

# Wykorzystanie narzędzi wielodomenowego modelowania układów fizycznych na przykładzie oceny stabilności naczepy typu wywrotka podczas jej rozładunku

## Application of multidomain physical systems modeling techniques for assessment of vehicle stability of tipper trailer during unloading

MICHAŁ KONTNY  
PIOTR KOWALSKI\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.3.29>

W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania metod symulacji wielodomenowych układów fizycznych na przykładzie naczepy typu wywrotka. Te metody pozwalają na przyspieszoną budowę modeli złożonych obiektów fizycznych. W niniejszym opracowaniu zaprezentowano fragment modelu stworzonego na potrzeby badania stabilności naczepy podczas rozładunku.

**SŁOWA KLUCZOWE:** wielodomenowe modelowanie układów fizycznych, CAE, stabilność pojazdów

*This paper presents the case of application of multidomain physical systems modelling techniques in the area of heavy transport vehicles. The presented techniques allow for faster developing of complex physical systems models. The paper presents portions of the model built for simulating the stability of semi-trailer dumper during tipping.*

**KEYWORDS:** multidomain physical systems modeling, CAE, vehicle stability

Naczepy typu wywrotka należą do podstawowych środków transportu materiałów sypkich. Są wykorzystywane m.in. do przewozu płodów rolnych, węgla oraz materiałów budowlanych. Rozładunek tego rodzaju naczepy odbywa się poprzez podniesienie skrzyni ładunkowej z użyciem siłownika hydraulicznego. Rozładunek wywrotki wymaga zachowania niezbędnych środków bezpieczeństwa: pojazd musi być ustawiony na równym oraz stabilnym gruncie, miechy zawieszenia pneumatycznego powinny zostać wypowietrzone, ciągnik siodłowy powinien być ustawiony w osi naczepy. Ważne jest również zapewnienie odpowiedniego ciśnienia w oponach. Niezachowanie środków ostrożności może doprowadzić do wybożenia, a w konsekwencji – do złamania siłownika hydraulicznego, utraty stabilności zespołu pojazdów i ich wywrócenia.

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie możliwości zastosowania metod symulacji wielodomenowych układów fizycznych do badania stabilności naczep typu wywrotka.

### Konstrukcja naczepy

Użytkowane na rynku europejskim naczepy siodłowe typu wywrotka na ogół są zbudowane ze stalowej ramy na bazie dwóch podłużnic. Skrzynia ładunkowa jest zamontowana przegubowo do tylnej części ramy. Podnoszenie skrzyni realizuje się za pomocą wielostopniowego siłownika hydraulicznego, łączącego przednią część ramy ze skrzynią ładunkową.

W przypadku wywrotek spotyka się dwa typy zawieszenia: pneumatyczne i mechaniczne. Najpowszechniejsze zastosowanie znajdują pojazdy z zawieszeniem pneumatycznym – to rozwiązanie jest preferowane również ze względu na mniejsze obciążenie infrastruktury drogowej.

Rozładunek jest realizowany z użyciem układu hydraulicznego.

### Model obiektu

Wierne odwzorowanie zachowania się pojazdu wymaga uwzględnienia:

- oddziaływania naczepy i ciągnika siodłowego,
- oddziaływania ładunku na naczepę,
- wzajemnego oddziaływania podukładów naczepy.

Jedną z możliwości odwzorowania pracy układów jest reprezentacja w postaci równań różniczkowych.

