

Symulacyjna ocena zderzeń dla przypadku pojazdu trakcyjnego

W artykule przedstawiono formalne wymagania w zakresie analizy zderzeń pojazdów szynowych oraz opis modelu symulacyjnego. Zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych zderzeń lokomotywy przeprowadzonych wg normy PN-EN 15227. Praca prowadzona w ramach projektu badawczego nr N N509 0823 33 Modelowanie i symulacja w badaniach bezpieczeństwa technicznego pojazdów szynowych oraz projektu MONIT finansowanych ze środków MniSzW

1. Wprowadzenie

Ostatnie dwa dziesięciolecia to dynamiczny rozwój prac i badań nad poprawą bezpieczeństwa pojazdów szynowych. W polskich ośrodkach badawczo-naukowych również prowadzone są intensywne prace obszarach związanych z bezpieczeństwem czynnym oraz w obszarach ściśle związanych z tą problematyką [1, 2, 3, 6, 9]. Zagadnienia związane z bezpieczeństwem biernym pojazdów szynowych do niedawna nie były tak dynamicznie rozwijane, gdyż poważne wypadki na kolei, w których występują zabici i ranni występują bardzo rzadko. Jest to zasługa wysokiego poziomu bezpieczeństwa czynnego tej gałęzi transportu lądowego. Niemniej jednak, nie da się uniknąć niektórych kolizji, dlatego też prowadzone są także prace nad poprawą bezpieczeństwa pasywnego i określaniu wymagań zderzeniowych w postaci norm.

Bodźcem do opracowania zaleceń dotyczących bezpieczeństwa pasywnego były projekty europejskie TRAINCOL (1991–1995) i SAFETRAIN (1997–2001) [4]. Korzystając ze statystyk wypadków kolejowych określono scenariusze zderzeń i dokonano analizy wytrzymałości zderzeniowej pojazdów szynowych. W ramach tych projektów udowodniono słuszność koncepcji, że podstawą analiz i scenariuszy zderzeń powinno być zarządzanie energią zderzenia. Efektem prac nad tymi projektami były nie tylko rozwiązania konstrukcyjne, ale także metody walidacji modeli teoretycznych i technik przewidywania dla testów praktycznych.

Pierwszym dokumentem w Unii Europejskiej określającym wymagania jakie musi spełnić tabor pasażerski w przypadku kolizji jest norma EN 15227, która zaczęła obowiązywać w 2008 r. Przed jej wprowadzeniem, konstruktorzy posiadali jedynie wytyczne w postaci karty UIC 566 i normy EN 12663 odnoszące się do wytrzymałości pudła w warunkach normalnej eksploatacji. Sprawą kluczową stało się zapewnienie nieodkształcalnej w czasie zderzenia strefy przeżycia, zabezpieczenie przed zjawiskiem wspinania oraz

ograniczenie opóźnienia doznawanego przez obsługę i pasażerów. W celu sprawdzenia czy pojazd spełnia te wymagania wprowadzono obowiązek przeprowadzania testów zderzeniowych według scenariuszy opisanych w Normie. Testy przeprowadzane w warunkach rzeczywistych, na torze, wiążą się jednak z wysokimi kosztami. Aby ograniczyć liczbę rzeczywistych badań, co oznacza zmniejszenie kosztów, proponuje się badania symulacyjne pozwalające na ocenę konstrukcji pojazdu w ekstremalnych warunkach jakie występują w rzeczywistych zderzeniach. Daje to możliwość poprawy konstrukcji już podczas prac nad prototypem w przypadku gdy wyniki nie będą satysfakcjonujące. Symulacje można wykonywać korzystając z profesjonalnych pakietów komputerowych [1, 6, 9] bazujących na metodzie elementów skończonych (MES). W pracy przeprowadzono badania symulacje zderzeń modelu uniwersalnej lokomotywy E4ACU wykorzystując w tym celu program LS-DYNA bazujący na metodzie MES.

2. Wymagania formalne w zakresie analizy zderzeń

Norma PN-EN 15227 dotyczy nowo projektowanych lokomotywy i tabor pasażerski, które podzielono na cztery kategorie od C-I do C-IV ze względu na wymagania wytrzymałości zderzeniowej. Przynależność do kategorii jest zależna od warunków eksploatacji i charakterystyki infrastruktury kolejowej. Wymagania ujęte w normie, opisane w postaci scenariuszy zderzeń, mają na celu zapewnienie odpowiednio wysokiego poziomu bezpieczeństwa biernego poprzez spełnienie poniższych warunków:

- zmniejszenie ryzyka wspinania;
- pochłanianie energii zderzenia w sposób kontrolowany;
- zachowanie przestrzeni przeżycia i strukturalnej integralności pomieszczeń zajmowanych przez ludzi;

- zmniejszenie opóźnienia wzdłużnego;
- zmniejszenie ryzyka wykolejenia i skutków uderzenia w elementy infrastruktury.

