

Karol Bryk, Marek Dudzik, Jakub Ingot, Wiesław Jakubas

Analiza stabilności lokomotywy EP09 - prędkość krytyczna pojazdu

Ideą pracy badawczej była analiza wybranych właściwości mechanicznych lokomotywy EP09. Za główny cel artykułu obrano analizę stabilności lokomotywy EP09, poprzez określenie prędkości krytycznej pojazdu. W tym celu w powyższej publikacji opisano w jaki sposób został zamodelowany układ obliczeniowy, jakie parametry i założenia zostały przyjęte do przeprowadzenia symulacji oraz zaprezentowano końcowe wyniki na podstawie których określono prędkość krytyczną pojazdu. Aby wyniki symulacji były w jak największym stopniu tożsame z wynikami rzeczywistymi, do stworzenia modeli symulacyjnych lokomotywy oraz wózka wykorzystano materiały i wyniki badań uzyskane z Instytutu Pojazdów Szynowych Tabor w Poznaniu. Większość obliczeń została wykonana w programie SIMPAK. W wyniku przeprowadzonej symulacji i analizy uzyskanych wyników określona została prędkość krytyczna lokomotywy EP09, przy której pojazd traci stabilność ruchu.

Słowa kluczowe: lokomotywa EP09, stabilność, analiza stabilności, prędkość krytyczna.

Opis lokomotywy EP09

Konstrukcja lokomotywy elektryczno-pasażerskiej 104 E została wykonana w latach 1979-1980, przy udziale Instytutu Taboru Kolejowego w Nowoczersku. Na PKP otrzymała ona oznaczenie EP09. Na przełomie 1986 i 1987 roku w Fabryce Wagonów „Pa-

fawag” został zbudowany pierwszy prototypowy egzemplarz tej lokomotywy.

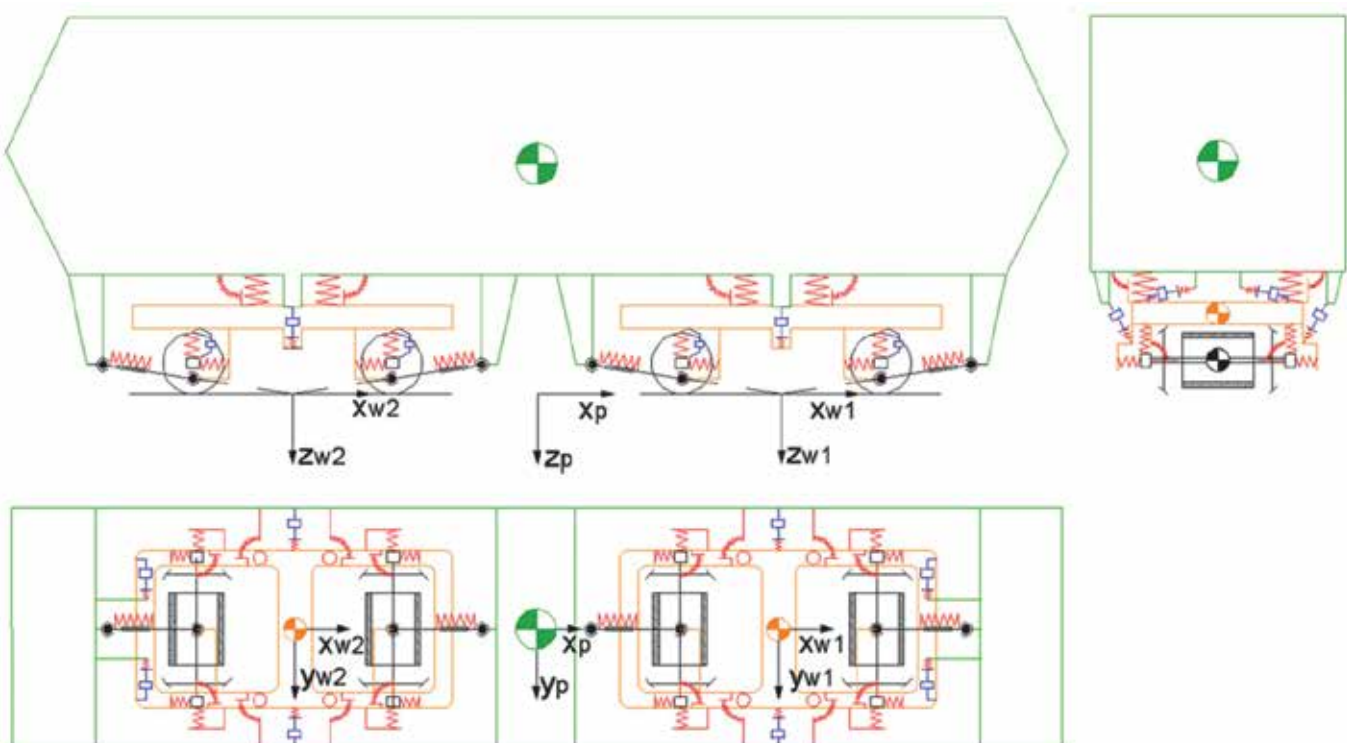
W latach 1986-1997 Wrocławski „Pafawag” dostarczył Polskim Kolejom Państwowym w sumie 47 sztuk lokomotyw tej serii. Lokomotywy te do dnia dzisiejszego stanowią zasadniczą grupę jednostek przeznaczonych do prowadzenia pociągów z prędkością 160 km/h w taborze kolejowym PKP Intercity.

