



Получена: 11.06.2024 г.

Приета: 26.06.2024 г.

## РАЗПРОСТРАНЕНИЕ НА ВИБРАЦИИТЕ ОТ ГРАДСКИЯ РЕЛСОВ ТРАНСПОРТ

С. Тодоров<sup>1</sup>, К. Куцарова-Димитрова<sup>2</sup>

*Ключови думи: релси, вибрации, градски транспорт, метро, трамвай*

### РЕЗЮМЕ

При преминаването на влаковете в метрото и трамваите нормално се появяват вибрации и шум, които възникват при: нормалното движение на возилата върху релсите; ускоряване и спиране на возилата в района на спирките; усилват се при наземно преминаване на метротрасето, движение на трамваите в крива и релсов път върху съоръжение.

Вибрациите се разпространяват по-добре по плътни материали, а затихват в еластични материали, несвързани почви и прекъснати въздушни участъци. При незаварени, неравномерно износени релси вибрациите се усилват. Нормалното движение на колосите е по синусоида, което също генерира вибрации. Те се усилват при неподдържано в рамките на техническите допуски междурелсие, едностранни и двустранни пропадания на релсите и т.н. Научният проект има за цел да установи каква е връзката между конструкцията на пътя, скоростта на движение, неравностите по релсите и вибрациите, чрез съставяне на теоретичен модел и последващи изследвания на характерни състояния.

### 1. Въведение

Релсовият транспорт е най-екологичният вид обществен транспорт с редица конкурентни предимства. Той има най-ниска себестойност на превозите. Спрямо

---

<sup>1</sup> Стойо Тодоров, проф. д-р инж., кат. „Железници“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: [stoyo\\_fte@uacg.bg](mailto:stoyo_fte@uacg.bg)

<sup>2</sup> Кина Куцарова-Димитрова, гл. ас. д-р инж., кат. „Железници“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: [kina\\_kutzarova@abv.bg](mailto:kina_kutzarova@abv.bg)

автобусните превози себестойността му е 4 – 5 пъти по-ниска. Разходът на електрическа енергия и общо на условни енергийни ресурси е сравним с водния транспорт, а спрямо автобусния и автомобилния е 2 до 3 пъти по-малък. Това е на базата на по-ниското съпротивление по време на движение и повече пътничкоместа на една тягова единица. От екологична гледна точка предимствата са две. По-малка заета площ за изграждане на една железопътна магистрала спрямо автомагистрала със същия превозен обем на превозите. Второто предимство е най-очевидно – по-малко отделяни вредни газове и емисии при електрическата енергия, която за железопътния транспорт е даденост, докато за автомобилния сега прохода. Максималните скорости на движение от порядъка над 500 km/h при железопътния транспорт са реалност, докато при автомобилния са 3 пъти по-малки с тенденция за допълнително ограничаване.

Главните недостатъци на железопътния транспорт са свързани с по-големи първоначални инвестиции, по-малка гъвкавост при организацията на превозите и необходимост от предварително планиране на урбанизираните територии за поемане на габарита на подвижния състав в общия размер на улиците и булевардите. От екологична гледна точка проблем е появата на шум и вибрации. Те възникват поради: нормалното синусоидално движение на колосите; ускоряването и спирането на влака при спирките, поради увеличаването на надлъжната компонента. При наставов релсов път, износени релси и нерегулирани температурни междини вибрациите се усилват. Вибрациите се усилват при неподдържан релсов път, по-широко междурелсие, едностранни или двустранни пропадания на релсите и т.н. До усилване на шума и вибрациите води и появата на дефекти по колелата на превозните средства.

## 2. Предпоставки

Разгледани са безбаластова конструкция на горното строене (фиг. 1), характерна за метрополитена, и баластова конструкция на горното строене (фиг. 2), характерна за трамваите на самостоятелно трасе.



