

## АНАЛИЗ НА ПЕШЕХОДЕН МОСТ С ОГЛЕД НА КОМФОРТА ПО ЕВРОКОДА

В. Ризов<sup>1</sup>, А. Дойчева<sup>2</sup>, А. Младенски<sup>3</sup>, Г. Кераджийски<sup>4</sup>

*Ключови думи:* пешеходен мост, вибрации, комфорт, симулации

*Научна област:* строителни конструкции

### РЕЗЮМЕ

Представени са резултати от анализ на стоманен пешеходен мост с оглед на комфорта по европейските норми. Във връзка с това е разработен изчислителен модел за изследване на динамичното поведение на моста по метода на крайните елементи. Извършен е анализ на вибрациите на моста и в трите направления: вертикално, хоризонтално напречно и хоризонтално надлъжно. Направена е оценка на моста с оглед комфорта на пешеходците по Еврокода.

### 1. Въведение

Необходимостта от анализ на пешеходните мостове с оглед на комфорта е породена главно от факта, че в тях много често възникват значителни трептения, които застрашават нормалната им експлоатация. Типичен пример в това отношение е пешеходният мост MILLENNIUM FOOTBRIDGE в Лондон. Големите вибрации, възникнали в това съоръжение, са наложили скъпо струващо допълнително усилване.

По отношение на вибрациите предписанията на европейските норми имат препоръчителен характер. По-специално там се препоръчва критериите за оценка на вибрациите да се съгласуват с клиента за всеки конкретен проект. Ясно е обаче, че тези

<sup>1</sup> Виктор Ризов, проф. д-р инж., кат. „Техническа механика”, УАСГ, бул. „Христо Смирненски“ 1, 1046 София, e-mail: V\_RIZOV\_FHE@UACG.BG

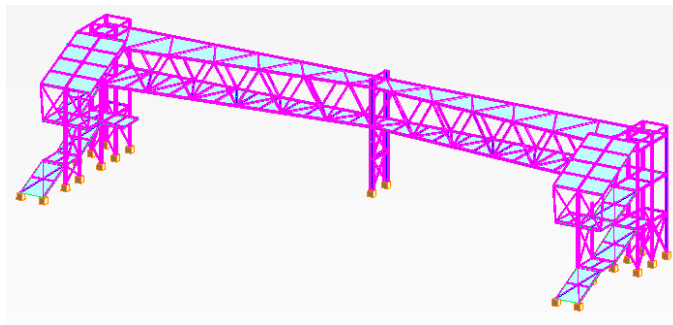
<sup>2</sup> Албена Дойчева, гл. ас. д-р инж., кат. „Техническа механика”, УАСГ, бул. „Христо Смирненски“ 1, 1046 София, e-mail: DOICHEVA\_FHE@UACG.BG

<sup>3</sup> Ангел Младенски, гл. ас. д-р инж., кат. „Техническа механика”, УАСГ, бул. „Христо Смирненски“ 1, 1046 София, e-mail: ANGELM\_FHE@UACG.BG

<sup>4</sup> Георги Кераджийски, студент, спец. „Пътно строителство”, УАСГ, бул. „Христо Смирненски“ 1, 1046 София

критерии оказват значително влияние върху проекта на съоръжението. Също така, нормалното функциониране на съоръжението в много висока степен зависи от правилния подбор на критериите. В критериите се прави сравнение на измерената или изчислената амплитуда на ускорението със земното ускорение. Обикновено се приема, че максималната амплитуда на ускорението трябва да е между 5% и 10% от земното ускорение. В някои национални правилници (Великобритания (BS 5400, 1978), Канада (OBDC, 1983)) и в международния правилник ISO 2631 се контролират вертикалните вибрации. Обаче в същото време по отношение на комфорта в ISO 10137 се отбелязва, че чувствителността на пешеходците към странични трептения е около 4 пъти по-голяма от тази към вертикални трептения.

