

TOMASZ GOIK, MAREK KSIĄŻEK, JANUSZ TARNOWSKI\*

## ANALIZA PRZYSPIESZEŃ I JERKÓW PASAŻERA W CZASIE JAZDY ROLLERCOASTEREM

---

### ROLLER COASTER USER, ACCELERATION AND JERK'S ANALYSIS

#### Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów na obiekcie rzeczywistym oraz analizy przyspieszeń i jerków oddziałujących na pasażera – użytkownika rollercoastera.

Określono zagrożenia, z jakimi może się spotkać użytkownik tego typu urządzenia oraz zwrócono uwagę na problemy, z jakimi spotka się i jakie niebezpieczeństwa powinien uwzględnić projektant rollercoastera.

*Słowa kluczowe: rollercoaster, jerk, przyspieszenie, analiza*

#### Abstract

The paper summarizes real roller coaster user acceleration and jerk analysis. The paper shows main threats and problems of roller coaster passenger health which designer should take into consideration.

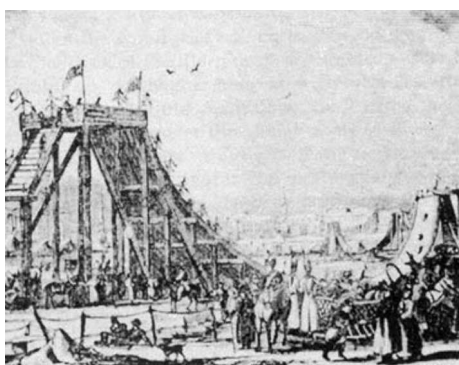
*Keywords: roller coaster, jerk, acceleration, analysis*

---

\* Dr inż. Tomasz Goik, prof. dr hab. inż. Marek Książek, dr inż. Janusz Tarnowski, Katedra Dynamiki Układów Materialnych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

## 1. Wstęp

Rollercoastery są obecnie bardzo popularnymi urządzeniami wykorzystywanymi w różnorodnych parkach rozrywki. Ich historia rozpoczęła się w Rosji [9] w okolicach Sankt Petersburga i datuje się na XVII wiek, kiedy to zbudowano ślizgi lodowe o wysokościach 21 m i 24 m z 50-stopniowym spadkiem (rys. 1). Budowla ta opierała się na lodowych blokach podpartych drewnianą konstrukcją zwaną rosyjską górą. Nazwa ta stała się w późniejszym czasie określeniem jednego z wielu typów kolejek górskich.



Rys. 1. Rosyjskie ślizgi lodowe, 1650

Fig. 1. Russian Ice Slides, 1650



Rys. 2. *Top Thrill Dragster*, 2003

Fig. 2. *Top Thrill Dragster*, 2003

Od tego czasu zbudowano dziesiątki tego typu urządzeń, wykorzystując najnowocześniejsze rozwiązania technologiczne i stosując coraz bardziej fantazyjne rodzaje torów, wózków i sposobów zamocowania pasażera [6, 7].

Wprowadzanie coraz to bardziej nowatorskich ewolucji wykonywanych przez rollercoastery, a *de facto* przez ich użytkowników, powoduje, że organizmy pasażerów wystawiane są na coraz większe zmiany przyspieszeń, sił i prędkości. Jako przykład wystarczy wymienić oddany do użytku w 2002 r. Colossus rollercoaster typu „lift hill” o wysokości 30 m, spadku 29 m, długości 850 m i maksymalnej prędkości 72 km/h charakteryzujący się aż 10 inwersjami, hydraulicznie wystrzeliwany Top Thrill Dragster (rys. 2) otwarty do użytku w 2003 r. (wysokość 130 m, spadek 120 m, długość 850 m i maksymalna prędkość 190 km/h), który wprawdzie nie ma żadnych inwersji, ale charakteryzuje się zmianą prędkości od 0 do 190 km/h w czasie 3,8 s. Podobnie oddany do użytku w 2010 r. Itimidator 305 typu „lift hill” o wysokości 93 m, spadku 91 m, długości 1600 m bez inwersji, ale z maksymalnym 85-stopniowym kontem spadku długości 91 m rozpędzający się do 140 km/h [6, 8].

