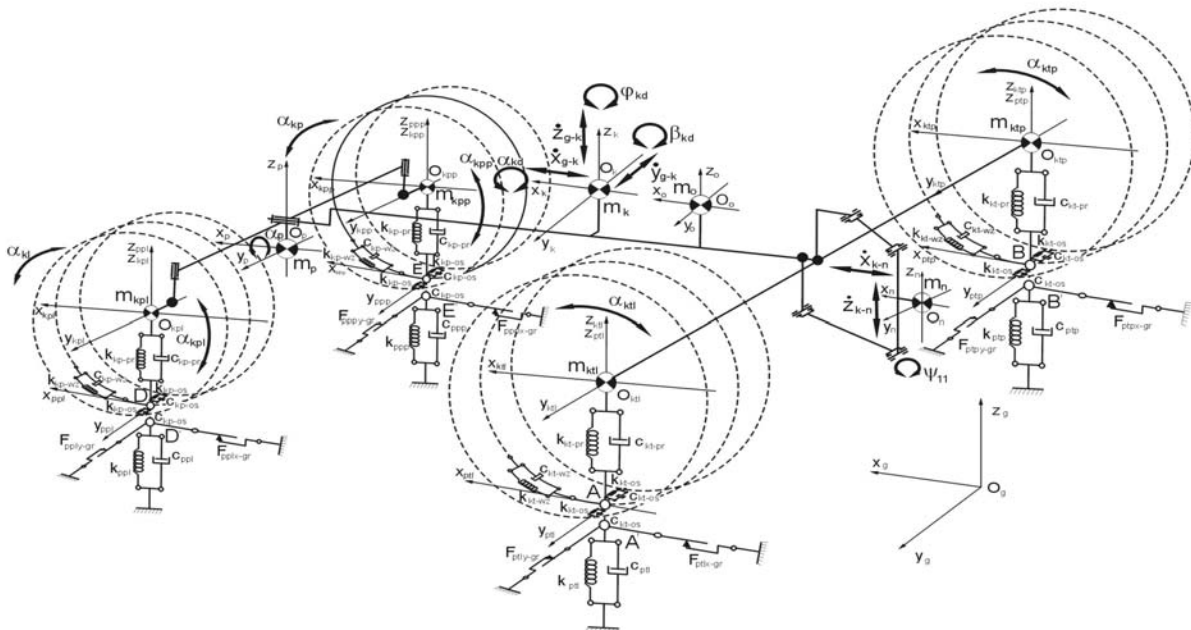
- the machine unit is a multi-mass system of uniform rigid segments that are constrained by holonomic, reonomic, ideal, one- and double sided constraints;
- the masses of segments were reduced to their centers of gravity;
- the gravity, centrifugal and inertial forces were reduced to segments' centers of gravity;
- the air resistance forces were dismissed because of low driving speeds;
- the susceptibility resulting from play in joints was dismissed;
- the vibrations originating from working engine were dismissed;
- the relative movements of the steering wheel and drive transmission system elements are dismissed (those elements are included in the rigid body of the machine unit);
- the base is homogenous;
- the wheels of the machine unit and the base possess independent anisotropic mechanical properties.

The machine unit was modeled as a multi-mass system consisting of 8 rigid modules: the body, front axle, tool suspended from the three-point suspension system, four driving wheels and the steering wheel. The presented model possesses 16 degrees of freedom. The body of the tractor that possesses 6 degrees of freedom was assumed to be the supreme module. The position of other modules was determined in relation to the tractor body.

The model took into account the radial flexibility, axial flexibility and longitudinal flexibility of driving wheels (Kelvin model), as well as vertical flexibility of the base (Kelvin model) and longitudinal and transverse flexibility of the base (Saint-Venant model).

The physical model of the machine unit is presented in figure 1.