Може да се обобщи, че проблемите, свързани с комфорта на пешеходните мостове, все още не са намерили своето задоволително решение [1 – 42].



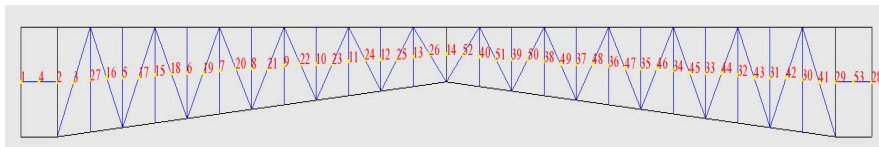
Фиг. 1

Мощната съвременна електронно-изчислителна техника заедно с непрекъснато усъвършенстващия се софтуер разкриват широки възможности за симулиране на динамиката на пешеходните мостове.

Основната цел на настоящото изследване е да се анализира динамичното поведение на пешеходен стоманен мост с оглед на комфорта (фиг. 1). Във връзка с това е разработен изчислителен модел на моста по метода на крайните елементи. За целта е използван пакетът приложни програми ARSAP.

## 2. Анализ

Динамичният анализ на моста за комфорт е извършен в съгласие с EN1990, Анекс А2.



Фиг. 2. Пътно платно с възли по средната линия

Правилникът изисква да се извършва проверка за комфорт на пешеходците, когато честотата на трептене на конструкцията е под 5 Hz за вертикални трептения и под 2,5 Hz за хоризонтални и усуквателни трептения. При това максималните препоръчителни ускорения в  $m/s^2$  за коя и да е точка на пътно платно са:

- 0,7 за вертикални трептения,
- 0,2 за хоризонтални трептения.

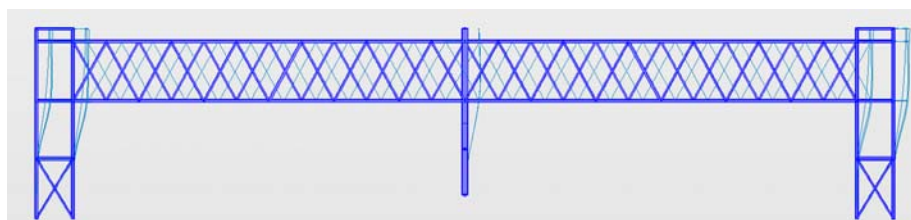
Фиг. 2 представя пътното платно с характерни възли от модела.

Таблица 1 съдържа данни от динамичния анализ на пасарелката при отчитане само на собствената маса и собствената маса плюс маса от  $56 \text{ kg/m}^2$  (в съгласие с техническите норми Sétra за натоварване на пешеходни мостове за проверка за комфорт). Вторият случай се отнася за категория II на пешеходния мост, по който се предполага да се движи компактна тълпа от 0,8 пешеходеца на  $\text{m}^2$ . В първата колона на таблицата е описан характерът на формата на трептене (хор.-надл. означава хоризонтално трептене надлъж по платното; хор.-напр. е хоризонтално трептене напречно по платното и верт. – вертикално трептене). Самите форми на трептене със съответните собствени честоти са показани на фиг. 3.

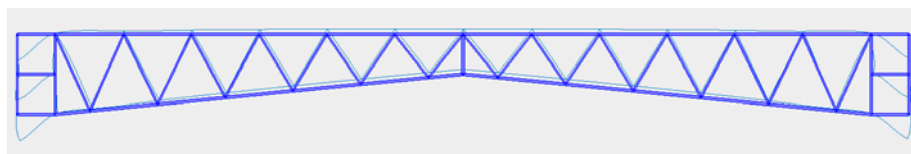
**Таблица 1. Форми и честоти на трептене на пасарелката**

