

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA
im. Jarosława Dąbrowskiego



STRESZCZENIE PRACY MAGISTERSKIEJ

MODELOWANIE 2D I BADANIA NUMERYCZNE BELKOWYCH MOSTÓW KOLEJOWYCH PODDANYCH DZIAŁANIU POCIĄGÓW SZYBKOBIEŻNYCH

Paulina GALEWSKA

WYDZIAŁ MECHANICZNY

Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej

Specjalność: Techniki komputerowe w budowie maszyn

Kierownik pracy: *prof. dr hab. inż. Marian KLASZTORNY*

WARSZAWA 2010

Praca dotyczy modelowania i symulacji numerycznych mostów kolejowych obciążonych pociągami szybkojeźdzącymi. Praca składa się z sześciu rozdziałów, spisu literatury i dwóch załączników. Objętość pracy wynosi 115 stron.

Cele pracy są następujące:

- 1) sformułowanie zadań podstawowych w dynamice mostów kolejowych pod obciążeniem ruchomym,
- 2) przeprowadzenie badań numerycznych w zakresie zadań podstawowych w celu określenia cech pojazdów szynowych, które należy uwzględnić w modelowaniu 2D układu most – tor – pociąg ruchomy,
- 3) opracowanie modelu fizycznego 2D i odpowiadającego mu modelu matematycznego układu most – pociąg ruchomy, przydatnego w obliczeniach inżynierskich jednotorowych jednoprzęsłowych mostów kolejowych,
- 4) przeprowadzenie analizy dynamicznej wybranego jednoprzęsłowego mostu stalowego, poddanego działaniu wybranego pociągu szybkojeźdźczego.

Praca dyplomowa została podzielona na dwie główne części. W części pierwszej sformułowano 4 zadania podstawowe w dynamice mostów kolejowych pod obciążeniem ruchomym. Opracowano algorytmy obliczeniowe i program w języku Pascal do symulacji drgań układów odpowiadających zadaniom podstawowym. Przeprowadzono badania numeryczne w zakresie zadań podstawowych dla wybranego mostu kolejowego i pociągu szybkojeźdźczego.

W części drugiej opracowano model fizyczny 2D i odpowiadający mu model matematyczny układu most – tor – pociąg ruchomy, w którym uwzględniono podstawowe cechy konstrukcyjne tego układu. Model odnosi się do jednotorowych jednoprzęsłowych belkowych mostów stalowych lub zespolonych oraz pociągów złożonych z pojazdów na niezależnych dwuosiowych wózkach jezdnych, typu ICE-3 lub Shinkansen. Układ most – tor – pociąg ruchomy podzielono na podukłady inercyjne i zastosowano metodę formułowania równań ruchu w niejawnej postaci. W odniesieniu do mostu zastosowano metodę Lagrange'a – Ritza. W odniesieniu do pojazdów szynowych zastosowano teorię układów wielu ciał sztywnych. Opracowano algorytmy obliczeniowe i program w języku Pascal do symulacji drgań układu most – tor – pociąg ruchomy. Wykorzystano rozwiązania problemów szczegółowych zaprezentowane w części pierwszej. Przeprowadzono analizę dynamiczną mostu stalowego SB15 o rozpiętości teoretycznej 15,00 m, poddanego działaniu pociągu szybkojeźdźczego ICE-3.

Zadania podstawowe są następujące:

- 1) drgania niestabilne belki Eulera obciążonej strumieniem cyklicznym sił skupionych (model P),
- 2) drgania niestabilne belki Eulera obciążonej strumieniem cyklicznym mas skupionych (model M),
- 3) drgania niestabilne belki Eulera obciążonej strumieniem cyklicznym oscylatorów lepkosprężystych jednomasowych (model M_0),
- 4) drgania niestabilne belki Eulera obciążonej strumieniem cyklicznym oscylatorów lepkosprężystych dwumasowych (model MM_0).