Фиг. 1. Конструкция на горното строене при метрополитена

Натоварването върху релсите е еластично. Колелото и релсата са еластични стоманени елементи. Релсата е подпряна с еластична подложка между траверса и петата на релсата. Напречната еластичност се постига с еластична скоба на скрепленото. У нас е SKL 14 (фиг. 1). Двублоковата траверса също има известна еластичност, ако се сравни с моноблоковата В-91. Дължи се на стоманения елемент между блоковете. Ако липсва, то двата блока могат да се завъртат самостоятелно в рамките на възможното от гумения ботуш. Под траверсите има гумен ботуш. Той дава възможност за единична смяна на траверси и гарантира известна еластичност в натоварено състояние. Около него е излят

бетон до конструкцията на тунела. Между замонолитващия бетон и конструкцията на тунела или съоръжението не е предвиден еластичен елемент. Релсите за метрото са тип 49 E1 с обемно закалени глави, без отвори и без закаляване на краищата, твърдост  $R = 350 \text{ HB}$ , съгласно БДС EN 13674-1:2004 +A1:2008.



**Фиг. 2. Баластова конструкция на горното строене на трамвайна линия**

Най-малката производствена дължина на релсите е 25 m, а най-малката дължина на вложено парче релса около местата на свързване на отделни строителни участъци или стрелките е 6 m. Преди въвеждане в експлоатация главите на релсите се шлайфат. Безнаставовият релсов път се изпълнява с алумино-термитни заварки или по методи, които гарантират якост на заварката 100 % от якостта на релсовата стомана. Наклонът на релсите навътре към оста на пътя трябва да бъде 1:40, който да се осигурява от наклонената горна повърхност на двублоковите траверси или от скрепленията.

Релсови скрепления са SKL14 (фиг. 1), двублокови стоманобетонни траверси ДТ-М за безбаластов релсов път. Релсовите скрепления на релсите към траверсите трябва да отговарят на EN13481-5:2012 за изискванията към крепежните елементи и тези на БДС EN 50122-1:2004 за електроизолацията на релсите спрямо останалата част на конструкцията.

Скрепителната система на релсите към траверсите трябва да бъде еластична – тип W14 или W21. Последната е взаимнозаменяема със система W14 с разликите, че еластичните скоби SKL14 се заменят с по-издължени, респ. по-еластичните SKL21 и твърдите пластмасови подрелсови подложки се заменят с високоеластични от гума със затворени пори. Не са необходими никакви промени на очертанието на горните повърхности на траверсите. На места еластичната скоба е W21. Тя прилича на W14, но е по-еластична.