Opisywana lokomotywa posiada cechę charakterystyczną, która nie była zamierzeniem ani jej konstruktorów i ani jej projektantów. Cecha ta jest zauważalna podczas jazdy z prędkością z prędkością około 120 km/h w pierwszym i drugim wagonie za lokomotywą. W okolicznościach tych odczuwalne jest charakterystyczne mało komfortowe impulsowe szarpanie. Jest ono wynikiem źle rozwiązanego układu przeniesienia siły trakcyjnej z wózka na pudło lokomotywy.

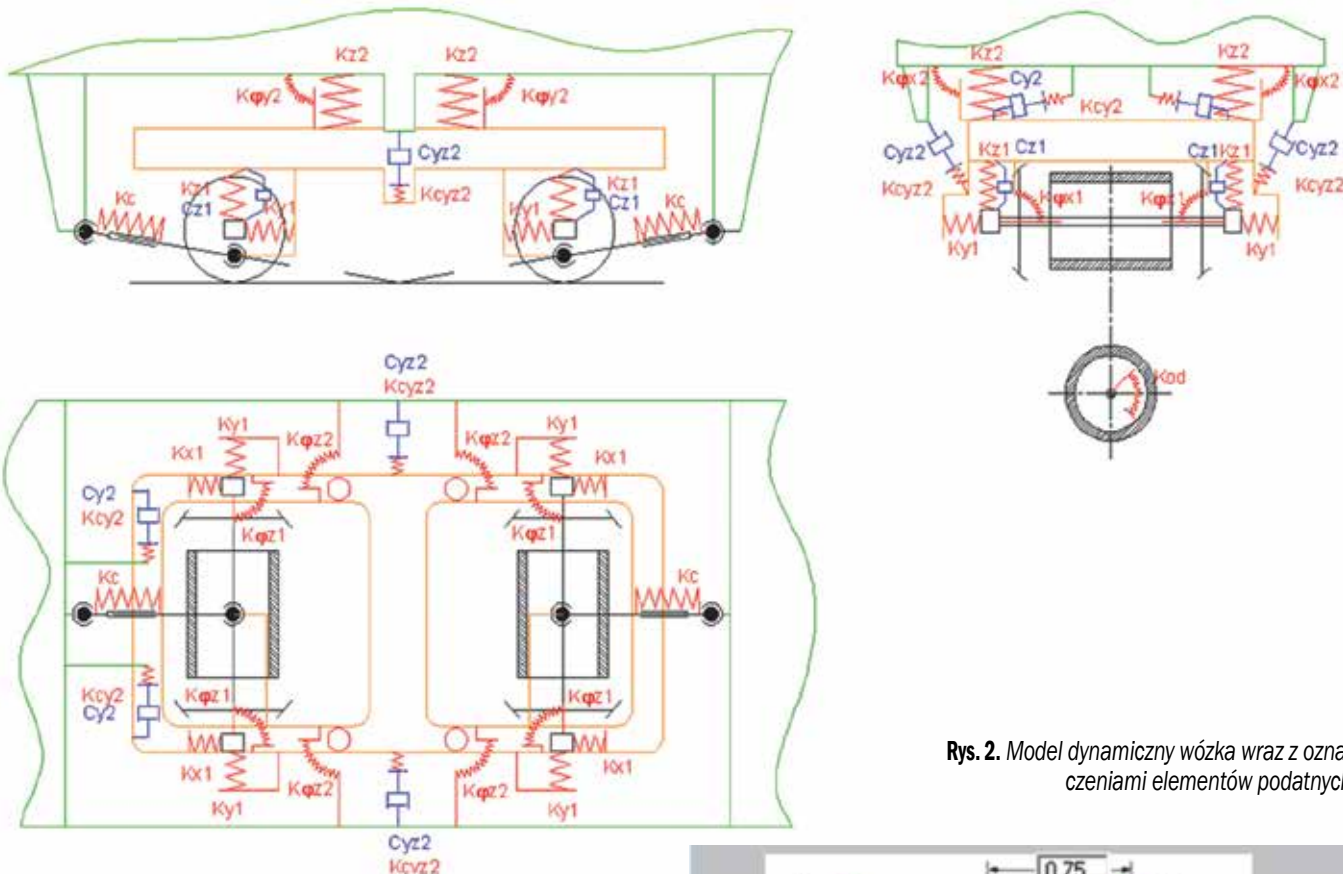
Model dynamiczny lokomotywy EP09

Model dynamiczny lokomotywy EP09 został opracowany na podstawie danych konstrukcyjnych oraz przedstawiony na rysunku 1. Na schemacie zostały wprowadzone i oznaczone trzy dodatkowe układy współrzędnych, w których zostały podane położenia poszczególnych elementów podatnych.

Na rysunku 2 został zaprezentowany model wózka wraz z oznaczeniami elementów podatnych. Ze względu na obszerność parametrów dane dotyczące brył oraz elementów podat-



Rys. 1. Model dynamiczny lokomotywy EP09



Rys. 2. Model dynamiczny wózka wraz z oznaczeniami elementów podatnych

nych wchodzących w skład modelu dynamicznego lokomotywy EP09 nie zostały zamieszczone w publikacji.