Belka Eulera jest uproszczonym modelem mostu kolejowego jednoprzęsłowego, swobodnie podpartego. Strumienie cykliczne składają się z powtarzalnych cykli elementów skupionych, będących uproszczonym modelem pociągu szybkojeźdźczego. Zadania podstawowe sformułowano w zakresie lepkosprężystym. Więzy jednostronne uwzględniono w modelach M, MM_0 . W modelu M_0 odrywanie się oscylatorów od toru nie występuje, co potwierdzono poprzez kontrolę interakcji. Układ belka – strumień elementów ruchomych (B-S) jest liniowy w przypadku modeli P, M_0 oraz przedziałami liniowy w przypadku modeli M, MM_0 , ze względu na możliwość odrywania się elementów ruchomych od toru.

Przyjęto następujące założenia:

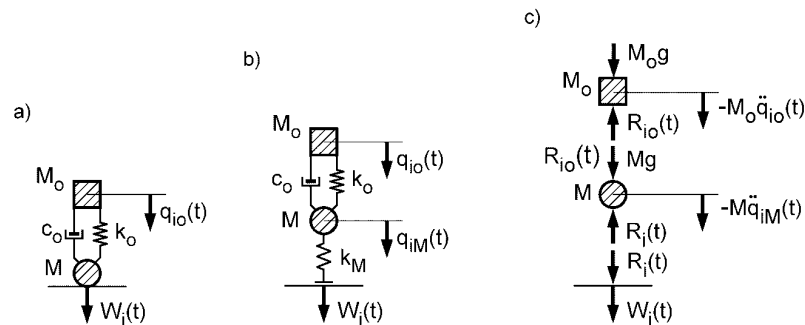
- 1) układ belka – obciążenie ruchome jest przedziałami liniowy fizycznie i geometrycznie,
- 2) belka Eulera jest pryzmatyczna, inercyjna, odkształcalna giętnie, wykonana z materiału liniowo lepkosprężystego,
- 3) tłumienie drgań w belce jest opisane modelem Langer'a (jednakowy dekrement tłumienia dla wszystkich układów modalnych),
- 4) rozpatruje się drgania pionowe belki i elementów ruchomych,
- 5) podniesienie konstrukcyjne osi belki jest tak dobrane, aby oś belki obciążonej statycznie ciężarem własnym była prostoliniowa,

- 6) rozpatruje się procesy izotermiczne,
- 7) obciążenie ruchome belki stanowi skończony strumień N powtarzalnych elementów skupionych, w odstępach odwzorowujących rozstaw osiowy wózków jezdnych oraz długość pojazdów powtarzalnych (obciążenie cykliczne),
- 8) obciążenie porusza się wzdłuż toru ze stałą prędkością poziomą,
- 9) w modelach M , MM_0 więzy między torem a obciążeniem ruchomym są jednostronne, tzn. przenoszą tylko ściskanie,
- 10) tor jest gładki (nierówności nie występują), tor poza belką jest prostoliniowy i niepodatny,
- 11) w chwili początkowej oscylatory ruchome są w równowadze statycznej, a belka jest w równowadze statycznej.

Do sformułowania ogólnych równań ruchu układu B-S zastosowano metodę Lagrange'a – Ritza oraz metodę Klasztornego w zakresie formułowania równań ruchu w niejawnej postaci. Obciążenie zewnętrzne belki stanowi strumień skupionych sił ruchomych $R_1(t), R_2(t), \dots, R_N(t)$, będących dynamicznymi naciskami elementów ruchomych na tor. W przypadku odrywania się elementu/elementów M, MM_0 od toru, układ jest traktowany jako liniowy w odpowiednich przedziałach czasowych. Ogólne macierzowe równanie ruchu belki mostowej obciążonej strumieniem sił interakcji $R_1(t), R_2(t), \dots, R_N(t)$, w niejawnej postaci:

$$\mathbf{B}\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{q}(t) = \mathbf{SR}. \quad (1)$$

W pracy dyplomowej wyznaczono wzory określające wektor sił interakcji w zadaniach 1 – 4. W zadaniu 4 belka jest obciążona cyklicznym strumieniem oscylatorów lepkosprężystych dwumasowych, Masę nieresorowaną M zastąpić można masą resorowaną M za pomocą jednostronnej sprężyny kontaktowej o sztywności k_M , podobnie jak w zadaniu 2 (rys. 1).



