



Приета: 18.03.2016 г.
Преработена: 11.04.2016 г.
Одобрена: 22.04.2016 г.

ИЗСЛЕДВАНЕ НА АСПЕКТИ ОТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕТО МЕЖДУ БРП (БЕЗНАСТАВОВ РЕЛСОВ ПЪТ) И СЪЩЕСТВУВАЩА МОСТОВА КОНСТРУКЦИЯ

М. Николова¹, Ц. Благоев², Л. Георгиев³

Ключови думи: безнаставов релсов път (БРП), взаимодействие с мостова конструкция, хоризонтални инерционни теглителни сили

РЕЗЮМЕ

В настоящата статия е изследвано взаимодействието между безнаставов железен път и съществуваща мостова конструкция под въздействието на хоризонтални инерционни теглителни сили, приложени на ниво горен ръб релса (ГРР), както и от температурна разлика между релса и конструкция. Направени са аналитични и числени решения, отчитащи взаимодействието между горно строене (ГС) и конструкция. За въздействието на хоризонтални инерционни теглителни сили са извършени числени анализи по МКЕ при вариране с хоризонталната коравина на баластовата призма. Изведени са зависимости, обвързващи коравината на баласта в хоризонтално направление и разпределението на хоризонталните надлъжни сили между ГС и конструкцията.

1. Общи положения

В съответствие с научноизследователска тема БН-175-15 / ЦНИП при УАСГ е извършено частично заснемане и обследване на стар стоманен нитован мост на km 22+730

¹ Мартина Николова, редовен докторант инж., кат. „Транспортни съоръжения”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: nikolova23@abv.bg.

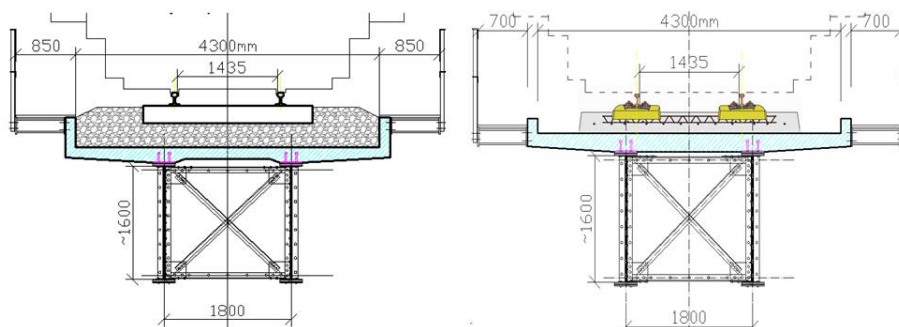
² Цветан Благоев, ас. инж., кат. “Железници”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: ceso_z@abv.bg.

³ Лазар Георгиев, доц. д-р инж., кат. „Транспортни съоръжения”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: ldg_77@abv.bg, lazargeorgiev@yahoo.com.

по линия София – Карлово – Варна фериботна – фиг. 1, с цел определяне на възможността и ефективността от привеждането му към съвременните експлоатационни и нормативни изисквания. За целта е предложена замяна на съществуващата пътна конструкция от отворен тип с нова стоманобетонна като са изследвани два варианта – с баластово и безбаластово преминаване чрез път на монолитна основа върху мостовата конструкция – фиг. 2. Предполага се, че след рехабилитацията на жп линията наставовият релсов път ще бъде заменен с безнаставов релсов път (БРП).



Фиг. 1. Стар стоманен нитован железопътен мост с пълностенни главни греди и отвор $L = 15$ m



Фиг. 2. Варианти с баластово (вляво) и с безбаластово преминаване (вдясно)

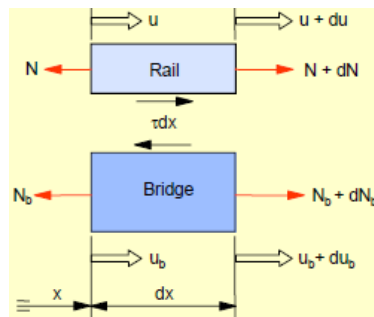
Както е показано на фиг. 2 привеждането на конструкцията към съвременните нормативни изисквания е реализирано чрез обединяването на стоманобетонна плоча за съвместна работа на огъване с главните стоманени нитовани греди. При този начин се реализира усилване на съществуващата конструкция, подобряване на поведението ѝ от гледна точка на умората и защита на стоманените елементи на мостовата конструкция от директното въздействие на атмосферни влияния. Извършен е задълбочен статико-динамичен анализ за съществуващото положение и изследваните варианти. Освен статико-динамичните изчислителни проверки са изследвани аспекти от взаимодействието между

горното строене на железния път (ГС) и мостовата конструкция за част от хоризонталните въздействия, породени от подвижния състав при варианта с баластово преминаване на железния път (фиг. 2). Механичните характеристики (граница на провлачване, якост на опън, гранично удължение при скъсване, ударна жилавост), химическия състав и заваряемостта на старата стомана са определени чрез серия от експериментални изпитвания, подробно описани в [3].

