

Jarosław Bednarz

Badania dynamiki konstrukcji wagonu kolejowego

JEL: L92 DOI: 10.24136/atest.2019.024

Data zgłoszenia: 15.12.2018 Data akceptacji: 08.02.2019

W dzisiejszych czasach przy projektowaniu konstrukcji mechanicznych jednym z podstawowych kryteriów są własności dynamiczne obiektu. Mają one znaczący wpływ na drgania układu, emitowany hałas, wytrzymałość zmęczeniową, sterowność i stabilność konstrukcji. Najczęściej do opisu dynamiki konstrukcji stosuje się modele strukturalne, które buduje się zgodnie z zasadami metody elementów skończonych. Model strukturalny można wykorzystać do wyznaczenia modelu modalnego będącego zbiorem częstości drgań własnych i odpowiadających im postaci drgań – przez zastosowanie odpowiedniej transformacji współrzędnych modelu. Proces budowy modelu modalnego nosi nazwę analizy modalnej. W artykule przedstawiano sposób przeprowadzenia eksperymentalnych badań modalnych wagonu kolejowego. Celem przeprowadzonych badań była identyfikacja własności dynamicznych w tym częstości i postaci drgań własnych badanego obiektu.

Słowa kluczowe: Eksperymentalna Analiza Modalna, dynamika pojazdów szynowych

Wstęp

W dzisiejszych czasach przy projektowaniu konstrukcji mechanicznych jednym z podstawowych kryteriów są własności dynamiczne obiektu. Mają one znaczący wpływ na drgania układu, emitowany hałas, wytrzymałość zmęczeniową, sterowność i stabilność konstrukcji. Najczęściej do opisu dynamiki konstrukcji stosuje się modele strukturalne, który można wykorzystać do wyznaczenia modelu modalnego będącego zbiorem częstości drgań własnych i odpowiadających im postaci drgań – przez zastosowanie odpowiedniej transformacji współrzędnych modelu. Proces budowy modelu modalnego nosi nazwę analizy modalnej [1,2,3], która znalazła ona szerokie zastosowanie jako narzędzie do rozwiązywania wielu problemów z zakresu analizy drgań, hałasu, wytrzymałości zmęczeniowej oraz syntezy układów sterowania. Taki model może być zidentyfikowany na rzeczywistym obiekcie na podstawie wyników eksperymentu identyfikacyjnego. Jest to jeden z najczęściej identyfikowanych modeli rzeczywistych konstrukcji mechanicznych.

W artykule przedstawiano sposób przeprowadzenia badań modalnych wagonu kolejowego typu TADS (rys.1).



Rys. 1. Wagon kolejowy typu TADS
(<http://sigman.kolej.org.pl/foto/tadns1.jpg>)

1 Opis przeprowadzonych badań modalnych

Głównym celem przeprowadzonych badań była identyfikacja częstości i postaci drgań własnych badanego obiektu. Zakres przeprowadzonych badań obejmował:

1. TEST A - badania modalne z zastosowaniem wymuszenia impulsowego (kierunek wymuszenia pionowy) w sieci 63 punktów pomiarowych dla wagonu z zamkniętym dachem i otwartymi zsypaniami,,
2. TEST B - badania modalne z zastosowaniem wymuszenia impulsowego (kierunek wymuszenia pionowy) w sieci 8 punktów pomiarowych dla wagonu z otwartym dachem i otwartymi zsypaniami,
3. TEST C - badania modalne z zastosowaniem wymuszenia impulsowego (kierunek wymuszenia pionowy) w sieci 16 punktów pomiarowych dla wagonu z zamkniętym dachem i zamkniętym jednym ze zsypanów.

