

## MODELING OF THE FEEDBACK CONTROL SYSTEMS (DRIVER-AGRICULTURAL SET) IN ASPECT OF MOVEMENT SAFETY

### Summary

*A control model of the agricultural machinery unit consisting of vehicle and agricultural machine has been presented. Vehicle driven by operator is being considered as control system with driver as a controller and vehicle as controlled system. Presented control system reproduces the actual behavior of the driver with its limited possibilities of perception, response time, delays, etc. Taking into account all the parameters describing such a behavior of the driver would not be possible. Therefore, it was decided to apply the method of describing the aggregate behavior by the use of the operational transmittance in the frequency domain and correlation in the time domain. The control model has been constructed with the use of stochastic methods and operational transmittances describing the various components of the system.*

## MODEL UKŁADU STEROWANIA ZE SPRZĘŻENIEM ZWROTNYM (CZŁOWIEK-AGREGAT ROLNICZY) W ASPEKTCIE BEZPIECZEŃSTWA RUCHU

### Streszczenie

*Przedstawiono model sterowania rolniczym agregatem, składającym się z pojazdu i połączonej z nim maszyny rolniczej. Sterowany przez kierowcę agregat jest rozpatrywany jako system regulacji, w którym kierowca jest regulatorem, a maszyna rolnicza obiektem regulowanym. Układ sterujący odwzorowuje zachowanie kierowcy, z jego ograniczonymi możliwościami percepcji, opóźnieniami reakcji itp. Bezpośrednie uwzględnienie wszystkich parametrów, opisujących takie zachowania kierowcy nie byłoby możliwe. Zdecydowano się zatem na zastosowanie metody opisującej zachowania agregatu metodami stochastycznymi, za pomocą transmitancji operatorowych w dziedzinie częstotliwości oraz korelacji w dziedzinie czasu.*

### 1. Wstęp

W 2009 r. zanotowano 26943 wypadki zgłoszone do KRUS. Śmiercią poszkodowanych zakończyły się 102 wypadki. Najgroźniejsze w skutkach okazują się wypadki podczas prac transportowych oraz związanych z manewrowaniem ciągnikami i maszynami (około 35% wszystkich wypadków śmiertelnych). W latach 2005–2009 w grupie: przejechanie, uderzenie, pochwylenie przez środek transportu w ruchu zanotowano 2398 wypadków (w tym 206 wypadków śmiertelnych). Można przypuszczać, że przynajmniej część z tych wypadków została spowodowana pośrednio cechami konstrukcyjnymi maszyn rolniczych niekorzystnie wpływającymi na ich własności trakcyjne.

### 2. Przetwarzanie przez kierowcę informacji w modelu ze sprzężeniem zwrotnym

O zachowaniu się pojazdu w ruchu decyduje wzajemne oddziaływanie trzech elementów: operatora, pojazdu i otoczenia. Zachowanie kierowcy obejmuje pobranie informacji ze środowiska, ich selekcji (wykrycie sytuacji wymagającej reakcji) oraz na scaleniu informacji i rozpoznaniu sytuacji, a następnie na podjęciu decyzji o przeprowadzeniu manewru i wysłaniu sygnałów sterujących. Zdaniem niektórych autorów każdy z kierowców ma kilka niezależnych kanałów przetwarzania informacji i podejmowania decyzji [9, 11].

Informacje docierające do świadomości bezpośrednio przez zmysły, wykorzystywane przez operatora przy kierowaniu pojazdem, mogą być trójakiego rodzaju:

- optyczne: najważniejsze dla operatora informujące o przebiegu drogi przed pojazdem, położeniu przeszkód,

- uzyskane ze zmysłu równowagi, dające informacje o przemieszczeniach kątowych (np. o przechylenie poprzecznym) i przyspieszeniach,

- dotykowe, uzyskiwane na podstawie sił działających między ciałem operatora a fotelem oraz na podstawie wartości momentu przykładanego do koła kierownicy.

Oprócz sygnałów docierających bezpośrednio przez zmysły są też informacje docierające w postaci informacji werbalnych.

Najważniejszymi parametrami opisującymi ruch pojazdu są: jego prędkość podłużna oraz pozycja względem założonego toru jazdy.