2. Сравнение между аналитично и числено определяне на ефекти от температурното въздействие при отчитане на взаимодействие между БРП и мостова конструкция

При БРП, когато в края на мостовата конструкция не се предвиждат устройства за линейно разширение на релсите, се реализира взаимодействие между релсите и конструкцията като неговото количествено изражение зависи в най-голяма степен от вида и хоризонталната коравина на горното строене. В настоящата публикация е изследвано взаимодействието между БРП и описаната в т. 1 мостова конструкция. В съответствие с описаната в [1] методика е направено аналитично изчисление за температурна разлика между релса и конструкция. С оглед сравнение на получените резултати е разработен числен модел, базиран на Метода на крайните елементи (МКЕ) в програмната система SAP2000 v.14.

На фиг. 3 е представен опростен аналитичен модел за отчитане на взаимодействието между ГС и мостова конструкция, предложен и подробно описан в [1].



Фиг. 3. Взаимодействие между релса и мостова конструкция

Взаимодействието БРП конструкция в надлъжно направление може да се опише със системата диференциални уравнения:

$$\frac{d^2 u}{dx^2} + \frac{\tau(u_b - u_r)}{EA} = 0; \quad (2.1)$$

$$\frac{d^2 u_b}{dx^2} + \frac{\tau(u_b - u_r)}{E_b A_b} = 0; \quad (2.2)$$

$$N = EA \left(\frac{du_r}{dx} - \alpha \Delta T \right); \quad (2.3)$$

$$N_b = E_b A_b \left(\frac{du_r}{dx} - (\alpha \Delta T)_b \right), \quad (2.4)$$

където u_r , u_b са хоризонтални премествания съответно на релсата и на моста;

N , N_b – нормални осови сили съответно в релсата и в мостовата конструкция;

EA , $E_b A_b$ – линейни коравини съответно на релсата и на мостовата конструкция;

$\alpha \Delta T$, $(\alpha \Delta T)_b$ – температурни деформации съответно на релсата и на моста.

За изследвания вариант приемаме, че хоризонталната коравина на релсотраверсовата скара е $k = 7636 \text{ kN/m}^2$. Линейната коравина на релсата е:

$$E_a A_a = 2,1 * 10^8 * 76,7 * 10^{-4} = 1,611 * 10^6 \text{ kN}. \quad (2.5)$$

Преместването на хоризонтална надлъжна посока и нормалната осова сила в релсата могат да бъдат определени както следва:

$$u_r(x) = \frac{\alpha_t \Delta T_b L_b}{2} \left[\cosh(\mu x) - \coth\left(\frac{\mu L_b}{2}\right) \sinh(\mu x) \right] + \alpha_t \Delta T_b x; \quad (2.6)$$

$$N_r(x) = E_a A_a \left(\frac{du_r(x)}{dx} - \alpha_t \Delta T_r \right); \quad (2.7)$$

$$\mu = \sqrt{\frac{k}{E_a A_a}}. \quad (2.8)$$

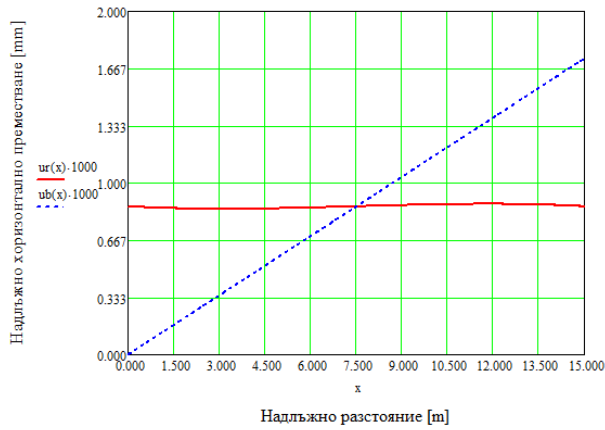
На фиг. 4 е представено надлъжното преместване съответно на релсата и на конструкцията по дължина на моста. На фиг. 5 е представена осовата нормална сила $N_r(x)$ по дължина на мостовата конструкция от 0,000 до 15,000 метра. С N_{\max} е означена съответната стойност, изчислена за БРП извън зоната на конструкция.