W dalszej części artykułu w celu uproszczenia opisu zostaną wykorzystane symbole A=C do oznaczenia poszczególnych testów. We wszystkich przeprowadzonych badaniach wykorzystano następująca aparaturę pomiarową:

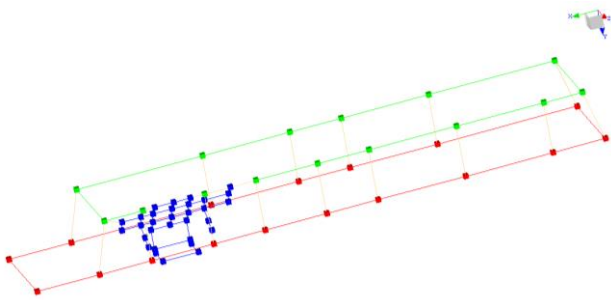
1. 28kanałowy analizator sygnałów dynamicznych typu SCADAS III,
2. akcelerometry piezoelektryczne typu PCB 356B08, PCB 356A16 oraz PCB M333B30,
3. młotki modalne typu PCB 086C20 oraz typu PCB 086D50,
4. moduł oprogramowania LMS Test.Lab,
5. moduł oprogramowania VIOMA.

Zestawienie najważniejszych wspólnych parametrów eksperymentów A=C:

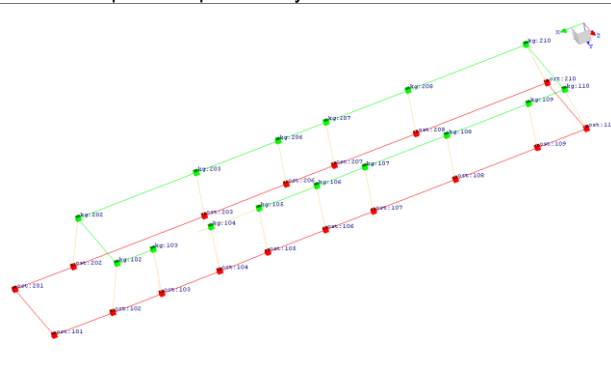
1. zastosowano wymuszenie impulsowe,
2. równocześnie z pomiarem sygnału siły wymuszającej mierzono sygnały odpowiedzi na wymuszenie – przyspieszenia drgań, w każdym punkcie pomiarowym w 3 wzajemnie prostopadłych kierunkach,
3. na podstawie mierzonych sygnałów pomiarowych wyznaczono widmowe funkcje przejścia (WFP), w postaci funkcji inertancji [m/s²/N], między sygnałem wymuszenia a sygnałami odpowiedzi,
4. w czasie estymacji przebiegów WFP przebiegi funkcji koherencji zwyczajnej między sygnałem wymuszenia, a sygnałami odpowiedzi były monitorowane dla zapewnienia odpowiedniej jakości sygnałów pomiarowych,
5. zakres częstości pomiaru ustalono na 0 ÷ 512 [Hz],
6. rozdzielczość częstościową pomiaru ustalono na 0.125 [Hz]
7. estymowane przebiegi WFP były 12 razy uśredniane w dziedzinie częstości w celu zmniejszenia błędów losowych pomiaru.

1.1 Badania modalne wagonu w sieci 63 punktów

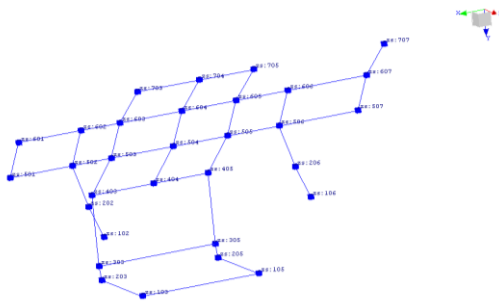
Sieć punktów pomiarowych oraz przyjęty układ współrzędnych przedstawiono na rysunku 2. Obejmowała ona 63 punkty rozmieszczone na konstrukcji wagonu (komponent „ost” oraz „kg”) oraz na elementach skrajnego zsypanu (komponent „zs”).



Rys. 2a. Sieć punktów pomiarowych w teście A.



