

## STEROWANIE SEMI-AKTYWNYM SYSTEMEM ZAWIESZENIA PLATFORMY GAŚNIENICOWEJ 2S1

### Streszczenie

*W niniejszym artykule sformułowano połówkowy model dynamiki zawieszenia platformy gaśnicowej 2S1, w którym obecne są dwa tłumiki magnetoreologiczne o nieliniowej charakterystyce. W badaniach numerycznych, w celu sterowania, wykorzystano sterownik sky-hook operujący na estymowanych zmiennych stanu systemu zawieszenia. Zadanie estymacji przeprowadzono wykorzystując rozszerzony filtr Kalmana. Wobec konwencjonalnych rozwiązań działanie to pozwala na dokładne odtworzenie zmiennych stanu, opisujących dynamikę systemu zawieszenia oraz redukuje liczbę zmiennych, które muszą być mierzone. Działanie sterowania hybrydowego oraz zastosowanego filtra zweryfikowano na podstawie porównania amplitudy przemieszczeń oraz przyśpieszeń odpowiednich punktów.*

### WSTĘP

Efektywne tłumienie drgań kadłuba pojazdu gaśnicowego wpływa na poprawę warunków pracy załogi, co pośrednio przekłada się na wzrost skuteczności prowadzenia ognia [6, 8]. Sukces działań bojowych prowadzonych na polu walki można uzależnić od własności systemu zawieszenia. Takie ujęcie stymuluje rozwój techniki współczesnych platform gaśnicowych pojazdów bojowych. W konstrukcjach zawieszonych oprócz konwencjonalnych elementów i układów pasywnych wykorzystuje się dziś elementy aktywne i semi-aktywne. Ponieważ umożliwiają one wytworzenie zmiennej siły tłumienia, układy tego typu można postrzegać jako układy regulacji. Podstawowym ich zadaniem jest ograniczenie wpływu wymuszeń zewnętrznych na kadłub pojazdu gaśnicowego, wynikających ze zmian profilu podłoża.

Układ jezdny platformy gaśnicowej 2S1 w swojej oryginalnej wersji wyposażony jest m.in. w czternaście kół jezdnych, dwa koła napędzające oraz dwa koła napinające gaśnicę. W osi każdego z kół jezdnych znajdują się wahacze połączone z drążkami skrętnymi. Pełnią one funkcje elementów nadających sztywność zawieszeniu [2, 3, 7]. Walki skrętne uznaje się za stosunkowo proste i niezawodne rozwiązanie konstrukcyjne. Ich wadą jest obniżenie odporności pojazdu gaśnicowego na wybuchy min przeciwpancernych. Ze względu na gromadzoną energię potencjalną w trakcie wybuchu miny, oraz umiejscowienie drążków pod kabiną załogi, w wypadku przekroczenia dopuszczalnych naprężeń drążka, energia potencjalna w nim zgromadzona może stać się bezpośrednim zagrożeniem dla zdrowia, a nawet życia załogi. W ramach projektu realizowanego przez pracowników Katedry Automatykacji Procesów AGH pod kierownictwem dr inż. A. Jurkiewicza dokonano modernizacji platformy 2S1 – w jej nowej wersji drążki skrętne zawieszenia zostały zastąpione pakietami sprężyn logarytmicznych, lub hiperbolicznych (w zależności od wersji). Rozwiązanie to znacząco poprawiło również własności tłumiące układu zawieszenia poprzez ściskanie oleju przez zwoje sprężyn pakietu. Niestety zamierzony wpływ kontroli ciśnienia oleju w bębnie pakietu na charakterystykę przenoszenia drgań okazał się niewystarczający. Te obserwacje skłoniły badaczy do umiejscowienia w strukturze analitycznego modelu zawieszenia platformy liniowych, sterowanych tłumików magnetoreologicznych, co tym samym uczyniło powstały model strukturą semi-aktywną [3]. Jedną z zalet wynikających z obecności tłumików magnetoreologicznych jest możliwość dostosowania charakterystyki tłumienia zawieszenia do bieżących warunków jezdnych oraz do aktualnej

masy pojazdu, na którą składa się m.in. masa dostępnego w pojeździe uzbrojenia. Możliwe staje się sterowanie stopniem dyssypacji energii drgań podczas jazdy. Często stosowaną strategią jest sterowanie typu sky-hook. Badania modelu semi-aktywnego zawieszenia jednego koła platformy gaśnicowej 2S1 z układem sky-hook wykazały obniżenie amplitudy chwilowego przyśpieszenia pionowego, co jest równoważne ze wzrostem komfortu jazdy załogi, w stosunku do modelu zawieszenia złożonego wyłącznie z elementów pasywnych [3].

Sterowanie sky-hook zależy od niektórych zmiennych stanu systemu zawieszenia, takich jak prędkość pionowa masy resorowanej oraz prędkości pionowe mas nieresorowanych. Metodą, która pozwala na odtworzenie tych wielkości z dużą dokładnością jest filtr Kalmana. Układ ten na podstawie pomiarów sygnałów sterowania oraz zmiennych reprezentujących obserwowalne zachowanie systemu określa wewnętrzny stan. Przyjęto, że w badanym połówkowym modelu zawieszenia platformy gaśnicowej 2S1 mierzonymi wielkościami wyjściowymi są ugięcia zawieszenia pierwszej i ostatniej osi pojazdu.

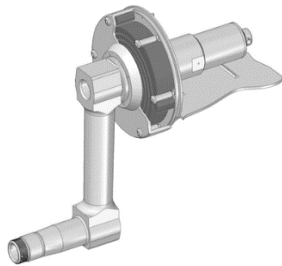
Obecność tłumików MR determinuje nieliniowy charakter różniczkowych opisujących dynamikę badanego modelu. Na podstawie tego spostrzeżenia uznano, że odpowiednim rozwiązaniem problemu estymacji jest zastosowanie rozszerzonej wersji filtra Kalmana. Oprócz obserwacji wektora stanu systemu nieliniowego metoda ta pozwala na zminimalizowanie wpływu zakłóceń, jakie oddziałują na proces przetwarzania oraz proces pomiarowy. W pracy [5], Lindgärde jako główne źródło tych zakłóceń przedstawia zakłócenia, które mogą być związane z drganiami generowanymi przez pracę silnika pojazdu. Jako alternatywne rozwiązanie pomiaru prędkości względnej masy resorowanej i masy nieresorowanej stosuje on różniczkowanie sygnału generowanego przez czujnik ugięcia zawieszenia poddanego wcześniej konwencjonalnej filtracji poprzez dolnoprzepustowy filtr Butterwortha. Dowodzi on jednak, że filtr Kalmana jest preferowanym rozwiązaniem, gdy istotna jest jedna ze zmiennych stanu – prędkość masy resorowanej, zwłaszcza, gdy zachodzą zjawiska rezonansowe tej masy.