Rys. 1. Pojedynczy element ruchomy w modelu MM_0 :

- a) element przed przemodelowaniem;
- b) przemodelowanie masy M na masę resorowaną;
- c) układ sił pionowych działających na masy M, M_0

Dodatkowe równania ruchu dwumasowych oscylatorów lepkosprężystych o parametrach M_0, M, k_0, c_0, k_M można wyznaczyć z zasady d'Alemberta dla mas M_0, M (rys. 1). Dodatkowe macierzowe równanie ruchu strumienia oscylatorów dwumasowych ma następującą postać niejawną:

$$\mathbf{B}_s\ddot{\mathbf{q}}_s(t) + \mathbf{D}_s\dot{\mathbf{q}}_s(t) + \mathbf{K}_s\mathbf{q}_s(t) = \mathbf{F}_s. \quad (2)$$

W pracy opracowano komputerowe algorytmy numerycznego całkowania równań ruchu w zadaniach 1 – 4, bazujące na metodzie średniego przyspieszenia Newmarka i predykcji liniowej wektorów interakcji.

Celem analizy dynamicznej w zakresie zadań podstawowych jest ocena adekwatności modeli obciążenia ruchomego P, M, M_0, MM_0 w prognozowaniu procesów dynamicznych w konstrukcjach mostowych, na przykładzie wybranego mostu kolejowego i wybranego pociągu szybkiego. Ocenie podlega wpływ podstawowych cech cyklicznego obciążenia ruchomego na odpowiedź dynamiczną układu B-S, a mianowicie:

- 1) wpływ inercji mas nieresorowanych elementów ruchomych,
- 2) wpływ inercji mas resorowanych elementów ruchomych,
- 3) wpływ resorowania elementów ruchomych.

Na podstawie przeprowadzonych badań numerycznych w zakresie zadań podstawowych można sformułować następujące wnioski końcowe:

1) W modelowaniu pojazdów szynowych należy uwzględniać masy nieresorowane, zawieszenie lepkosprężyste i masy resorowane. Model MM_0 mający te cechy jest jednak zbyt uproszczony. Należy uwzględnić zestawy kołowe modelowane oddzielnie, resorowane ramy wózków i nadwozie oraz zawieszenia I i II stopnia.

2) W przypadku powtarzalnych pojazdów szynowych mogą wystąpić stany rezonansowe, dlatego konieczne jest uwzględnienie pełnej liczby pojazdów oraz dodatkowych czynników tłumiących drgania, m.in. podsypki.

3) Model M wykazuje niedopuszczalne różnice jakościowe i ilościowe w porównaniu z modelem MM_0 , co świadczy o nieadekwatności modelu M.

4) Model P daje wyniki zbliżone do rzeczywistości, ale w stanach rezonansowych mogą wystąpić przesunięcia i zawyżone rzędne w porównaniu z modelem MM_0 .

5) Model M_0 daje wyniki zbliżone do rzeczywistości, ale w stanach rezonansowych mogą wystąpić przesunięcia i niewielkie różnice ilościowe w porównaniu z modelem MM_0 .

6) W modelowaniu pojazdów szynowych zachodzi konieczność uwzględnienia wieżów jednostronnych pomiędzy zestawami kołowymi a szynami. Analizą należy objąć ryzyko wykolejenia się pociągu przy wyższych prędkościach pociągu przejeżdżającego przez most kolejowy.

Obiektem badań numerycznych w drugiej części pracy jest most kolejowy oznaczony kodem SB15, zaprojektowany jako jeden z obiektów typoszeregu belkowych mostów stalowych, jednotorowych, swobodnie podpartych z torem na podsypce tłuczniowej. Przyjęto uproszczony model mostu w formie pryzmatycznej belki Eulera, odpowiadającej jednemu torowi. Do badań numerycznych wybrano niemiecki pociąg szybkobieżny ICE-3, rozwijający prędkości eksploatacyjne do 300 km/h (rys. 2).