Rys. 2b. Sieć punktów pomiarowych dla komponentu „ost” oraz „kg” w teście A



Rys. 2c. Sieć punktów pomiarowych dla komponentu „zs” w teście A

Zestawienie najważniejszych parametrów przeprowadzonego eksperymentu:

1. punkt przyłożenia siły wymuszającej znajdował się na ostoi wagonu pomiędzy punktami ost:104 oraz ost:105,
2. siła wymuszająca przyłożona była w kierunku pionowym „+Y”,
3. TEST A składał się z 8 eksperymentów częściowych.

1.2 Badania modalne wagonu w sieci 8 punktów

Sieć punktów pomiarowych obejmowała 8 punktów rozmieszczonych na konstrukcji wagonu (komponent „ost” oraz „kg”) oraz na elementach skrajnego zsypu (komponent „zs”). Lista punktów pomiarowych (oznaczenia zgodne z rysunkiem 2):

- | | |
|------------|-----------|
| 1. kg:207 | 5. zs:604 |
| 2. ost:207 | 6. zs:605 |
| 3. ost:108 | 7. zs:606 |
| 4. kg:108 | 8. zs:607 |

Zestawienie najważniejszych parametrów przeprowadzonego eksperymentu:

1. punkt przyłożenia siły wymuszającej znajdował się na ostoi wagonu pomiędzy punktami ost:104 oraz ost:105,
2. siła wymuszająca przyłożona była w kierunku pionowym „+Y”,
3. TEST B składał się z 1 eksperymentu częściowego.

1.3 Badania modalne wagonu w sieci 16 punktów

Sieć punktów pomiarowych obejmowała 16 punktów rozmieszczonych na konstrukcji wagonu (komponent „ost” oraz „kg”) oraz na elementach skrajnego zsypu (komponent „zs”). Lista punktów pomiarowych (oznaczenia zgodne z rysunkiem 2):

- | | | |
|------------|-------------|------------|
| 1. kg:207 | 7. zs:606 | 13. zs:501 |
| 2. ost:207 | 8. zs:607 | 14. zs:601 |
| 3. ost:108 | 9. kg:206 | 15. zs:602 |
| 4. kg:108 | 10. ost:206 | 16. zs:603 |
| 5. zs:604 | 11. ost:107 | |
| 6. zs:605 | 12. kg:107 | |

Zestawienie najważniejszych parametrów przeprowadzonego eksperymentu:

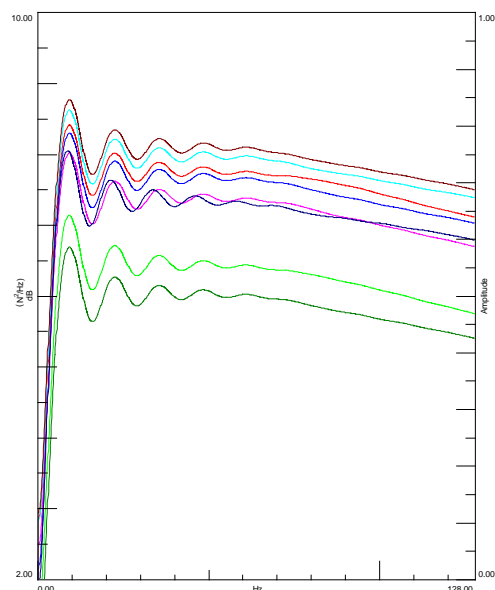
1. punkt przyłożenia siły wymuszającej znajdował się na ostoi wagonu pomiędzy punktami ost:104 oraz ost:105,
2. siła wymuszająca przyłożona była w kierunku pionowym „+Y”,
3. TEST C składał się z 2 eksperymentów częściowych.