Artykuł posiada następującą strukturę: w sekcji 2 podano ogólną charakterystykę konstrukcji platformy gaśnicowej 2S1 oraz przedstawiono jej matematyczny, połówkowy model, w którego strukturze zastosowano dwa tłumiki magnetoreologiczne. Kolejna sekcja opisuje zastosowaną strategię sterowania hybrydowego. Punkt 4 poświęcono problemowi estymacji wektora stanu za pomocą rozszerzonego filtra Kalmana. W sekcji 5 znalazły się wyniki

badania modelu numerycznego wraz z komentarzem, a w ostatnim punkcie sformułowano wnioski i spostrzeżenia.

## 1. SYSTEM ZAWIESZENIA PLATFORMY GAŚNIENICOWEJ

Oryginalna wersja zawieszenia platformy gaśnicowej 2S1 jako elementy nadające sztywność wykorzystuje popularne po II wojnie światowej wałki skrętne. Charakterystyka sztywności tych elementów nie jest progresywnie nieliniowa – sztywność nie wzrasta wraz ze skruceniem wałka [3, 7]. Ponadto, zawieszenie posiada słabe własności tłumiące.



Rys. 1. Wahacz z pakietem sprężyn spiralnych zmodernizowanego systemu zawieszenia platformy gaśnicowej 2S1.

Rys 1 przedstawia zmodernizowane zawieszenie platformy wykorzystujące pakiet sprężyn logarymicznych. Model teoretyczny zawieszenia jednego koła pojazdu platformy w [3] został wzbogacony o tłumik magneto-reologiczny, który charakteryzuje niski pobór mocy i krótki czas odpowiedzi na zmiany wartości prądu przepływającego przez uzwojenia sterujące. Element ten stwarza jednak duże trudności podczas projektowania układu sterowania ze względu na swój nieliniowy opis [10, 12]. Siły tłumienia  $F_{t1}$  oraz  $F_{t7}$  (N) jakie generują tłumiki magneto-reologiczne można określić przez zmodyfikowany model Bingham'a [10]:

$$F_{t1} = \frac{2}{\pi} (f_a + f_b I_1) \arctg(pV_1) + (c_a + c_b I_1) V_1, \quad (1)$$

$$F_{t7} = \frac{2}{\pi} (f_a + f_b I_7) \arctg(pV_7) + (c_a + c_b I_7) V_7, \quad (2)$$

gdzie  $V_1$  i  $V_7$  są prędkościami względnymi tłoków tłumików magneto-reologicznych w cylindrach (m/s),  $I_1$  oraz  $I_7$  opisują natężenie prądów elektrycznych przepływających przez uzwojenia sterujące tłumików magneto-reologicznych (A). Elementy  $f_a + f_b I_1$  oraz  $f_a + f_b I_7$  są współczynnikami tarcia coulombowskiego a składowe  $c_a + c_b I_1$  oraz  $c_a + c_b I_7$  opisują współczynniki tarcia wiskotycznego.

Formułując model analityczny połowki zawieszenia założono brak wpływu temperatury na własności cieczy magneto-reologicznej tłumików, jak również brak strat związanych z jej przeciekami. Przy-

jęto liniowe charakterystyki sztywności zawieszenia związane ze sprężynami spiralnymi oraz założono liniową sztywność i liniowe tłumienie promieniowe kół jezdnych. Masy, zarówno resorowana jak i masy nieresorowane, są elementami dyskretnymi, skupionymi w punkcie. Ponadto przyjęte zostały więzy dwustronne, co oznacza, że nie uwzględniono możliwości odrywania się kół jezdnych od podłoża. Dla tak uproszczonej struktury zawieszenia platformy gaśnicowej 2S1 (Rys. 2) określić można równania ruchu masy resorowanej  $m_1$  oraz mas nieresorowanych  $m_{21}$ ,  $m_{22}$ ,  $m_{23}$ ,  $m_{24}$ ,  $m_{25}$ ,  $m_{26}$  oraz  $m_{27}$ :

$$m_1 \ddot{z}_1 = k_{11}(z_{21} - z_1 + l_1 \varphi_1) + k_{12}(z_{22} - z_1 + l_2 \varphi_1) + k_{13}(z_{23} - z_1 + l_3 \varphi_1) + k_{14}(z_{24} - z_1 + l_4 \varphi_1) + k_{15}(z_{25} - z_1 + l_5 \varphi_1) + k_{16}(z_{26} - z_1 + l_6 \varphi_1) + k_{17}(z_{27} - z_1 + l_7 \varphi_1) + F_{t1} + F_{t7} \quad (3)$$

$$m_{21} \ddot{z}_{21} = k_{21}(g_1 - z_{21}) + c_{21}(\dot{g}_1 - \dot{z}_{21}) - k_{11}(z_{21} - z_1 + l_1 \varphi_1) - F_{t1} \quad (4)$$

$$m_{22} \ddot{z}_{22} = k_{22}(g_2 - z_{22}) + c_{22}(\dot{g}_2 - \dot{z}_{22}) - k_{12}(z_{22} - z_1 + l_2 \varphi_1) \quad (5)$$

$$m_{23} \ddot{z}_{23} = k_{23}(g_3 - z_{23}) + c_{23}(\dot{g}_3 - \dot{z}_{23}) - k_{13}(z_{23} - z_1 + l_3 \varphi_1) \quad (6)$$

$$m_{24} \ddot{z}_{24} = k_{24}(g_4 - z_{24}) + c_{24}(\dot{g}_4 - \dot{z}_{24}) - k_{14}(z_{24} - z_1 + l_4 \varphi_1) \quad (7)$$

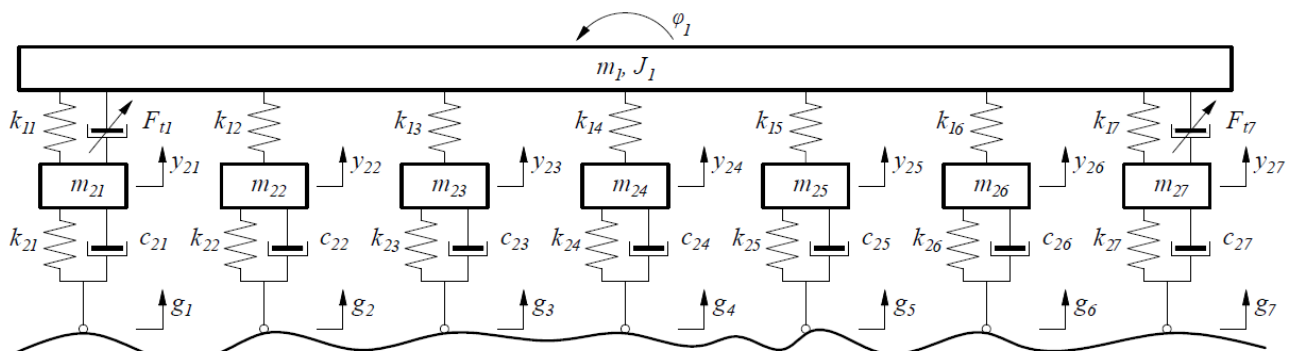
$$m_{25} \ddot{z}_{25} = k_{25}(g_5 - z_{25}) + c_{25}(\dot{g}_5 - \dot{z}_{25}) - k_{15}(z_{25} - z_1 + l_5 \varphi_1) \quad (8)$$