W rozdziale 5 normy sprecyzowano wymagania odnośnie:

- zjawiska wspinania;
- przestrzeni przeżycia;
- opóźnienia wzdłużnego;
- zgarniacza (deflektora).

Przeprowadzone badania pozwoliły na ocenę zachowania przestrzeni przeżycia i określenie średniej wartości opóźnienia wzdłużnego (wzdłuż osi x). Poniżej podano warunki, które muszą być spełnione w symulacji zderzenia dostępnych modeli pojazdów.

Norma wymaga przeprowadzenie czterech testów zderzeniowych według poniższych scenariuszy:

- Scenariusz 1 - zderzenie czołowe dwóch identycznych pociągów;
- Scenariusz 2 - zderzenie czołowe pociągu z innym pojazdem szynowym;
- Scenariusz 3 - zderzenie pociągu z dużym pojazdem drogowym na przejeździe;
- Scenariusz 4 - zderzenie pociągu z małą przeszkodą (np. samochód na przejeździe, zwierzę).

Rodzaje przeszkód (oprócz scenariusza 1) i prędkości zderzenia są zależne od kategorii pojazdu i od charakterystyki linii kolejowej, na której pojazd jest eksploatowany. Scenariusz 4 przeprowadza się jako próbę wytrzymałościową zgarniacza-wartości obciążeń są uzależnione od prędkości eksploatacyjnej.

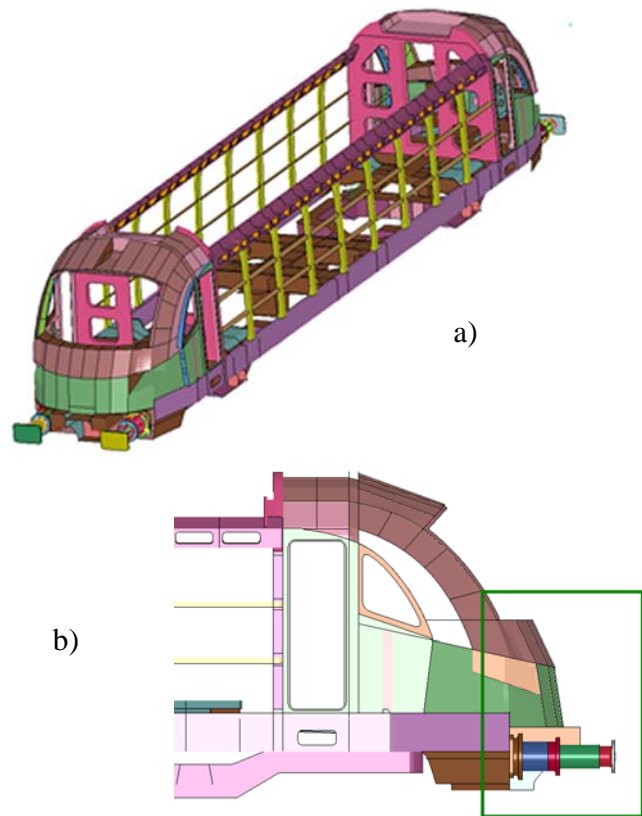
3. Model symulacyjny

Obiektem badań symulacyjnych był model prototypu czteroosiowej, elektrycznej lokomotywy uniwersalnej E4ACU. Pojazd należy do kategorii C-I wg PN-EN 15227. Ostoja pojazdu składa się ze spawanych profili hutniczych oraz blach, natomiast ściany i dach zaprojektowano w technologii interlockingu. Uproszczony model badanej lokomotywy, przedstawiony na rys. 1a, składa się z:

- ostoi;
- szkieletu pudła;
- dwóch kabin maszynistów;
- uproszczonych ram wózków;
- zderzaków.

W ostoi nie zamodelowano podłuznic biegnących przez jej środek, natomiast pudło nie posiada belek podłużnych i poprzecznych dachu. Dla konstrukcji nośnej pudła założono materiał S355J2, do którego opisu przyjęto model kinematyczno–plastyczny.