2 Analiza wyników przeprowadzonych badań

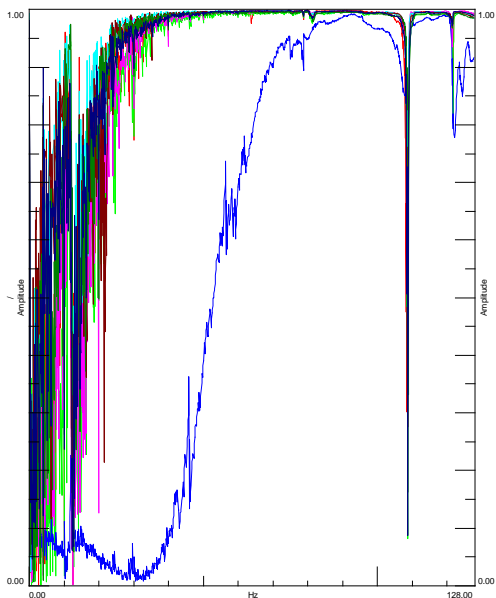
W przypadku testów A do C analiza wyników polegała na estymacji parametrów modalnych badanego obiektu czyli: częstotliwości drgań własnych, współczynników tłumienia modalnego oraz postaci drgań własnych (PDW). Estymacje parametrów w tych testach przeprowadzono w paśmie częstotliwości $0 \div 128$ [Hz]. Estymacja parametrów w tych testach była przeprowadzona przy pomocy modułu oprogramowania LMS Test.Lab. Zastosowano algorytm POLYMAX [4]. Przeprowadzono zbiór procedur estymacji, z których wyników wybrano najbardziej reprezentatywne postacie drgań przy pomocy autorskiej procedury konsolidacji modelu modalnego będącej składnikiem oprogramowania VIOMA.

2.1 Estymacja parametrów modalnych w teście A

Estymację parametrów modalnych poprzedziła analiza jakości danych pomiarowych w oparciu o przebiegi zmierzone w punkcie i kierunku przyłożenia siły wymuszającej. Na rysunku 3 pokazano przebiegi widm amplitudy siły wymuszającej oraz funkcji koherencji zwyczajnej między sygnałem wymuszenia i sygnałem odpowiedzi mierzonym w punkcie i kierunku wymuszenia. Przebiegi te pokazują, że amplituda siły wymuszającej była wystarczająco równomierna w rozważanym paśmie częstotliwości dla przeprowadzenia estymacji parametrów modelu modalnego.

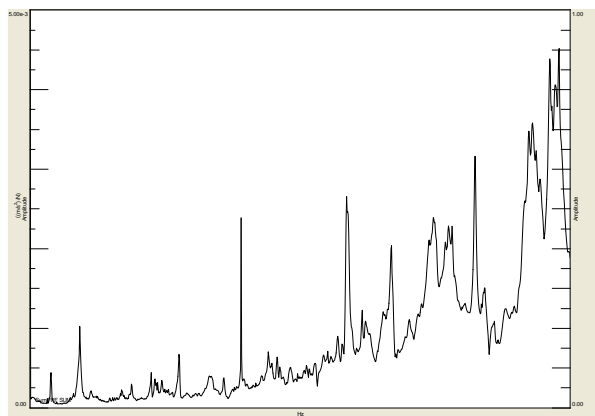


Rys.3a. Charakterystyki amplitudy siły wymuszającej w serii eksperymentów częściowych dla TESTU A

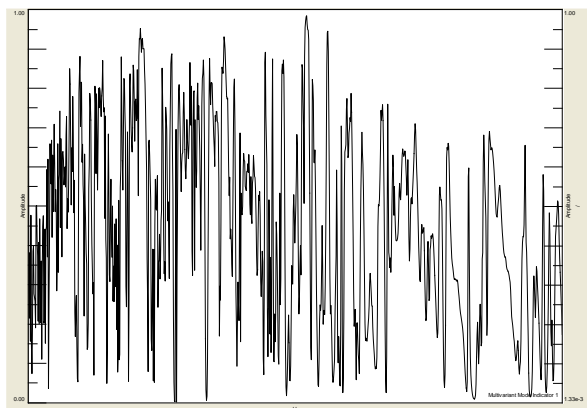


Rys. 3b. Charakterystyki amplitudy siły wymuszającej i funkcji koherencji zwyczajnej w serii eksperymentów częściowych dla TESTU A

Na rysunku 4 przedstawiono przebieg wskaźnika SUM - unormowanej sumy amplitud WFP. Maksymalne wartości tego przebiegu wskazują wartości częstotliwości drgań własnych, które zostały odwzorowane w zarejestrowanych przebiegach WFP dla częstotliwości z zakresu 0 ÷ 128 [Hz]. Podobnie wykorzystywany jest wskaźnik MIF (rys. 5), którego minima wskazują wartości częstotliwości drgań własnych odwzorowanych w wynikach eksperymentu.