$$m_{26} \ddot{z}_{26} = k_{26}(g_6 - z_{26}) + c_{26}(\dot{g}_6 - \dot{z}_{26}) - k_{16}(z_{26} - z_1 + l_6 \varphi_1) \quad (9)$$

$$m_{27} \ddot{z}_{27} = k_{27}(g_7 - z_{27}) + c_{27}(\dot{g}_7 - \dot{z}_{27}) - k_{17}(z_{27} - z_1 + l_7 \varphi_1) - F_{t7} \quad (10)$$

$$J_1 \ddot{\varphi}_1 = -k_{11}(z_{21} - z_1 + l_1 \varphi_1) l_1 - k_{12}(z_{22} - z_1 + l_2 \varphi_1) l_2 - k_{13}(z_{23} - z_1 + l_3 \varphi_1) l_3 - k_{14}(z_{24} - z_1 + l_4 \varphi_1) l_4 + k_{15}(z_{25} - z_1 + l_5 \varphi_1) l_5 + k_{16}(z_{26} - z_1 + l_6 \varphi_1) l_6 + k_{17}(z_{27} - z_1 + l_7 \varphi_1) l_7 - F_{t1} l_1 + F_{t7} l_7 \quad (11)$$

gdzie  $k_{11} \dots k_{17}$  to parametry sztywności pakietu sprężyn spiralnych,  $k_{21} \dots k_{27}$  oraz  $c_{21} \dots c_{27}$  opisują sztywność promieniową oraz tłumienie promieniowe kół jezdnych. Stałe  $l_1 \dots l_7$  wyrażają odległość koelnych osi pojazdu względem środka ciężkości platformy. Wreszcie  $J_1$  to moment bezwładności kadłuba platformy związany z przechyłem wzdłużnym, obliczony względem osi przechodzącej przez środek masy platformy, prostopadłej do płaszczyzny rysunku



Rys. 2. Schemat modelu połowki zawieszenia platformy gaśnicowej.

2.

Sygnały  $g_1 \dots g_7$  reprezentują wymuszenie w postaci funkcji profilu drogi pokonywanej przez koła jezdne kolejnych osi pojazdu. Można zatem uznać, że sterowanie drganiami w systemie zawieszenia pojazdu gąsienicowego stanowi przykład wibroizolacji przemieszczeniowej.

Przed sformułowaniem równań stanu i wyjścia modelu matematycznego połówki układu zawieszenia platformy gąsienicowej (Rys. 2), na podstawie równań (3) – (11), przyjęto zmienne stanu  $x_1 = z_{21}, x_2 = \dot{z}_{21}, x_3 = z_{22}, x_4 = \dot{z}_{22}, x_5 = z_{23}, x_6 = \dot{z}_{23}, x_7 = z_{24}, x_8 = \dot{z}_{24}, x_9 = z_{25}, x_{10} = \dot{z}_{25}, x_{11} = z_{26}, x_{12} = \dot{z}_{26}, x_{13} = z_{27}$  oraz  $x_{14} = \dot{z}_{27}$ . Zmienne te określają przemieszczenia i prędkości mas nieresorowanych  $m_{21}, m_{22}, m_{23}, m_{24}, m_{25}, m_{26}$  i  $m_{27}$ . Przemieszczenie oraz prędkość masy resorowanej  $m_1$  została określona zmiennymi stanu  $x_{15} = z_1$  oraz  $x_{16} = \dot{z}_1$ . Kąt oraz prędkość kątowna przechyłu wzdłużnego kadłuba pojazdu określono zmiennymi  $x_{17} = \varphi_1, x_{18} = \dot{\varphi}_1$  natomiast sterowanie związane z natężeniem prądów przepływających przez uzwojenia sterujące tłumików magneto-reologicznych opisano zmiennymi  $u_1 = I_1$  oraz  $u_2 = I_2$ . Wymuszenia reprezentujące funkcję profilu drogi i jej pochodną względem czasu opisano zmiennymi  $u_3 = g_1, u_4 = \dot{g}_1, u_5 = g_2, u_6 = \dot{g}_2, u_7 = g_3, u_8 = \dot{g}_3, u_9 = g_4, u_{10} = \dot{g}_4, u_{11} = g_5, u_{12} = \dot{g}_5, u_{13} = g_6, u_{14} = \dot{g}_6, u_{15} = g_7$  oraz  $u_{16} = \dot{g}_7$ . Natomiast wyjścia modelu systemu przedstawiono w postaci  $y_1 = x_1 - x_{15} + l_1 x_{17}$  oraz  $y_2 = x_{13} - x_{15} + l_7 x_{17}$ . Dla tak przyjętych zmiennych równania stanu i wyjścia są postaci:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \\ \dot{x}_9 \\ \dot{x}_{10} \\ \dot{x}_{11} \\ \dot{x}_{12} \\ \dot{x}_{13} \\ \dot{x}_{14} \\ \dot{x}_{15} \\ \dot{x}_{16} \\ \dot{x}_{17} \\ \dot{x}_{18} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ (F_{s21} + F_{t21} - F_{s11} - F_{t1})m_{21}^{-1} \\ x_4 \\ (F_{s22} + F_{t22} - F_{s12})m_{22}^{-1} \\ x_6 \\ (F_{s23} + F_{t23} - F_{s13})m_{23}^{-1} \\ x_8 \\ (F_{s24} + F_{t24} - F_{s14})m_{24}^{-1} \\ x_{10} \\ (F_{s25} + F_{t25} - F_{s15})m_{25}^{-1} \\ x_{12} \\ (F_{s26} + F_{t26} - F_{s16})m_{26}^{-1} \\ x_{14} \\ (F_{s27} + F_{t27} - F_{s17} - F_{t7})m_{26}^{-1} \\ x_{16} \\ (F_{s11} + F_{s12} + F_{s13} + F_{s14} + F_{s15} + F_{s16} + F_{s17} + F_{t1} + F_{t7})m_1^{-1} \\ x_{18} \\ (-F_{s11}l_1 - F_{s12}l_2 - F_{s13}l_3 - F_{s14}l_4 + F_{s15}l_5 + F_{s16}l_6 + F_{s17}l_7 - F_{t1}l_1 + F_{t7}l_7)l_1^{-1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & +l_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & -l_7 & 0 \end{bmatrix} x \quad (13)$$