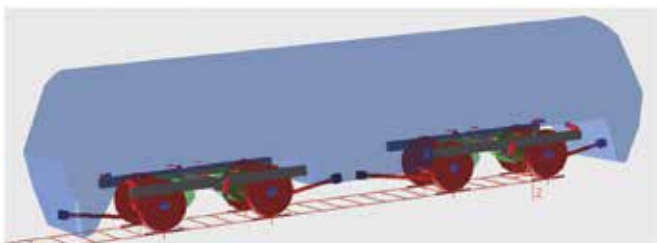
Model lokomotywy EP09 w programie SIMPACK

Analiza stabilności lokomotywy EP09 została przeprowadzona w programie SIMPACK. Jest to jeden z wiodących na świecie programów z zakresie symulacji ruchu pojazdów szynowych. Na rysunku 3 został przedstawiony widok modelu lokomotywy EP09 zamodelowanego w tym programie.

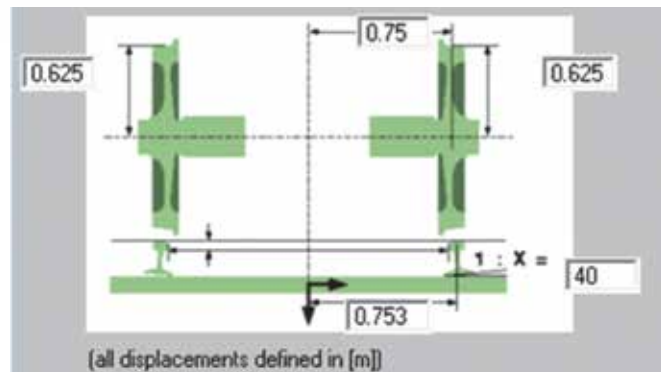
Przeprowadzone symulacje na potrzeby niniejszej pracy zostały wykonane dla kół o profilu DIN5573-E1425-140 oraz na sztywnym torze z szynami UIC60. Na rysunku 4 zostały przedstawione podstawowe parametry geometryczne zestawu kołowego oraz toru zastosowane do symulacji w programie SIMPACK.

Rysunki 5, 6, 7 przedstawiają charakterystykę styku koła-szyba w funkcji przemieszczenia poprzecznego dla zestawu kołowego, wyposażonego w koła o profilu

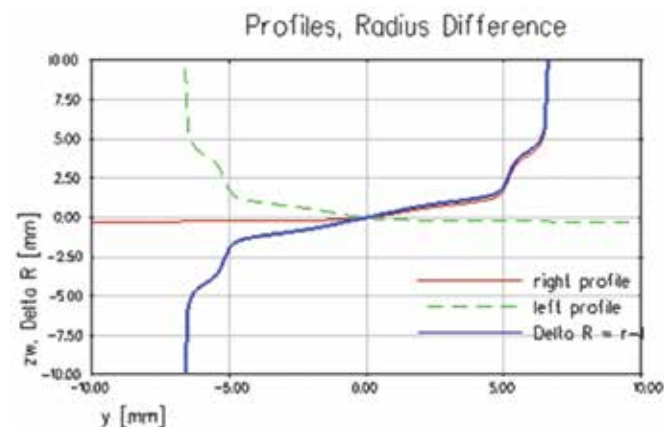
DIN5573-E1425-140 i szyn UIC60. Rysunki te przedstawiają kolejno różnicę okręgów toczyń, ekwiwalent stożkowatości i różnicę tangensów kąta pochylenia styku koła-szyba między kołami zestawu kołowego.



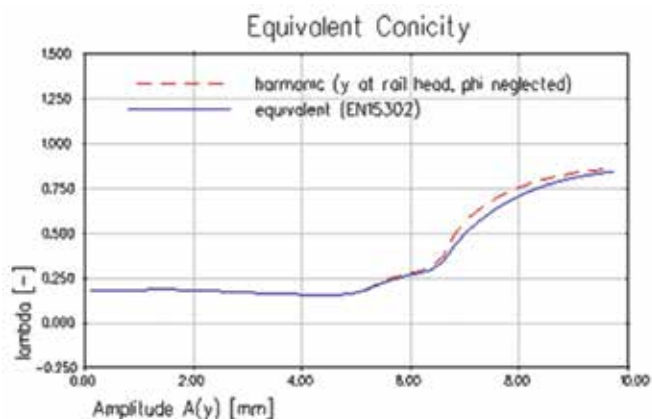
Rys. 3. Widok modelu lokomotywy EP09 w programie SIMPACK



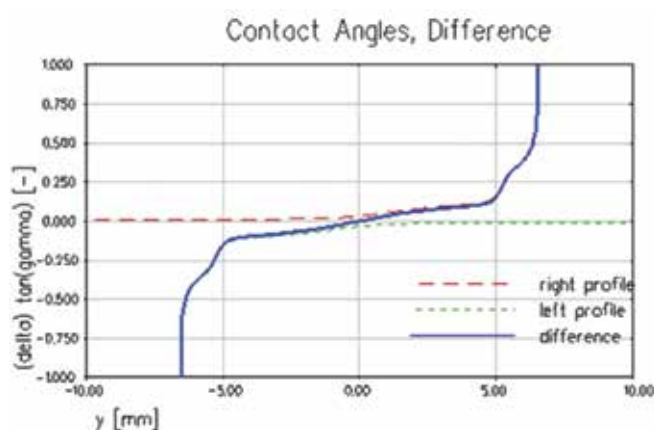
Rys. 4. Podstawowe parametry geometryczne zestawu kołowego oraz toru zastosowane do symulacji w programie SIMPACK