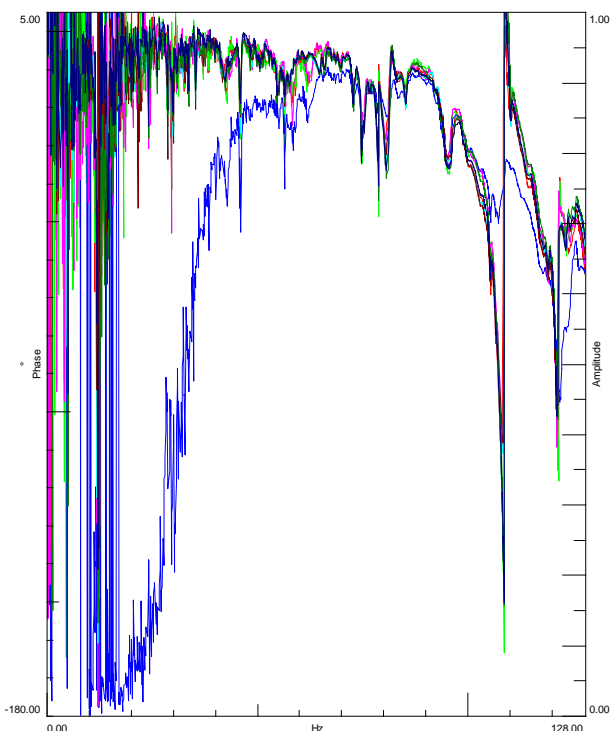
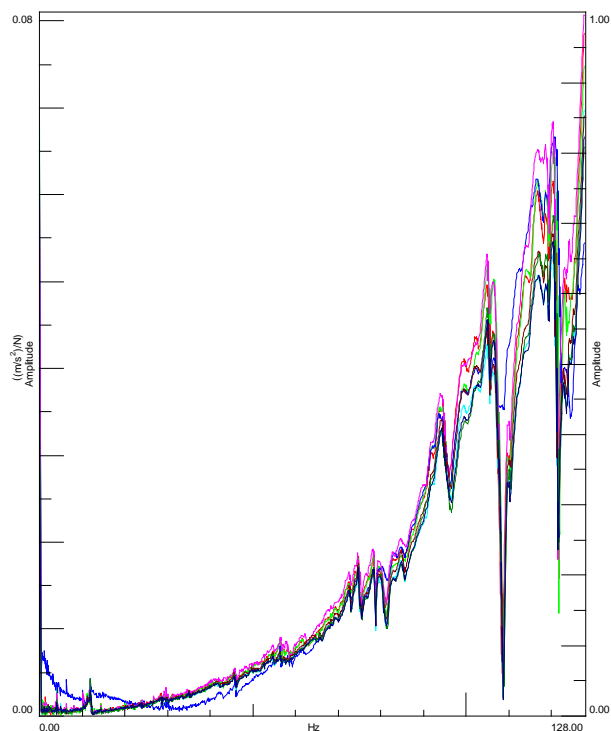


Rys. 4. Wskaźnik SUM dla TESTU A



Rys. 5. Wskaźnik MIF dla TESTU A

Na rysunku 6 pokazano przebiegi WFP w punkcie i kierunku wymuszenia zarejestrowane w serii eksperymentów częściowych.