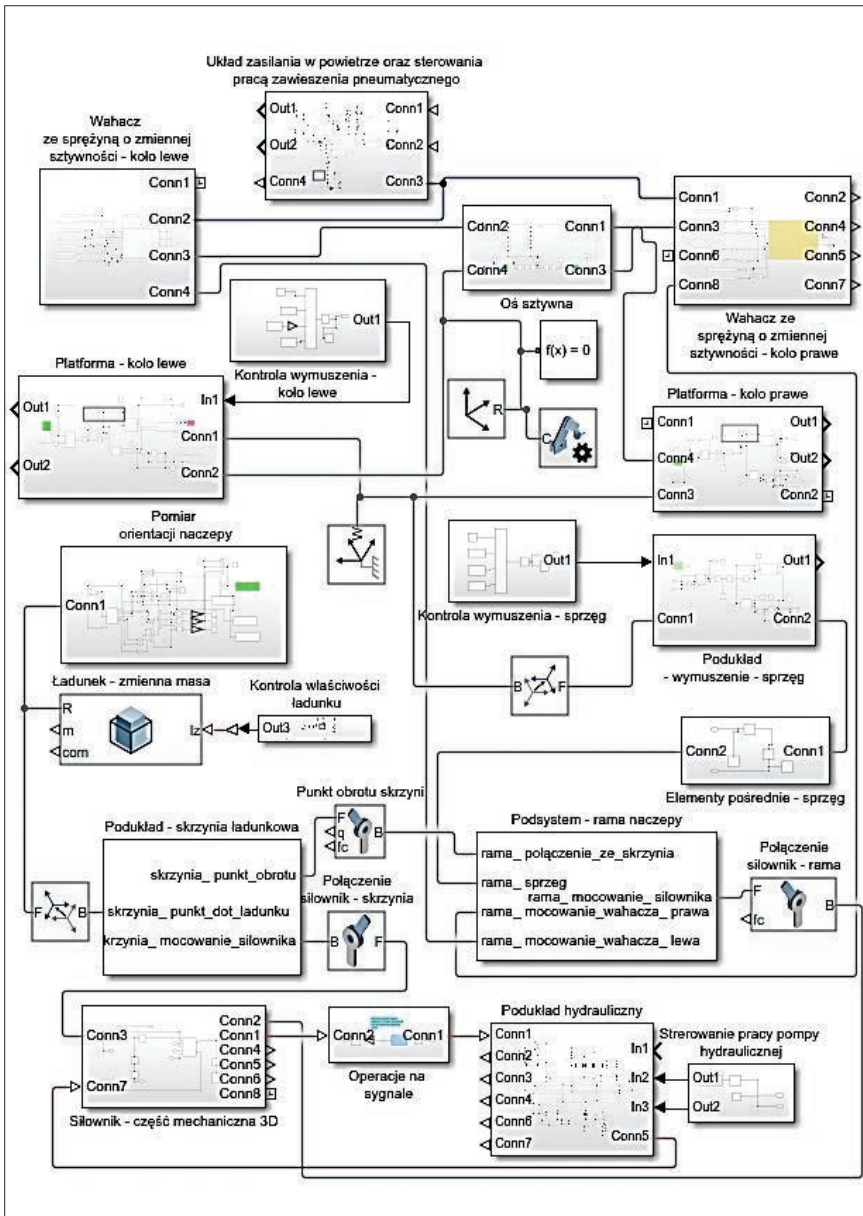
W pracy [1] przedstawiono model zawieszenia pneumatycznego wykorzystywany do badania wpływu zmiany obciążenia na pracę układu zawieszenia naczepy. Równania opisujące zachowanie się obiektu zostały wprowadzone z postaci geometrycznej układu oraz zależności fizycznych.

W przypadku złożonych układów opracowanie modelu za pomocą równań wiąże się z dużym nakładem pracy.

Jednym z narzędzi upraszczających proces modelowania i symulacji pracy układów jest program Simscape [2], dostępny jako moduł oprogramowania Matlab.

Simscape udostępnia zestaw bloczków reprezentujących elementy składowe rzeczywistych układów fizycznych. Poszczególne bloczki są łączone ze sobą za pomocą linii reprezentujących przepływ fizycznego sygnału. Oprogramowanie umożliwia również import zewnętrznej geometrii obiektów.

