

Symulacyjna metoda analizy bezpieczeństwa pojazdu szynowego

W artykule omówiono wybrane zagadnienia związane z analizą bezpieczeństwa pojazdów szynowych z wykorzystaniem modeli symulacyjnych. Przedstawiono metody obliczeń i wyniki symulacji przeprowadzonych dla oszacowania trwałości zmęczeniowej węzła konstrukcyjnego.

1. Wstęp

Problematyka bezpieczeństwa w systemach eksploatacji pojazdów szynowych jest rozpatrywana głównie w aspekcie zaistnienia wypadku. W transporcie kolejowym termin bezpieczeństwo sprowadza się najczęściej do zagrożenia środowiska naturalnego, pojawiającego się w związku z przewozem materiałów niebezpiecznych i prawdopodobieństwem zaistnienia katastrofy. Analizy i statystyki z ostatnich lat przedstawiają, że ok. 80% katastrof w transporcie spowodowane jest działalnością operatora (błędne lub celowe oddziaływanie człowieka na system), 10% to zawodność urządzeń, a pozostałe 10% to wpływ czynników zewnętrznych (tj. oddziaływanie przyrody np. zwierzęta leśne wybiegające na tory, burza, mgła).

System techniczny pojazdów szynowych, analizowany w aspekcie bezpieczeństwa, stanowi element składowy przestrzeni: *człowiek – technika – środowisko*. System ten może znajdować się w pięciu podstawowych stanach [3]:

- stan bezpieczeństwa oznacza funkcjonowanie systemu zgodnie z wymaganiami;
- stan poczucia zagrożenia bezpieczeństwa wynika z pobudek racjonalnych lub irracjonalnych, związanych z możliwością zaistnienia utraty stanu bezpieczeństwa;
- stan zagrożenia bezpieczeństwa jest to taki stan, w którym operator zapobiega sytuacji niebezpiecznej spowodowanej błędem własnym lub innego operatora, albo uszkodzeniem obiektu technicznego;
- stan zawodności sprawności ma miejsce wtedy, kiedy system traci w pełni albo częściowo swoją sprawność wskutek np. uszkodzenia eksploatacyjnych obiektów;
- stan zawodności bezpieczeństwa oznacza stan katastrofy, np. wypadki z udziałem ludzi lub zniszczenie istotnej części systemu.

Pojęciami związanymi z oceną systemu eksploatacji pojazdów szynowych są, jakość, niezawodność i bezpieczeństwo.

W literaturze spotyka się wiele rozwiązań, przykładów i analiz dotyczących modeli symulacyjnych niezawodności [1], [2], [3], [4]. Opisywane modele można podzielić w zależności od sposobu i rodzaju realizowanych zadań. Sama analiza niezawodnościowa określonego pojazdu szynowego opiera się na wynikach przetwarzania danych pomiarowych, pozyskiwanych w procesach: kontroli – weryfikacji – kwalifikacji elementów pojazdów i maszyn, i jest prowadzona głównie w zakładach naprawczych.

2. Modele symulacyjne w analizie bezpieczeństwa

Modele symulacyjne znajdują duże zastosowanie w różnych dziedzinach nauki, można też je wykorzystać w badaniach i projektowaniu bezpieczeństwa pojazdów szynowych. W technice symulacji tworzy się często złożone modele całego systemu i procesów w nim zachodzących, którymi możemy manipulować w taki sposób, aby w rezultacie dokonać oceny funkcjonowania badanego systemu, podlegającego wpływom zmiennych warunków zewnętrznych. Procedury wykorzystywane są przy symulacji eksploatacji, kontroli i korygowania parametrów jakościowych i niezawodnościowych podzespołów pojazdów szynowych, od etapu projektowania (symulacja w CAD), poprzez produkcję (symulacja w CAM i CAP) aż do kontroli jakości (CAQ) i serwisu (CAS), przy zabezpieczeniu niezawodności eksploatacyjnej.

Modele symulacyjne w kolejnictwie, związane z analizą bezpieczeństwa mają obszerne zastosowanie, gdyż umożliwiają między innymi:

- sprawne, bezkolizyjne zarządzanie logistyczne, dzięki śledzeniu zachowań wirtualnych modeli złożonych systemów i procesów;
- racjonalną analizę doboru materiału na elementy konstrukcji pojazdów szynowych;
- prognozowanie i analizowanie następstw wystąpienia usterek prowadzących do powstania zagrożenia;
- kontrolę czy dany pojazd szynowy jest bezpieczny dla otoczenia.