W konstrukcji lokomotywy zaprojektowano strefę pochłaniającą energię. Strefę zlokalizowano przed czołownicą przednią, co przedstawiono na rys. 1b. Zgodnie z wymaganiami dla pojazdów z kategorii C-I, w każdym scenariuszu do lokomotywy został dołączony model wagonu referencyjnego o masie 80 t.



Rys. 1. Model lokomotywy E4ACU (a), strefa pochłaniająca energię (b)

4. Program badań symulacyjnych

Trójwymiarowe modele pojazdów zostały opracowane w programie CAD (Computer Aided Design). Następnym krokiem było wyeksportowanie opracowanych modeli do programu CAE (Computer Aided Engineering) MSC.PATRAN. Na tym etapie zostały nałożone na modele siatki elementów skończonych. Do analizy wykorzystano program LS-DYNA, który służy m.in do przeprowadzania obliczeń zjawisk dynamicznych silnie nieliniowych, takich jak zderzenia. Ponieważ ramy wózków lokomotywy zostały utwierdzone w kierunku pionowym (oś z), nie uzyskano w wyniku symulacji efektu przekoszenia. Nie przeprowadzono badań wytrzymałościowych zgarniacza - scenariusz 4, ponieważ nie dysponowano jego modelem. Dla całej symulacji zebrano przebiegi czasowe zmian energii kinetycznej i opóźnień punktów pomiarowych. Rejestrowano wartości przyspieszenia (opóźnienia) punktu A - zlokalizowanego na środku górnej powierzchni ostoi, od momentu zderzenia do czasu kiedy pojazdy zaczynają się oddalać od siebie. Etap rejestracji trwa od początku symulacji do momentu, w którym wartości przyspieszenia zaczynają osiągać wartości dodatnie.

W poniższej tabeli przedstawiono warunki początkowe określające parametry uderzającego składu oraz masy przeszkód w poszczególnych scenariuszach.

Tabela 1
Zestawienie warunków początkowych symulacji

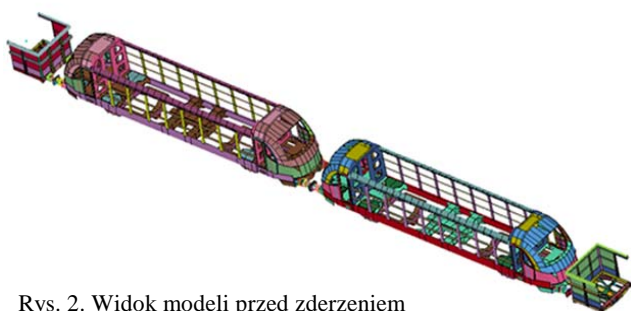
Scenariusz	Całkowita masa składu: E4ACU + wagon ref. [t]	Przeszkoda	Masa przeszkody [t]	Prędkość zderzenia [km/h]
1	223	Identyczny skład	223	36
2	160	Wagon	80	36
3	223	Pojazd drogowy	15	110

Wartości początkowej prędkości zderzenia zawarte w tabeli 1 są zdeterminowane przynależnością lokomotywy do kategorii C-1. Rodzaj przeszkody jest uzależniony od warunków eksploatacji - dla scenariusza 1 jest to zawsze identyczny skład, dla scenariusza 2 jest to ruch mieszany z pojazdami ze zderzakami, natomiast w scenariuszu 3 są to sieci transeuropejskie i linie z przejazdami kolejowymi.

5. Wyniki badań symulacyjnych

Mając na uwadze ograniczone możliwości prezentacji otrzymanych wyników, poniżej przedstawione zostaną rezultaty otrzymane tylko w przypadku scenariusza 1.