$$N_{\max} = -E_a A_a \alpha_t \Delta T_r. \quad (2.9)$$

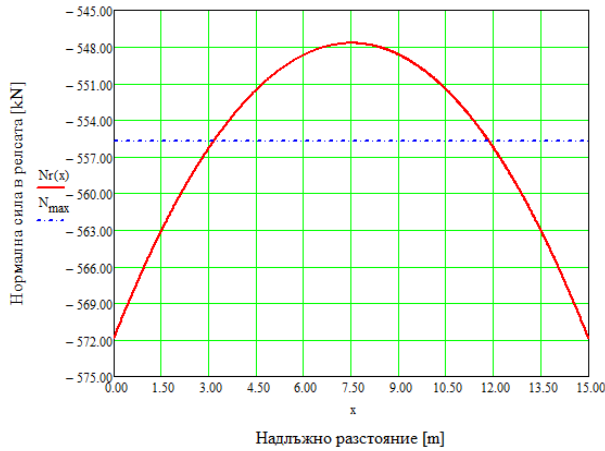
При разстояние между траверсите $s_s = 0,600 \text{ m}$ хоризонталната коравина на баластовата призма може да се моделира чрез пружинна опора с пружинна константа:

$$k_{s_horizontal} = k s_s = 7636 * 0,600 = 4582 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (2.10)$$

С тези характеристики $k_{s_horizontal} = 4582 \text{ kN/m}$ е разработен модел по МКЕ (Метод на Крайните Елементи) в програмна система SAP2000 v14 – фиг. 6 с прътови FRAME крайни елементи за релса и мостова греда и LINK крайни елементи за връзката между релса и конструкция. Осовите разрезни усилия от температурна разлика 30 °C за релсата и 10 °C за конструкцията са представени на фиг. 7.



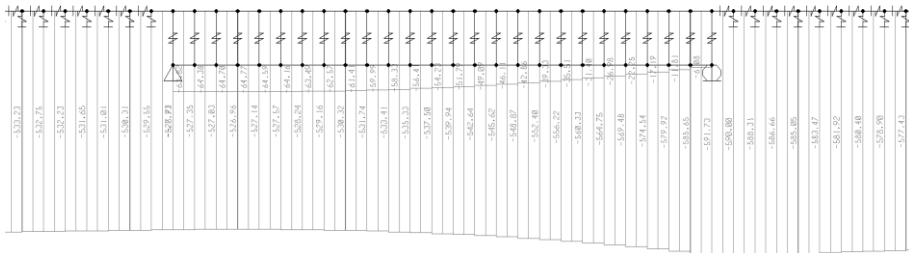
Фиг. 4. Надлъжни премествания на релсата и на моста



Фиг. 5. Осова нормална сила в релсата



Фиг. 6. Модел на системата релса – конструкция



Фиг. 7. Осови нормални разрезни усилия в релсата [kN] при температура на релсата 30 °C и на мостовата конструкция 10 °C

Таблица 2.1. Осови нормални сили N_r и нормални напрежения $\sigma_{Ed,rail,T30-10}$ в релсата, определени аналитично и по МКЕ за температура на релсата 30 °С и на мостовата конструкция 10 °С

x [m]	подпиране	N_r [kN]		$\sigma_{Ed,rail,T30-10}$ [N/mm ²]	
		Аналитично решение	Решение по МКЕ	Аналитично решение	Решение по МКЕ
0.000	НПЛ	-571.87	-527.91	-74.56	-68.83
7.500	-	-547.71	-535.33	-71.41	-69.79
15.000	ЛПЛ	-571.87	-585.56	-74.56	-76.34