Rys.6. Przebiegi amplitudy i fazy WFP w punkcie i kierunku przyłożenia wymuszenia dla TESTU A

Wyniki estymacji parametrów modelu modalnego na podstawie danych zarejestrowanych w przeprowadzonych badaniach zestawiono w tabeli 1. Rysunki przykładowych zidentyfikowanych postaci drgań własnych przedstawiono na rysunku 7.

W czasie przeprowadzonych badań zidentyfikowano tę część postaci drgań, która została dobrze wymuszona i odwzorowana w wynikach przeprowadzonego eksperymentu.

Tab. 1. Wartości parametrów modalnych badanego obiektu dla TESTU A

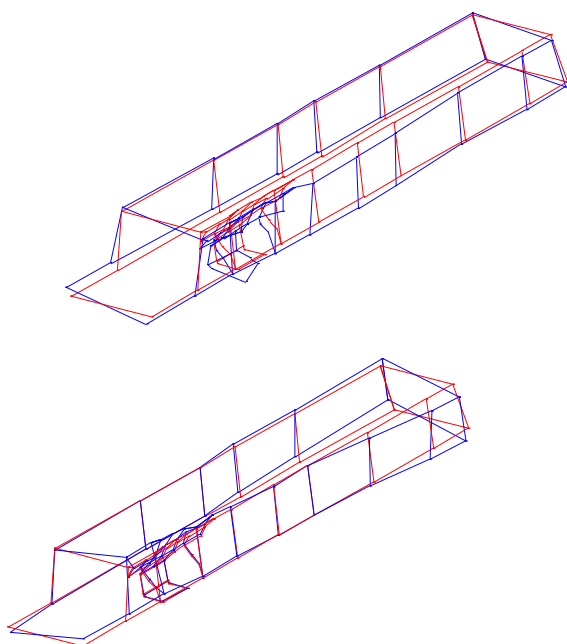
Lp.	Częstotliwość drgań własnych [Hz]	Współczynnik tłumienia modalnego [%]	Lp.	Częstotliwość drgań własnych [Hz]	Współczynnik tłumienia modalnego [%]
1	4.82	0.18	27	72.24	0.46
2	11.77	0.49	28	74.86	0.19
3	14.37	0.36	29	75.32	0.23
4	15.64	0.30	30	77.29	0.18
5	18.81	0.27	31	79.23	0.43
6	23.44	0.23	32	79.46	0.50
7	24.06	0.24	33	80.61	0.25
8	29.06	0.23	34	83.80	0.36
9	31.08	0.19	35	85.27	0.20
10	35.20	0.45	36	85.46	0.16
11	41.37	0.24	37	85.58	0.29
12	42.63	0.47	38	87.11	0.32
13	42.67	0.47	39	88.80	0.21
14	45.88	0.13	40	89.82	0.52
15	48.93	0.27	41	91.73	0.21
16	50.66	0.13	42	94.26	0.30
17	54.94	0.25	43	94.34	0.34
18	56.61	0.14	44	94.51	0.30
19	57.20	0.24	45	95.40	0.32
20	58.49	0.25	46	96.25	0.20
21	60.30	0.21	47	98.20	0.40
22	62.16	0.40	48	99.69	0.20
23	64.36	0.27	49	103.16	0.21
24	65.64	0.21	50	105.46	0.22
25	67.64	0.30	51	107.69	0.19
26	69.85	0.34			