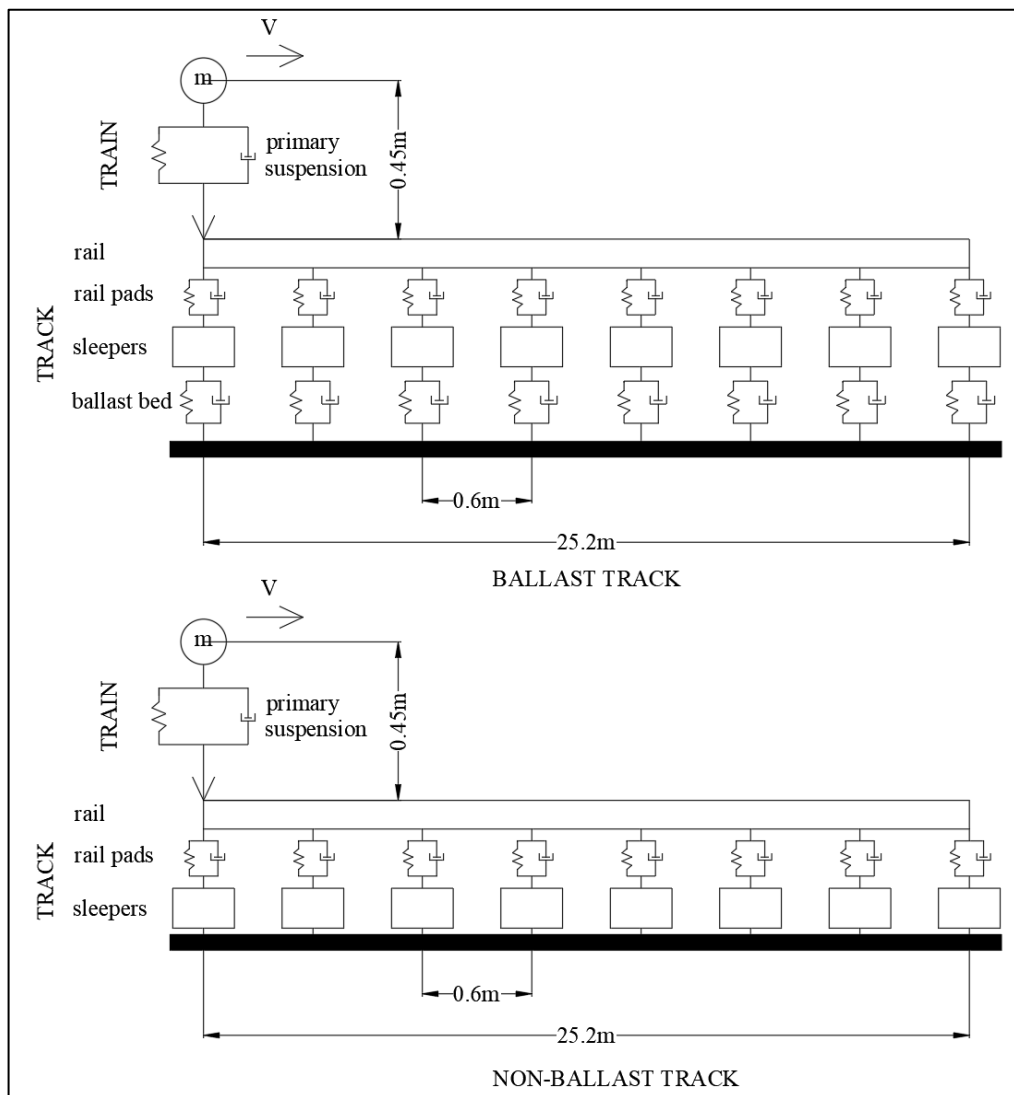
### **3. Теоретичен модел**

Направен е компютърен модел на железен път и превозно средство, движещо се по него. Използван е програмният продукт ANSYS LS – DYNA, основан на метода на крайните елементи. За получаване на вертикалните премествания е използван TIME-DOMAIN METHOD [1]. По този начин може да се проследи как влияят скоростта на движение на возилото и различните характеристики на елементите на пътя върху

преместванията (вибрациите на пътя) [2]. Симулациите са направени за двата типа конструкция на горното строене. Схема на модела е дадена на фиг. 3.

Използван е прост модел на превозното средство (фиг. 3), състоящ се от една колоос, без да се отчита собственото тегло и характеристиката на материала, от който е направена. Всяко колело с приспадащото се натоварване е зададено като ONE-MASS SPRING SYSTEM [3]. Стойността на масата за едно колело е 5000 kg, като тя е причина за статично натоварване върху релсата от 50 kN. Отчетена е характеристиката на окачването на талигата (Primary suspension). Числените стойности на еластичната и демферната характеристика на окачването са взети от [3].

Двете колела се движат заедно, като движението се извършва само по ос  $X$  на координатната система (съвпадаща с надлъжната ос на пътя). Това означава, че не се отчита лъкатушенето по време на движение.



Фиг. 3. Модел на пътя и превозното средство

Скоростите на движение са 10 m/s и 15 m/s, постоянни за цялото време на движението. Характеристиките на елементите на пътя са дадени в таблица 1.