W infrastrukturze systemu związanego z pojazdem szynowym w pierwszym kroku modelowania stanu bezpieczeństwa należy znaleźć odpowiedzi na pytania:

- czy istnieją (lub mogą być zbudowane) adekwatne modele umożliwiające podejmowanie optymalnych (lub bliskich optymalnym) decyzji?
- czy można zbudować adekwatne modele nie wymagające bezpośredniego wyprowadzania optymalnych rozwiązań?

Po podjęciu decyzji, następnym krokiem jest wybór odpowiednich modeli fizycznych podsystemu, po nim tworzy się modele matematyczne i na ich bazie konstruuje modele symulacyjne. Realizując te kroki należy pamiętać o założeniach wynikających z wymagań formalnych (normy, przepisy, zalecenia), ograniczeniach (np. dotyczących dostępności pakietów symulacyjnych) i przesłankach techniczno-organizacyjno-ekonomicznych.

Wprowadzenie techniki cyfrowej w dziedzinie sterowania ruchem kolejowym spowodowało, że konieczne stało się opracowanie nowych kryteriów oceny urządzeń, ze szczególnym uwzględnieniem bezpieczeństwa ruchu. W różnych krajach Europy przyjęto różne zalecenia i uregulowania prawne gwarantujące zapewnienie właściwego poziomu bezpieczeństwa transportu kolejowego. Bezpieczeństwo pojazdów szynowych musi być zgodne np. z normą CENELE [7], która narzuca twórcom konieczność spełniania wymagań norm jakościowych ISO 9001.

3. Metody i narzędzia

Przy ocenie i prognozowaniu stanów bezpieczeństwa obiektów technicznych stosuje się głównie metody matematyczne bazujące na miarach statystycznych, odniesionych do procesów stochastycznych [1], [3], [4]. W opisach struktur hierarchicznych często wykorzystuje się pojęcia i metody teorii informacji np. przy konstruowaniu kryteriów klasyfikacji stanów oraz metody informatyki np. w zakresie automatyzacji pozyskiwania danych z relacyjnych baz danych.

Wybrana przykładowo w tej pracy metoda „Grey – system theory” [3], [6] służy do prognozowania stanu obiektów w przypadkach, gdy analizowane są np. wielkość zużycia współpracujących elementów, ilość uszkodzeń elementów, wielkość drgań elementów tocznych. Sprawdzenie bezpieczeństwa polega na symulacji eksploatacji pojazdu przy zakładanej znajomości intensywności uszkodzeń i popełnianych błędów przez maszynistę oraz po określeniu wartości początkowych poszczególnych prawdopodobieństw i czasów badań symulacyjnych. Wyniki zastosowania tej metody wskazują na dużą zgodność wartości prognozowanych z rzeczywistymi, otrzymanymi z pomiarów. Wykorzystuje się ją w procesach kontroli stanu technicznego środków transportu – również

szynowego, jako jeden z elementów systemu monitorowania [3].

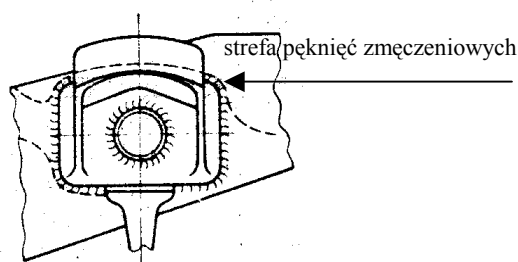
Obecnie, duże, specjalne pakiety symulacji wykorzystuje się przy analizie wypadków, jak również przy predykcji procesów eksploatacji pojazdów szynowych (diagnostyka, niezawodność, bezpieczeństwo) oraz przy analizie pracy całej infrastruktury kolejowej.

W niniejszej pracy stosuje się oryginalne programy-moduły symulacyjne, zbudowane na bazie pakietu VisSim & Analyze, służące do komputerowego wspomaganie realizacji zadań związanych z szacowaniem wskaźników bezpieczeństwa wybranych modeli podsystemów pojazdów szynowych.

4. Wybrany przykład zadania

Ocena trwałości i współczynnika bezpieczeństwa wytrzymałości zmęczeniowej wybranego elementu konstrukcyjnego pojazdu szynowego.