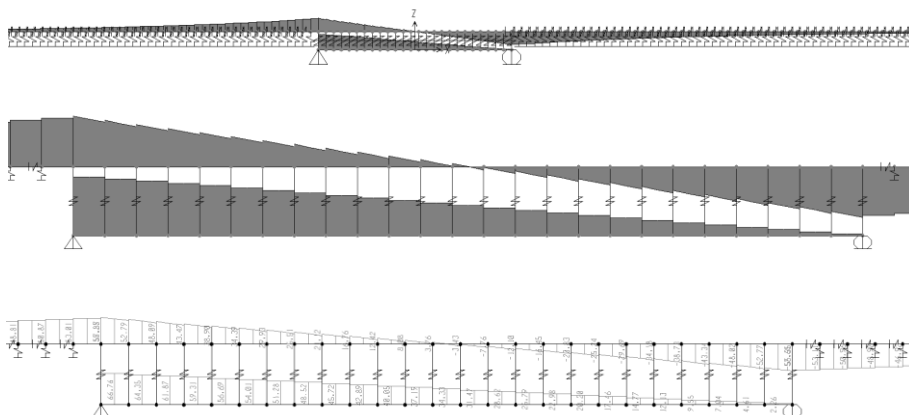
НПЛ - неподвижен лагер, ЛПЛ - линейно подвижен в хоризонтална надлъжна посока лагер

3. Изследване на ефектите от хоризонтални инерционни сили при взаимодействие между БРП и разглежданата мостова конструкция

Направен е анализ за ефекта и разпределението на хоризонталните теглителни сили $Q_{lak} = 33 \text{ kN/m}'$ (общо за двете релси) и $\alpha = 1,21$, породени от железопътния трафик, като функция от хоризонталната коравина на баласта. Те са приложени на ниво ГРП по дължината на цялата мостова конструкция в съответствие с предписанията на [2].



Фиг. 8. Натоварване на ниво релса с $Q_{lak_1rail} = 19,965 \text{ kN/m}$



Фиг. 9. Осови разрезни усилия в релса и конструкция от теглителни сили Q_{lak_1rail}

Направено е изследване чрез серия от модели по МКЕ, разработени в програмната система SAP2000 V.14, на влиянието на хоризонталната коравина на баласта $k_{h_ballast}$ (за една траверса, с k_{h_bb} е означена разпределената хоризонтална коравина за баластовото легло) върху частта от теглителната сила, която се поема от неподвижния в хоризонтална надлъжна посока лагер $\xi = R_{hb_k} / R_{Qlak}$ (R_{hb_k} – хоризонтална надлъжна реакция в неподвижния лагер на мостовата конструкция, R_{Qlak} – сумарна хоризонтална надлъжна сила приложена на ниво ГРП за една релса). На фиг. 8 и фиг. 9 са представени съответно моделът по МКЕ и диаграма на осовите нормални разрезни усилия на системата БРП – мостова конструкция при хоризонтална коравина на баластовата призма $k_{h_bb} = 7637 \text{ kN/m}^2$. Резултатите от проведените анализи по МКЕ са обобщени в табл. 3.1. Въз основа на получените от изчисленията по МКЕ резултати и анализ по МНМК (Метод на най-малките квадрати) е изведена функционална зависимост за частта от хоризонталната надлъжна сила, която се поема от неподвижните лагери на разглежданата мостова конструкция във функция от хоризонталната коравина на баласта:

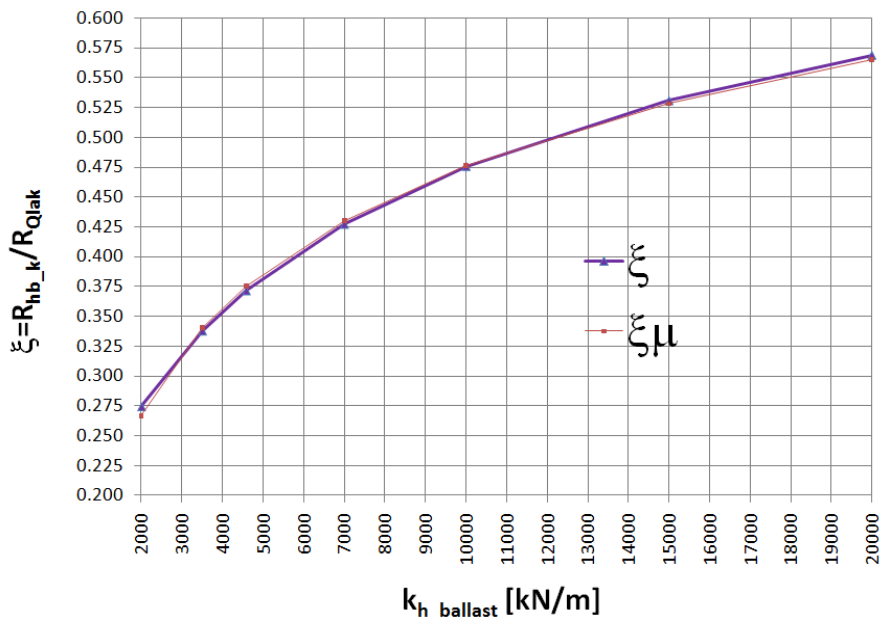
$$\xi_{\mu} \left(k_{h_ballast} \right) = \frac{-8,42}{\left(k_{h_ballast} \right)^{0,018}} + 7,61. \quad (3.1)$$