Вид на трептенето	Форма №	Честоти $f_0$ [Hz] от:	
		собствена маса (с.м.)	собствена маса + маса от $70 \text{ kg/m}^2$ ( $0,8 \text{ лица/m}^2$ )
хор.-надл.	1	2,10	2,06
хор.-напр.	2	2,17	2,15
хор.-надл.	3	2,76	2,62
хор.-напр.+усук.	4	3,13	3,08
хор.-напр.	5	3,41	3,36
хор.-напр.	6	3,51	3,49
хор.-напр.	7	3,63	3,59
хор.-напр.	8	4,90	4,68
хор.-напр.	9	5,29	4,93
верт.	10	5,37	4,99
верт.	11	6,07	5,66
верт.	12	6,18	5,86

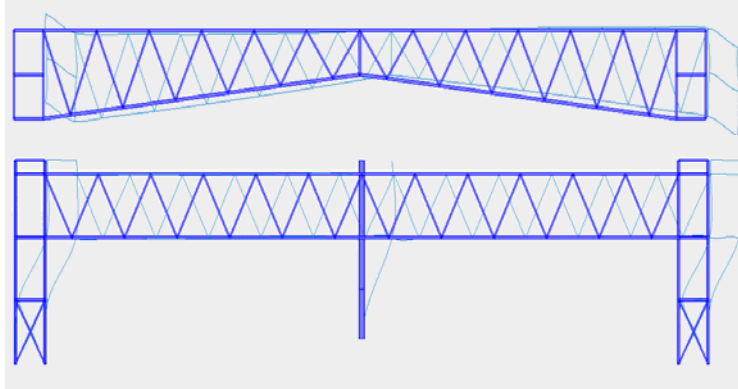
**Форма 1 – хоризонтална –  $f_0 = 2,06$  [Hz]**



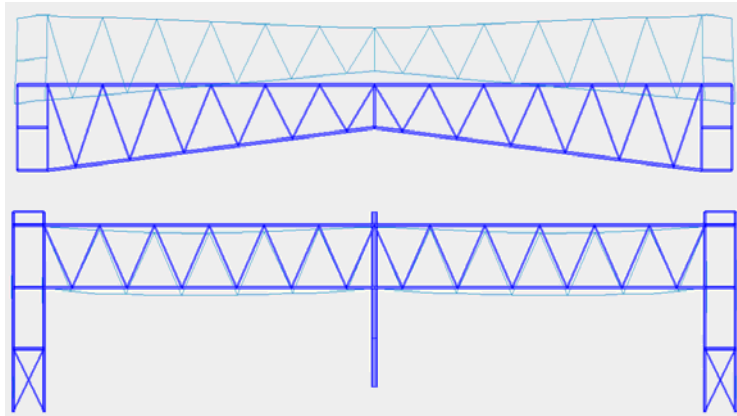
**Форма 2 – хоризонтална –  $f_0 = 2,15$  [Hz]**



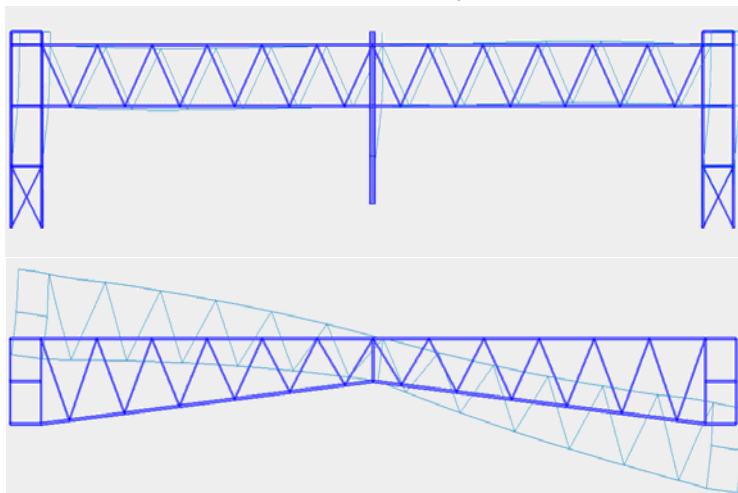
**Форма 3 – хоризонтална –  $f_0 = 2,62$  [Hz]**