Największe trudności przy badaniu układu operator-pojazd-otoczenie sprawia formalny opis działania kierowcy. Prace dotyczące modelowania kierowcy samochodu prowadzone są już od dawna. Do sterowania samochodem używano modeli opartych na nieliniowym rozprężaniu, metodach klasyfikacji, z zastosowaniem sieci neuronowych lub logiki rozmytej. Wyniki te nie były jednak przenoszone na maszyny rolnicze. Wymaga to bowiem z jednej strony uwzględnienia specyfiki budowy maszyn rolniczych (niesymetryczne położenie środka ciężkości, rozmaite ogumienie, niekiedy niesymetryczne położenie kół) i ich połączenia z ciągnikiem (maszyny zawieszane, półzawieszane, przyczepiane, itd.), a z drugiej analizy zachowania maszyny na różnorodnym podłożu (drogi polne, pola) o złożonych i zmiennych właściwościach.

Dobrze opisują zachowania kierowcy modele ze sprzężeniem zwrotnym. Mają one budowę modułową, składającą się z modelu otoczenia, modelu kierowcy i modelu pojazdu. Sterowany przez kierowcę pojazd może być rozpatrywany

jako system regulacji, w którym kierowca jest regulatorem, a samochód obiektem regulowanym [3, 4]. Taka budowa umożliwia doskonalenie każdego modelu z osobna, a także porównywanie różnych modeli poprzez wymianę modułów. Zamknięciem pętli sprzężenia zwrotnego jest operator, który reaguje na zachowanie pojazdu i błędy położenia.

Formalny opis działania kierowcy jest możliwy, jeżeli potraktuje się go jako element układu sterowania [7, 9].

Jego funkcje dają się opisać jako przetwarzanie pochodzących z zewnątrz informacji, dotyczących ruchu pojazdu na sterowanie stanem poszczególnych układów. Model kierowcy obejmuje dwa bloki: „kierowanie” i „ocena”.

Na rys. 1 przedstawiono model procesu przetwarzania informacji przez człowieka w układzie ze sprzężeniem zwrotnym.

Przez kierowanie rozumiane jest oddziaływanie na układ sterowania pojazdem. Realizacja sygnałów kierowania realizowana jest na drodze oceny. Wynikiem oceny jest zmiana prędkości jazdy lub toru jazdy.

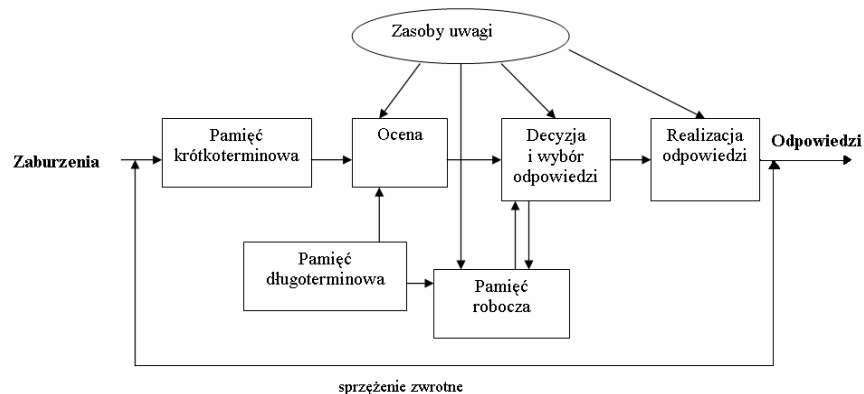
Krótkoterminowa pamięć pozwala na czasowe przechowywanie informacji od 1 sekundy dla kanału wizyjnego do kilku sekund dla kanału informacji werbalnych. Informacje nie są tu poddawane żadnej obróbce. W bloku oceny włączone zostają wyższe ośrodki układu nerwowego powiązane z pamięcią długoterminową, gdzie gromadzone są doświadczenia wynikające z procesu nauki. Sygnał zostaje oceniony i podjęta decyzja, jakie działanie należy podjąć. Odbywa się to w bloku decyzja i wybór odpowiedzi. Wytworzona informacja albo wywołuje od razu reakcje albo jest magazynowana w pamięci roboczej, aby wywołać reakcje w późniejszym czasie. Jeżeli podjęta zostanie decyzja o wykonaniu konkretnej czynności w bloku realizacja odpowiedzi to wypracowywane są w kolejnych krokach rozkazy dla mięśni. W wyniku tego działania powstaje sygnał zwrotny, przekazywany do modułu wejściowego.