Przedstawiony na rys. 1 węzeł konstrukcyjny poprzeczniczy ramy wózka z przyspawanym wspornikiem zawieszenia przekładni ukazuje strefę pęknięć zmęczeniowych obserwowanych w eksploatacji i podczas badań stanowiskowych [6].



Rys. 1. Węzeł konstrukcyjny poprzeczniczy ramy wózka z przyspawanym wspornikiem zawieszenia przekładni wg [6]

Wytrzymałość zmęczeniową konstrukcji rozpatrywanego węzła określa związek między trwałością a funkcją gęstości widmowej naprężeń w spoinie połączenia wspornika z poprzecnicą, dla różnych prędkości jazdy (np. 40÷100 km/h). Wykładnik potęgowej m krzywej wytrzymałościowej i granica wytrzymałości węzła σ_{-1k} przyjmowane są z danych tablicowych (dla danego rodzaju materiału), na poziomie ufności 0,95. Zadaniem podstawowym jest znalezienie wartości estyma trwałości węzła, określonej wg [6] wzorem:

$$T_c = \frac{[\sigma_{-1k}]^m N_0 \phi^m}{2^{m/2} \Gamma\left(\frac{m+2}{2}\right) \sum_i p_{it} \left[2 \int_0^{\infty} f^{2/m} S(f) df \right]^{m/2}} \quad (1)$$

gdzie:

- f – częstotliwość zmian cyklu obciążenia,
- m – wykładnik potęgowej krzywej zmęczeniowej,
- $[\sigma_{-1k}]$ – min wartość granicy wytrzymałości zmęczeniowej,

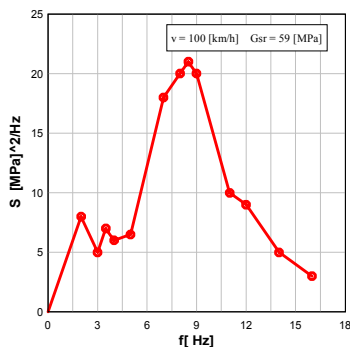
- $\Gamma\left(\frac{m+2}{2}\right)$ – funkcja gamma Eulera,
- N_0 – ilość badanych zmęczeniowo próbek połączenia,
- φ – współczynnik asymetrii cyklu obciążenia danego elementu – połączenia,
- $S(f)$ – gęstość widmowa naprężeń dynamicznych w elemencie,
- P_{ti} – prawdopodobieństwo czasu jazdy z prędkością v_i .

Algorytm obliczenia trwałości węzła konstrukcyjnego w oparciu o wzór (1), przy zastosowaniu symulacji komputerowej, przedstawić można następująco:

- ustalenie prędkości jazdy v_0 (zgodnie z planem jazdy na danym odcinku trasy),
- wybór generatora losowego (np. o rozkładzie Gaussa albo rozkładzie równomiernym) i losowe (addytywne) zaburzenie przebiegu prędkości jazdy,
- wyznaczenie prawdopodobieństwa P_{ti} czasu jazdy z prędkością v_i (z histogramów rozkładów prędkości jazdy na danej trasie),
- wyznaczenie wariancji procesu z gęstością widmową $S(f)$ naprężeń dynamicznych

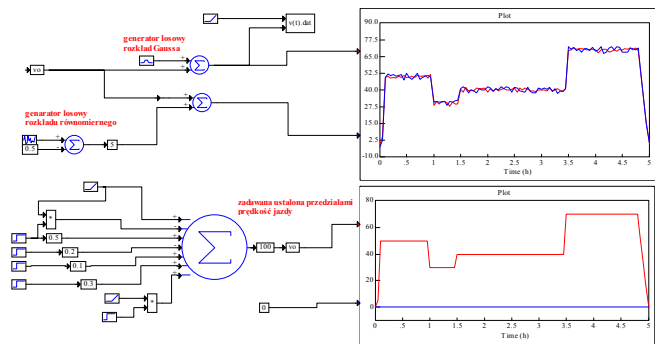
$$2 \int_0^{\infty} f^{\frac{m}{2}} S(f) df \quad (2)$$

- na podstawie danych: widm naprężeń dynamicznych $S(f)$ we wsporniku, przy różnych prędkościach jazdy oraz znajomości P_{ti} następuje obliczenie trwałości T_c .