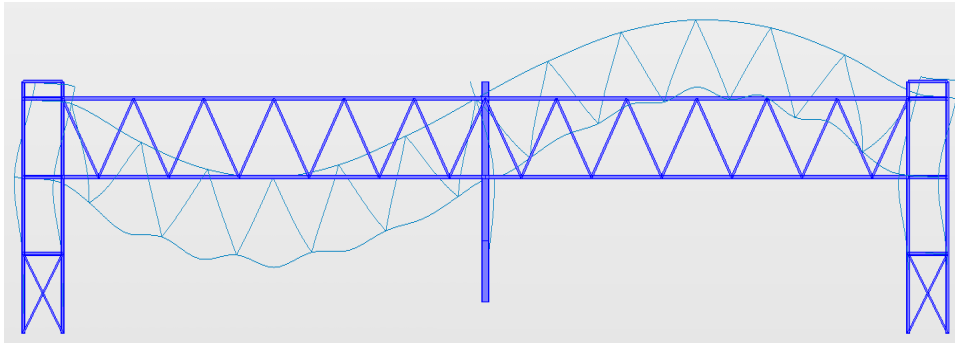
**Форма 4 – основно хоризонтална –  $f_0 = 3,08$  [Hz]  
„Вертикалността” идва от посукването на сечението!**



**Форма 5 – хоризонтална –  $f_0 = 3,36$  [Hz]**



Форма 10 – вертикална –  $f_0 = 4,99$  [Hz]



Фиг. 3. Форми на собствено трептене

Прави впечатление, че първата вертикална форма на трептене е № 10 с честота 4,99 Hz много близко до граничната стойност от 5 Hz. Ето защо трябва да се очаква слабо влияние на движението на пешеходци с обичайната честота в интервала 1 – 2,8 Hz върху реагирането на конструкцията. Резултатите от численото изследване в тази връзка са представени в таблици 2 и 3.

Таблица 2 се отнася за самовъзбуждане, т.е. най-голямото ускорение на реагиране на конструкцията в точката от платното, в която е стъпил пешеходецът и е наложено смущението. Таблица 3, от друга страна, представя най-голямото ускорение в дадена точка от всички възможни положения на пешеходеца по пътното платно, т.е. т. нар. „пълно възбуждане“. В тази връзка твърде показателни са колоните 3 и 4 на таблиците. Съдържанието на първата е ясно след поясненията за самовъзбуждане и пълно възбуждане от по-горе, докато колона 4 показва при каква честота в интервала на възбуждане (1 – 2,8) Hz се е получило съответното максимално ускорение.

Както се очакваше, максимално полученото ускорение от около  $0,24 \text{ m/s}^2$  е далече от максималните препоръчителни ускорения за вертикални трептения от  $0,7 \text{ m/s}^2$ .

От табл. 1 в комбинация с фиг. 3 за множителя  $\psi$  на въздействието от техническите норми Sétra се вижда, че за случая меродавна за комфорта е първата форма на трептене с честота 2,06 Hz, при което  $\psi = 1$ , коефициентът на плътност на тълпата е  $d = 0,8$ , а за коефициента на затихване  $\xi$  е приета средната стойност 0,3% в препоръчания интервал за стоманени мостове (0,2 – 0,4)%. Въздействието на тълпата в  $\left[ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]$  е определено по формулата

$$\left( d \cdot 140 [\text{N}] \cdot \cos 2\pi f_i t \right) \left( \psi 10,8 \sqrt{\frac{\xi}{N}} \right) = 0,8 \cdot 140 \psi 10,8 \sqrt{\frac{0,003}{167}} \cos 2\pi f_i t = 5,12 \cos 12,97 t .$$