gdzie  $x = [x_1 \dots x_{18}]^T$  jest 18 wymiarowym wektorem stanu systemu. Siły  $F_{s11} \dots F_{s17}$  to siły sprężystości wynikające z odkształcenia sprężyn spiralnych posiadających współczynniki sprężystości  $k_{11} \dots k_{17}$ . Siły  $F_{s21} \dots F_{s27}$  oraz  $F_{t21} \dots F_{t27}$  to siły skojarzone ze współczynnikami sztywności promieniowej kół jezdnych  $k_{21} \dots k_{27}$  oraz współczynnikami tłumienia promieniowego kół jezdnych  $c_{21} \dots c_{27}$ . Przyjęty opis modelu w przestrzeni stanu wskazuje, że oprócz bieżącej wartości ugięcia zawieszenia konieczny jest pomiar funkcji profilu drogi  $g_1 \dots g_7$  oraz pomiar ich pochodnych względem czasu  $\dot{g}_1 \dots \dot{g}_7$ .

## 2. STRATEGIA STEROWANIA SKY-HOOK

Strategia sterowania sky-hook została zaproponowana w pracy [4] przez Karnopp i innych w 1974 roku. Sterowanie dostosowuje właściwości dynamiczne pojazdu wpływając korzystnie na komfort jazdy załogi pojazdu. Strategia ta jest najczęściej stosowaną strategią we współczesnych semi-aktywnych systemach zawiesznień. Wyróżnić można dyskretne oraz ciągłe sterowanie sky-hook. W niniejszej pracy porównano działanie systemu pasywnego oraz systemu semi-aktywnego z ciągłym sterowaniem.

Algorytm sterowania sky-hook jest przedmiotem badań w [3, 6, 9]. Ponadto, w [3] Jurkiewicz i inni, przedstawiają ciągły wariant sterowania sky-hook w modelu zawieszenia jednego koła jezdne platformy gąsienicowej 2S1. Dla połówkowego modelu dynamiki systemu zawieszenia opisanego równaniami (12) i (13) zastosowano sterowanie ciągle sky-hook. W teorii, zakłada się, że pasywny, liniowy tłumik wiskotyczny jest połączony z masą resorowaną oraz z abstrakcyjnym „niebem”, nieruchomym w absolutnym układzie współrzędnych. Taka konfiguracja redukuje pionowe wibracje masy resorowanej, co bezpośrednio przekłada się na wzrost komfortu jazdy. Nie jest ona jednak fizycznie realizowalna. Aby możliwe stało się zaadoptowanie tego rodzaju strategii wprowadza się element o sterowanej charakterystyce tłumienia do układu jaki tworzą masa resorowana i nieresorowana.

Wartość siły  $F_{sky}$  (N), którą wytwarza pasywny, liniowy tłumik wiskotyczny łączący środek ciężkości masy resorowanej z układem inercyjnym definiuje równanie [6]:

$$F_{sky} = \zeta_{sky} b_{kr} \dot{z}_1 \quad (14)$$

gdzie  $\zeta_{sky}$  jest wielkością bezwymiarową, która w przypadku tłumienia krytycznego ma wartość 1. Współczynnik tłumienia krytycznego  $b_{kr}$  dla przyjęto modelu zawieszenia (Rys. 2) opisuje równanie:

$$b_{kr} = 2 \cdot \sqrt{m_1 \sum_{i=1}^7 k_{1i}}, \quad (15)$$

Podstawiając (15) do (14) otrzymujemy siłę jaką powinien generować abstrakcyjny tłumik. Aby zaadaptować strategię sterowania sky-hook, siła ta musi być równa sumie sił wytwarzanych przez tłumiki magneto-reologiczne pierwszej i ostatniej kolumny zawieszenia:

$$F_{t1} + F_{t7} = 2 \cdot \zeta_{sky} \sqrt{m_1 \sum_{i=1}^7 k_{1i}} \cdot \dot{z}_1, \quad (16)$$

Ponieważ rozpatruje się sterowanie drganiami kadłuba pojazdu jedynie w kierunku pionowym założono, że  $F_{t1} = F_{t7}$ . Stąd, siły generowane przez tłumiki magneto-reologiczne wynoszą (N):

$$F_{t1} = F_{t7} = \zeta_{sky} \sqrt{m_1 \sum_{i=1}^7 k_{1i}} \cdot \dot{z}_1, \quad (17)$$

Powyższe równanie uznać można za regułę sterowania. W celu jej zastosowania, konieczne jest wprowadzenie do układu sterowania odwrotnych modeli tłumików magneto-reologicznych. Inwersja równań (1) oraz (2) ze względu na  $I_1$  oraz  $I_7$  prowadzi do (A):

$$I_1 = \frac{F_{t1} - \frac{2fa}{\pi} \arctg(pV_1) - c_a V_1}{\frac{2fb}{\pi} \arctg(pV_1) + c_b V_1} = \frac{\zeta_{sky} \sqrt{m_1 \sum_{i=1}^7 k_{1i}} \cdot \dot{z}_1 - \frac{2fa}{\pi} \arctg(pV_1) - c_a V_1}{\frac{2fb}{\pi} \arctg(pV_1) + c_b V_1}, \quad (18)$$

$$I_7 = \frac{F_{t7} - \frac{2fa}{\pi} \arctg(pV_7) - c_a V_7}{\frac{2fb}{\pi} \arctg(pV_7) + c_b V_7} = \frac{\zeta_{sky} \sqrt{m_1 \sum_{i=1}^7 k_{1i}} \cdot \dot{z}_1 - \frac{2fa}{\pi} \arctg(pV_7) - c_a V_7}{\frac{2fb}{\pi} \arctg(pV_7) + c_b V_7}. \quad (19)$$