Rys. 5. Różnica promienia okręgów toczyń kół zestawu kołowego w funkcji jego wychylenia poprzecznego dla kół o profilu DIN5573-E1425-140 i szyn typu UIC60



Rys. 6. Ekwiwalent stożkowatości w funkcji wychylenia poprzecznego zestawu kołowego dla koła o profilu DIN5573-E1425-140 i szyn typu UIC60



Rys. 7. Różnica tangensów kąta pochylenia styku koło-szyna między kołami zestawu kołowego funkcji wychylenia poprzecznego zestawu kołowego dla koła o profilu DIN5573-E1425-140 i szyn typu UIC60

Wyniki badań lokomotywy EP09 w programie SIMPACK

W celu oceny poprawności modelu zaprezentowanego w rozdziale 3, zdecydowano się na sprawdzenie poprawności jego wykonania przy pomocy analizy częstotliwości drgań własnych, identyfikacji tych drgań, a następnie porównania ich z częstotliwościami uzyskanymi na drodze analitycznej. W tabeli 1 zaprezentowano wybrane częstotliwości drgań własnych modelu lokomotywy EP09, stworzonego w programie SIMPACK. Mała częstotliwość wężykowania spowodowana jest niewielką prędkością pojazdu (1 km/h) podczas analizy modalnej (form drgań).

Analizę stabilności ruchu lokomotywy EP09 wykonano na podstawie informacji zawartych w rozdziale 3. Analizę tę można ograniczyć do badania znaku części rzeczywistej wartości własnych, wykorzystując pierwszą metodę Lapunowa i twierdzenie o stabilności układów liniowych.

Jednakże, dla lepszego zrozumienia wpływu obliczonych numerycznie wartości własnych na układ, ich składową rzeczywistą i urojoną przeliczono kolejno na tłumienie względne oraz częstotliwość, zgodnie z równaniem 1.

$$\lambda = -\alpha \pm \omega i \quad ; \quad \zeta = \frac{\alpha}{\omega_0}, f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (1)$$

gdzie:

λ – wartość własna [1/s],

ζ – tłumienie (względne) [-],

f – częstotliwość [Hz],

ω_0 – częstość drgań nietłumionych (odpowiadająca danej wartości własnej).

Dzięki temu zamiast sprawdzenia znaku części rzeczywistej wartości własnej, sprawdzono znak tłumienia ζ .

Zaznaczyć należy, że w programie SIMPACK tłumienie to ma przeciwny znak w stosunku do ogólnie przyjętej definicji (równanie 1). Interpretacją fizyczną takiego zapisu w pracy jest niestabilność badanego układu, gdy wartość tłumienia ζ jest dodatnia.

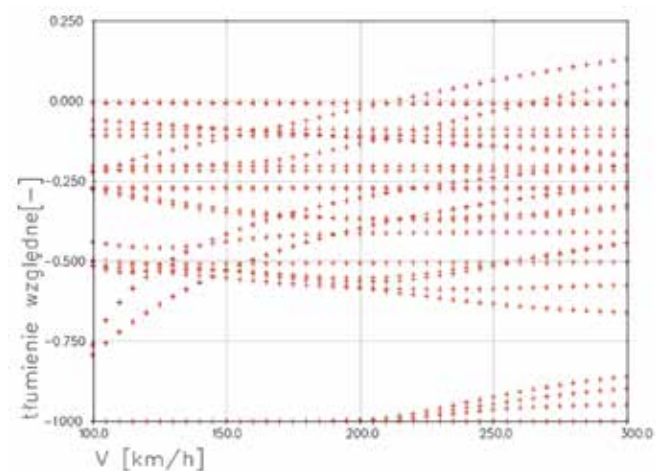
Na rysunku 8 został przedstawiony wykres wartości tłumienia w funkcji prędkości jazdy pojazdu. Na rysunku zauważyć można, że tłumienie, w formach drgań związanych z wężykowaniem zestawów kołowych, zanika. Stanowi to charakterystyczną cechę tego wykresu. Z rysunku tego odczytać można również wartość prędkości krytycznej lokomotywy.

Z uwagi na fakt, że wartość ta jest prędkością dla której pojawia się pierwsza wartość własna z dodatnim tłumieniem, prędkość krytyczna lokomotywy wynosi 212 km/h.