**Таблица 2. Ускорение от самовъзбуждане**

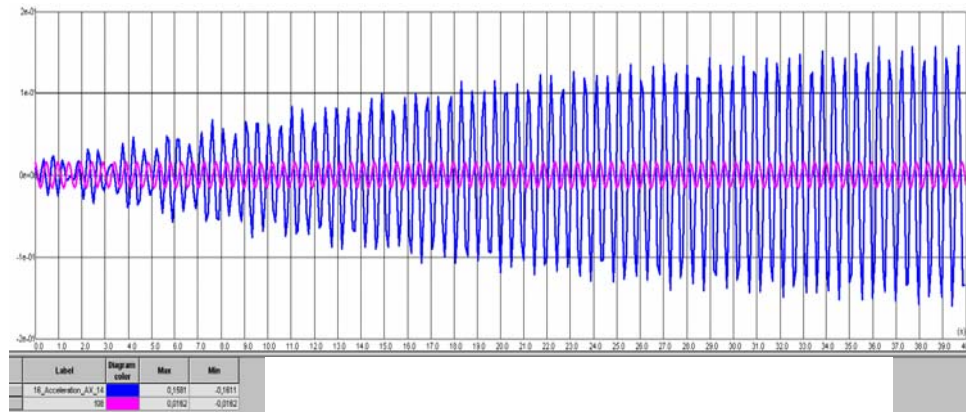
<b>Възел</b>	<b>Максимално ускорение [m/s<sup>2</sup>]</b>	<b>Приложна точка на силата</b>	<b>Честота [Hz]</b>
1	0,0000	1	2,80
2	0,0001	2	2,80
3	0,0102	3	2,80
4	0,0002	4	2,80
5	0,1601	5	2,08
6	0,1437	6	2,37
7	0,1395	7	2,59
8	0,1436	8	2,61
9	0,1468	9	2,58
10	0,1441	10	2,55
11	0,1559	11	2,65
12	0,1556	12	2,80
13	0,1234	13	2,80
14	0,0000	14	2,59
15	0,1562	15	2,25
16	0,0218	16	2,80
17	0,0223	17	2,08
18	0,0217	18	2,25
19	0,0253	19	2,38
20	0,0212	20	2,80
21	0,0204	21	2,80
22	0,0264	22	2,58
23	0,0268	23	2,70
24	0,0298	24	2,37
25	0,0329	25	2,59
26	0,0044	26	2,80
27	0,2375	27	2,80
28	0,0000	28	2,80
29	0,0001	29	2,80
30	0,2375	30	2,80
31	0,1601	31	2,08
32	0,1562	32	2,25
33	0,1437	33	2,37
34	0,1395	34	2,59
35	0,1435	35	2,61
36	0,1469	36	2,58
37	0,1440	37	2,55
38	0,1559	38	2,65
39	0,1556	39	2,80

**Таблица 3. Ускорение от пълно възбуждане**

<b>Възел</b>	<b>Максимално ускорение [m/s<sup>2</sup>]</b>	<b>Приложна точка на силата</b>	<b>Честота [Hz]</b>
1	0,0001	13	2,80
2	0,0002	27	2,80
3	0,0492	27	2,80
4	0,0002	4	2,80
5	0,1601	5	2,08
6	0,1437	6	2,37
7	0,1395	7	2,59
8	0,1436	8	2,61
9	0,1468	9	2,58
10	0,1441	10	2,55
11	0,1559	11	2,65
12	0,1556	12	2,80
13	0,1234	13	2,80
14	0,0016	12	2,65
15	0,1562	15	2,25
16	0,0619	27	2,80
17	0,0518	5	2,10
18	0,0476	15	2,25
19	0,0496	6	2,38
20	0,0401	7	2,59
21	0,0381	6	2,38
22	0,0484	10	2,57
23	0,0483	10	2,65
24	0,0515	12	2,35
25	0,0659	12	2,62
26	0,0232	13	2,80
27	0,2375	27	2,80
28	0,0001	40	2,80
29	0,0002	30	2,80
30	0,2375	30	2,80
31	0,1601	31	2,08
32	0,1562	32	2,25
33	0,1437	33	2,37
34	0,1395	34	2,59
35	0,1435	35	2,61
36	0,1469	36	2,58
37	0,1440	37	2,55
38	0,1559	38	2,65
39	0,1556	39	2,80

За целия мост ( $S=167,64 \text{ m}^2$ ) имаме  $0,86 \cos 12,97t \text{ [kN]}$ , което разделено на 53 възела дава по  $0,0162 \cos 12,97t \text{ [kN]}$  смущаваща сила във възел.