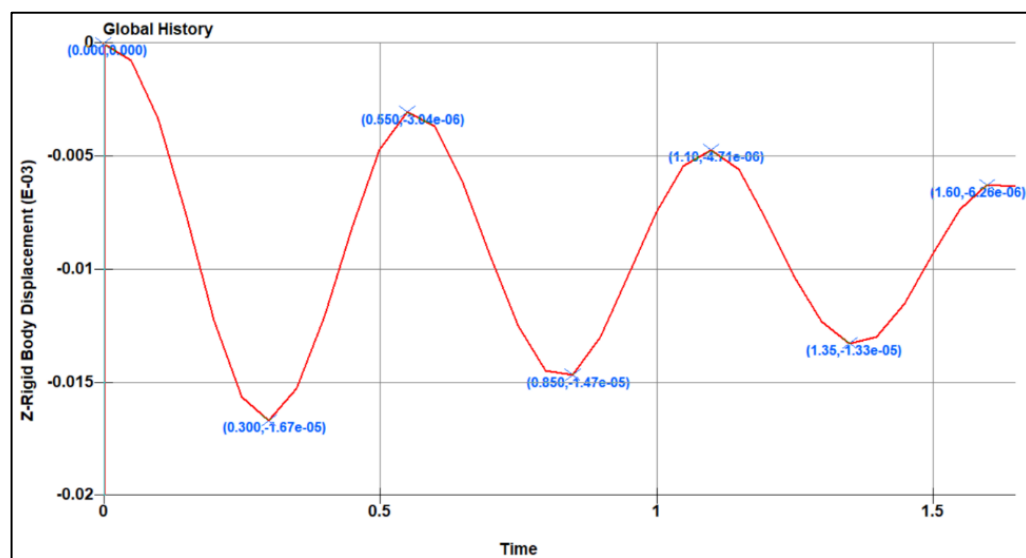
**Таблица 1. Характеристика на елементите ANSYS LS – DYNA**

Name	Element type	Material type	Material property				
			Mass density	Young's modulus	Poisson's ratio	Elastic stiffness	Damping constant
<b>dimension</b>	–	–	kg/m <sup>3</sup>	Pa	–	N/m	Ns/m
<b>Rail</b>	beam	Mat_elastic	7850	2,070.10 <sup>11</sup>	0,300	–	–
<b>Rail pad</b>	discrete	Mat_spring_elastic	–	–	–	1,000.10 <sup>8</sup>	
		Mat_damper_viscous	–	–	–	–	1,50.10 <sup>4</sup>
<b>Sleeper</b>	beam	Mat_elastic	2500	2,000.10 <sup>10</sup>	0,200	–	–
<b>Ballast bed</b>	discrete	Mat_spring_elastic				4,503.10 <sup>7</sup>	
		Mat_damper_viscous					2,05.10 <sup>4</sup>

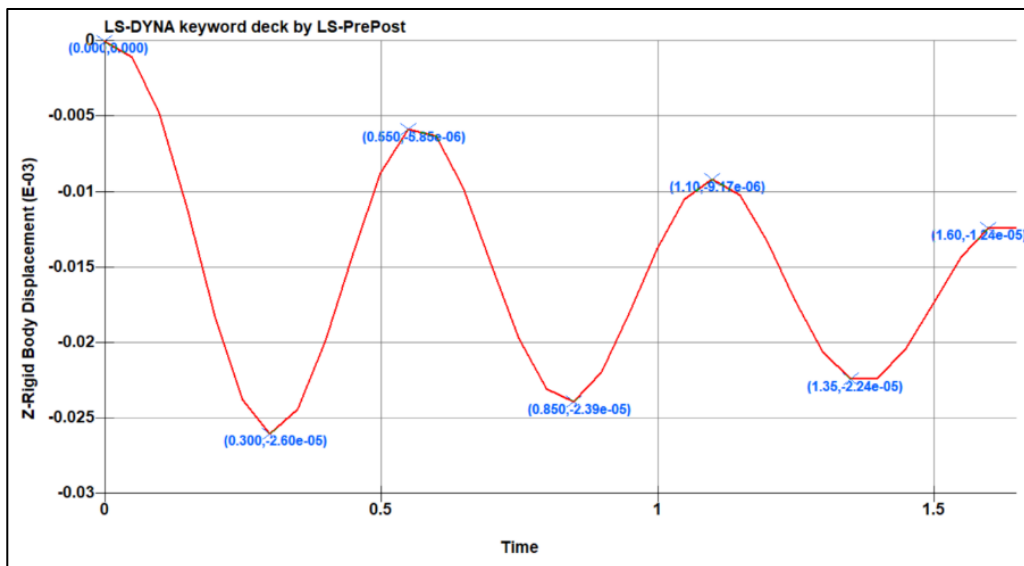
Баластовият път е моделиран с моноблокови траверси с дължина 2,5 m, а безбаластовият с двублокови траверси ДТ-М, използвани в Софийското метро. Двете релси са зададени като един ходов път RAIL\_TRACK. Първо е изследвано движение със скорост 15 m/s по идеално гладък път.