Uzyskane równania (18) oraz (19) determinują wartości natężeń przepływu prądów elektrycznych płynących w uzwojeniach sterujących tłumików magneto-reologicznych, co w zamiarze pozwo-



lic ma na uzyskanie pożądaných wartości sił tłumienia (17). Z rozdziału 2 wynika, że  $I_1$  oraz  $I_2$  są zmiennymi wejściowymi modelu wielowymiarowego (12) oznaczonymi przez  $u_1$  oraz  $u_2$ . Prędkość pionowa masy resorowanej  $\dot{y}_1$  jest zmienną stanu  $x_{16}$ . Z kolei prędkości względne  $V_1$  i  $V_7$  masy resorowanej  $m_1$  oraz mas nieresorowanych  $m_{21}$  oraz  $m_{27}$  pierwszej i ostatniej kolumny zawieszania wynoszą odpowiednio (m/s):

$$V_1 = x_2 - x_{16} + l_1 x_{18}, \quad (20)$$

$$V_7 = x_{14} - x_{16} - l_7 x_{18}. \quad (21)$$

### 3. ROZSZERZONY FILTR KALMANA

Strategia Filtru Kalmana można postrzegać jako średnio kwadratowy estymator wektora stanu będący rozwiązaniem problemu minimalizacji kwadratowej funkcji kosztu ujętej w sensie warunkowej wartości oczekiwanej [1, 11]:

$$\min J = E[(x - \hat{x}_k)(x - \hat{x}_k)^T | Y_k], \quad (22)$$

gdzie  $x \in \mathbf{R}^n$  jest wektorem stanu systemu,  $\hat{x}_k \in \mathbf{R}^n$  jest estymatorem tego wektora oraz  $Y_k$  jest wektorem postaci  $[y(t_1), y(t_2), \dots, y(t_k)]^T$ , gdzie  $y(t_i) \in \mathbf{R}^p$  dla każdego  $i \in \{1 \dots k\}$  jest wektorem odpowiedzi systemu dyskretnego kolejnych chwil czasowych. Minimalizacja funkcji kosztu (22) prowadzi do [1]:

$$\hat{x}_k = E[x | Y_k], \quad (23)$$

Powyższy zapis wyznacza kierunek estymacji średnio kwadratowej, która uwzględnia zaistniałe zdarzenia związane z estymowanym parametrem.

W systemie zawieszania platformy proces przetwarzania oraz proces pomiarowy mogą być obciążone zakłóceniami, których źródłem może być praca silnika czy innych urządzeń znajdujących się w wyposażeniu pojazdu. Przyjęto, że rozważane zakłócenia stanowią biały szum o rozkładzie gaussowskim. Pozytywnie określona, stała w czasie, diagonalna macierz  $Q \in \mathbf{R}^{n \times n}$  jest macierzą kowariancji szumu przetwarzania  $w(t) \in \mathbf{R}^n$ , natomiast macierz  $R \in \mathbf{R}^{p \times p}$  spełniająca te same założenia jest macierzą kowariancji szumu pomiarowego  $v(t) \in \mathbf{R}^p$ . Model opisany równaniami (12) i (13) przy założeniu addytywności zakłóceń  $w(t)$  i  $v(t)$  ma teraz postać:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) + w(t), \quad (24)$$

$$y(t) = h(x(t)) + v(t). \quad (25)$$

Przyjmuje się, że  $E[w(t)] = 0$ ,  $E[v(t)] = 0$  oraz  $E[w(t)v(t)^T] = 0$ .

Implementacja dyskretnego, rozszerzonego filtru Kalmana w cyfrowej jednostce sterującej wymaga wyznaczenia dyskretnej postaci równań (25) i (26). Korzystając z definicji pochodnej, zakładając krok  $\Delta$  oraz, że  $t = t_k$  równania te przyjmują następującą formę:

$$x(t_{k+1}) = f(x(t_k), u(t_k)) \Delta + w(t_k) \Delta + x(t_k) \quad (26)$$

$$y(t_{k+1}) = h(x(t_{k+1})) + v(t_{k+1}) \quad (27)$$

Zapis (26) opisuje tak zwany dyskretny, wielowymiarowy proces losowy Gaussa – Markowa. Wektor  $w(t)$  jest wektorem losowym o rozkładzie gaussowskim skąd wyciągnąć można wniosek o tym, że (26) spełnia własność Gaussa. Własność Markowa wynika z

kolei z faktu, że stan systemu w chwili czasowej  $t_{k+1}$  zależy jedynie od stanu w chwili poprzedniej  $t_k$ .

Rozszerzony filtr Kalmana jest dwu etapowym algorytmem estymacji wektora stanu nieliniowego systemu dynamicznego. Idea tej metody polega na linearyzacji systemu nieliniowego w punkcie w przestrzeni stanów, którego współrzędne określają aktualne wartości estymatora a następnie wykorzystaniu zlinearyzowanego opisu do obliczenia kolejnej estymaty. Rozszerzony filtr Kalmana jest aproksymacją pierwszego rzędu filtru standardowego, gdyż linearyzacji systemu dokonuje się na podstawie rozwinięcia w szereg Taylora zachowując przy tym dokładność do pierwszej pochodnej włącznie. Proces estymacji, który wyznacza wzór (23), przebiega według [1]:

$$\hat{x}(t_{k+1}|t_k) = f(\hat{x}(t_k|t_k), u(t_k)) \Delta + \hat{x}(t_k|t_k), \quad (28)$$

$$P_{k+1|k} = A_k P_{k|k} A_k^T + Q, \quad (29)$$

$$K_{k+1} = P_{k+1|k} H_{k+1}^T [H_{k+1} P_{k+1|k} H_{k+1}^T + R]^{-1}, \quad (30)$$

$$\hat{x}(t_{k+1}|t_{k+1}) = \hat{x}(t_{k+1}|t_k) + K_{k+1} (y(t_{k+1}) - hxtk+1/tk), \quad (31)$$

$$P_{k+1|k+1} = [I - K_{k+1} H_{k+1}] P_{k+1|k} [I - K_{k+1} H_{k+1}]^T + K_{k+1} R K_{k+1}^T, \quad (32)$$

gdzie  $\hat{x}(t_{k+1}|t_k) \in \mathbf{R}^n$  i  $\hat{x}(t_{k+1}|t_k) \in \mathbf{R}^n$  to estymatory *a priori* oraz *a posteriori* wektora stanu skojarzone kolejno z fazą predykcji i korekcji. Z kolei  $P_{k+1|k} \in \mathbf{R}^{n \times n}$  i  $P_{k+1|k+1} \in \mathbf{R}^{n \times n}$  to macierze kowariancji błędów tych estymatorów. Macierz  $K_{k+1} \in \mathbf{R}^{n \times p}$  nazywana jest macierzą wzmocnień Kalmana. Macierz  $A_k \in \mathbf{R}^{n \times n}$  jest macierzą Jacobiego – pochodnych cząstkowych nieliniowej funkcji wektorowej (12) względem zmiennych stanu  $x$ , która dla systemu dyskretnego ma postać:

$$A_k = \left[ I + \Delta \cdot \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)_{(\hat{x}(t_{k+1}|t_k), u(t_k))} \right], \quad (33)$$

gdzie  $I \in \mathbf{R}^{n \times n}$  jest macierzą jednostkową. Ostatnia już macierz  $H_{k+1} \in \mathbf{R}^{p \times n}$  to macierz pochodnych funkcji  $h(x(t))$  względem wektora stanu  $x$ . Ponieważ równanie wyjścia układu ciągłego (13) jest liniowe to macierz ta nie zmienia swojej postaci:

$$H_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & +l_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & -l_7 & 0 \end{bmatrix} \quad (34)$$