Смущаващата функция  $f_{08}$  се вижда на фиг. 4 да се изменя хармонично между амплитудните стойности  $\pm 0,0162 \text{ kN}$  заедно с нарастващото надлъжно ускорение  $A_x$  на характерния възел 14 в интервала от време  $[0 - 40 \text{ s}]$ , колкото е продължителността на движението по платното със скорост около  $1,2 \text{ m/s}$ .



**Фиг. 4. Ускорение на точка от платното от група пешеходци**

Законът на изменение на хоризонталното ускорение по дължина на платното достига по абсолютна стойност максимум  $0,1611 \text{ m/s}^2$ , което е по-малко от препоръчаното в Еврокод максимално ускорение за този вид трептене от  $0,2 \text{ m/s}^2$ .

Анализът показва, че мостът отговаря на изискванията за комфорт на пешеходците.

Трябва да се отбележи, че настоящият анализ може да се използва и в учебния процес по дисциплината „Теоретична механика II част – Динамика” в раздела по динамика на трептенията.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Giuseppe Piccardo, Federica Tubino*. Parametric resonance of flexible footbridges under crowd-induced lateral excitation *Journal of Sound and Vibration* 311 (2008) 353–371.
2. *Shun-ichi Nakamura, Toshitsugu Kawasaki*. Lateral vibration of footbridges by synchronous walking, *Journal of Constructional Steel Research* 62 (2006) 1148–1160.
3. *Shun-ichi Nakamura, Toshitsugu Kawasaki, Hiroshi Katsuura, Kaoru Yokoyama*. Experimental studies on lateral forces induced by pedestrians *Journal of Constructional Steel Research* 64 (2008) 247–252.
4. *Tommaso Morbiato, Renato Vitaliani, Anna Saetta*. Numerical analysis of a synchronization phenomenon: Pedestrian–structure interaction, *Computers and Structures* 89 (2011) 1649–1663.
5. *Elsa Caetano, Álvaro Cunha, Carlos Moutinho, Filipe Magalhães*. Studies for controlling human-induced vibration of the Pedro e Inês footbridge, Portugal. Part 2: Implementation of tuned mass dampers, *Engineering Structures* 32 (2010) 1082\_1091.