### 3. Model sterowania kierowcy

W pracy do opisu rzeczywistego zachowania kierowcy przyjęto model kierowania pojazdem zbudowany metodami stochastycznymi, z uwzględnieniem transmitancji operatorowych, opisującymi poszczególne elementy składowe układu.

$$H(s) = \frac{s^2 [1 + (\tau + T_1 + T_2 + T_4 \sqrt{2})s]}{k_1 (1 + T_1 s) [1 + T_2 s + T_3^2 s^2] [1 + T_4 \sqrt{2} s + T_4^2 s^2] - e^{s\tau} [1 + (\tau + T_1 + T_2 + T_4 \sqrt{2})s]}, \quad (4)$$

gdzie  $s=j\omega$ .



Rys. 1. Schemat przetwarzania przez kierowcę informacji w modelu ze sprzężeniem zwrotnym [9]

Fig. 1. Block diagram of the vehicle-driver of information processing model

układu. Uzyskany model może być opisany w dziedzinie częstotliwości i dziedzinie czasu.

Model ten opisuje zależności pomiędzy drogą, kierowcą a pojazdem realizującym odchylenie kątowe i liniowe od warunków początkowych ruchu.

Dla ruchu po prostej, kąt obrotu koła kierownicy  $\beta(t)$  i kąt odchylenia samochodu  $\Psi(t)$  oraz przemieszczenie poprzeczne samochodu  $y(t)$  z warunkiem początkowym  $y_0=0$  są określone przez układ równań [1, 6]:

$$\begin{cases} \beta = H\delta_y - Hy \\ y = A_1\delta_\beta + A_1\beta \\ \Psi = A_2A_1^{-1}y + \Delta_H \end{cases}, \quad (1)$$

gdzie:  $\delta_y, \delta_\beta, \Delta_H$ , - zakłócenia.

Na podstawie układu równań (1) i własnych gęstości widmowych oraz wzajemnych gęstości widmowych zmierzonych sygnałów można uzyskać zależności określające transmitancję  $H$  modelu kierowcy.

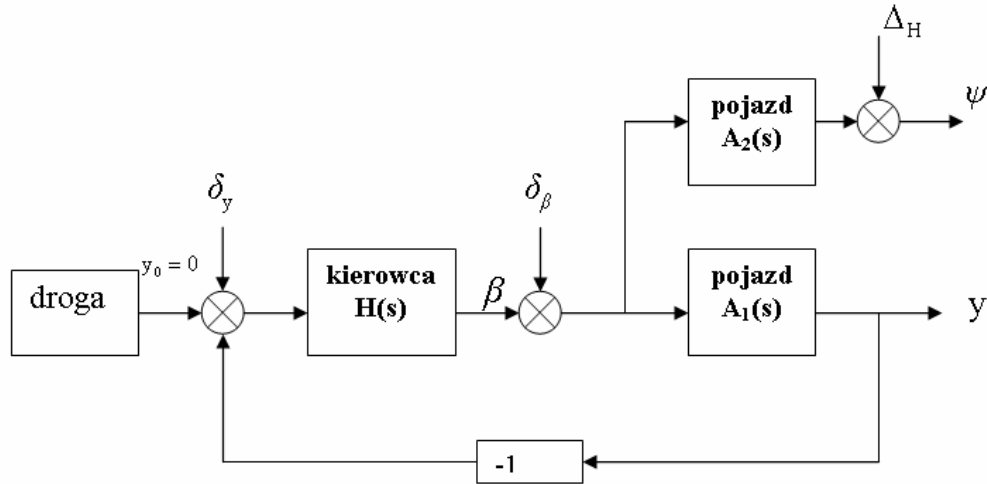
Transmitancja widmowa  $H$  modelu kierowcy opisana jest przez operatory pojazdu  $A_1, A_2$  i gęstości widmowe  $G$  (wzajemne i własne) zmierzonych sygnałów w postaci:

$$H = \frac{G_{\beta\beta} - A_1^{*-1}G_{y\beta}}{A_1^{*-1}G_{yy} - G_{y\beta}^*}. \quad (2)$$