На фиг. 10 са изобразени ξ и ξ_{μ} като функция на хоризонталната коравина на баласта $k_{h_ballast}$, от където е видно задоволителното съвпадение с апроксимиращата функция $\xi_{\mu} \left(k_{h_ballast} \right)$ (3.1).

Таблица 3.1. Разпределение на хоризонтална надлъжна теглителна сила между горно строене на железния път и мостова конструкция

$k_{h_ballast}$ [kN/m]	k_{h_bb} [kN/m ²]	R_{Qlak} [kN]	R_{hb_k} [kN]	$\xi = R_{hb_k} / R_{Qlak}$	ξ_{μ}	$Si = (\xi - \xi_{\mu})^2$
2000	3333	299.475	82.228	0.275	0.267	0.000062606044
3500	5833	299.475	101.203	0.338	0.340	0.000005407868
4582	7637	299.475	111.271	0.372	0.375	0.000014978219
7000	11667	299.475	127.970	0.427	0.430	0.000009512570
10000	16667	299.475	142.485	0.476	0.476	0.000000316466
15000	25000	299.475	158.980	0.531	0.528	0.000006983511
20000	33333	299.475	170.352	0.569	0.565	0.000016314446
$\Sigma Si = 0.000116119124$						

В табл. 3.2 са представени характеристикните $N_{k,rail}$ и изчислителни $N_{Ed,rail}$ нормални осови сили, както и максималните нормални напрежения σ_{Ed} в релсата като функция от хоризонталната коравина на баластовата призма.



Фиг. 10. Разпределение на хоризонтална надлъжна теглителна сила между ГС на железния път и мостова конструкция

Таблица 3.2. Характеристични и изчислителни стойности на осовите разрезни усилия и изчислителни стойности на нормалните напрежения в релсата от теглителни сили, определени според [2]

$k_{h_ballast}$ [kN/m]	k_{h_bb} [kN/m ²]	$\pm N_{k,rail}$ [kN]	$\pm N_{Ed,rail}$ [kN]	A_{rail} [mm ²]	$\pm \sigma_{Ed}$ [N/mm ²]
2000	3333	110.09	159.63	7670.0	20.81
3500	5833	100.87	146.26	7670.0	19.07
4582	7637	95.95	139.13	7670.0	18.14
7000	11667	87.76	127.26	7670.0	16.59
10000	16667	80.59	116.86	7670.0	15.24
15000	25000	72.36	104.92	7670.0	13.68
20000	33333	66.60	96.58	7670.0	12.59

4. Заключение

Замяната на пътна конструкция от отворен тип със стоманобетонна, обединена за комбинирано действие, представлява технически ефективен вариант за привеждане на стари стоманени нитовани жп мостови конструкции с път горе към съвременните експлоатационни и нормативни изисквания [3]. При подобен тип реконструкции се очаква преминаване от наставов към БРП, при което следва да бъдат отчетени ефектите от взаимодействието между ГС и мостовата конструкция.

От описания числен пример в т. 2 е видно, че при нагряване на релсите до 30 °С, а на мостовата конструкция 10 °С и приета хоризонтална коравина на баласта 7637 kN/m² [1] в релсите от взаимодействието с мостовата конструкция се получават нормални натискови напрежения с максимална стойност около 75 ÷ 76 N/mm², които са малко по-високи от допустимите натискови напрежения в релсата, вследствие взаимодействието – 72 N/mm² в съответствие с [2]. При подобни случаи е възможно да се предвиди устройство за осигуряване на линейно разширение на релсите (УОЛРР) от БРП в единия или в двата края на мостовата конструкция.