6. *Elsa Caetano, Álvaro Cunha, Filipe Magalhães, Carlos Moutinho*. Studies for controlling human-induced vibration of the Pedro e Inês footbridge, Portugal. Part 1: Assessment of dynamic behaviour, *Engineering Structures* 32 (2010) 1069–1081.
7. *E.T. Ingólfsson, C.T. Georgakis*. A stochastic load model for pedestrian-induced lateral forces on footbridges, *Engineering Structures* 33 (2011) 3454–3470.
8. *E.T. Ingólfsson, C.T. Georgakis, J. Jonsson*. Pedestrian-induced lateral vibrations of footbridges: A literature review, *Engineering Structures* 45 (2012) 21–52.
9. *John M. Usher, Lesley Strawderman*. Simulating operational behaviors of pedestrian navigation, *Computers & Industrial Engineering* 59 (2010) 736–747.
10. *Fiammetta Venuti, Luca Bruno*. The synchronous lateral excitation phenomenon: modelling framework and an application, *C. R. Mécanique* 335 (2007) 739–745.
11. *C. Butz, M. Feldmann, C. Heinemeyer, G. Sedlacek, B. Chabrolin, A. Lemaire, M. Lukic, P.-O. Martin, E. Caetano, Á. Cunha, A. Goldack, A. Keil, M. Schlaich*. Advanced load models for synchronous pedestrian excitation and optimised design guidelines for steel footbridges, European Commission, Research Fund for Coal and Steel, Final report, 2008, 169 p.
12. *P. Dallard, A. J. Fitzpatrick, A. Flint, S. Le Bourva, A. Low, R. M. Ridsdill Smith, M. Willford*. Evening Meeting, The London Millennium Footbridge, Based on an invited paper presented and discussed at a meeting of the Institution of Structural Engineers, held at the Institution of Civil Engineers, 1 Great George Street, London SW1, on 26 April 2001 at 6pm. Additional material is included.
13. *Douglas P. Taylor*. Damper retrofit of the london millennium footbridge – A case study in biodynamic design.
14. *P. Pecol, S. Dal Pont, S. Erlicher, P. Argoul*. Modélisation du mouvement d’une foule sur une structure en vibration, 19<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique, Marseille, 24–28 août 2009.
15. *Joanna BODGI*, Sujet de la thèse: Synchronisation piétons-structure: Application aux vibrations des passerelles souples, L’École nationale des ponts et chaussées, 2008.
16. *David E. Newland*. Pedestrian excitation of bridges – recent results, Tenth International Congress on Sound and Vibration, 07–10 July 2003, Stockholm.
17. Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading, Sétra Technical guide, October 2006, 131 p.
18. *Michael Mistler & Dieter Heiland*. Lock-in-Effekt bei Brücken infolge Fußgängeranregung – Schwingungstest der weltlängsten Fußgänger- und Velobrücke „Dreiländerbrücke“.
19. *John H.G Macdonald*. Lateral excitation of bridges by balancing pedestrians, *Proc. R. Soc. A* 2009 465, 1055-1073 first published online 16 December 2008, doi: 10.1098/rspa.2008.0367.
20. *Willford, M. R. and Young, P.* A Design Guide for Footfall Induced Vibration of Structures, The Concrete Centre, London 2006.
21. *Chen Xuwei, Han Xiaolei, Jack CHEANG, He Weiqiu, Ji Jing*. The Research of Time-History Response Analysis of Floor Vibration Based on Simulation of Group Walking, Proceedings of Fisrt International Conference on Modelling and Simulation, Nanjing, P. R. China, August. 5-7, 2008, pp. 214-220.
22. *Mohammad Maksud-Ul-Alam & A.F.M.S. Amin*. Pedestrian induced vibrations in footbridges: Reappraisal of code provisions IABSE-JSCE Joint Conference on Advances in Bridge Engineering-II, August 8-10, 2010, Dhaka, Bangladesh.