Na pasażera tego typu urządzenia działają szybkozmienne siły, które mogą powodować uczucie dyskomfortu, a w skrajnych przypadkach trwałe uszkodzenia organów, kalectwo, a nawet śmierć. Ponieważ organizm ludzki potrzebuje czasu na adaptację do warunków, podczas projektowania tego typu urządzeń przyjęto, że dopuszczalne są przyspieszenia pionowe dociążające w zakresie od 4 do 6 g ( $\sim 39,24\text{--}58,86\text{ m/s}^2$ ), pionowe odciążające w zakresie od 1,5 do 2 g ( $\sim 14,72\text{--}19,62\text{ m/s}^2$ ) [6].

Przeciążenia boczne powinny być utrzymywane na minimalnych poziomach (brak konkretnych wartości dopuszczalnych przyjętych w tego typu urządzeniach) przez stosowanie pochyłych zakrzywień toru, należy jednak pamiętać o braku odporności ludzkiego karku na działanie sił bocznych, a co za tym idzie ryzyku uszkodzenia odcinka szyjnego kręgosłupa, co prowadzi do ograniczenia wartości przyspieszeń bocznych poniżej 1,8 g.

Teoretycznie poruszanie się w powyższych granicach przyspieszeń dla większości ludzi nie będzie powodowało szkodliwych efektów ubocznych korzystania z kolejek typu rollercoaster, jakkolwiek dowiedziono, że zmiany przyspieszeń i ich typów mogą powodować uszkodzenia mózgu i nienaturalną pracę serca.

## 2. Obiekt badań

Do badań wybrano największy w Polsce rollercoaster Tornado firmy Soquet przedstawiony na rysunku 3, charakteryzujący się następującymi parametrami technicznymi: wysokość 21 m, prędkość maksymalna ~60 km/h, maksymalne przeciążenie ~4 G, 2 inwersje. Tor rollercoastera Tornado zawiera dwie pętle w kształcie okręgów w płaszczyźnie pionowej oraz kilka pętli i zakrzywień toru w płaszczyźnie poziomej i zbliżonej do poziomej. W trakcie badań uwzględniono szczególnie tę jego część, w której użytkownicy poddawani są największym przeciążeniom – pętle pionowe.



Rys. 3. Obiekt badań roller coaster Tornado firmy Soquet

Fig. 3. Tested object – roller coaster Tornado, Soquet

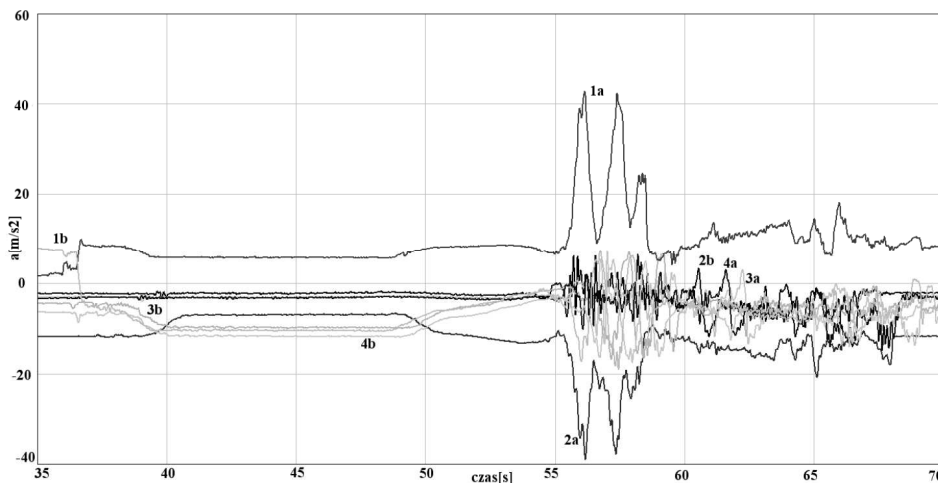
### 3. Pomiary i analiza wyników

W czasie badań dokonano pomiarów przyspieszenia pasażera kolejki podczas wykonywania głównych ewolucji, wykorzystując dwuosiowy akcelerometr pojemnościowy ADXL 202 (Analog Devices USA) wraz z osprzętem i oprogramowaniem, komputer pomiarowy, kamerę cyfrową i odbiornik GPS.