#### 4. Изследване на характерни състояния

Преместванията в системата могат да се видят от фиг. 4а и 4б.



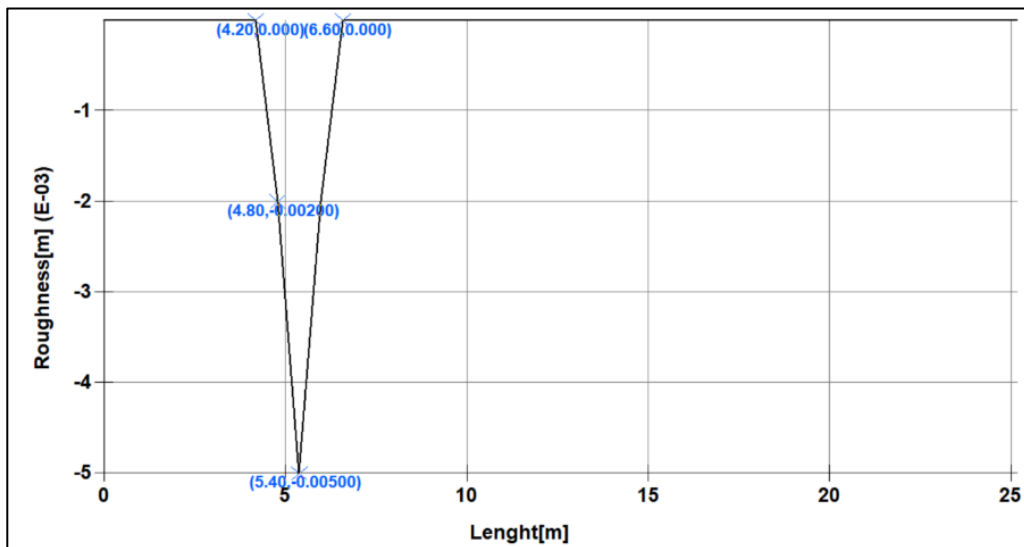
**Фиг. 4а. Премествания в безбаластова конструкция**



Фиг. 46. Премествания в баластова конструкция

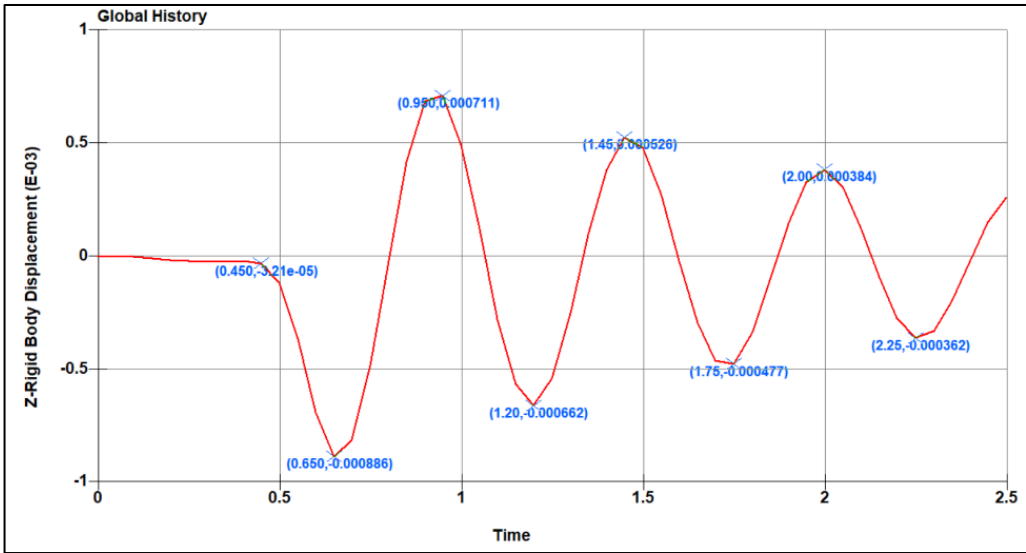
Сравнението между графиките показва, че вертикалните премествания са много малки. Освен това преместванията при безнаставовата конструкция са почти два пъти по-малки.