23. *Živanović, S., Pavić, A. and Reynolds, P.* Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: A literature review. *Journal of Sound and Vibration* (2005) Vol. 279, No. 1-2, pp. 1-74. (doi:10.1016/j.jsv.2004.01.019).
24. *Thambiratnam, David, Perera, Nimal, Abeysinghe, Chanaka, Huang, Ming-Hui, & De Silva, Sandun S.* (2012). Human activity-induced vibration in slender structural systems. *Structural Engineering International*, 22(2), pp. 238-245.
25. *Huang, Ming-Hui and Thambiratnam, David P. and Perera, Nimal J.* Dynamic performance of slender suspension footbridges under eccentric walking dynamic loads. *Journal of Sound and Vibration* 303(1-2(2007)):pp. 239-254.
26. *Mangerig, I., Zapfe, C.*: Schwingungen und Dämpfung im Stahlbau, Schwingungen und Dämpfung im Stahlbau.
27. *Chris Barker.* Footbridge Pedestrian Vibration Limits Part 3: Background to Response Calculation, Footbridge 2005 – Second International Conference.
28. *M. Willford, P. Young, C. Field,* Predicting footfall induced vibration: Part 1, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures & Buildings 160, April 2007 Issue SB2, Pages 65–72.
29. *Keith Wan, Stana Živanović, Aleksandar Pavic,* Design Spectra for Single Person Loading Scenario on Footbridges, Proceedings of the IMAC-XXVII February 9-12, 2009 Orlando, Florida USA.
30. *Hugo Bachmann.* "Lebendige" Fußgängerbrücken .– eine Herausforderung, Aktuelle Probleme der Brückendynamik, D-A-CH Tagung 2003, Zürich.
31. *M. Studničková.* The Effect of Pedestrian Traffic on the Dynamic Behavior of Footbridges, *Acta Polytechnica* Vol. 44 No. 2/2004.
32. *Gudmundur V. Gudmundsson.* Einar Thór Ingólfsson, Baldvin Einarsson, Bjarni Bessason, Serviceability assessment of three lively footbridges in reykjavik, Footbridge 2008, Third International Conference.
33. *Fjalar Hauksson.* Dynamic behaviour of footbridges subjected to pedestrian-induced vibrations, Master's Dissertation, Division of Structural Mechanics, LTH, Lund University, Lund, Sweden.
34. *Arnaud Lemaire, Pascal Charles.* Exemple d'application du guide SETRA/AFGC calcul dynamique d'une passerelle: passerelle du Moulin.
35. *Philippe PÉCOL.* Modélisation 2D discrète du mouvement des piétons - Application à l'évacuation des structures du génie civil et à l'interaction foule-passerelle.
36. *Werkle, H. und W. Püschel.* Schawankende Fußgängerbrücken – Versuche unnn numerische Simulation.
37. *Reiterer, M.* Schwingungsdämpfung von Baukonstruktionen, insbesondere von Brücken, Technischen Universität Wien Fakultät für Bauingenieurwesen 2004.
38. *JMW Brownjohn.* Vibration serviceability of footbridges, School of Engineering, University of Plymouth, Drake Circus, Plymouth PL4 8AA, UK.
39. *JMW Brownjohn et. al.* A spectral density approach for modeling continuous vertical forces on pedestrian structures due to walking.
40. *C. J. Middleton and J. M. W. Brownjohn.* Simplified Methods for Estimating the Response of Floors to a Footfall, Structures Congress 2011 © ASCE 2011, pp.383-403.
41. *Živanović, S., Pavić, A. and Reynolds, P.* Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 279, No. 1-2, 2005, pp. 1-74.
42. Human induced Vibrations of Steel Structures, Design of Footbridges. Background Document, 2007.

Постыпила: април 2015 г.

## ANALYSIS OF A PEDESTRIAN BRIDGE WITH RESPECT TO THE COMFORT USING THE EUROCODE

V. Rizov<sup>1</sup>, A. Doicheva<sup>2</sup>, A. Mladensky<sup>3</sup>, G. Keradjisky<sup>4</sup>

*Keywords:* pedestrian bridge, vibrations, comfort, simulations

*Research area:* structural engineering

### ABSTRACT

A pedestrian steel bridge is analyzed with respect to the comfort according to the Eurocodes. A computational model for dynamic simulations of the bridge is developed using the FEM. The vibrations of the bridge are analyzed in three directions: vertical, horizontal-transversal and horizontal-longitudinal. The analysis results are used to make an assessment of the bridge with respect to the comfort of the pedestrians.

---

<sup>1</sup>Victor Rizov, Prof. Dr. Eng., Dept. "Technical Mechanics", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: V\_RIZOV\_FHE@UACG.BG

<sup>2</sup>Albena Doicheva, Chief Assist. Dr. Eng., Dept. "Technical Mechanics", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: DOICHEVA\_FHE@UACG.BG

<sup>3</sup>Angel Mladensky, Chief Assist. Dr. Eng., Dept. "Technical Mechanics", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: ANGELM\_FHE@UACG.BG

<sup>4</sup>Georgy Keradjisky, Student in Transportation Engineering, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046