Akcelerometr wraz z układem akwizycji danych został zamocowany na kolanach pasażera urządzenia siedzącego w pierwszym wagoniku zestawu w pozycji narzuconej przez konstruktorów rollercoastera zabezpieczeniami fabrycznymi. Podczas kolejnych przejazdów była zmieniana pozycja akcelerometru, tak by zarejestrować wszystkie składowe przyspieszenia. Główne ewolucje pasażera podczas kolejnych przejazdów były rejestrowane kamerą cyfrową. Odbiornik GPS pozwolił na pozycjonowanie obiektu w czasie pomiarów.

Pomiary wykonano podczas pięciu kolejnych przejazdów. Po wykonaniu pomiarów została przeprowadzona analiza komputerowa wyników, w tym analiza numeryczna zarejestrowanych obrazów ruchu. Do analizy ruchu wykorzystano pakiet WinAnalyze (Mikromak Niemcy) umożliwiający kalibrację i automatyczne śledzenie ruchu wybranych punktów obrazu oraz D-Plot 2.2.7 (HydeSoft USA) pozwalający m.in. na różniczkowanie numeryczne. Na rysunku 3 przedstawiono okno analizy ruchu punktu zaznaczonego na wagoniku kolejki.

Analiza pozwoliła na ocenę przyspieszenia, jakiemu podlega pasażer, pochodnych tego przyspieszenia (jerk), a także na oszacowanie wibracji, do jakich dochodzi podczas „wężykowania” wagonika kolejki po torze oraz sił oddziaływujących na pasażera.

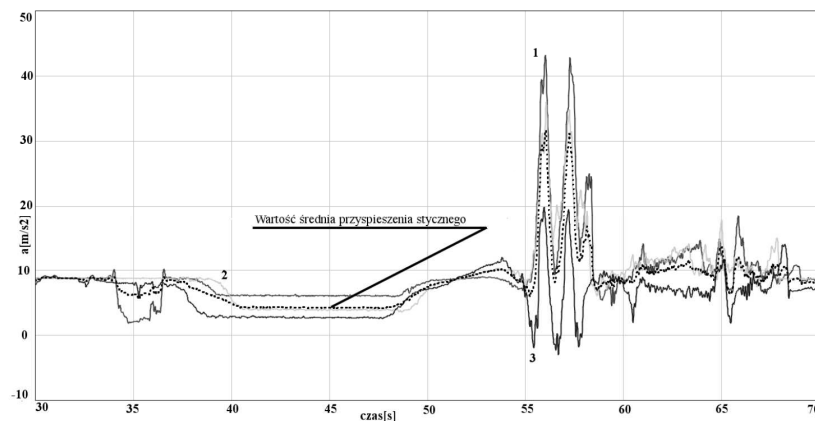


Rys. 4. Zestawienie przyspieszeń normalnych (indeks b) i stycznych (indeks a) zmierzonych podczas czterech przejazdów pomiarowych

Fig. 4. Normal (b index) and tangent (a index) acceleration measured during four test drives

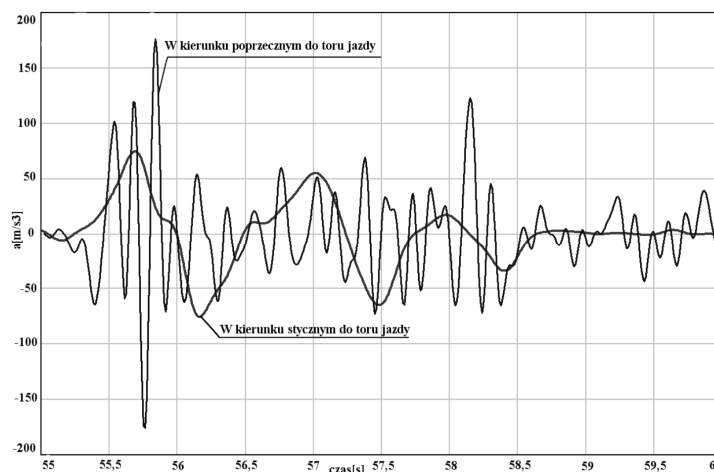
Na rysunku 4 przedstawiono przebiegi czasowe przyspieszeń zmierzone akcelerometrem podczas wykonywania głównej ewolucji dla czterech przejazdów pomiarowych.