Rys. 2. Pociąg szybkobieżny ICE-3

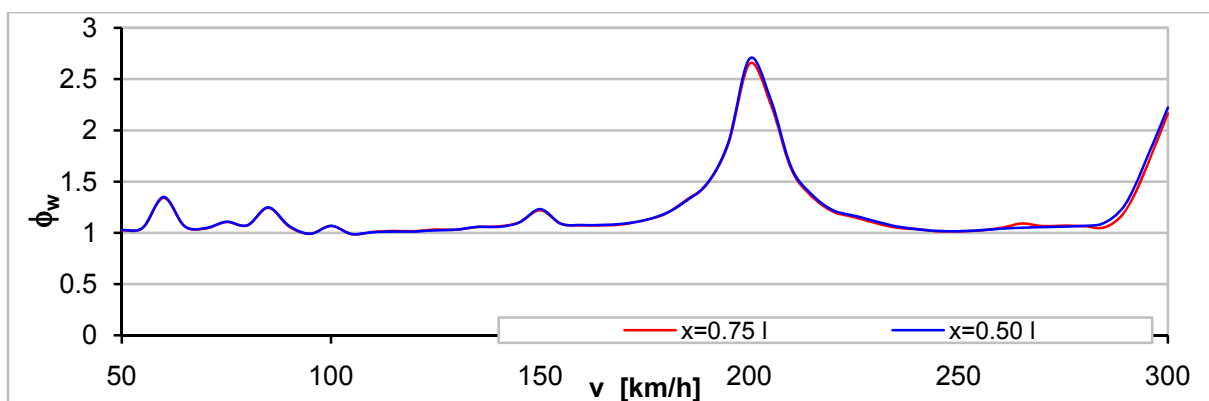
Do sformułowania równań ruchu układu most – pociąg ruchomy zastosowano metodę Lagrange’a – Ritza oraz metodę Klasztornego w zakresie formułowania równań ruchu w niejawnej postaci. Metodyka formułowania równań ruchu jest następująca:

- 1) ugięcie pionowe belki aproksymuje się globalnie szeregiem funkcji spełniających warunki Ritza (kinematycznie dopuszczalny układ zupełny),
- 2) rozpatruje się drgania względne ruchomych pojazdów szynowych od położenia równowagi statycznej, tzn. wprowadza się siły ruchome będące naciskami statycznymi zestawów kołowych na tor,
- 3) wprowadza się interakcje będące dynamicznymi naciskami sprężyn kontaktowych na tor (naciski te są równe zeru w stanie równowagi statycznej),
- 4) równania ruchu formułuje się w niejawnej postaci, oddzielnie dla belki i pojazdów szynowych, stosując równania Lagrange’a II rodzaju dla belki i pojazdów szynowych,

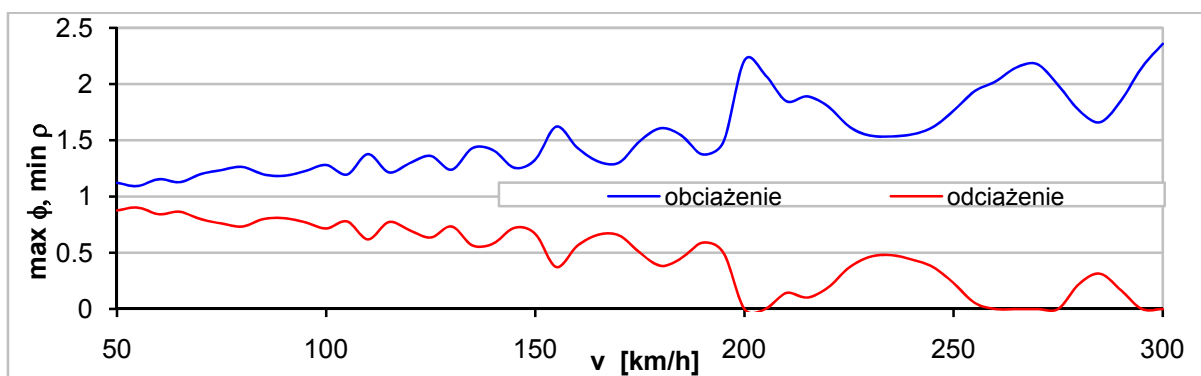
- 5) gradient obciążenia belki w postaci strumienia nacisków statycznych zestawów kołowych oraz nacisków dynamicznych sprężyn kontaktowych na tor oblicza się dla nacisków dynamicznych w niejawniej postaci,
- 6) gradient obciążenia mas skupionych pojazdów szynowych (odwzorowujących zestawy kołowe), w postaci nacisków dynamicznych sprężyn kontaktowych, oblicza się dla nacisków dynamicznych w niejawniej postaci,
- 7) równania ruchu formułuje się, stosując rachunek macierzowy.