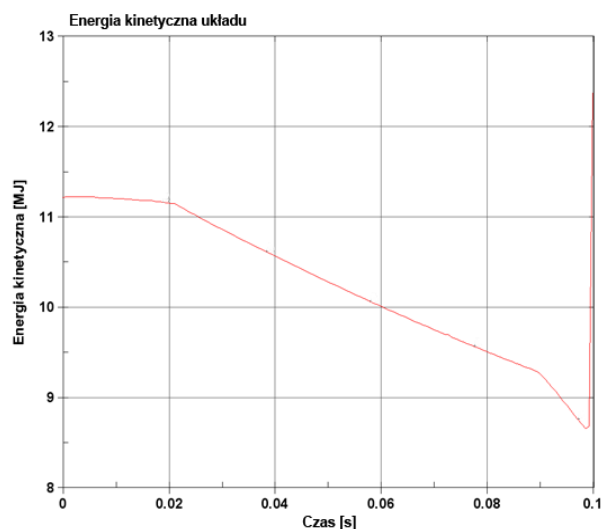
W scenariuszu tym dokonano symulacji zderzenia dwóch identycznych pojazdów z dołączonymi wagonami referencyjnymi o masie 80 t każdy. Lokomotywy zostały utwierdzone poprzez odebranie węzłom możliwości przesunięcia wzdłuż osi pionowej w miejscach gdzie znajdują się sprężyny zestawów kołowych. Jako kryterium końcowe analizy określono czas 0,3 s. Czas symulacji wyniósł jednak 0,1 s ponieważ w trakcie obliczeń dokonywanych przez program wystąpiły błędy. Nie przeszkadza to jednak w ocenie zachowania konstrukcji pojazdu, gdyż po tym czasie następuje koniec etapu odbicia i nie występują już maksymalne naprężenia ani dalsze deformacje. Plan sytuacyjny przed zderzeniem pokazano na rys. 2.



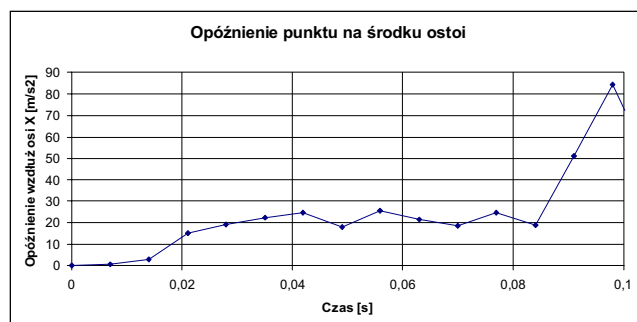
Rys. 2. Widok modeli przed zderzeniem

Na rys. 3 przedstawiono przebieg zmian energii kinetycznej układu. Dla początkowej prędkości 36 km/h (10 m/s) energia wynosiła 11,379 MJ. Po zderzeniu wartość energii kinetycznej zmniejszyła się

o 2,723 MJ do wartości 8,656 MJ. Opóźnienie mierzone w punkcie pomiarowym A, którego przebieg przedstawiono na rys. 4, osiągnęło najwyższą wartość ok. 85 m/s² w momencie gdy energia kinetyczna układu była najmniejsza. Wartość średniokwadratowa opóźnienia wyniosła 32,7 m/s².

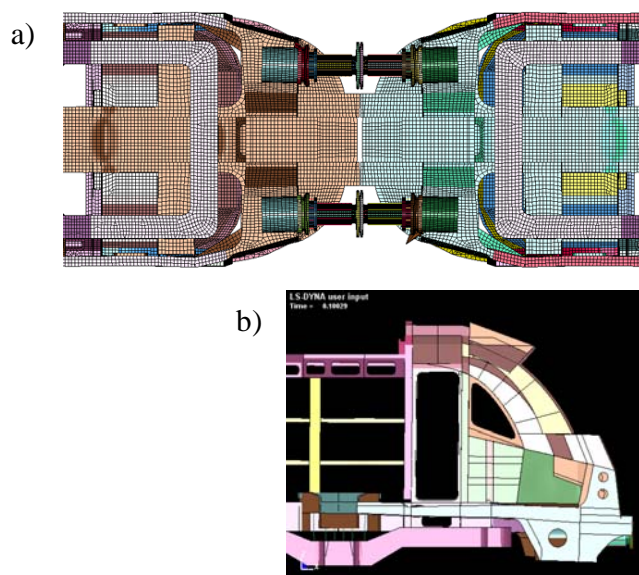


Rys. 3. Przebieg zmian energii kinetycznej układu



Rys. 4. Przebieg opóźnienia punktu A na środku ostoi

Na poniższych rysunkach przedstawiono deformacje lokomotywy po zderzeniu.



Rys. 5. Deformacja po zderzeniu - widok od dołu (a), przekrój podłużny kabiny (b)

Po przeprowadzeniu testu zderzeniowego nieznacznej deformacji uległa środkowa podłużnica bieżąca pod kabiną maszynisty. Widoczne wygięcie powstało przy tylnej ścianie kabiny uwidocznione na rys. 5a. Pozostałe elementy kabiny nie odkształciły się na tyle, alby zmniejszyć widocznie przestrzeń przeżycia. Również czoło lokomotywy nie uległo deformacjom i żadne jego elementy konstrukcyjne nie dostały się do środka kabiny - wymagana normą przestrzeń przeżycia dla maszynisty została zachowana. Wartość średniokwadratowa opóźnienia wynosiła 34,8 m/s² (3,6 g) w punkcie pomiarowym A, czyli jest niższa od maksymalnej dopuszczanej przez normę-5g [8].