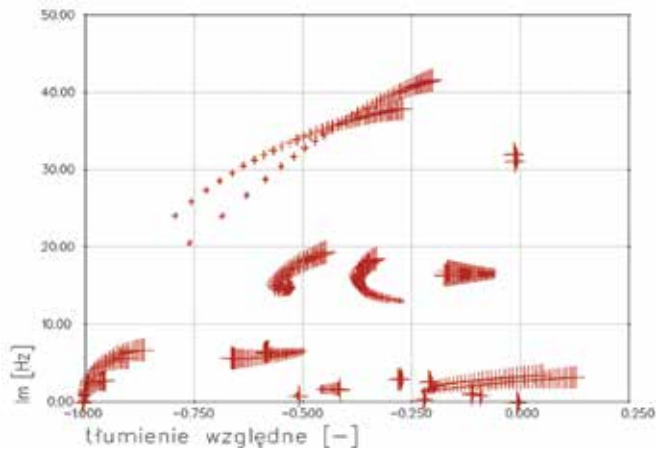
Na rysunek 9 zostały przedstawione krzywe pierwiastkowe analizowanego pojazdu (miejsca geometryczne pierwiastków

Tab. 1. Wybrane częstotliwości form drgań własnych lokomotywy EP09 (104E) uzyskane na drodze obliczeń w programie SIMPACK dla prędkości 1 km/h

Lp	Nazwa formy drgań	Częstotliwość
1	Wężykowanie	f=0,0137 Hz
2	Wężykowanie	f=0,0138 Hz
3	Koływanie (dolne) pudła	f=0,508 Hz
4	Obracanie pudła	f=0,836 Hz
5	Pochylenie pudła (wózki drgają w fazie z pudłem pojazdu)	f=0,836 Hz
6	Drgania pionowe – podskakiwanie (wózki drgają w fazie z pudłem pojazdu)	f=1,158 Hz
7	Koływanie (górne) pudła	f=1,683 Hz
8	Pochylenie wózków (wózki drgają w przeciwnych fazach)	f=2,698 Hz
9	Pochylenie wózków (wózki drgają w fazie)	f=2,70 Hz
10	Pochylenie pudła (wózki drgają w przeciwnej fazie z pudłem)	f=3,00 Hz
11	Drgania pionowe, podskakiwanie (wózki drgają w przeciwnej fazie z pudłem pojazdu)	f=3,0491 Hz



Rys. 8. Przebieg tłumienia poszczególnych wartości własnych od prędkości jazdy dla lokomotywy EP09



Rys. 9. Krzywe pierwiastkowe otrzymane dla modelu lokomotywy EP09 w przedziale prędkości 100 do 300 km/h

równania charakterystycznego, czyli wartości własnych) otrzymane dla przedziału prędkości od 100 km/h do 300 km/h. Weryfikacje uzyskanych wyników przeprowadzono przy pomocy symulacji ruchu lokomotywy. W celu wzbudzenia drgań przypisano warunek brzegowy wychylenia całego pojazdu o 1 mm od osi toru.

Rysunek 10 przedstawia przebiegi czasowe y-kowych współrzędnych położenia zestawów kołowych dla prędkości $V = 205$ km/h i wychylenia początkowego $y = 1$ mm.

Prędkość, dla której wykonano symulacje jest maksymalną prędkością dla której z przebiegów czasowych jednoznacznie wynika ruch stabilny pojazdu.

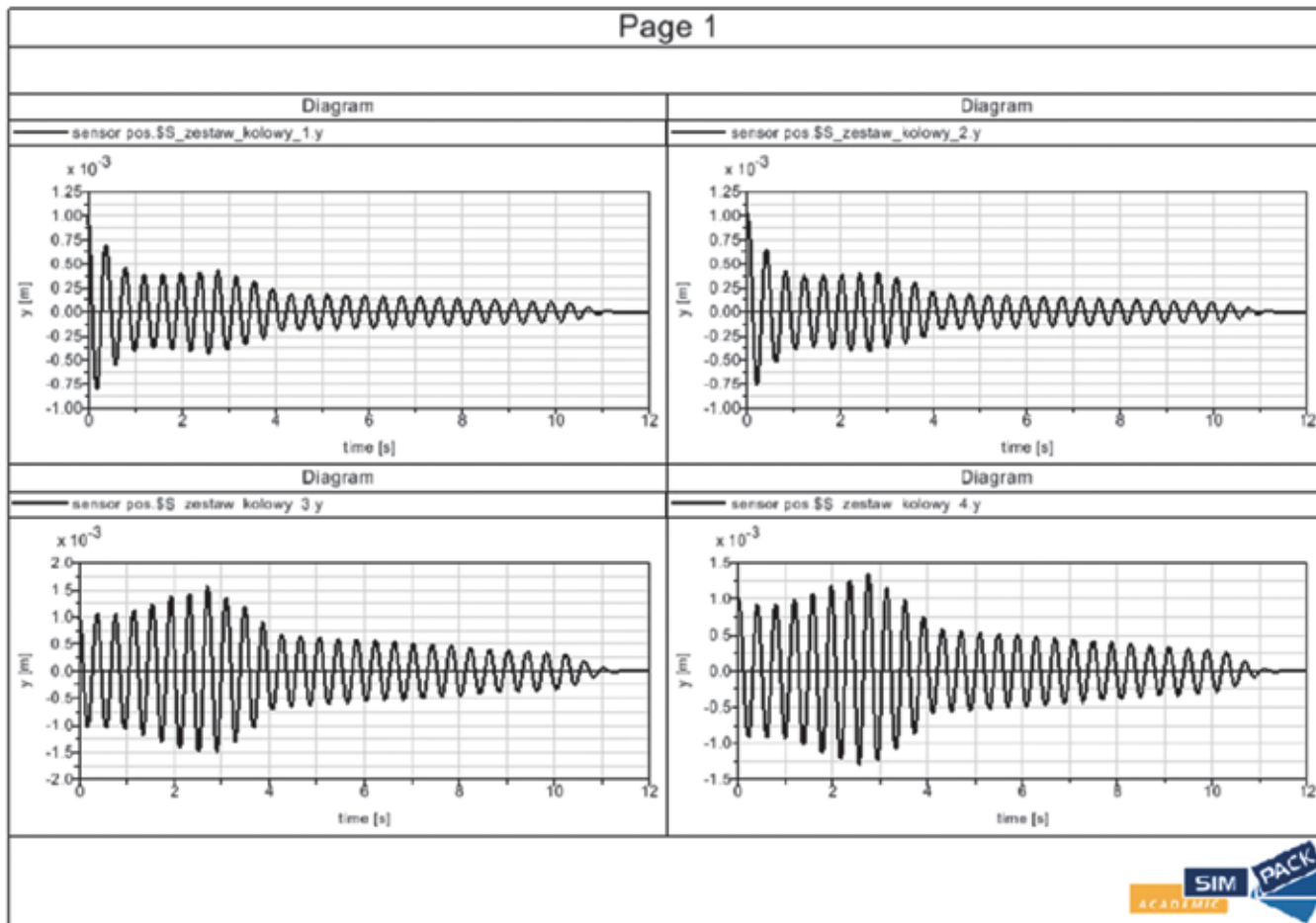
Rysunek 11 przedstawia wyniki symulacji dla prędkości, przy której widoczna jest już niestabilność ruchu pojazdu ($V = 208$ km/h) i analogicznego wychylenia początkowego jak dla wyników symulacji z rysunku 10.