\* Mgr inż. Michał Kontny (michal.kontny@polsl.pl) – Wydział Mechaniczny Technologiczny Politechniki Śląskiej; mgr inż. Piotr Kowalski (pk1977@o2.pl)



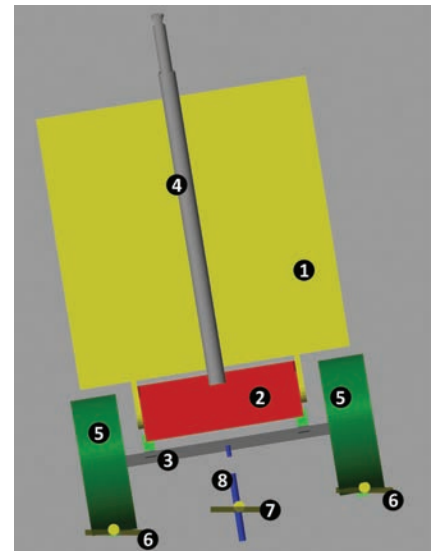
Rys. 1. Schemat blokowy modelu naczepy opracowanego w oprogramowaniu Simscape – ujęcie wysokopoziomowe

Na rys. 1 zaprezentowano schemat blokowy modelu opracowanego na potrzeby badania stabilności wywrotki. Na schemacie widoczne są podukłady obejmujące poszczególne podzespoły naczepy oraz odpowiedzialne za wprowadzanie wymuszeń do układu.

### Geometria obiektu

Na potrzeby badań zdecydowano się na zastosowanie uproszczonej reprezentacji postaci geometrycznej naczepy (rys. 2). Główne elementy – takie jak: skrzynia ładunkowa, rama, siłownik oraz pojedyncza oś sztywna z wahaczami – zamodelowano w zewnętrznym oprogramowaniu CAD. Opracowaną w ten sposób geometrię zaimportowano do programu Simscape.

Do zdefiniowania połączeń ruchowych wykorzystano opcje dostępne w programie Simscape (program oferuje szeroki wachlarz połączeń o różnych stopniach swobody, od najprostszych połączeń sworzniowych do połączeń typu gimbal, a ponadto umożliwia określenie parametrów charakterystycznych dla konkretnego połączenia, np. sztywności czy tłumienia).

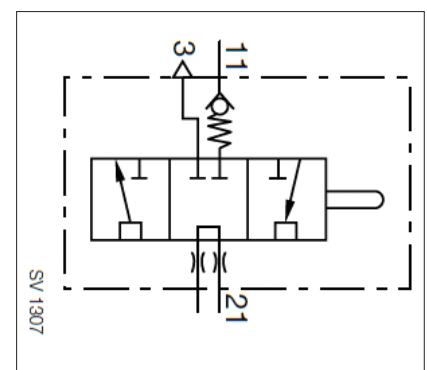


Rys. 2. Widok postaci geometrycznej uproszczonego modelu naczepy wygenerowany w przeglądarce „Mechanic Explorer” programu Simscape: 1 – skrzynia ładunkowa, 2 – rama naczepy, 3 – oś sztywna z wahaczami, 4 – siłownik hydrauliczny, 5 – koła, 6 i 7 – platformy wykorzystywane do realizacji wymuszenia kinematycznego (platformy 6 odpowiadają za koła, a platforma 7 odpowiada za część podsiłową naczepy), 8 – symboliczna reprezentacja oddziaływania naczepa-ciągnik