Zmienne stanu modelu (12) platformy gąsienicowej 2S1 są estymowane zgodnie z algorytmem rozszerzonego filtru Kalmana. Niektóre z tych zmiennych wchodzi w zakres wielkości wejściowych algorytmu sterowania sky-hook, który opisują reguły (19) oraz (20). Stąd:

$$u_1 = \frac{\zeta_{sky} \sqrt{m_1 \sum_{i=1}^7 k_{1i} \dot{x}_{16} - \frac{2f_a}{\pi} \arctg(p(\dot{x}_2 - \dot{x}_{16} + l_1 \dot{x}_{18})) - c_a(\dot{x}_2 - \dot{x}_{16} + l_1 \dot{x}_{18})}}{\frac{2f_b}{\pi} \arctg(p(\dot{x}_2 - \dot{x}_{16} + l_1 \dot{x}_{18})) + c_b(\dot{x}_2 - \dot{x}_{16} + l_1 \dot{x}_{18})} \quad (35)$$

$$u_2 = \frac{\zeta_{sky} \sqrt{m_1 \sum_{i=1}^7 k_{1i} \dot{x}_{16} - \frac{2f_a}{\pi} \arctg(p(\dot{x}_{14} - \dot{x}_{16} - l_7 \dot{x}_{18})) - c_a(\dot{x}_{14} - \dot{x}_{16} - l_7 \dot{x}_{18})}}{\frac{2f_b}{\pi} \arctg(p(\dot{x}_{14} - \dot{x}_{16} - l_7 \dot{x}_{18})) + c_b(\dot{x}_{14} - \dot{x}_{16} - l_7 \dot{x}_{18})} \quad (36)$$

Strukturę systemu sterowania opartą na równaniach (35) oraz (36) przedstawiono na rys. 3.

4. BADANIA SYMULACYJNE

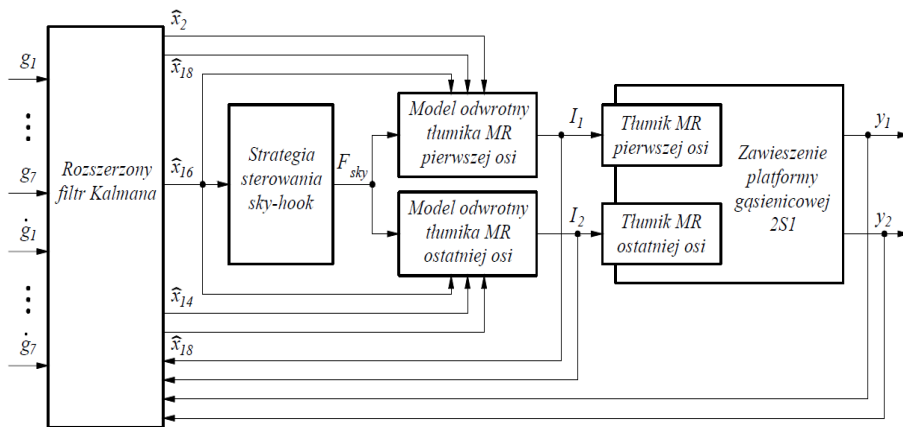
Założono, że podczas badań symulacyjnych, które przeprowadzono w środowisku MATLAB, połowkowy model układu zawieszenia platformy gaśnicowej 2S1 o strukturze semi-aktywnej w 1 [s] ruchu najjeżdża na przeszkodę o wysokości 0,1 [m]. Przyjęto, że pojazd przemieszcza się ze stałą prędkością równą 0,832 [m/s]. Badaniom poddany został pasywny system zawieszenia, czyli układ w którym wartości natężeń prądów przepływających przez uzwojenia sterujące tłumików magneto-reologicznych wynoszą 0 [A]. Tłumiki magneto-reologiczne działają w tym przypadku jak viskozne tłumiki drgań, których siła tłumienia zależy jedynie od prędkości względnych  $V_1$  (20) i  $V_7$  (21), masy resorowanej  $m_1$  i mas nieresorowanych  $m_{21}$  oraz  $m_{27}$ .

Badaniom symulacyjnym poddano model systemu zawieszenia w którym zastosowano strategię sterowania sky-hook zdefiniowaną przez równania (36) i (37). Tłumiki magneto-reologiczne generują siły na które wpływają wartości natężeń prądów przepływających

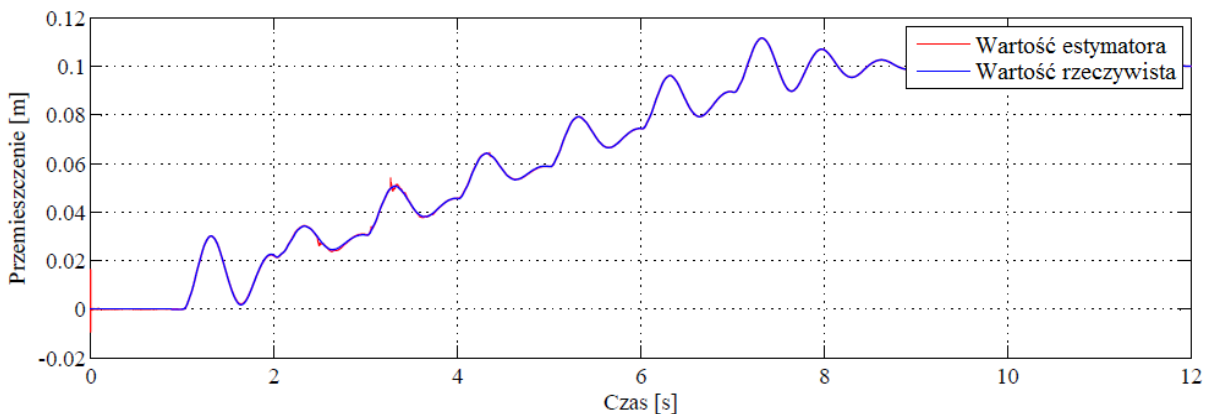
przez ich uzwojenia sterujące. Należy zaznaczyć, że w sterowanym systemie zawieszenia platformy gaśnicowej 2S1 założono obecność addytywnych zakłóceń procesu oraz pomiaru. Dyskretny w czasie algorytm rozszerzonego filtru Kalmana zastosowano jako estymator wektora stanu, mający w zamiarze pozwolić na minimalizację ich niekorzystnego wpływu.