W przypadku, gdy  $\Delta_H=0$  z równania (2) uzyskuje się zależność:

$$H = \frac{G_{\beta\beta} - A_2^{*-1}G_{\psi\beta}}{A_1^{*-1} |A_1 A_2^{-1}|^{-2} G_{\psi\psi} - A_1 A_2^{-1} G_{\psi\beta}^*}. \quad (3)$$

Bezpośrednie wykorzystanie tych równań jest utrudnione ze względu na trudności z dokładnym określeniem wartości gęstości widmowych procesów losowych. Niewielkie nawet błędy w określeniu funkcji transmitancji  $H$  mogą spowodować, że wyniki otrzymywane z analizowanego modelu będą istotnie różnić się od zachowań układu rzeczywistego. Po dalszych przekształceniach transmitancje kierowcy można wyrazić zależnością [6, 8]:



Rys. 2. Schemat sterowania ruchem pojazdu z uwzględnieniem sprzężenia zwrotnego  
Fig. 2. Simplified diagram of road-driver-vehicle system with feedback

Stałe te można wyznaczyć na podstawie badań eksperymentalnych.

Równania układu przedstawionego na rys. 2 mają postać [1, 2]:

$$\beta = G_2(A_1^{-1}\delta_y - \delta_\beta) \quad (5)$$

$$y = G_2(H^{-1}\delta_\beta - \delta_y)$$

$$\psi = py / v_a,$$

gdzie  $p=d/dt$ .

Z równań uzyskuje się wyrażenia na gęstości widmowe sygnałów:

$$\begin{aligned} G_{\beta\beta} &= G_{\delta_\beta} |G_2|^2 [G_{\delta_y} G_{\delta_\beta}^{-1} |A_1|^{-2} + 1], \\ G_{\psi\psi} &= G_{\delta_\beta} \omega^2 v_a^{-2} |G_2|^2 [|H|^{-2} + G_{\delta_y} G_{\delta_\beta}^{-1}], \\ G_{\psi\beta} &= G_{\delta_\beta} j\omega v_a^{-1} |G_2|^2 [H^{*-1} - G_{\delta_y} G_{\delta_\beta}^{-1} A_1^{-1}]. \end{aligned} \quad (6)$$

Znając gęstości widmowe można, korzystając z twierdzenia Wienera-Chinczyna, wyznaczyć funkcje korelacji:

$$\begin{aligned} k_{\beta\beta}(\theta) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} G_{\beta\beta}(\omega) e^{i\omega\theta} d\omega, \\ k_{\psi\psi}(\theta) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} G_{\psi\psi}(\omega) e^{i\omega\theta} d\omega, \\ k_{\psi\beta}(\theta) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} G_{\psi\beta}(\omega) e^{i\omega\theta} d\omega. \end{aligned} \quad (7)$$

Znormalizowane funkcje korelacji wyznacza się z zależności:

$$\begin{aligned} \rho_{\beta\beta}(\theta) &= k_{\beta\beta}(\theta) / D_\beta; \quad \rho_{\psi\psi}(\theta) = k_{\psi\psi}(\theta) / D_\psi, \\ \rho_{\psi\beta}(\theta) &= k_{\psi\beta}(\theta) / \sqrt{D_\psi D_\beta}. \end{aligned} \quad (8)$$

Dla przypadku znormalizowanej korelacji dla kąta  $\beta$ , zgodnie z wyrażeniami (6), gęstość widmowa  $G_{\beta\beta}$  wynosi:

$$G_{\beta\beta} = G_{\delta_\beta} (1 + b^2 T_\beta^2 \omega^2) / (1 + T_\beta^2 \omega^2)^3, \quad (9)$$

$$\text{gdzie: } b = T_\beta^{-1} (\tau + 3T_\beta + \sqrt{2}T_\delta).$$

Wyznaczając przekształcenie Fouriera z tego wyrażenia otrzymano zależności na funkcje korelacji dla kąta  $\beta$ :

$$k_{\beta\beta}(\theta) = \frac{G_{\delta_\beta}}{T_\beta} e^{-\frac{|\theta|}{T_\beta}} \left\{ \frac{3+b^2}{16} \left( 1 + \frac{|\theta|}{T_\beta} \right) + \frac{1-b^2}{16} \left( \frac{|\theta|}{T_\beta} \right)^2 \right\}. \quad (10)$$