Przyjęto następujące założenia:

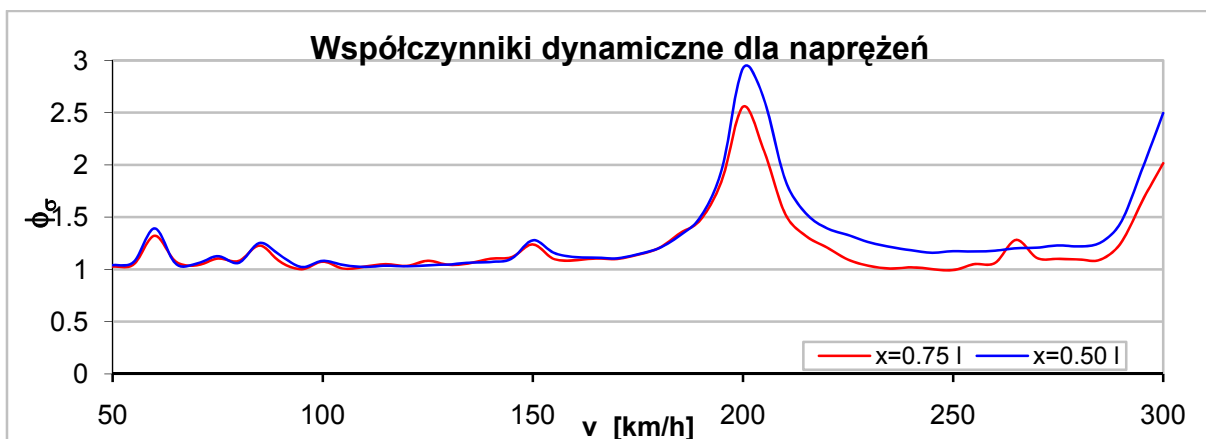
- 1) układ belka – pociąg ruchomy jest przedziałami liniowy fizycznie i geometrycznie,
- 2) belka Eulera jest pryzmatyczna, inercyjna, odkształcalna giętnie, wykonana z materiału liniowo lepkosprężystego,
- 3) tłumienie drgań w belce jest opisane modelem Langerera (jednakowy dekrement tłumienia dla wszystkich układów modalnych),
- 4) rozpatruje się drgania w płaszczyźnie pionowej belki i pojazdów szynowych,
- 5) podniesienie konstrukcyjne osi belki jest tak dobrane, aby oś belki obciążonej statycznie ciężarem własnym była prostoliniowa,
- 6) rozpatruje się procesy izotermiczne,
- 7) obciążenie ruchome belki stanowi strumień ośmiu pojazdów szynowych odwzorowujących pociąg szybkojeźdźny ICE-3,
- 8) pociąg porusza się wzdłuż toru ze stałą prędkością eksploatacyjną,
- 9) sprężyny kontaktowe są jednostronne; odrywanie sprężyny od toru następuje wówczas, gdy siła rozciągająca sprężynę jest równa naciskowi statycznemu zestawu kołowego na tor,
- 10) tor jest gładki (nierówności nie występują),
- 11) w chwili początkowej pociąg znajduje się przed belką,
- 12) w chwili początkowej pociąg i belka są w równowadze statycznej,
- 13) tor poza belką jest prostoliniowy i niepodatny.