При БРП в зависимост от хоризонталната коравина на баласта се редуцира хоризонталната надлъжна инерционна сила от потегляне и спиране на возилата, която следва да се поеме от неподвижните в съответната посока лагери на мостовата конструкция. Количествена мярка за този ефект е коефициентът ξ , представляващ отношението между сумарната хоризонтална надлъжна реакция в неподвижните лагери и общата приложена в съответната посока сила. За изследваната конструкция и предпоставката за БРП без УОЛРР в близост до краищата на моста са проведени анализи по МКЕ за теглителни хоризонтални надлъжни инерционни сили при хоризонтална коравина на баласта, варираща в границите $k_{h_ballast} = 2000 \div 20000$ kN/m' (разлика 1000%), при което се получава $\xi = 0,267 \div 0,565$ (разлика 112%). По МНМК е изведена функционалната зависимост

$\xi_{\mu}(k_{h_ballast})$, съответстваща на проведените по МКЕ серия от анализи. За този случай в [2] се препоръчва стойността $\xi = 0,600$ вероятно като консервативна. С увеличаване на хоризонталната коравина на баласта нараства и частта от хоризонталните надлъжни сили, които следва да се поемат от неподвижните лагери на мостовото съоръжение. Въпреки това, както е видно от табл. 3.1 над 40% от приложената хоризонтална сила се поема от БРП, което сериозно облекчава неподвижните лагери. Този ефект е особено важен при стари конструкции в случаите, при които подмяната на лагерите е трудно осъществима.

При подмяна на наставовия с безнаставов релсов път се получават различни ефекти от взаимодействието на БРП с мостовите съоръжения. Те би следвало да се отчитат при изчислението както на мостовите конструкции, така и на релсите. В зависимост от конкретните условия и предписанията в [2] следва да се оценява необходимостта, локацията и броят на УОЛРР. Важно е да се отбележи, че при БРП и липса на УОЛРР в близост до съоръжението, се получава значително облекчаване на неподвижните в хоризонтална надлъжна посока лагери от теглителни (и спиращи) сили, което за разглежданата в настоящата публикация мостова конструкция и за вариращия диапазон от коравини на баласта в хоризонтална посока достига 43 ÷ 73%. При отчитане на този положителен ефект от взаимодействието между БРП и мостова конструкция следва да се има предвид, че хоризонталната коравина на баласта е възможно да не бъде постоянна във времето на експлоатацията величина, което налага да се работи с адекватна горна и долна граница.

Благодарности

Настоящата научноизследователска разработка по договор БН-175/2015 е подкрепена финансово от Център за научни изследвания и проектиране при УАСГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Coenraad Esveld*. Modern Railway Track. MRT – Productions A subsidiary of Esveld Consulting Services BV, 2014.
2. БДС EN 1991-2:2006, Еврокод 1: Въздействия върху строителните конструкции. Част 2: Подвижни натоварвания от трафик върху мостове.
3. *Георгиев, Л. и колектив*. Изследване на поведението на стоманени железопътни мостове с пътна конструкция от отворен тип при изграждане на стоманобетонна от затворен тип, обединена за съвместна работа с елементи от старата конструкция. Годишен отчет, договор БН-175/15, ЦНИП при УАСГ, София, 2015.
4. MathCAD 15 Help System.

ANALYSING ASPECTS OF THE INTERACTION BETWEEN CWR (CONTINUOUSLY WELDED RAIL) TRACK AND EXISTING BRIDGE STRUCTURE

M. Nikolova¹, Ts. Blagoev², L. Georgiev³

Keywords: *continuously welded rail (CWR) track, interaction with bridge structure, horizontal inertia acceleration forces*

ABSTRACT

The interaction between a CWR track and a bridge structure under horizontal inertia acceleration forces imposed at the upper rail level, as well as temperature difference, is analyzed in the present paper. Analytical and numerical calculations considering the interaction between a CWR track and a structure are performed. A series of numerical analyses using FEM and varying the ballast stiffness in horizontal direction are developed for horizontal inertia acceleration forces. Relations connecting the ballast stiffness in horizontal longitudinal direction and the redistribution of the longitudinal traffic forces between the CWR track and the bridge structure are obtained.

¹ Martina Nikolova, PhD student Eng., Dept. “Transport Structural Facilities”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: nikolova23@abv.bg

² Tsvetan Blagoev, Assist. Prof. Eng., Dept. “Railway Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: ceco_z@abv.bg

³ Lazar Georgiev, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. “Transport Structural Facilities”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: ldg_77@abv.bg, lazargeorgiev@yahoo.com