След това в модела на пътя е зададено пропадане в зона с 5 траверси, посредством LCUR1 = defining track roughness (vertical displacement from line of beam elements) само за дясната релса. LCUR1 е дадена на фиг. 5.

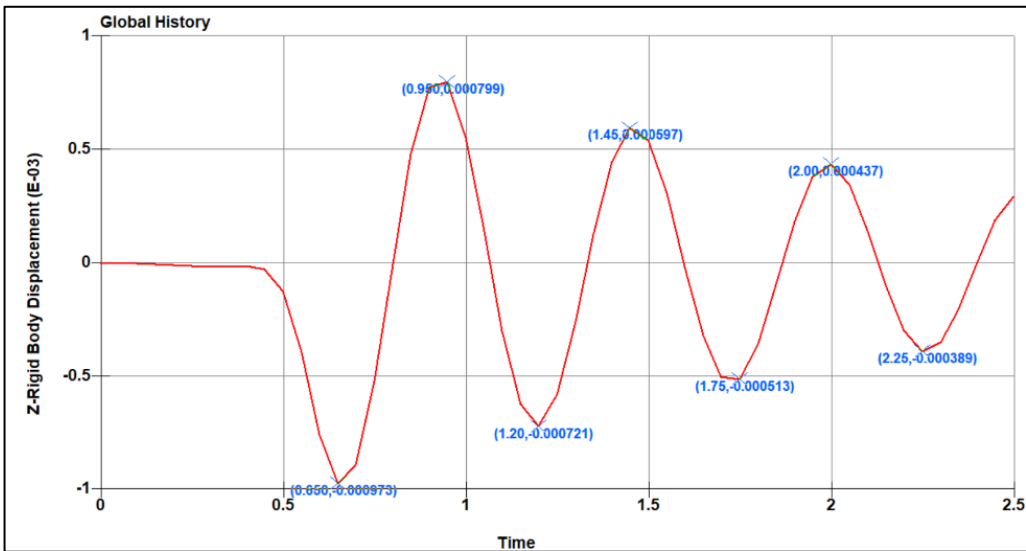


Фиг. 5. LCUR1-curve

На фигури 6 – 9 са дадени общите вертикални премествания при скорост на движение на колооста 10 и 15 m/s.