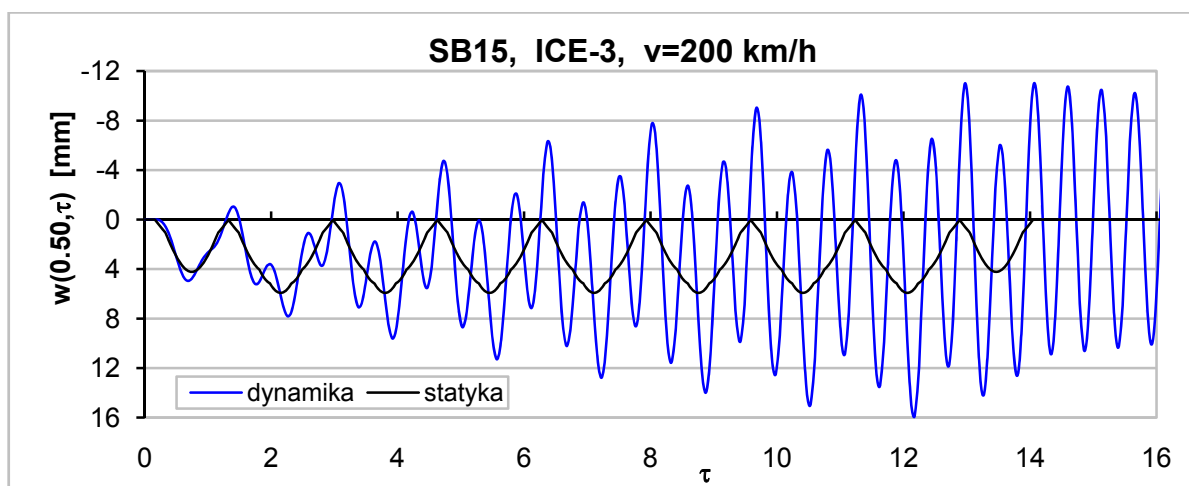
Rys. 3. Wykresy współczynników dynamicznych ugięć w badanych przekrojach mostu SB15 obciążonego pociągiem ICE-3



Rys. 4. Wykresy współczynników obciążenia i odciążenia pociągu ICE-3 przejeżdżającego przez most SB15



Rys. 5. Wykresy współczynników dynamicznych naprężeń normalnych w badanych przekrojach mostu SB15 obciążonego pociągiem ICE-3



Rys. 6. Przebieg czasowy dynamiczny ugięcia w środku rozpiętości mostu SB15 wywołanego przejazdem pociągu ICE-3 z prędkością 200 km/h, na tle przebiegu quasi-statycznego

Przeprowadzono modelowanie analityczne 2D, sformułowano macierzowe równania ruchu, opracowano program obliczeniowy oraz przeprowadzono analizę dynamiczną układu SB15 – ICE-3. Analizę dynamiczną mostu SB15, obciążonego pociągiem szybkobieżnym ICE-3, przeprowadzono w dwóch etapach. W etapie pierwszym wykonano symulacje przejazdu pociągu z prędkościami eksploatacyjnymi $v \in [50; 300]$ km/h, co $\Delta v = 10$ km/h. Pozwala to na wyznaczenie stanów rezonansowych oraz stref, w których przejazd ma charakter prawie statyczny. Wyznaczono wykresy współczynników dynamicznych ugięć i naprężeń normalnych w środku rozpiętości przęsła i w $\frac{3}{4}$ rozpiętości oraz wykresy współczynników obciążenia i odciążenia pociągu. Przykładowe wyniki pokazano na rys. 3-6.

Sformułowano następujące główne wnioski w części drugiej pracy:

1) Prognoza teoretyczna prędkości rezonansowych pociągu ICE-3 względem mostu SB15 została potwierdzona przez symulacje. Występują niewielkie obniżenia tych prędkości spowodowane efektami parametrycznymi. Najbardziej niebezpieczna jest prędkość 200 km/h.

2) Wykresy współczynników dynamicznych ugięć w badanych przekrojach są bardzo zbliżone do siebie. W wykresach współczynników dynamicznych naprężeń widoczne są różnice przy prędkościach wyższych od 200 km/h.

3) Wykresy współczynników obciążenia i odciążenia pociągu ICE-3 są prawie symetryczne względem siebie, co jest spowodowane oscylacjami zawieszonych mas pojazdów szynowych. W pewnych przedziałach prędkości powyżej 200 km/h wystąpiły mikrooderwania kół od szyn. Jednak po uwzględnieniu ciągłości toru na podporach i odkształcalności toru poza mostem oderwania te prawdopodobnie nie wystąpią.