Na podstawie powyżej zaprezentowanych analiz przyjąć można, że prędkość krytyczna obliczona na podstawie symulacji ruchu jest równa 205 km/h.

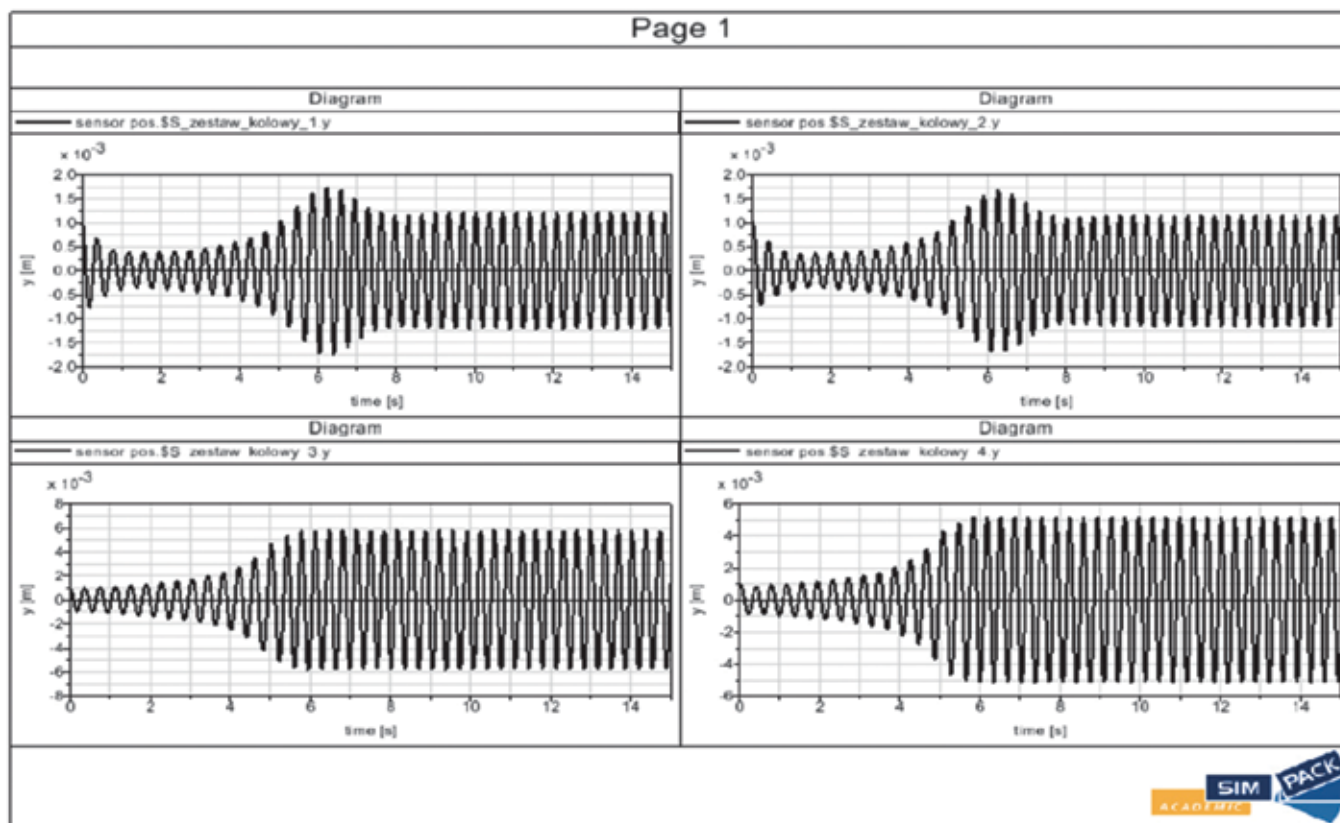
Zauważyć można, że wartość prędkości krytycznej odczytana z wykresu wartości tłumienia w funkcji prędkości jazdy pojazdu (rys. 8) różni się o 7 km/h, od wartości tej prędkości uzyskanej przy użyciu symulacji komputerowych. Różnica ta wynikać może z uwagi na fakt zbyt dużego wychylenia początkowego oraz z linearyzacji geometrii styku koło-szlina, w zakresie wychylenia poprzecznego zestawu kołowego ± 3 mm. Zabieg ten jest domyślnie przeprowadzany w programie SIMPACK.