### Układ pneumatyczny

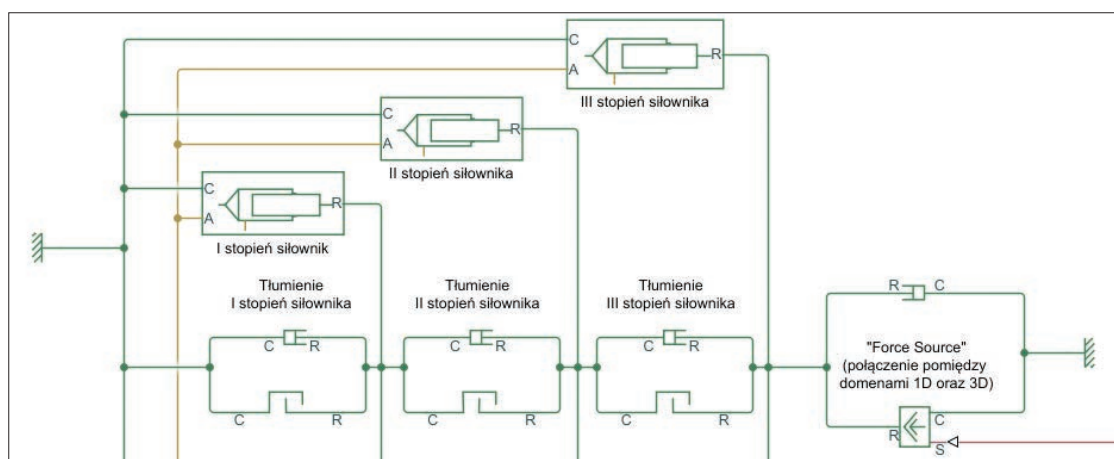
Sprężone powietrze jest w naczepie wykorzystywane jako medium robocze w układach hamulcowym i zawieszenia. Sprężone powietrze jest wytwarzane w ciągniku i przekazywane do naczepy przewodami pneumatycznymi. W przygotowanym modelu uwzględniono jedynie część związaną z pneumatycznym układem zawieszenia. Opracowano model sprężyny pneumatycznej o nieliniowej charakterystyce (tj. uwzględniono zmianę jej efektywnej powierzchni w zależności od wysunięcia).

W rzeczywistych naczepach regulacja wysokości pracy naczepy w czasie jazdy jest realizowana za pomocą zaworu wysokości jazdy (rys. 3). Umożliwia to zachowanie wymaganej pozycji przy różnym obciążeniu naczepy, bez względu na stopień załadowania. W przypadku omawianego modelu zastosowano mechanizm pozwalający na regulację dopływu powietrza do miechów w zależności od chwilowego położenia zawieszenia.



Rys. 3. Jedna z możliwych wersji wykonania zaworu poziomu zawieszenia pneumatycznego: port 21 – poduszki zawieszenia pneumatycznego, port 11 – zasilanie, port 3 – wypowietrzenie

Rys. 4. Fragment schematu modelu układu hydraulicznego odpowiadającego za podniesienie skrzyni ładunkowej



## Układ hydrauliczny

Podobnie jak w przypadku zasilania powietrzem zasilanie układu hydraulicznego odbywa się z poziomu ciągnika siodłowego. W modelu zaimplementowano układ odpowiadający za sterowanie pracą pompy hydraulicznej. Olej pod ciśnieniem jest podawany na trójstopniowy siłownik hydrauliczny. Na rys. 4 przedstawiono fragment układu hydraulicznego realizującego podniesienie skrzyni ładunkowej.

Bloczki dostępne w oprogramowaniu Simscape przynależą do tzw. domen. Przy budowie modelu wykorzystano domeny: mechaniczną, hydrauliczną oraz pneumatyczną. Do opracowania modelu siłownika użyto bloków typu „Translational Hydro-Mechanical Converter” (I, II i III stopień siłownika na rys. 4), łączących domenę mechaniczną (linie koloru zielonego) i hydrauliczną (kolor żółty). Wprowadzono możliwość sterowania pracą układu hydraulicznego.

## Reprezentacja ładunku

Kluczowy wpływ na stabilność naczepy ma położenie środka ciężkości ładunku. W omawianym modelu oddziaływanie ładunku na naczepę zrealizowano za pomocą elementu „Variable Mass”, dostępnego w oprogramowaniu Simscape. Możliwe jest zamodelowanie zmian wartości masy oraz położenia środka ciężkości ładunku w miarę postępu rozładunku. Właściwości fizyczne ładunku są opisane takimi parametrami, jak: początkowa objętość, gęstość i kąt naturalnego usypu [4]. Ponadto możliwe jest zasymulowanie skokowego zsypanywania się ładunku (np. podczas rozładunku materiałów mokrych lub zakleszczających się w skrzyni ładunkowej).