Wartości przyspieszeń w kierunku stycznym do toru jazdy osiągały maksymalnie  $44 \text{ m/s}^2$ , a średnia zmiana przyspieszenia w czasie wykonywania ewolucji wynosiła  $25 \text{ m/s}^2$ . Szczególnie interesujące okazały się wyniki analizy zmian pochodnej przyspieszenia (jerk) oddziałującego na pasażera. Pochodna przyspieszenia w kierunku normalnym wynosiła maksymalnie  $75 \text{ m/s}^3$ , natomiast pochodna przyspieszenia w kierunku poprzecznym osiągała wartość  $182 \text{ m/s}^3$ . Na rys. 5 zestawiono przebiegi czasowe zmierzonych przyspieszeń stycznych.



Rys. 5. Przyspieszenie zmierzone w kierunku stycznym do toru jazdy podczas kolejnych przejazdów pomiarowych (wykresy 1, 2, 3) oraz wartość średnia przyspieszenia stycznego (linia punktowa)

Fig. 5. Tangent acceleration measured during test drives (line 1, 2, 3) and average tangent acceleration (dot line)



Rys. 6. Pochodna przyspieszenia (jerk) w kierunku stycznym i poprzecznym do toru jazdy mierzona podczas wykonywania ewolucji podwójnej pętli

Fig. 6. Normal and tangent jerk measured during main evolutions (in loops)

Na rysunku 6 przedstawiono uzyskane po różniczkowaniu numerycznym przebiegi czasowe pochodnej przyspieszenia w kierunkach stycznym i poprzecznym do kierunku jazdy. Wartości pochodnej przyspieszenia (jerk) podczas wykonywania głównych ewolucji są szczególnie wysokie w kierunku poprzecznym do toru jazdy  $182 \text{ m/s}^3$ . Można się spodziewać, że jest to związane z „wężykowaniem” wagonika po torze. Może to stanowić istotne zagrożenie dla pasażera i powinno stać się przedmiotem dodatkowych badań i ewentualnych zmian konstrukcyjnych urządzenia.

#### 4. Wnioski

Wyniki obliczonych wartości pochodnej przyspieszenia względem czasu (jerk) w kierunku stycznym ( $75 \text{ m/s}^3$ ) i poprzecznym ( $182 \text{ m/s}^3$ ) są niepokojące, na pasażera oddziałują duże wartości tej wielkości podczas prawie całego przejazdu. Należy tu zwrócić uwagę na szczególnie wysokie wartości pojawiające się w kierunku poprzecznym i to nie tylko podczas wykonywania głównych ewolucji w płaszczyźnie pionowej, ale także w płaszczyznach poziomych i zbliżonych do poziomych. Istotny wpływ na tak wysokie wartości może mieć wykonanie i utrzymanie samego toru, po którym poruszają się wagoniki – powinno to naszym zdaniem stanowić przedmiot odrębnych badań.

Istotnym skutkiem tak wysokich przyrostów pochodnej przyspieszenia są wysokie wartości przyrostów siły działającej na klienta kolejki.

Sytuacja taka zmusza do zadawania sobie pytań o granice bezpieczeństwa, konieczność poddawania zwykłych ludzi takim siłom, przyspieszeniom i zmianom przyspieszeń oraz ewentualnym restrykcjom, jakie powinny być narzucone użytkownikom, a przede wszystkim inżynierom projektującym urządzenia typu rollercoaster (brak norm ściśle określających bezpieczne wartości jerków), tak aby zabawa nie stała się dosłownie grą w rosyjską ruletkę o zdrowie i życie ludzkie.

#### Literatura

- [1] Sprott J.C., *Chaos and Time-Series Analysis*, Oxford University Press, 2003.
- [2] Sprott J.C., *Some simple chaotic jerk functions (PDF)*, Am J Phys 65 (6): 537-43. doi:10.1119/1.18585, Retrieved 28.09.2008.
- [3] Blair G., *Making the Cam (PDF)*, Race Engine Technology (010), Retrieved 29.09.2008.
- [4] PN-N-01354:1991, PN-91/N-01354, PN-91/N-01353
- [5] Raport M-1/583/2009
- [6] <http://en.wikipedia.org/>
- [7] <http://www.personal.psu.edu/faculty/v/a/vac3/table.html>
- [8] <http://rcdb.com>
- [9] <http://www.ultimaterollercoaster.com>
- [10] AS 3533-1-2009, AS 3533-2-2009.