Na podstawie zaprezentowanych powyżej rezultatów zauważyć można również, że dla ruchu z prędkością niewiele mniejszą od prędkości krytycznej (205 km/h), wartość współczynnika tłumienia formy drgań związanej z wężykowaniem jest bardzo mała. Powoduje to długi powrót układu do pierwotnego położenia w osi toru, po wychyleniu jego z położenia równowagi.

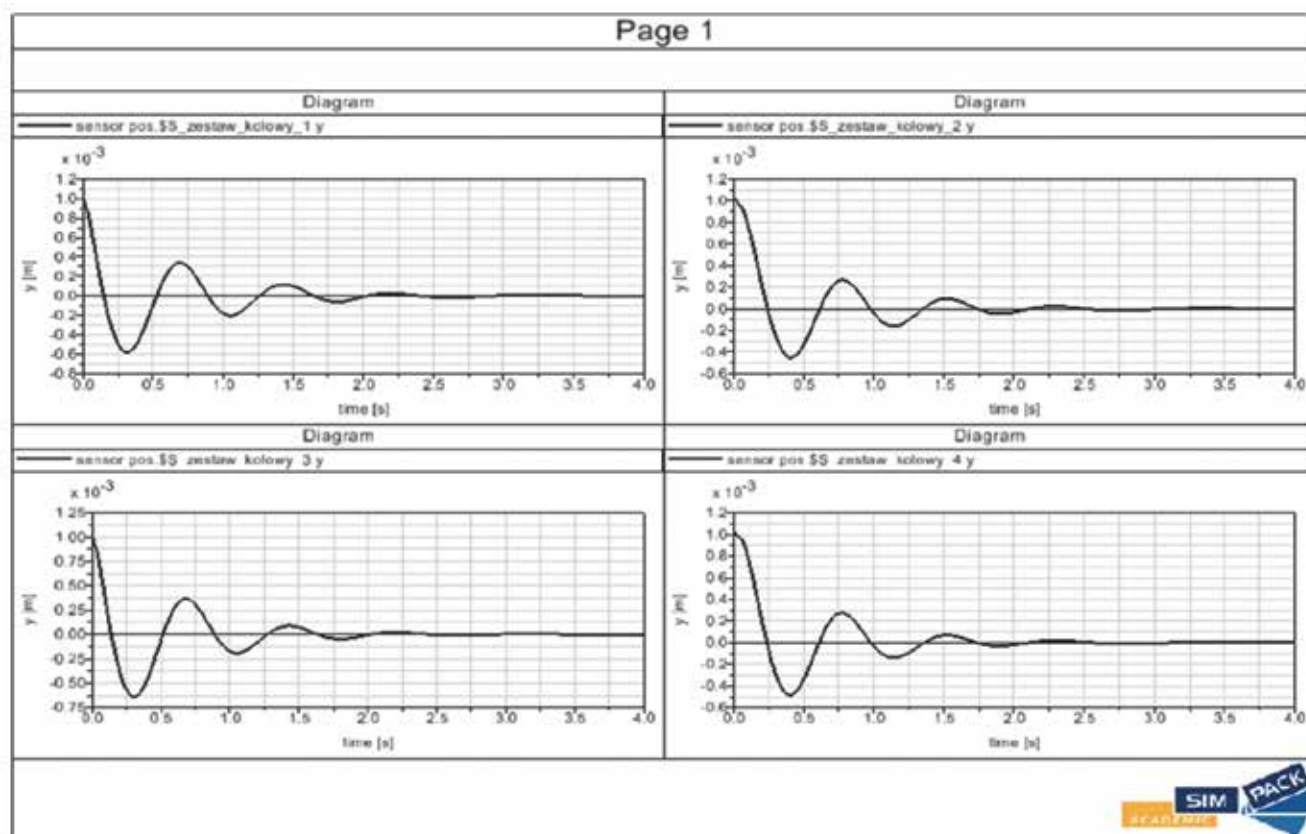
W celach porównawczych na rysunku 12 zaprezentowano zachowanie się modelu dla prędkości 100 km/h. Przy tej prędk-



Rys. 10. Wyniki symulacji dla prędkości $V = 205$ km/h i wychylenia początkowego $y = 1$ mm



Rys. 11. Wyniki symulacji dla prędkości $V = 208$ km/h i wychYLENIA początkowego $y = 1$ mm



Rys. 12. Wyniki symulacji dla prędkości $V = 100$ km/h i wychYLENIA początkowego $y = 1$ mm

kości układ ten posiada znacznie większe tłumienie, dzięki czemu w krótszym czasie następuje powrót pojazdu do ruchu w osi toru.