Tab. 2. Wartości CDW dla testów A i B

Lp.	CDW [Hz] TEST A	CDW [Hz] TEST B	Lp.	CDW [Hz] TEST A	CDW [Hz] TEST B
1	4.82	4.82	27	72.24	68.62
2	11.77	10.83	28	74.86	73.82
3	14.37	11.66	29	75.32	74.42
4	15.64	12.49	30	77.29	78.27
5	18.81	14.24	31	79.23	79.36
6	23.44	21.72	32	79.46	80.94
7	24.06	23.27	33	80.61	83.32
8	29.06	24.05	34	83.80	85.56
9	31.08	28.60	35	85.27	87.52
10	35.20	29.95	36	85.46	89.83
11	41.37	33.31	37	85.58	92.22
12	42.63	34.75	38	87.11	93.69
13	42.67	38.15	39	88.80	95.59
14	45.88	39.39	40	89.82	98.41
15	48.93	40.41	41	91.73	101.99
16	50.66	40.91	42	94.26	105.35
17	54.94	42.08	43	94.34	107.40
18	56.61	45.68	44	94.51	109.96
19	57.20	48.87	45	95.40	111.88
20	58.49	50.54	46	96.25	---
21	60.30	54.16	47	98.20	---
22	62.16	55.14	48	99.69	---
23	64.36	57.04	49	103.16	---
24	65.64	60.63	50	105.46	---
25	67.64	62.75	51	107.69	---
26	69.85	64.99			

Tab. 3. Wartości wskaźnika MAC

CDW [Hz] TEST A	CDW [Hz] TEST B	MAC [%]
4.82	4.81	94
11.77	12.48	83
14.37	14.23	91
23.44	23.27	56
24.05	24.04	94
29.05	28.60	61
31.08	29.95	76
41.37	42.08	79
45.87	45.68	72
48.92	48.86	82
50.65	50.53	80
54.94	54.16	69
56.61	55.14	75
57.19	57.04	92
60.30	64.99	93
69.84	68.61	94
72.24	74.41	97
79.23	79.36	81
79.46	80.93	86
83.80	83.32	96
85.27	85.56	97
87.10	87.51	93
89.81	89.83	87
91.73	93.68	92
94.50	95.58	88
103.16	101.98	95
105.46	105.35	93
107.68	109.95	69



Rys.7. Przykładowe postacie drgań własnych badanego obiektu

2.2 Estymacja parametrów modalnych w teście B

Test B został przeprowadzony w celu sprawdzenia czy występują różnice wartości częstotliwości drgań własnych (CDW) i jeżeli występują to jak są duże dla wagonu z otwartym i zamkniętym dachem.

W ocenie ilościowej przeprowadzono porównanie wartości częstotliwości drgań własnych wyestymowanych na podstawie przeprowadzonych testów A i B. Wartości wyestymowanych częstotliwości przedstawiono w tabeli 2. W tabeli 3 przedstawione są wartości wskaźnika MAC dla bliskich sobie CDW wyznaczonych na podstawie testów A i B.

2.3 Estymacja parametrów modalnych w teście C

Test C został przeprowadzony w celu sprawdzenia czy występują różnice w CDW i jeżeli występują to jak są duże dla wagonu z otwartym i zamkniętym skrajnym zszpem.

W ocenie ilościowej przeprowadzono porównanie wartości częstotliwości drgań własnych wyestymowanych na podstawie przeprowadzonych testów A i C. Wartości wyestymowanych częstotliwości przedstawiono w tabeli 4. W tabeli 5 przedstawione są wartości wskaźnika MAC dla bliskich sobie CDW wyznaczonych na podstawie testów A i D.

Tab. 4. Wartości CDW dla testów A i B

Lp.	CDW [Hz] TEST A	CDW [Hz] TEST C	Lp.	CDW [Hz] TEST A	CDW [Hz] TEST C
1	4.82	4.86	27	72.24	73.64
2	11.77	11.46	28	74.86	75.91
3	14.37	11.69	29	75.32	78.07
4	15.64	21.45	30	77.29	79.60
5	18.81	23.56	31	79.23	80.68
6	23.44	24.00	32	79.46	81.17
7	24.06	29.33	33	80.61	82.21
8	29.06	30.96	34	83.80	85.92
9	31.08	31.67	35	85.27	87.60
10	35.20	35.05	36	85.46	89.51
11	41.37	40.35	37	85.58	94.21
12	42.63	41.40	38	87.11	94.76
13	42.67	45.80	39	88.80	99.67
14	45.88	48.68	40	89.82	103.13
15	48.93	49.68	41	91.73	105.55
16	50.66	51.48	42	94.26	107.22
17	54.94	53.41	43	94.34	112.49
18	56.61	56.31	44	94.51	116.11
19	57.20	59.64	45	95.40	118.19
20	58.49	59.35	46	96.25	---
21	60.30	61.49	47	98.20	---
22	62.16	63.68	48	99.69	---
23	64.36	65.61	49	103.16	---
24	65.64	67.47	50	105.46	---
25	67.64	68.49	51	107.69	---
26	69.85	69.77			