The equation of motion was formulated on the basis of the second type Lagrange equation in its initial form [7]:



Rys. 1. Model fizyczny agregatu maszynowego
Fig. 1. Physical model of the machine unit

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial q_i} + \frac{\partial E_p}{\partial q_i} = Q_{qi}, \quad i = 1, 2, \dots, s \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial q_i} + \frac{\partial E_p}{\partial q_i} = Q_{qi}, \quad i = 1, 2, \dots, s \quad (1)$$

gdzie: E_k – energia kinetyczna układu, E_p – energia potencjalna układu, q_i – i -ta współrzędna uogólniona, Q_{qi} – siła uogólniona odpowiadająca i -tej współrzędnej uogólnionej, s – liczba stopni swobody układu.

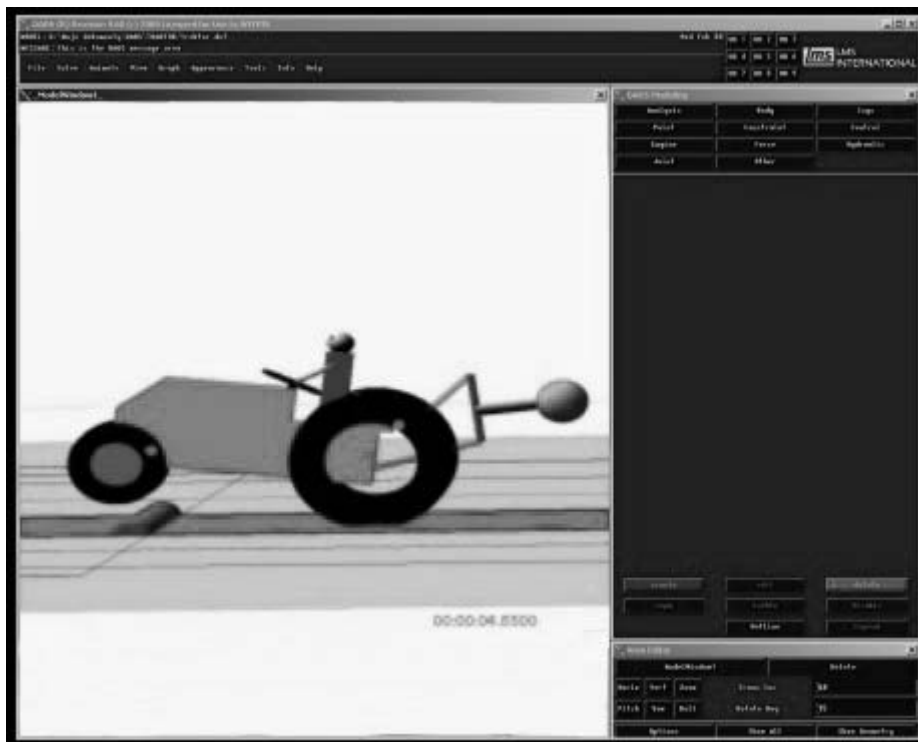
Model agregatu maszynowego zapisano cyfrowo w środowisku DADS (rys. 2).

Opisany model dynamiki zweryfikowano w warunkach eksploatacyjnych. Weryfikacja modelu wykazała zbieżność wyników obliczeń z wynikami uzyskanymi w czasie badań eksperymentalnych, co świadczy o poprawności przyjętych założeń podczas budowy modelu.

where: E_k – kinetic energy of the system, E_p – potential energy of the system, q_i – i -generalized coordinate, Q_{qi} – generalized force corresponding to the i -generalized coordinate, s – number of the degrees of freedom of the system.

The machine unit model was entered in the digital form in the DADS environment (fig. 2).

The described model of dynamics was verified under operational conditions. Model verification showed cohesion of calculation results with experimental results, which proves that the assumptions made for construction of the model were right.



Rys. 2. Interfejs graficzny programu DADS
Fig. 2. Graphic interface of DADS software

3. Badania symulacyjne stateczności agregatu maszynowego

Celem badań symulacyjnych było określenie wpływu podatności podłoża po którym porusza się agregat maszynowy na jego stateczność.

Symulacyjne badania zachowań agregatu maszynowego przeprowadzono z użyciem modelu agregatu maszynowego zapisanego w środowisku DADS. Stany stateczności agregatu maszynowego określono z modelu stateczności przedstawionego w artykule [10].