Przyjmując, że  $\theta=0$ , znajduje się dyspersję kąta  $\beta$ :

$$D_\beta = k_{\beta\beta}(0) = \frac{G_{\delta_\beta}}{T_\beta} \frac{3+b^2}{16}. \quad (11)$$

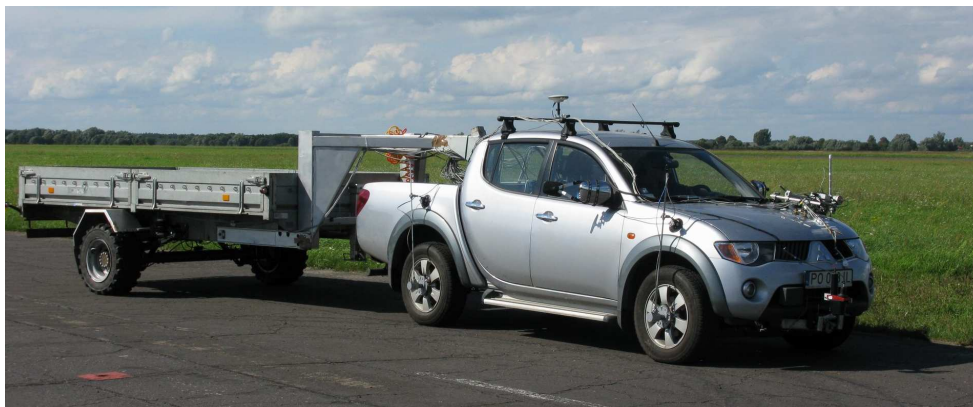
Znormalizowana funkcja korelacji dla kąta  $\beta$ :

$$\rho_{\beta\beta}(\theta) = \frac{k_{\beta\beta}(\theta)}{D_\beta} = e^{-\frac{|\theta|}{T_\beta}} \left[ 1 + \frac{|\theta|}{T_\beta} + \frac{1-b^2}{3+b^2} \left( \frac{|\theta|}{T_\beta} \right)^2 \right]. \quad (12)$$

Wartości parametrów  $T_\beta$ ,  $\tau$ ,  $T_\delta$  opisujących znormalizowane współczynniki korelacji ( $\tau$  – czas reakcji kierowcy,  $T_\beta$ ,  $T_\delta$  – stałe związane z czasem reakcji kierowcy) można wyznaczyć metodami eksperymentalnymi.

#### 4. Badania eksperymentalne agregatu pojazd-maszyna rolnicza

Przeprowadzono badania eksperymentalne w celu uzyskania informacji o zachowaniu agregatu podczas jazdy z różnymi prędkościami i podczas wykonywania rozmaitych manewrów (zmiana pasa ruchu, wymijanie, wykonywanie skrętów o różnych promieniach). Badania te przeprowadzono przy udziale różnych kierowców.



Rys. 3. Agregat pojazd–przyczepa rolnicza podczas badań  
Fig. 3. Unit vehicle–trailer during the test

Parametry wykonywanych manewrów (prędkość, szerokość pasa ruchu, promienie skrętów itp.) były zgodne z zaleceniami ISO.

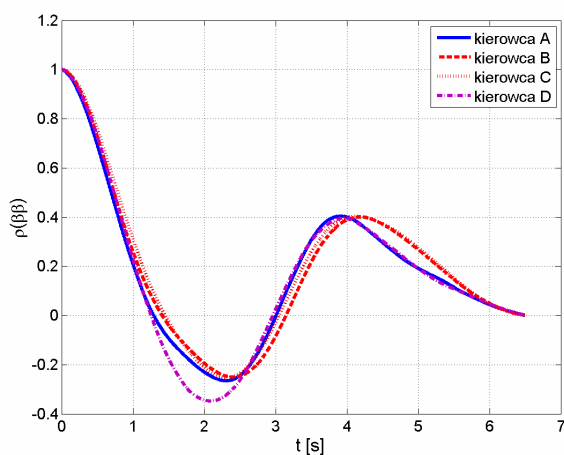
Do badań wykorzystano aparaturę pomiarową uzupełnioną i przystosowaną do specyfiki przeprowadzanych pomiarów (rys. 3).