## Wymuszenia

Opracowano mechanizm pozwalający na odwzorowanie nierówności terenu, po którym porusza się naczepa. Wykorzystano trzy niezależnie sterowane platformy, pozwalające na podniesienie: koła lewego, koła prawego oraz płyty podsiodłowej. Zastosowane oprogramowanie umożliwia wprowadzanie dowolnych wymuszeń układu.

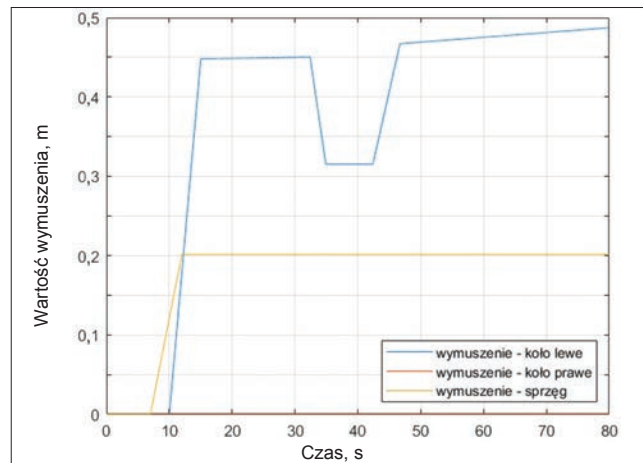
## Symulacja

Przeprowadzono symulację zachowania się naczepy podczas rozładunku w sytuacji niewystarczającego ciśnienia w prawym kole. Do reprezentacji opony zastosowano uproszczony model w postaci sprężyny o określonej

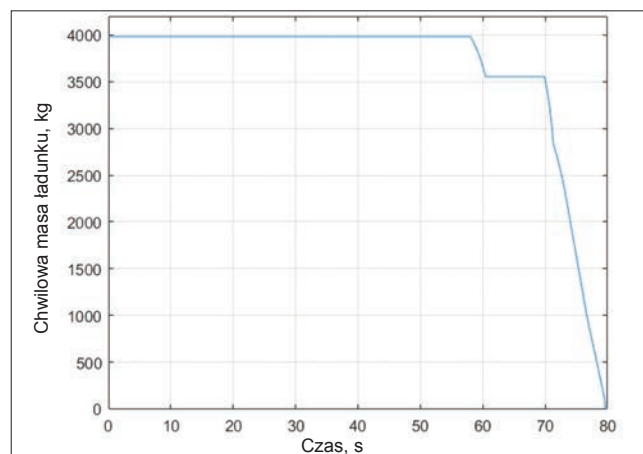
sztwywności [5]. Współczynnik sztywności opony jest uzależniony od ciśnienia powietrza w jej wnętrzu [6], więc dla koła o mniejszym ciśnieniu przyjęto zmniejszony współczynnik sztywności.

Naczepa została ustawiona w jednej osi z reprezentacją ciągnika siodłowego, zawieszenie zostało wypowietrzone. Na rys. 5 przedstawiono przebieg wymuszeń kinematycznych odpowiadających jeździe po nierównym podłożu. Przemieszczanie zestawu podczas wyładunku jest praktyką niezalecaną, jednak często spotykaną.