Plan badań symulacyjnych obejmował ruch ustalony po łuku na płaskim podłożu glebowym i asfaltowym. Przykładowe wyniki badań symulacyjnych stateczności agregatu maszynowego przedstawiono na rys. 3., zaś w tab. 1 zamieszczono krytyczne wartości prędkości i kąta skręcenia kół przednich, przy których wystąpiła utrata stateczności agregatu maszynowego.

3. Simulation tests of machine unit stability

Determining the influence of flexibility of the base along which the machine unit is moving on its stability was the goal of simulation tests.

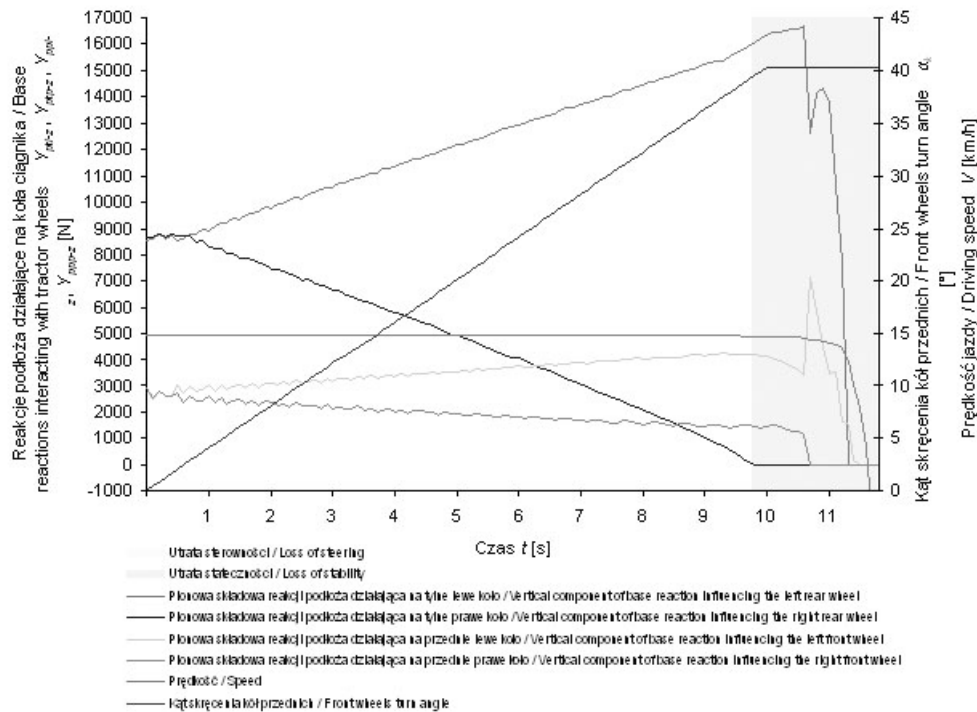
Simulation tests of machine unit behavior were carried out using the machine unit model recorded in the DADS environment. The states of stability of the machine unit model were determined according to the stability model presented in paper [10].

The simulation tests plan covered the fixed motion along the arch over flat asphalt and soil base. Sample results of stability simulation tests for the machine unit are presented in fig. 3 while table 1 presents the critical values of speed and turning angle of front wheels at which the loss of stability by the machine unit occurred.

Tab. 1. Krytyczne wartości prędkości jazdy i kąta skręcenia kół przednich, przy jakich nastąpiła utrata stateczności agregatu maszynowego

Tab. 1. Critical values of speed and turning angle of front wheels at which machine unit loss of stability occurred

Nazwa testu Test name	Prędkość Speed [km/h]	Kąt skręcenia kół przednich Turning angle of front wheels [°]	
		Asfalt / Asphalt	Gleba / Soil
Ruch po łuku Movement along the arch	5	stateczność zachowana w całym zakresie stability maintained over the entire range	stateczność zachowana w całym zakresie stability maintained over the entire range
	10	stateczność zachowana w całym zakresie stability maintained over the entire range	stateczność zachowana w całym zakresie stability maintained over the entire range
	15	39,499	40,306
	20	24,993	24,993
	25	16,933	16,933



Rys. 3. Przebiegi czasowe prędkości jazdy, kąta skręcenia kół przednich i reakcji podłoża działających na koła oraz wyznaczone obszary stateczności i sterowności dla ruchu agregatu maszynowego po łuku na podłożu asfaltowym ze średnią prędkością 15 km/h