### 5. Identyfikacja czasu opóźnienia kierowcy na podstawie analizy funkcji korelacji własnej

Wyznaczono eksperymentalnie dla różnych kierowców znormalizowane funkcje korelacji własnej dla kąta  $\beta$ . Następnie wyznaczono stałe czasowe opisujące zachowania kierowcy korzystając ze wzoru na znormalizowaną funkcję korelacji dla kąta  $\beta$ .

Wartości parametrów  $T_\beta$ ,  $\tau$ ,  $T_\delta$ , opisujące znormalizowane współczynniki korelacji ( $\tau$  – czas reakcji kierowcy,  $T_\beta$ ,  $T_\delta$  – stałe związane z czasem reakcji kierowcy), można wyznaczyć metodami optymalizacji. Stosowano w tym celu algorytmy zaimplementowane w środowisku Optimization Toolbox w Matlabie. Stałe czasowe wyznaczono stosując metodę Neldera i Meada realizowaną przez procedurę Matlaba `fminsearch`.

Na rys. 4 zamieszczono porównanie funkcji korelacji własnych dla kąta  $\beta$  wyznaczonych eksperymentalnie dla czterech różnych kierowców.



Rys. 4. Porównanie znormalizowanych funkcji korelacji własnej dla kąta  $\beta$  wyznaczonych eksperymentalnie dla różnych kierowców (A, B, C, D)

Fig. 4. Correlogram comparison for different drivers: A, B, C and D

Wyznaczony metodami optymalizacji czas reakcji kierowcy  $\tau$  wynosi dla kierowcy: A – 0,38; B – 0,34; C – 0,31; D – 0,38 s. Uzyskane z obliczeń wartości czasu reakcji kierowcy są podobne do czasów reakcji kierowcy pojazdów samochodowych. Dla tego samego kierowcy ten czas może się zmieniać w szerokim zakresie, w zależności od stanu kierowcy i warunków pracy agregatu.

### 6. Wnioski

1. Na podstawie znajomości modelu matematycznego kierowca–pojazd–droga, po przeprowadzeniu identyfikacji parametrycznej, można wyznaczyć parametry czasowe opisujące czas reakcji kierowcy.
2. Przeprowadzone obliczenia wstępne wykazały, że zaproponowany model poprawnie odwzorowuje kierowność agregatu pojazd–przyczepa rolnicza. Opracowany model może być podstawą dla dalszych badań i uściśleń.

### 7. Literatura

- [1] Chacaturow A.A.: Dinamika sistemy doroga–szina–avtomobil-woditel. Maszynostroyeniye. Moskwa, 1976.
- [2] Cieślak M.: Inteligentne systemy sterowania statecznością ruchu pojazdów. Praca doktorska, Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, 2005.
- [3] Guo K., Guan H.: Modelling of driver/vehicle directional control systems. Vehicle System Dynamics International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 1993, Vol. 22 (3&4), s. 141-182.
- [4] Davidson J. B., Schmidt D. K.: Modified Optimal Control Pilot Model for Computer-Aided Design and Analysis, Tech. Rep. TM-4384, NASA, 1992.
- [5] Engel Zb., Kowal J.: Sterowanie procesami wibroakustycznymi. Kraków: Wydawnictwa AGH, 1995.
- [6] Kromulski J., Pawłowski T.: The modeling and control of the agricultural set, 7<sup>th</sup> International Workshop on Modeling & Applied Simulation MAS 2008, Campora S. Giovanni (Amantea, CS), 17-19.09.2008.
- [7] Liu Zhaoheng: Characterisation of optimal human driver model and stability of a tractor-semitrailer vehicle system with time delay, Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21.
- [8] Pawłowski, T., Kromulski, J., Szczepaniak, J.: Wpływ percepcji kierowcy na bezpieczeństwo ruchu maszyn rolniczych. XXI Konferencja "Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych", 449-455, 21-24.01.2008, Zakopane.
- [9] Reński A.: Modelowanie działania kierowcy w układzie kierowca–ojazd–otoczenie. Prace Naukowe, Mechanika, z. 184, Politechnika Warszawska, Warszawa, 2000.
- [10] Schafer F.R.: Generalized Feedback Control and Application to Vehicle Path Following Control. TU, Berlin, 2004.
- [11] Szczepaniak C.: Podstawy modelowania systemu człowiek–pojazd–otoczenie. Warszawa: PWN, 1999.