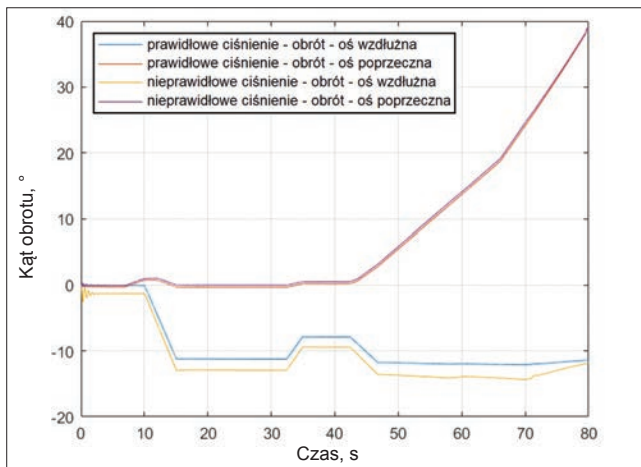
Na rys. 6 pokazano chwilową masę ładunku w funkcji czasu. Podnoszenie skrzyni rozpoczyna się w 40. sekundzie symulacji, jednak ładunek zaczyna się zsypanywać później – zgodnie z przyjętym scenariuszem. Odpowiada to zsypanywaniu się ładunku porcjami.



Rys. 5. Przebieg wymuszeń kinematycznych w czasie



Rys. 6. Chwilowa masa ładunku pozostającego na wywrotce



Rys. 7. Wykres przechylenia skrzyni wywrotki

Na rys. 7 zaprezentowano kąt przechylenia skrzyni wywrotki (zmierzony w globalnym układzie współrzędnych) podczas rozładunku dla dwóch przypadków: dla prawidłowego ciśnienia w obydwu oponach oraz dla obniżonego ciśnienia po jednej stronie naczepy. Jak widać, przy nieprawidłowym ciśnieniu w kołach występuje większe boczne przechylenie naczepy (obróć względem osi wzdłużnej), co wpływa na zmniejszenie stabilności pojazdu.

## Podsumowanie

Wykorzystanie narzędzi wielodomenowego modelowania obiektów przyspiesza budowę modeli złożonych układów fizycznych. Prezentowana metoda obejmuje zaimportowanie zewnętrznej geometrii, odwzorowanie połączeń pomiędzy elementami oraz płynne połączenie podukładów (mechanicznego, pneumatycznego, hydraulicznego, sterowania i in.).

Przy dodawaniu kolejnych elementów rozbudowanych modeli zaleca się bieżącą kontrolę poprawności działania modelu. Ważne jest trafne dobranie takich parametrów, jak sztywność i tłumienie połączenia ruchowego. Zbyt duże przeszczywnienie modelu może doprowadzić do błędów numerycznych lub znacznego wydłużenia czasu symulacji.

W rozpatrywanym przypadku potwierdzono przydatność opracowanego modelu do symulacji wpływu nieprawidłowego ciśnienia w kołach na stabilność wywrotki. Model zawiera wszystkie główne układy naczepy, co pozwala na symulację pracy i ewentualnych niesprawności układu hydraulicznego lub pneumatycznego. Ze względu na złożoność obliczeniową model został przedstawiony w postaci uproszczonej – na potrzeby dokładniejszych analiz należałoby ten model uszczegółowić, m.in. przez wierniejsze odwzorowanie geometrii czy uzupełnienie go o dodatkowe osie. Geometrię układu mechanicznego przedstawiono za pomocą brył sztywnych, zatem pominięto zjawiska związane z odkształceniami elementów naczepy.

## LITERATURA

1. Czarnuch A., Lisowski E. "Studies of truck semitrailer stability during loading and unloading". *Mechanika*. 1 (2017): s. 21–28.
2. Matlab Simulink Simscape. <https://uk.mathworks.com/products/simscape.html>.
3. Knorr Bremse. "Product Data. SV13... SV14... Levelling Valves". 2011.
4. Antoniuk J. „Przenośniki taśmowe w górnictwie podziemnym i odkrywkowym”. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2007.
5. Tandela A. i in. "Modeling, Analysis and PID Controller Implementation on Double Wishbone". *12th Global Congress on Manufacturing and Management, GCMM 2014*, s. 1274–1281.
6. Kulikowski K., Szpica D. "Determination of directional stiffnesses of vehicles' tires under a static load operation". *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*. 16 (2014): s. 66–72. ■