Fig. 3. Time runs of driving speed, turn angle of front wheels, base reaction interacting with wheels, and determined areas of stability and steering for the movement of the machine unit along the arch on asphalt base with average speed of 15 km/h

4. Podsumowanie

Wykonując badania z użyciem modelu agregatu maszynowego wykazano, że wzrost prędkości ruchu agregatu maszynowego powoduje pozorną zmianę właściwości podłoża glebowego, które wykazuje cechy charakterystyczne dla podłoża sztywnego. W przypadku badań symulacyjnych dla założonych warunków, podłoże glebowe wykazywało właściwości podłoża sztywnego, po przekroczeniu prędkości 15 km/h. Zjawisko to nie zostałoby zauważone, w czasie badań stateczności z wykorzystaniem modeli przedstawionych w publikacjach [2, 3, 4, 5, 8, 11], co świadczy o poprawności przyjętych założeń dotyczących metod badań stateczności.

4. Conclusion

Performing the tests using the machine unit model it was shown that the machine unit movement speed increase causes an apparent change of soil base that shows characteristics of a rigid base. In case of simulation tests for the assumed conditions the soil base showed the characteristics of rigid base after exceeding the speed of 15 km/h. That phenomenon was not noticed during stability tests using models presented in publications [2, 3, 4, 5, 8, 11], which indicates correctness of assumptions made as concerns stability testing methods.

5. References

- [1] Ahokas J., Kosonen S.: *Dynamic Behaviour of a Tractor-trailer Combination during Braking*. Biosystems Engineering (2003) 85 (1). s. 29–39. Lista Filadelfijska (1537-5110).
- [2] Botwin M.: *Podstawy użytkowania maszyn leśnych*. Wydawnictwo SGGW. Warszawa 1993.
- [3] Celmerowski C.: *Stateczność jednoosiowej przyczepy rolniczej z nadbudowaną ładowarką*. Motoryzacja i energetyka rolnictwa. II Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna MOTROL 99. Część pierwsza. Lublin 1999. s. 98-103.
- [4] Czyborra M., Popescu S., Karamousantas D.: *Particularities of the dynamics of an agricultural tractor equipped with front loader*. Teka komisji motoryzacji i energetyki rolnictwa. Tom 1. Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Lublinie. Lublin 2001. s. 86-93.
- [5] Deitz D.: *Visualizing systems in motion*. *Mechanical Engineering*, Dec 1997, Vol. 119. Issue 12. s. 76-77. Lista Filadelfijska (1537-5110).
- [6] Kaczorowski B.: *Badania koncepcji sygnalizatora zagrożenia równowagi ciągników i maszyn rolniczych*. Zeszyty problemowe postępów nauk rolniczych 1995. z. 424. s. 113-118.
- [7] Leyko J.: *Mechanika ogólna*. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa 1996.
- [8] Michalski R., Szczyglak P.: *Имитационная модель состояний динамического равновесия машинного агрегата*, Международная Научно-Техническая Конференция, Балттехмаш 2002, Калининград 2002, s. 245-247.
- [9] Molari G., Rondelli V.: *On the Definition of Narrow-track Wheeled agricultural Tractors*. Biosystems Engineering (2004) 88 (1). s. 75–80. Lista Filadelfijska (1537-5110).
- [10] Szczyglak P.: *Badania stateczności agregatu maszynowego z wykorzystaniem modelu cyfrowego*. Inżynieria Systemów Bioagrotechnicznych. Zeszyt 5 (14). Płock 2005 s. 197-202.
- [11] Yisa M. G., Terao H., Noguchi N., Kubota M.: *Stability criteria for tractor-implement operation*. Journal of Terramechanics 35 (1998). s. 1-19. Lista Filadelfijska (0022-4898).

Dr inż. Piotr SZCZYGLAK

Katedra Budowy, Eksploatacji Pojazdów i Maszyn
Wydział Nauk Technicznych
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie
10-719 Olsztyn, ul. M. Oczapowskiego 11
e-mail: szczypio@uwm.edu.pl