Rys. 4 przedstawia przemieszczenie pionowe środka masy pojazdu gaśnicowego, którego semi-aktywne zawieszenie jest sterowane według strategii sky-hook. Wykres przedstawia wpływ rozszerzonego filtru Kalmana w systemie, w którym obecne są zakłócenia addytywne procesu i pomiaru. Przedstawia on również odpowiedź systemu, w którym algorytm ten nie został wykorzystany i w którym nie uwzględniono zakłóceń. Jak widać na rysunku przebiegi te wykazują wysoką zgodność.

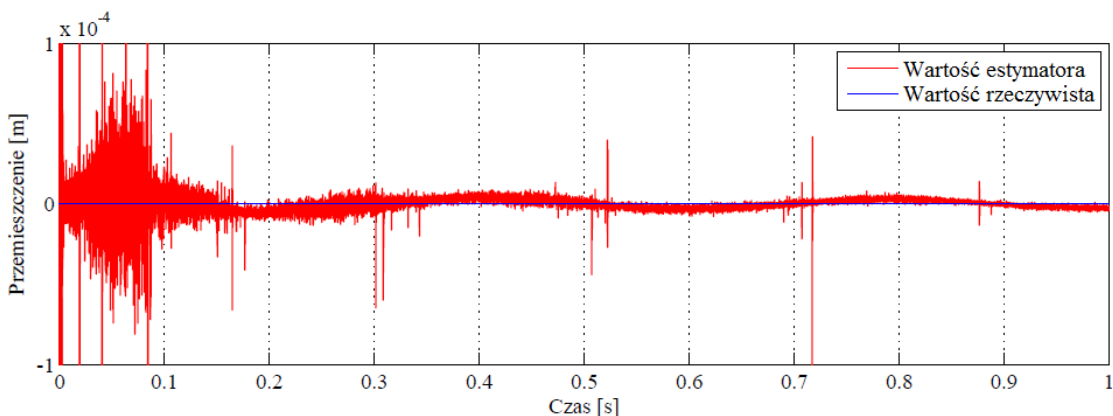
Przyjęto, że estymator a posteriori inicjalizujący algorytm rozszerzonego filtru Kalmana jest wektorem zerowym. Inicjalizacja algorytmu wymaga także założenia początkowej wartości macierzy błędu kowariancji tego estymatora. Macierz tą, przejęto jako ma-



Rys. 3. Model systemu sterowania zawieszeniem platformy gaśnicowej 2S1.



Rys. 4. Przemieszczenie środka masy kadłuba pojazdu gaśnicowego 2S1.



Rys. 5. Estymacja przemieszczenia środka masy kadłuba pojazdu gaśnicowego 2S1.

cierz jednostkową. Efektem jest nietypowe zachowanie estymowanych wielkości w początkowej fazie symulacji (Rys. 5). Estymator wektora stanu jest zmienną losową, której wartości zależą od macierzy kowariancji błędu estymatora a posteriori. Wzrost dokładności kolejnych przybliżeń wektora stanu jest efektem aktualizacji, w każdej z dyskretnych chwil czasowych, wartości elementów tej macierzy.

Rys. 6 stanowi porównanie przyspieszenia pionowego środka masy pojazdu gąsienicowego w systemie semi-aktywnym, sterowanym według ciągłej strategii sky-hook oraz w systemie pasywnym. Rys. 7 wyraża wpływ zaproponowanego układu sterowania na kąt przechyłu wzdłużnego kadłuba w stosunku do systemu pasywnego.

## PODSUMOWANIE

Na podstawie obserwacji estymowanych zmiennych stanu modelu systemu zawieszenia platformy gąsienicowej 2S1 można stwierdzić, że implementacja rozszerzonego filtra Kalmana zakończyła się sukcesem. Odtworzone zmienne  $\hat{x}_2$ ,  $\hat{x}_{14}$ ,  $\hat{x}_{16}$  oraz  $\hat{x}_{18}$  pozwoliły na skuteczne sterowanie systemem poprzez zastosowanie ciągłej strategii sterowania sky-hook.

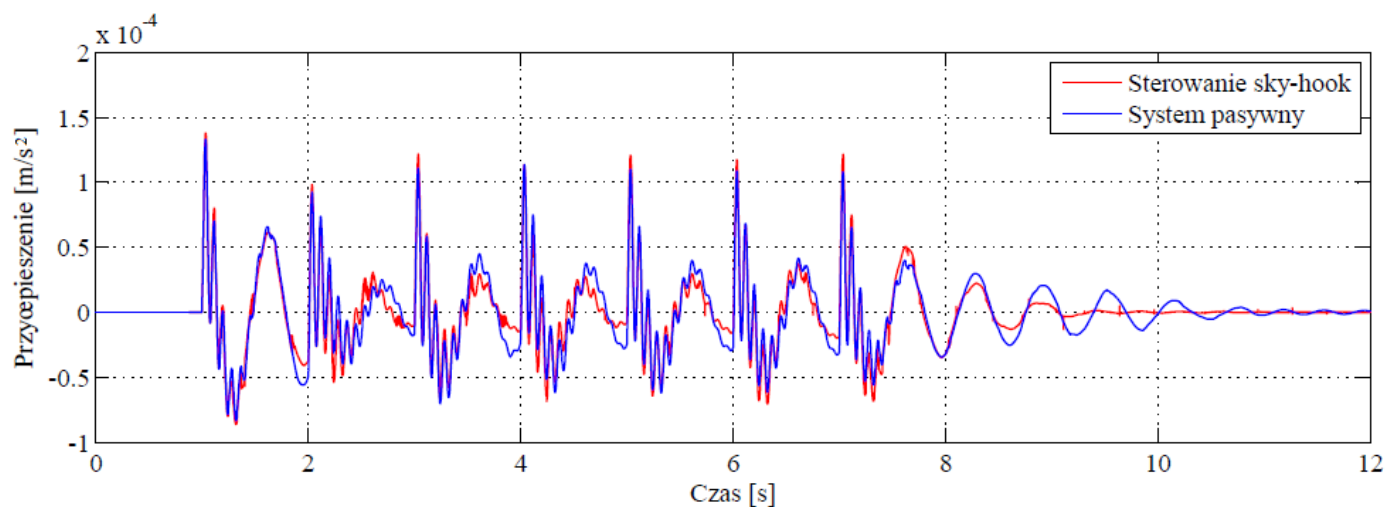
Zastosowanie estymatora wektora stanu w badanym systemie jest źródłem wielu ułatwień. Estymator eliminuje skomplikowany pomiar prędkości pionowej masy resorowanej, prędkości względnych masy resorowanej i mas nieresorowanych oraz prędkości kątowej przechyłu wzdłużnego kadłuba pojazdu. Ponadto, rozszerzony filtr Kalmana minimalizuje wpływ zakłóceń addytywnych nie wnosząc przy tym niekorzystnych opóźnień kątowych, jakie pojawia-

ją się w przypadku konwencjonalnych technik filtracji sygnałów, a więc podejść opierających się na zastosowaniu filtrów takich jak filtr Czebyszewa, filtr Butterwortha czy filtr Eliptyczny, mogących drastycznie pogorszyć jakość sterowania.