Rys. 2. Przykładowe widmo naprężeń dynamicznych $S(f)$ we wsporniku zawieszania przekładni

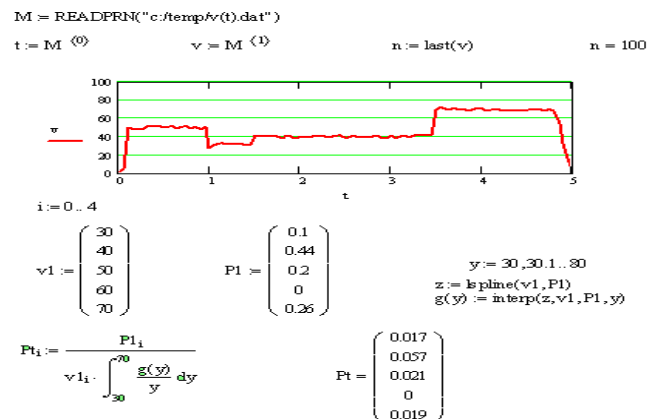
Do analizy numerycznej niniejszego przykładu został wykorzystany histogram rozkładu prędkości jazdy na zadanej trasie wybrany z literatury [6]. Korzystając z pakietu symulacyjnego VisSim przeprowadzono symulację zmian losowych nałożonych na zdeterminowane planem prędkości jazdy. Można zaobserwować, iż na niższym rysunku 3b) jest przedstawiona zadawana ustalona przedziałami prędkość jazdy. W rzeczywistości nie jest ona taka idealna, co można zaobserwować na rysunku 3a) przez wykorzystanie generatora losowego o rozkładzie Gaussa i generatora o rozkładzie równoległym.



Rys. 3. Symulacja losowych zmian prędkości jazdy a) z wykorzystaniem generatorów, b) zadana prędkość jazdy

Na rys. 4 przedstawiono wykres symulowanych zmian prędkości jazdy, na podstawie którego określano wartości prawdopodobieństwa P_{ti} czasu jazdy z prędkością v_i na danej trasie. W obliczeniach wykorzystano pakiet MathCad.

Po wyznaczeniu P_{ti} i wstawieniu pozostałych danych (zakładanych) wartości do wzoru (1) można obliczyć trwałość zmęczeniową węzła.



Rys. 4. Określenie wartości prawdopodobieństwa P_{ti} czasu jazdy z prędkością v_i (na danej trasie)

Po wyznaczeniu P_{ti} i wstawieniu pozostałych już danych wartości do wzoru (1) możemy obliczyć trwałość.

5. Uwagi końcowe

Analizując uzyskane wyniki badań symulacyjnych, można stwierdzić, że:

- Wartość wielkości trwałości zmęczeniowej uzyskiwana z obliczeń symulacyjnych, pozwala efektywnie określić poziom bezpieczeństwa ramy wózka zależny od prędkości jazdy i dokonać optymalnego doboru rodzaju materiału konstrukcji węzła.

- Pakiety symulacyjne VisSim i Mathcad są przydatne do rozwiązania postawionych problemów bezpieczeństwa złożonych systemów w kolejnictwie. Zauważono komplementarność ich cech w rozwiązywaniu zadań mieszanych, gdy dane wejściowe podane są w postaci macierzy wartości sygnału albo jawnej zależności funkcyjnej pomiędzy zmiennymi.

Literatura

- [1] Bobrowski D., *Modele i metody matematyczne teorii niezawodności*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1989.
- [2] Jaźwiński J., *Bezpieczeństwo systemów*, Wydawnictwo Naukowe PWN Sp. z o. o., Warszawa 1993.
- [3] Magiera J., *Prognozowanie niezawodności w kombinowanym systemie transportowym, Zużycie i Niezawodność cz. III*, PAN, Kraków 1998.
- [4] Oprędkiewicz J., Stolarski B., *Komputerowe monitorowanie niezawodności samochodów*, PWN, Warszawa-Kraków 2000.
- [5] Piec P., Magiera J., *Ocena zużycia i niezawodności pojazdów szynowych*, Zakład Narodowy im. Ossolińskich – Wydawnictwo, Wrocław 1994.
- [6] Praca zbiorowa pod redakcją S.I. Sokołowa, *Badanie dynamiki i wytrzymałości wagonów pasażerskich*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1983.
- [7] Sobański M., Mikulski J., *Bezpieczeństwo systemów sterowania ruchem kolejowym w świetle wymagań norm CENELE*, Przegląd Kolejowy 11/99.