Symulacje wg przedstawionego powyżej schematu zostały również przeprowadzone dla scenariuszy 2 i 3 opisanych w rozdziale 2. Wyniki zamieszczono w tabeli 2.

Tabela 2
Wyniki liczbowe badań

	Scenariusz 1	Scenariusz 2	Scenariusz 3
Energia kin. przed zderzeniem	11,379 MJ	8,224 MJ	75,384 MJ
Energia kin. po zderzeniu	8,656 MJ	5,531MJ	66,892 MJ
Strata energii	2,723 MJ	2,693 MJ	8,492 MJ
Średnie opóźnienie (RMS)	3,6 g (< 5 g)	3,3 g (< 5 g)	5,9 g (< 7,5 g)

6. Wnioski

W wyniku badań symulacyjnych otrzymano przebiegi deformacji modelu lokomotywy w czasie zderzenia. Jak pokazały przebiegi czasowe symulacji, na końcowych etapach scenariusza 1 i 2 widać, że kabina maszynisty nie została odkształcona w sposób zmniejszający przestrzeń przeżycia. W scenariuszu 3 podłoga w kabinie zdeformowała się do tego stopnia, iż może to spowodować wyrzucenie maszynisty w kierunku pulpitu. Tak poważnej deformacji można uniknąć poprzez zamontowanie podłużnicy bieżącej przez środek ostoi lokomotywy. Podłużnica ta usztywniłaby szkielet pojazdu i odciążałaby elementy tworzące podłogę kabiny maszynisty.

Ogólnie można uznać, iż kabina maszynisty została prawidłowo zaprojektowana. W trakcie deformacji żadne elementy konstrukcyjne kabiny nie wnikają do jej wnętrza i przez to nie ograniczają przestrzeni przeżycia.

Po przeanalizowaniu wyników badań modelu lokomotywy E4ACU, nie można stwierdzić jednoznacznie czy spełnia on wymagania stawiane przez normę PN-EN 15227, ponieważ nie jest znane dokładne położenie fotela maszynisty w tym prototypie. Średnie wartości opóźnienia zostały spełnione w każdym scenariuszu, ale obawę budzi deformacja podłogi w scenariuszu 3.

W przypadku prowadzenia symulacji które miałyby być podstawą stwierdzenia o spełnieniu lub nie, wymagań zawartych w przedmiotowej normie, należałoby wykonać jeszcze dodatkowe badania.

Literatura

- [1] Chudzikiewicz A., *Elementy diagnostyki pojazdów szynowych*, ITE, Radom -Warszawa 2002.
- [2] Chudzikiewicz A., *Modelling of wheel and rail wear*, Archives Of Transport, Vol.13, issue 2, 2001, ITE, Radom 2001.
- [3] Chudzikiewicz A., Drożdziel J., Sowiński B., *The influence of wheel and rail rolling surfaces wear on railway vehicle dynamics*. Proc. of CSME Forum - 2004, The University of Western Ontario, 1 - 4 lipca 2004, 945 - 954.
- [4] Erskine A., *Structural Crashworthiness Literature Search*. <http://www.rssb.co.uk/pdf/reports/research/T119%20Literature%20review%20of%20rail%20vehicle%20structural%20crashworthiness.pdf>
- [5] Karta UIC 566 OR *Obciążenia pudeł wagonów pasażerskich i części dobudowanych*.
- [6] Melnik R., *Symulacyjna ocena wymagań dotyczących bezpieczeństwa pojazdów szynowych zgodnie z normą PN-EN 15227*, praca magisterska, Politechnika Warszawska, Warszawa 2009.
- [7] Norma PN-EN 12663 *Wymagania konstrukcyjno-wytrzymałościowe pudeł kolejowych pojazdów szynowych*.
- [8] Norma PN-EN 15227 *Wymagania zderzeniowe dla pudeł pojazdów szynowych*.
- [9] Opala M., *Symulacyjna metoda oceny bezpieczeństwa ruchu wagonów towarowych o zwiększonej sile nacisku na oś*, praca doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa 2006.