Na uwagę zasługuje również fakt, że wykonując symulacje dla prędkości powyżej krytycznej, tłumienie zmienia znak na przeciwny. Skutkuje to narastaniem drgań i utratą stabilności układu.

Podsumowanie

Obliczona prędkość krytyczna nazywana jest nierzadko prędkością bifurkacji VB, dzięki czemu odróżnić ją można od technicznej prędkości krytycznej VC. Obliczona prędkość krytyczna pojazdu to dopiero początek badań związanych ze stabilnością lokomotywy EP09. W kolejnych pracach autorzy skupią się nad zagadnieniem technicznej prędkości krytycznej analizowanej lokomotywy. Analiza wyników tych obliczeń wraz z prezentowanymi w niniejszej publikacji umożliwi ocenę stabilności pojazdu w szerszym zakresie.

Bibliografia

1. Arczewski K., Pietrucha J., Szuster J.: *Drgania układów fizycznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008.
2. Dusza M., Zosiński K.: *Wybrane zagadnienia dokładnego wyznaczenia wartości prędkości krytycznej modelu pojazdu szynowego*, XIX Konferencja Naukowa Pojazdy Szynowe, Andrychów 2010.
3. Grzesikiewicz W., Osiecki J., Piotrowski J.: *Podstawy dynamiki pojazdów szynowych*, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1974
4. Madej J.: *Mechanika transmisji momentu trakcyjnego*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
5. Madej J.: *Teoria ruchu pojazdu szynowego*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004.
6. Zygmunt M., Siennicki A.: *Analiza pracy układu biegowego lokomotywy EP09 w aspekcie poprawy dynamiki podłużnej i trwałości układu napędowego*, Pojazdy Szynowe 1/2000.
7. Zygmunt M., Siennicki A.: *Analiza pracy układu biegowego lokomotywy EP09 w aspekcie poprawy dynamiki podłużnej i trwałości układu napędowego*, Pojazdy Szynowe 1/2000.
8. Osiecki J.: *Wstęp po dynamiki pojazdów szynowych*, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1964.
9. Palczewski A.: *Równania różniczkowe zwyczajne*, Wydawnictwo Naukowo - Techniczne, Warszawa 2004.
10. Piechowiak T.: *Wykłady z przedmiotu Dynamika Pojazdów Szynowych*, Politechnika Poznańska.
11. Wickens A. H.: *Fundamentals of rail vehicle dynamics*, Taylor and Francis e-Library, 2005.

Autorzy:

mgr inż. **Karol Bryk**, Instytut Pojazdów Szynowych TABOR, Poznań
dr inż. **Marek Dudzik**, Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej
mgr inż. **Jakub Ingot**, Niezależny specjalista
dr inż. **Wiesław Jakubas**, Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej

Analysis of EP09 locomotive stability - critical vehicle speed

The idea of the research was analysis selected mechanical preferences of the locomotive EP09. As the main objective of article was chosen analysis of the stability of the locomotive EP09 by define the critical speed of the vehicle. With this and in view in this publication was described how the calculative model was built, what parameters and assumptions were taken to simulate and presented the final results on the basis of which identified the critical speed of the vehicle. In order to simulation results were as much as possible the same as the real results, to create simulation models locomotive and trolley, there have been used information and the research results obtained from the Institute of Rail Vehicles Tabor in Poznan. Most of the calculations has been made in the computer software SIMPLE. As a result of the simulation and analysis of the results was defined the critical speed of locomotive EP09, at which the vehicle loses stability movement.

Keywords: locomotive EP09, stability, stability analysis, critical speed.

Działalność inwestycyjna województw samorządowych w Polsce

Magdalena Kogut-Jaworska, Jolanta Zawora

Magdalena Kogut-Jaworska
Jolanta Zawora

Działalność inwestycyjna
województw samorządowych
w Polsce



ISBN 978-83-66017-97-9

Liczba stron: 168

Format: B5

Oprawa: miękka

Rok wydania: 2020

Cena 39,00 zł (w tym 5% VAT)

Opracowanie „Działalność inwestycyjna województw samorządowych w Polsce” wpisuje się w nurt badań nad finansami regionalnymi i możliwościami pobudzenia rozwoju regionalnego. Podjęta w pracy problematyka postrzegana jest jako jedna z ważniejszych, gdyż dotyczy zapewnienia odpowiednich warunków życia społeczności w regionach. Stąd Autorki zakładają, że głównymi odbiorcami książki będą praktycy i teoretycy zajmujący się właśnie finansowymi aspektami pobudzenia rozwoju regionalnego. Opracowanie, w swym założeniu, powinno także ułatwić studentom kierunków związanych z finansami publicznymi lub regionalistyką pełniejszą analizę kwestii dotyczących pozyskiwania środków na inwestycje, jak i zarządzanie samymi inwestycjami w regionie

Pełna oferta wydawnicza:

www.inw-spatium.pl