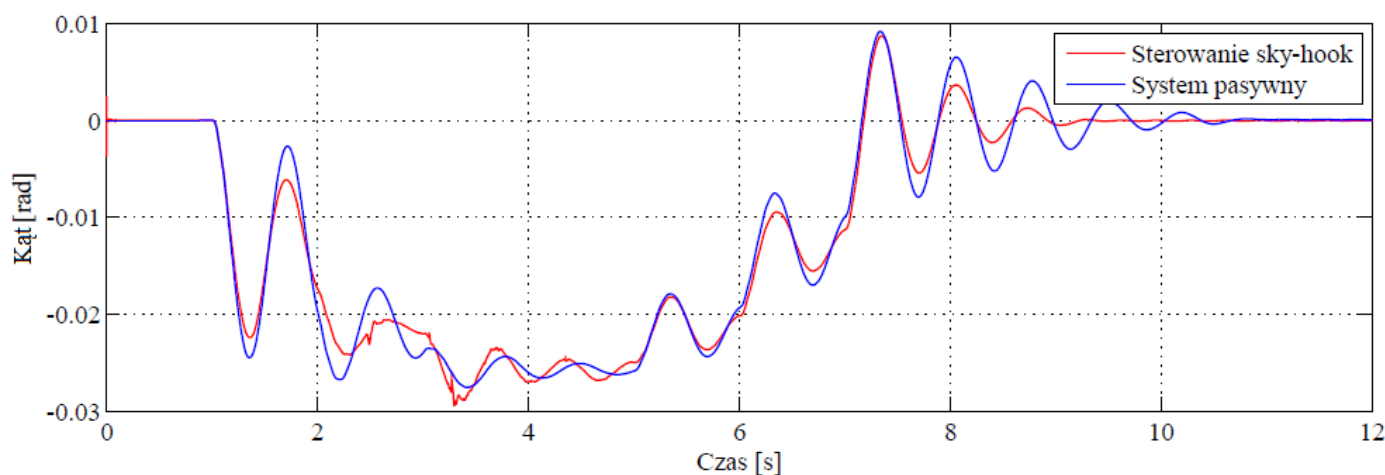
Otrzymane charakterystyki czasowe wskazują, że sterowanie sky-hook w systemie zawieszenia platformy gąsienicowej 2S1 pozwala na redukcję wartości amplitud zmiennych stanu oraz skracza czas ich ustalenia się na odpowiednich poziomach. Przyspieszenie pionowe masy resorowanej systemu semi-aktywnego w relacji do systemu pasywnego wskazuje wzrost komfortu jazdy. Ponadto, zaproponowana ciągła strategia sterowania sky-hook skutkuje poprawą reakcji kąta przechyłu wzdłużnego. Zachowanie wpłynąć może korzystnie na działanie układu stabilizacji armaty co w efekcie oznacza wzrost celności prowadzenia ognia.

## BIBLIOGRAFIA

1. JULIER, Simon J.; UHLMANN, Jeffrey K. Unscented filtering and nonlinear estimation. *Proceedings of the IEEE*, 2004, 92.3: 401-422.
2. JURKIEWICZ, Andrzej, et al. A new suspension system of an autonomous caterpillar platform. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2014, 52.4: 857-867.
3. JURKIEWICZ, Andrzej, et al. *Wybrane zagadnienia układów redukcji drgań i hałasu*. Katedra Automatykacji Procesów Akademii Górniczo-Hutniczej, 2014.
4. KARNOPP, Dean; CROSBY, Michael J.; HARWOOD, R. A. Vibration control using semi-active force generators. *Journal of*



Rys. 6. Przyspieszenie pionowe kadłuba pojazdu gąsienicowego 2S1.



Rys. 7. Kąt przechyłu wzdłużnego kadłuba pojazdu gąsienicowego 2S1.

- Manufacturing Science and Engineering*, 1974, 96.2: 619-626.
5. LINDGÄRDE, Olof. Kalman filtering in semi-active suspension control. In: *Proc. of 15th IFAC World Congress*. 2002. p. 1539-1544.
  6. MACHOCZEK, T.; MEŻYK, A. Sterowanie zawieszeniem pojazdu wielokółowego. *Przegląd Mechaniczny*, 2015, 1: 19-25.
  7. NABAGŁO, Tomasz, et al. Simulation of 2S1 tracked vehicle model with modernized suspension system during crossing a single obstacle. In: *Solid State Phenomena*. 2014. p. 140-147.
  8. RYBAK, Piotr, et al. Badania modelowe czołgu lekkiego na bazie wielozadaniowej platformy bojowej. *Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe*, 2011, 2 (28): 39-46.
  9. SANKARANARAYANAN, V., et al. Vehicle chassis control using adaptive semiactive suspension. In: *Proceedings of the 17th World Congress of the International Federation of Automatic Control*, Seoul. 2008. p. 4677-4682.
  10. SAPIŃSKI, BOGDAN.; JASTRZĘBSKI, ŁUKASZ; WĘGRZYŃSKI, MARCIN. Modelowanie samozasilającego się układu redukcji drgań. *Modelowanie Inżynierskie*, 2011, 10: 353-362.s
  11. SOUTO, Rodrigo Fontes; ISHIHARA, João Yoshiyuki; ARAUJO BORGES, G. A robust extended Kalman filter for discrete-time systems with uncertain dynamics, measurements and correlated noise. In: *American Control Conference*, 2009. ACC'09. IEEE, 2009. p. 1888-1893.
  12. SPENCER, B. F., et al. Phenomenological model for magnetorheological dampers. *Journal of engineering mechanics*, 1997, 123.3: 230-238.

## CONTROL OF THE 2S1 SEMIACTIVE TRACKED VEHICLE SUSPENSION SYSTEM

### *Abstract*

*In this article, the model of the 2S1 tracked suspension system has been formulated. The model contains two magnetorheological dampers. For the numerical studies in order to control, sky-hook strategy has been chosen. The control algorithm uses variables estimated by Extended Kalman Filter. In comparison to conventional solutions this approach allows for accurate estimation of state variables which describe suspension dynamics. Evaluation of control algorithm has been made by comparison of the displacement, angle and acceleration of vehicle, measured in the vertical direction.*

Autorzy:

dr inż. **Andrzej Jurkiewicz** – Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

dr inż. **Tomasz Nabaglio** – Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Wydział Mechaniczny, Al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków

mgr inż. **Kamil Zając** – Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków