

**ЧИСЛЕНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА
ЕКВИВАЛЕНТНО НАТОВАРВАНЕ ОТ LM71 ВЪРХУ ПЪТНАТА
ПЛОЧА НА МОСТОВИ КОНСТРУКЦИИ ПРИ БЕЗБАЛАСТОВО
ИЗПЪЛНЕНИЕ**

Николай Янев¹, Яна Янева²
nyanev@vtu.bg

¹ВТУ „Тодор Каблешков“, ²„БЕТА КОНСУЛТ 1“ ЕООД
София, 1574, ул. „Гео Милев“ 158, София 1000, бул. „Г.С.Раковски“ 85
БЪЛГАРИЯ

Ключови думи: *плочна релсова конструкция; пътна плоча на мост; еквивалентно разпределено натоварване от железопътен трафик*

Резюме: *Прилагането на плочна релсова конструкция (slab track) върху железопътните мостове води до нерегламентиран от БДС EN 1991-2 подход за разпределяне на концентрираните сили в товарните модели на железопътния трафик върху пътната мостова плоча. Целта на публикацията е да предложи изчислителен подход за едно по-точно определяне на взаимодействието между плочната релсова конструкция и мостовата конструкция, на базата на който да се получат удобни за практическо ползване модели на еквивалентно разпределено натоварване (EPH) върху плочата от концентрирани сили, приложени върху релсата, така както такова е регламентирано в Чл.б.3.б.2 и фиг.б.4 от БДС EN 1991-2 за баластово изпълнение на релсовия път. Направени са също така сравнения между параметрите на EPH от концентрираните сили в товарен модел LM71 при двата начина на изпълнение на релсовия път.*

Числените изследвания са проведени с помощта на универсалния софтуерен продукт SAP2000, върху едноотворна стоманобетонова мостова конструкция с плочогредово напречно сечение и конструктивен отвор от 40 м.

I. ОБЩА ПОСТАНОВКА НА ПРОБЛЕМА

Моделите на натоварване от железопътен трафик, дефинирани в действащите нормативни документи за мостове [1] и [2] са предназначени за прилагане върху релсите, които са най-горния „конструктивен“ елемент от релсовия път. Последният дори при баластово изпълнение представлява конструкция, която преразпределя натоварването от модела и го предава на мостовата пътна плоча вече като неравномерно разпределен площен товар. Геометрията и интензивността на този площен товар зависи, както от параметрите на модела на трафика, така и от конструктивните характеристики на релсовия път и връхната конструкция на моста, които взаимодействат по между си при поемането му. Точното отчитане на това взаимодействие в изчислителните модели, с които се определят разрезните усилия и

деформациите от ж.п. трафик усложнява значително статическото изчисляване на мостовата конструкция. За нуждите на практиката този проблем се решава обикновено чрез регламентиране на еквивалентни разпределени натоварвания (ЕРН), които се прилагат директно върху пътната плоча в изчислителния модел. Така при рутинни проектантски задачи могат да бъдат спестени трудоемки изчисления, като същевременно се отчита с достатъчна степен на сигурност, концентрирания характер на подвижните товари при оразмеряване на мостовата конструкция и особено на пътната плоча.

II. ЕРН ПРИ БАЛАСТОВА РЕЛСОВА КОНСТРУКЦИЯ

Баластовият тип релсова конструкция е класическото решение, прилагано при изграждане на железопътните трасета в т.ч. и при преминаването им по мостови съоръжения. У нас това е преобладаващото решение на този етап. Релсовата конструкция се състои от релси, подложки, траверси и баластова призма, конструктивните параметри на които варират в тесни граници. Широкото приложение и натрупания опит при баластовия релсов път, вероятно са обусловили сравнително доброто регламентиране на ЕРН в този случай. На основание [3] и [4] от началото на 2015 година [1] и [2] ще бъдат единствените български стандарти, които регламентират въздействията от железопътен трафик и други въздействия, специфични за железопътните мостове. В тях (т.6.3.6 на [1]) се съдържат следните указания за „Разпределяне на осовите натоварвания от релсите, траверсите и баластовото легло“:

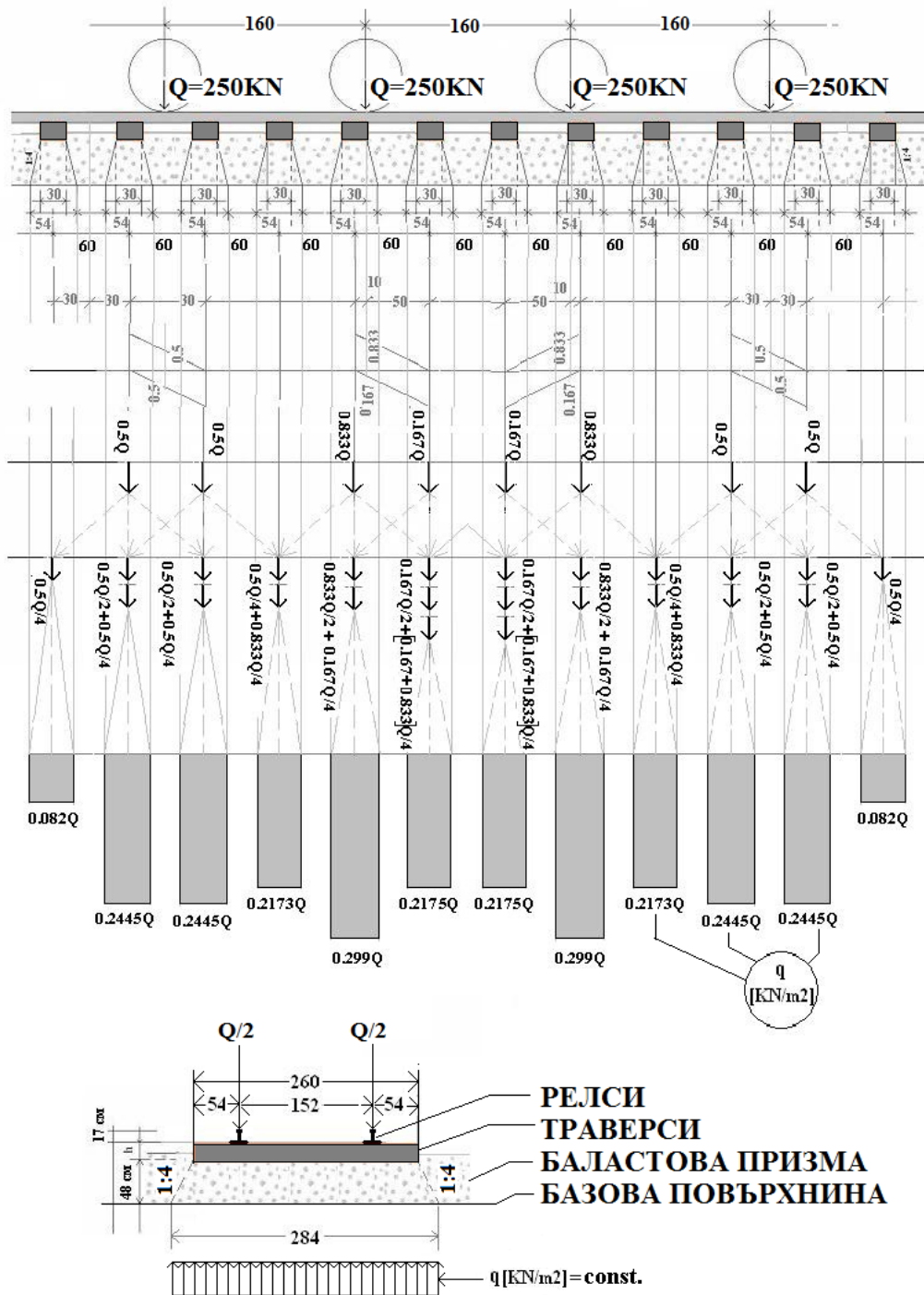
В 6.3.6.1. **Надлъжно разпределяне на съсредоточена сила или на товар от колело чрез релсата** е казано: *“Съсредоточена сила от товарен модел LM71 (или вертикален товар, класифициран съгласно 6.3.2.(3), когато се изисква) и HSLM (с изключение на HSLM-B), или товар от едно колело може да се разпределя между три опори на релсата, както е показано на фиг.6.4.”* Фигурата илюстрира разпределение на съсредоточената сила Q_{vi} , позиционирана върху релсата и в оста на траверса, както следва – $\frac{1}{2} Q_{vi}$ в траверсата под силата и по $\frac{1}{4} Q_{vi}$ в траверсите от двете ѝ страни.

В 6.3.6.2. **Надлъжно разпределяне на товар чрез траверси и баласт** е казано:

(1) *“Най общо съсредоточените сили от товарен модел LM71 (или вертикален товар, класифициран съгласно 6.3.2.(3), когато се изисква) или осов товар могат да се разпределят равномерно в надлъжно направление (с изключение на случаите, когато ефектите от местните товари са значителни, например при проектиране на елементите от пътната плоча и други)“*.

(2) *“При проектирането на елементи от пътната плоча и други елементи (например надлъжни и напречни ребра, опирания на релсите, напречни греди, стоманени пътни плочи, стоманобетонни тънки плочи и т.н.) надлъжното преразпределяне на товарите под траверсите трябва да се отчита съгласно фиг. 6.5., при което за базова равнина се определя горната повърхност на връхната конструкция“*. Фигурата илюстрира разпределение на съсредоточената сила, от която и да е траверса, чрез баластрата, под наклон 4:1 от двата ръба в ширина на траверсата до базовата повърхнина.

Фиг. 1



В 6.3.6.3. *Напречно разпределяне на въздействие чрез траверсите и баласта* се дават указания за следните характерни случаи: 6.6. – *Напречно разпределение при коловози в права или крива без надвишение*; 6.7. – *Напречно разпределение при коловози без надвишение, когато баластът е подбит под релсите или когато се използват дублокови траверси*; 6.8. – *Напречно разпределение при коловози в крива с надвишение*. Характерно за всички случаи на разпределение чрез траверсите и баласта е, че се прилага наклон 4:1 от контура на траверсата до базовата повърхнина, като формата и интензитета на разпределеното натоварване върху конструкцията зависи

освен от този наклон, така също и от разстоянието между траверсите, техните размери в план и височината на баластовата призма от долния ръб на траверсата до базовата повърхнина.

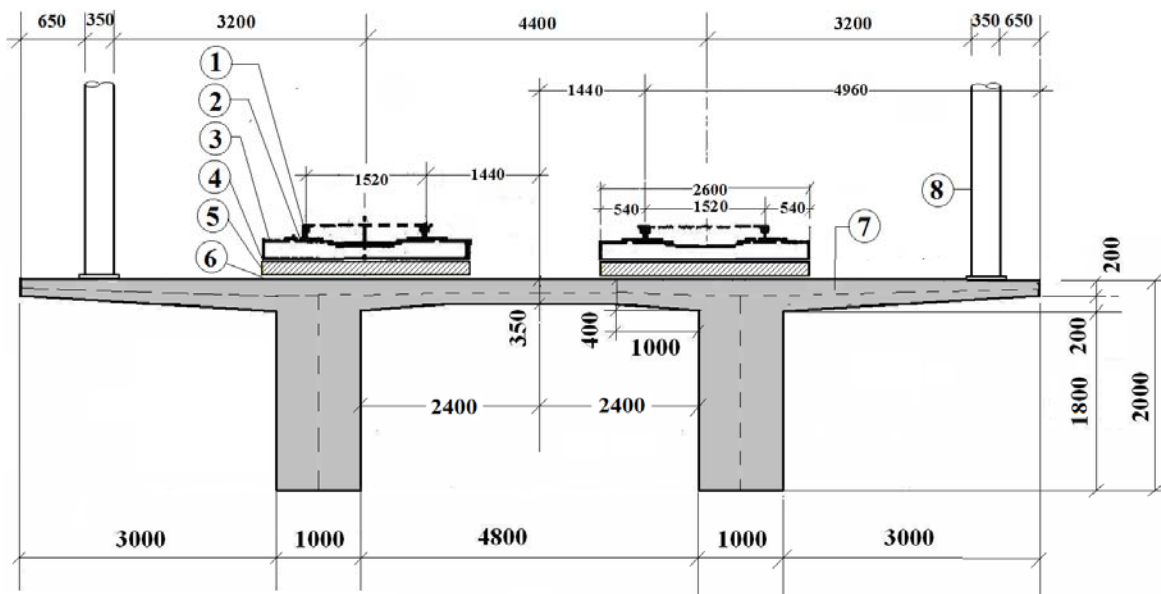
На Фигура №1 е показан пример на прилагане на тези нормативни правила при определяне на формата и интензитета q [KN/m^2] на ЕРН от концентрираните сили на товарен модел LM71 в прав участък. Приложени са широко разпространени размери на траверсите в план 260 см /30 см и разстояние между тях от 60 см което отговаря на предписаната гъстота на траверсите на участъци в права и тези в крива с $R>650$ м. Височината на баластовата призма под траверсата е приета 40 см. Прието е също силите върхурелсата, позиционирани над траверсите, когато колелото е разположено между тях, да се определят по правилата за реакции в „проста греда“. Използвайки указанията дадени във фигури 6.7. и 6.8. на [1] може да бъде определено съответното неравномерно разпределение на q в напречна посока при коловози в крива с надвишение, подбиване на баластрата под релсите или използване на двублокови траверси.

III. ОСОБЕНОСТИ НА БЕЗБАЛАСТОВИТЕ РЕЛСОВИ КОНСТРУКЦИИ ИЗПЪЛНИ ВЪРХУ МОСТОВЕ

Много водещи страни в използването и развитието на железопътния транспорт вече прилагат безбаластови релсови пътища в размери, които са съизмерими с „класическото“ баластово изпълнение. Това е съпроводено със значителна по своя мащаб и сложност изследователска работа, за увеличаване предимствата и редуциране на недостатъците на този подход. В голямата си част тези изследвания са свързани с разработването на различни модификации и прилагането на т.н. slab track конструкции, които в следващото изложение наричаме *плочни релсови конструкции* (ПРК). Характерна особеност на тези релсови конструкции е, че ролята на баластовата призма в „класическото изпълнение“ се замества от стоманобетонна плоча с различни конструктивни параметри и начини на връзка, от една страна с релсите и от друга със земното платно или конструкцията на съоръженията.

Фигура №2 показва компонентите на ПРК върху конструкцията на стоманобетонен железопътен мост, така както са заложили в числените изследвания, предмет на публикацията. Означенията на фигурата са: 1 – релси; 2 – еластично деформируема подложка (ЕДП) под релсите; 3 – траверси; 4 – ЕДП под траверсите; 5 – плоча в ПРК; 6 – ЕДП между плочата в ПРК и пътната плоча на моста; 7 – стоманобетонна мостова конструкция; 8 – стълбове на контактната мрежа.

Фиг. №2



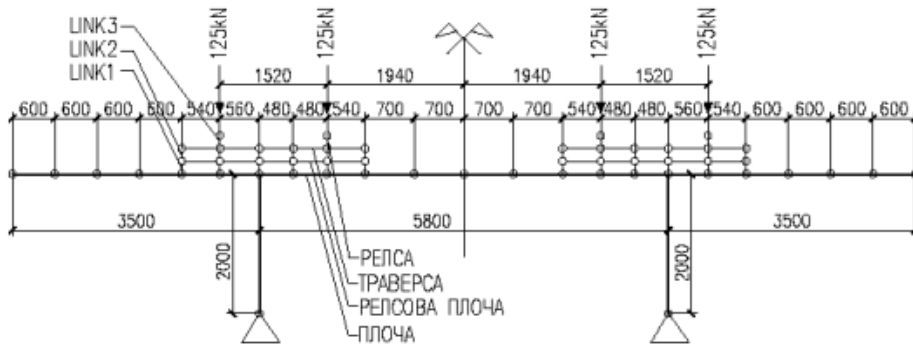
На този етап прилагането на безбаластови релсови пътища у нас е сравнително ограничено, но най-вероятно световните тенденции ще променят това. В момента нормативните указания за проектиране на ПРК върху железопътни мостове са недостатъчни и повечето проблеми се решават така както е записано в НА.2.67 на [2] *Изискванията към безбаластовия път се регламентират от възложителя на конкретния проект и се съгласуват с железопътната администрация.*

IV. ЧИСЛЕНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ЕРН ПРИ БЕЗБАЛАСТОВО ИЗПЪЛНЕНИЕ

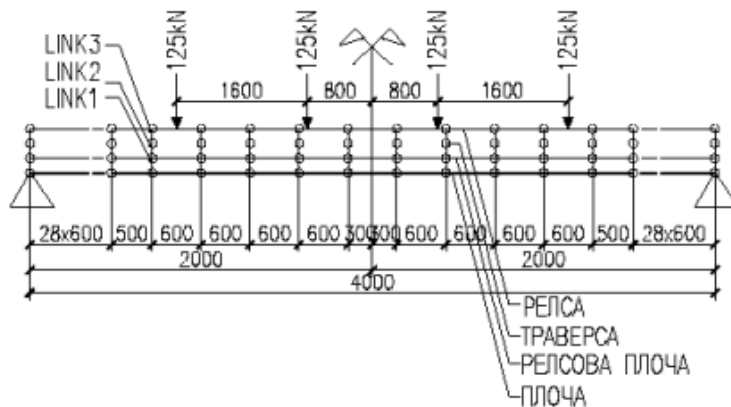
Разглежда се едноотворна „просто подпряна“ мостова конструкция, с конструктивен отвор 40 метра и плочогредово напречно сечение, изобразено на фигура №2. Натоварването от железопътен трафик, отразено на фигурата е от два ж.п. коловоза тип ПРК. Основната цел е да се получат усилията на взаимодействие между ПРК и мостовата конструкция и от тях подходящи за практически анализи и изчисления ЕРН.

Моделирането на задачата и статическото изследване са проведени в програмната среда на универсалния софтуерен продукт за статичен и динамичен анализ SAP2000. Фигури 3 и 4 дават информация за „комбинирания“ изчислителен модел, отразяващ съвместната работа на мостовата и релсовата конструкции (фиг.3 представя схематично мрежата от крайни елементи и натоварването в напречно направление, а фиг.4 в надлъжно). Мостовата конструкция и плочата в релсовата конструкция са моделирани изцяло с правоъгълни крайни елементи от типа shell, с 6 степени на свобода (три моментни и три мембранни) във всеки възел. Релсите и траверсите в релсовата конструкция са моделирани с прътови крайни с 6 степени на свобода (три моментни и три мембранни) във всеки възел. Връзките (позиции 2, 4 и 6 на фиг.2) са моделирани като еластични от типа LINK (LINK 1, LINK 2 и LINK 3 от фиг.3 и 4).

Фиг. № 3



Фиг. № 4



С цел да се проследи влиянието на фактори като: характеристиките на LINK връзките, дебелината на плочата в ПРК и коравината на самата мостова конструкция върху ЕРН от концентрирани сили, приложени върху релсата, са изследвани четири варианта на комбинации от характеристики. Те са показани на таблица №1, като специфичната за всеки един от вариантите характеристика е маркирана.

Таблица №1 Параметри на мостовата конструкция и ПРК в изследваните варианти

ВАРИАНТ	Модул на еластичност на бетона на пътната плоча	Модул на еластичност на релсата на ПРК	Модул на еластичност на траверсата на ПРК	Модул на еластичност на бетона на плочата на ПРК	Дебелина на плочата на ПРК	Характеристики на връзките тип LINK в модела					
						Обща площ на пружинна константа	LINK №	Линейна пружинна константа по локална ос "1"	Линейна пружинна константа по локална ос "2"	Линейна пружинна константа по локална ос "3"	Условна площ на връзката по ос "1"
	kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²	kN/m ²	cm	kN/m ² /m ²		kN/m'	kN/m'	kN/m'	cm ²
1	3150000	21000000	3150000	3150000	20		1	25000	5000	5000	50/50
						100000	2	13500	2500	2500	50/27
							3	5000	2500	2500	20/25

2	3150000	2100000 0	3150000	3150000	20	50000	1	12500	5000	5000	50/50
							2	26750	2500	2500	50/27
							3	2500	2500	2500	20/25
3	3150000	2100000 0	3150000	3150000	12	100000	1	25000	5000	5000	50/50
							2	13500	2500	2500	50/27
							3	5000	2500	2500	20/25
4	1050000	2100000 0	3150000	3150000	20	100000	1	25000	5000	5000	50/50
							2	13500	2500	2500	50/27
							3	5000	2500	2500	20/25

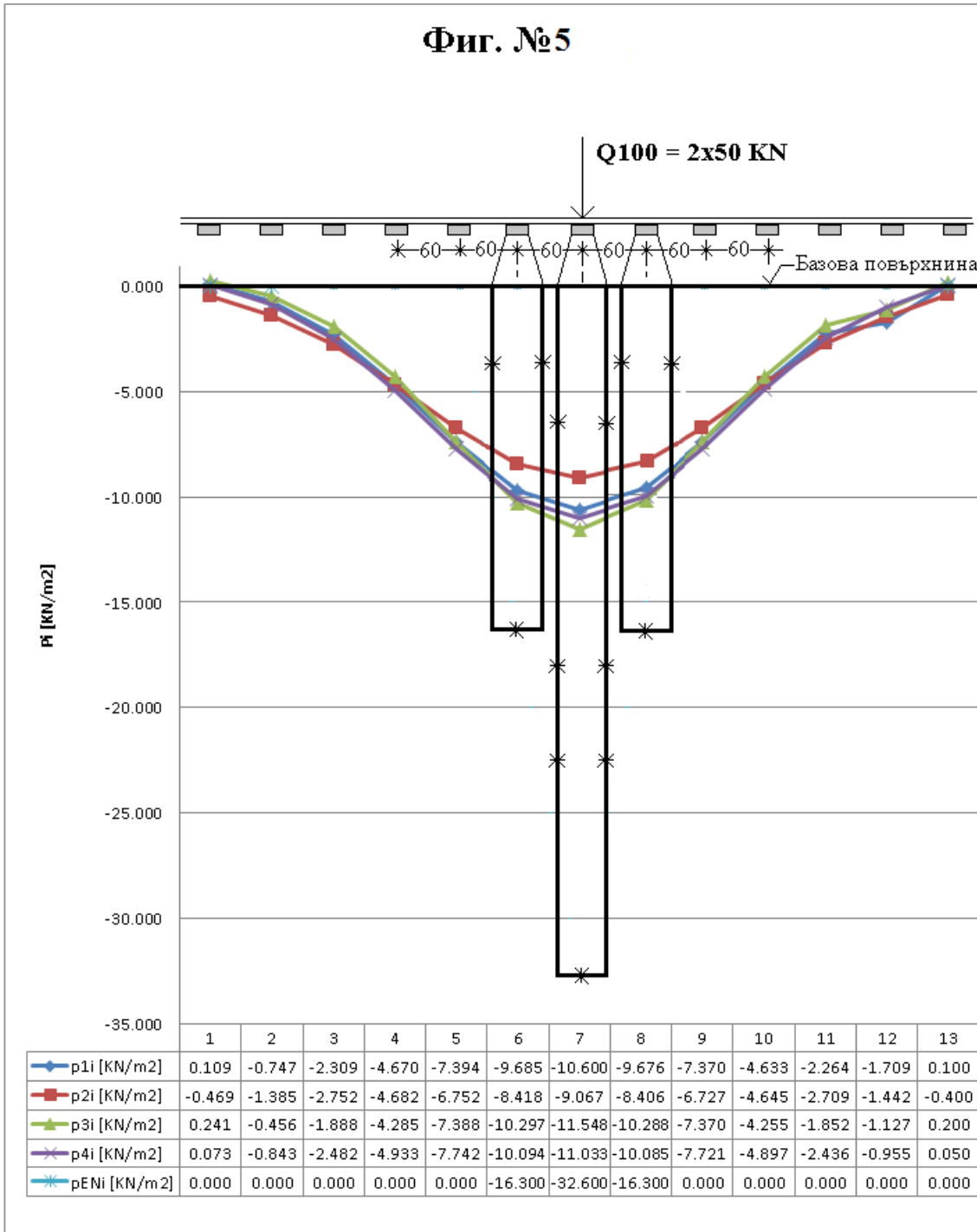
Вариантното изследване е проведено за концентрирана сила от 100 KN на ос (по 50KN върху всяка релса), разположена в оста на траверса, в средата на отвора на моста. Фигура №5 представя обобщени числови резултати и графична визуализация на сравнението, както между отделните варианти, така и със съответното EPH за баластова релсова конструкция. Последното е означено на фигура №5, като $pENi$ и е получено на база предписанията на [1], подробно изложени в раздел II, по горе.

Таблица №2 Данни за EPPH по варианти

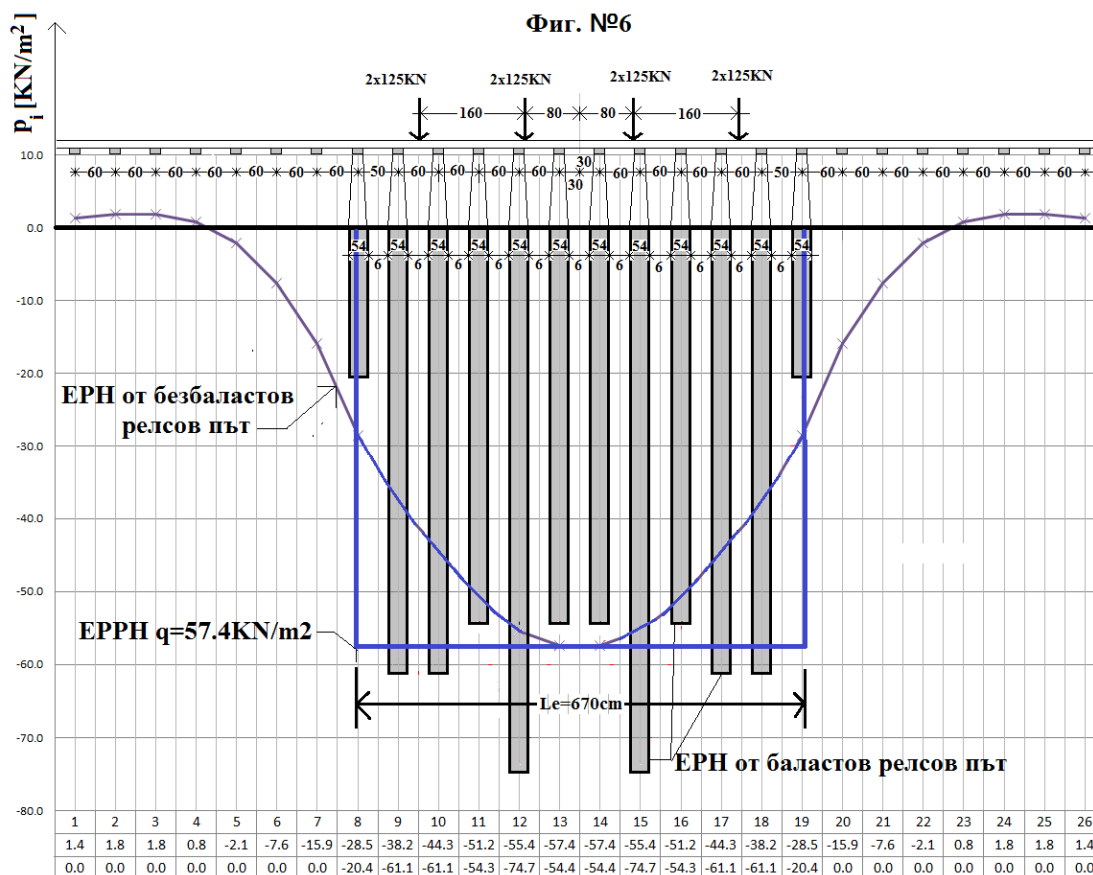
Вариант №	Интензивност q [KN/m ²]	Дължина Le [m]
1 - базов	10.60	3.63
2 – по-ниска пружинната константа на LINK връзките	9.07	4.24
3 – по-малка дебелина на плочата в ПРК	11.55	3.33
4 – по-малка коравина на мостовата конструкция	11.03	3.49

Доколкото еквивалентното разпределено натоварване (EPH) е неудобно за практически цели и сравнителен анализ, в Таблица №2 са представени еквивалентни равномерно разпределени натоварвания (EPPH) за четирите варианти, получени на база максималната интензивност на EPH при съответния вариант (максимално консервативен подход)

Фиг. №5



По нататък е проведено изследване за пакета концентрирани сили в товарен модел LM 71, както е показан на фигури №3 и №4. Това изследване е направено с характеристиките от първи-базов вариант на Таблица №1. Обобщения резултат за EPH и графичната му визуализация, в т.ч. сравнението с EPH при баластов релсов път са представени на фигура №6.



V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Безбаластовите релсови конструкции ще навлизат все повече в железопътното строителство у нас, което изисква натрупване на национален опит, в изучаване, проектиране и прилагане на т.н. плочни релсови конструкции ПРК.
2. Разпределянето на натоварването от железопътен трафик върху съоръженията чрез релсовата конструкция е регламентирано за практически цели от [1] и [2] само за баластови релсови конструкции.
3. При безбаластови релсови конструкции, разпределянето на концентрираните сили в натоварването от железопътен трафик, при определяне на усилията в тънки стоманобетонни пътни плочи, може да се получи при използването на сложни изчислителни модели от вида на описания в настоящия доклад.
4. В повечето случаи за нуждите на проектирането, както и за някои научно приложни цели [5], свързани с железопътни (или при метро) мостове е целесъобразно да бъдат получени, за облекчаване на работата, достатъчно консервативни ЕРРН от железопътен трафик върху ПРК, по начина описан в настоящия доклад. В случай на параметри, близки до разглеждания пример, може да се ползва така получения ЕРРН от концентрираните сили на товарен модел LM71: $q=57.4 \text{ kN/m}^2$ с дължина $L_e = 670 \text{ cm}$ и ширина $B = 260 \text{ cm}$.
5. Сравнението на ЕРРН на отделните варианти в Таблица №2 показва: максимално отклонение от 27.3% в данните: долната граница на интензивността и горната на дължината се получават при „по-меки“ връзки; реципрочните граници се получават при „по-мека“ плоча в ПРК.
6. Горният пример показва, че интензивността на ЕРРН от концентрираните сили в LM71 е повече от четири пъти по – голяма от тази на постоянните товари върху пътната плоча и то без да са отчетени: коефициента $\alpha > 1$ за по отговорните ж.п. линии; динамичните ефекти; случаен ексцентрицитет; надвишение и центробежни

сили в крива и др. Това показва, че макар и разположен над ребрата и засягащ ограничена площ от пътната плоча, ЕРПН от ж.п. трафик ще има съществено влияние за размера на армировката и/или размерите на пътната плоча. В този смисъл допълнителни аналогични изследвания за обхващане на други напречни мостови сечения и вариации с компонентите на ПРК са оправдани и целесъобразни.

7. Констатациите в т.5 и т.6 показват, че влагането на висококачествени, издръжливи и „силно-пружиниращи“ материали в ПРК, е един от ефективните начини за по-добро разпределение на концентрираното натоварване и борба с шума при подобни проектни решения.

Литература:

[1] БДС EN 1991-2:2006: Eurocode 1: Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges;

[2] БДС EN 1991-2/НА: Eurocode 1: Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges - National annex to BDS EN 1991-2:2006;

[3] Наредба № РД-02-20-19/29.12.2011 г. (ДВ, бр. 2 от 2012 г.) за проектиране на строителните конструкции на строежите чрез прилагане на европейската система за проектиране на строителни конструкции;

[4] Наредба за изменение и допълнение на Наредба № РД-02-20-19 от 2011 г. В сила от 27.12.2013 г.;

[5] Доц. Д-р инж. Николай Янев, Отчетни доклади по договор от 2012 година към проект № BG051PO001-3.3.06-0043 от оперативна програма „Развитие на човешките ресурси” на Европейски социален фонд.

NUMERICAL INVESTIGATIONS ON THE LM71 EQUIVALENT DISTRIBUTED LOAD DUE TO THE SLAB TRACK-BRIDGE DECK INTERACTION

Nikolay Ianev¹, Iana Ianeva²
nyanev@vtu.bg

¹Todor Kableshkov University of Transport, ²BETA CONSULT 1 Ltd.
¹1574 Sofia, 158 Geo Milev Str., ²1000 Sofia, 85 “G.S.Racovsky”str.
BULGARIA

Key words: slab track; bridge deck; equivalent distributed load due to the railway traffic.

Abstrakt: The BDS EN 1991-2 (clause 6.3.6.) regulates all details related to the distribution of the concentrated traffic loads by the standard ballasted track. There are no instructions how to proceed in case of the slab track implementation. The paper presents an accurate finite elements model of the slab track-bridge deck interaction. These interaction joint forces are the base of the equivalent distributed load (EDL) determination, which is more practical for the engineering calculations. The slab track and the standard track EDL parameters, due to LM71 traffic model have been compared.

The given example presents a typical one span railway concrete bridge structure. The length of the span is 40 meters. The structural analysis is made by the SAP2000 software program.