Tab. 4. Wartości wskaźnika MAC

CDW [Hz] TEST A	CDW [Hz] TEST C	MAC [%]
4.82	4.86	94
11.77	11.69	94
23.44	23.56	84
24.06	24.00	96
29.06	29.33	82
31.08	30.96	81
35.20	35.05	93
41.37	45.80	93
42.63	40.35	98
48.93	51.48	72
50.66	53.41	92
57.20	56.31	96
58.49	59.64	64
60.30	59.35	65
65.64	65.61	86
67.64	67.47	88
74.86	69.77	86
75.32	78.07	66
79.23	80.68	66
83.80	82.21	86
85.27	85.92	88
87.11	89.51	86
105.46	105.55	95
107.69	107.22	92

Podsumowanie

Przedstawione w artykule wyniki badań modalnych konstrukcji wagonu kolejowego pokazują, że metoda analizy modalnej może być z powodzeniem zastosowana w procesie konstruowania i eks-

ploatacji pojazdów kolejowych. Najważniejsze wnioski z przeprowadzonych badań to:

1. Analiza wartości wskaźnika amplitud drgań pozwala stwierdzić, że w zakresie częstotliwości do ok. 60 [Hz] zarówno elementy zsyphu jak i ostoja wagonu mają podobne amplitudy drgań, w wyższych częstotliwościach dominujące amplitudy drgań występują na elementach zsyphu.
2. Porównywane wartości zamieszczonych w tabeli 3 pokazało, że otwarcie dachu spowodowało zmianę wartości niektórych częstotliwości drgań. Zmiana ta nie przekracza 7.2%.
3. Porównywane wartości zamieszczonych w tabeli 5 pokazało, że zamknięcie zsyphu spowodowało zmianę wartości niektórych częstotliwości drgań. Zmiana ta nie przekracza 7%.

Bibliografia:

1. Haylen W., Lammens S., Sas P., Modal Analysis Theory and Practice, KU Leuven, 1997.
2. Kurowski P., Bednarz J.: Comparison of modal parameters determined in operational conditions by means of the OMA and OMAX method, Structural health monitoring 2008 : proceedings of the fourth European workshop: Cracow, Poland, July 2-4, 2008 Lancaster, Pennsylvania: DEStech Publications, Inc., 2008.
3. Uhl T., Lisowski W., Kurowski P., Inoperation modal analysis and its application, Wydawnictwo Katedry Robotyki i Mechatroniki AGH, 2001.
4. Peeters B., Vecchio A., Van der Auweraer H. PolyMAX modal parameter estimation from operational data. Proceedings of ISMA2004. 2004; 1049-1063.

Research on the dynamics of railway car construction

Nowadays, one of the basic criteria of the design of mechanical structures are dynamic properties of the object. They have a significant effect on the vibration, emitted noise, fatigue strength, controllability and stability of the structure. The structural models are most often use to describe the dynamics of the structures. These models are built in accordance with the principles of the finite element method . Structural model can be used to determine the modal model which is a collection of natural frequencies and corresponding mode shapes by an appropriate coordinate transformation model. The construction process is called the modal analysis . The article presented a method of conducting the experimental modal studies of railway car. The aim of the study was to identify the dynamic properties including the frequency and mode shapes of the object.

Keywords: Experimental Modal Analysis, dynamics of railway vehicles

Autor:

dr inż. **Jarosław Bednarz** – AGH Akademia GórniczoHutnicza im. Stanisława Staszica, Katedra Robotyki i Mechatroniki, al. Mickiewicza 30, 30059 Kraków; email: bednarz@agh.edu.pl