Фиг. 6. Вертикално преместване при скорост на движение 10 m/s за баластов път

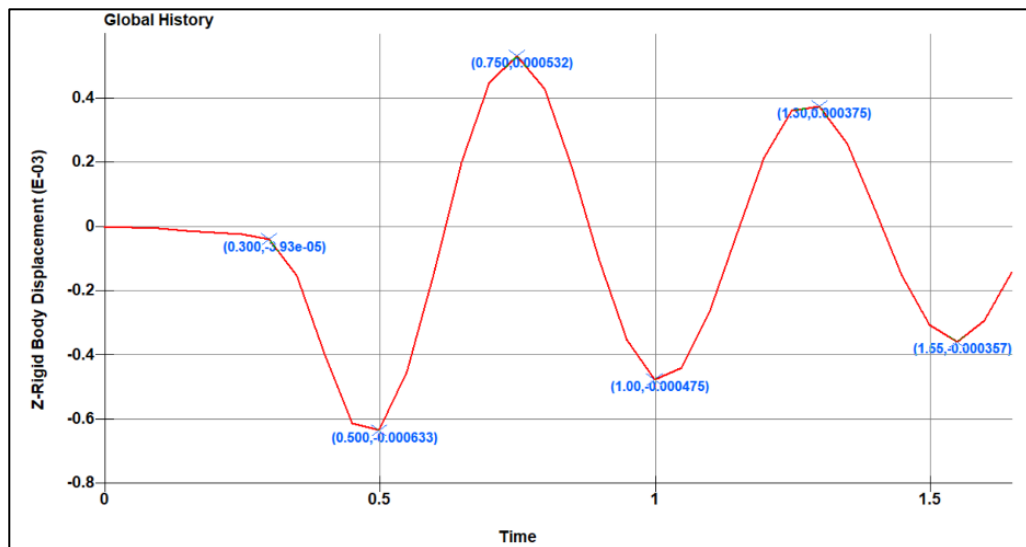


Фиг. 7. Вертикално преместване при скорост на движение 10 m/s за безбаластов път

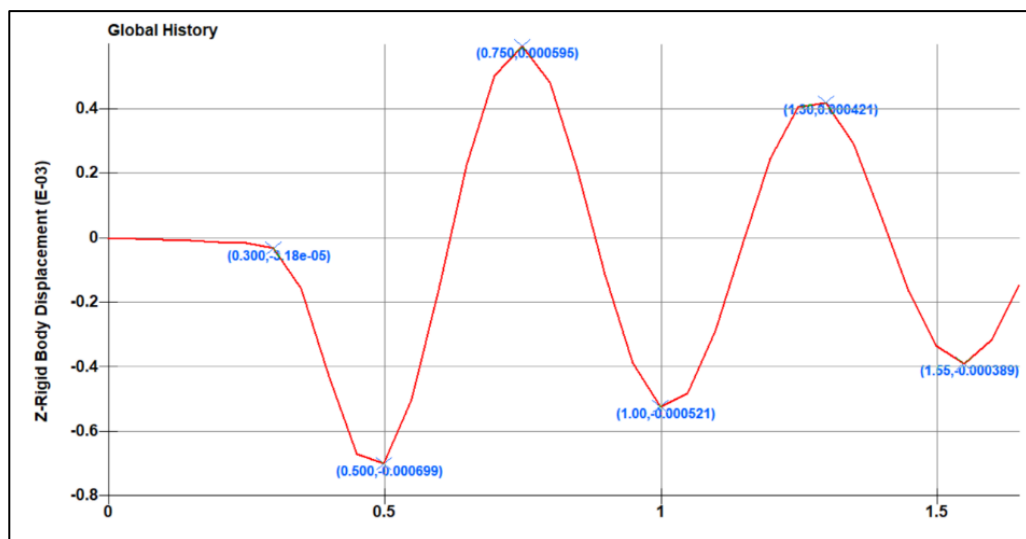
Общо за цялата система вертикалните премествания се усилват значително след като колооста навлезе в участъка с неравностите. Стойностите на преместванията са най-големи при излизане от зоната с неравности. Забелязва се обаче, че когато оста излезе от участъка с неравностите, вертикалните премествания на системата си остават съизмерими с максималното. Това означава, че в системата са възбудени трептения вследствие на динамичното натоварване, породено от неравностите. Характеристиките на тези трептения са както следва:

- Скорост 10 m/s период 0,55 s, максимална амплитуда  $1,6 \cdot 10^{-3}$  m за баластов път и  $1,8 \cdot 10^{-3}$  m за безбаластов път.

- Скорост 15 m/s период 0,50 s, максимална амплитуда  $1,2 \cdot 10^{-3}$  m за баластов път и  $1,3 \cdot 10^{-3}$  m за безбаластов път.



Фиг. 8. Вертикално преместване при скорост на движение 15 m/s за баластов път

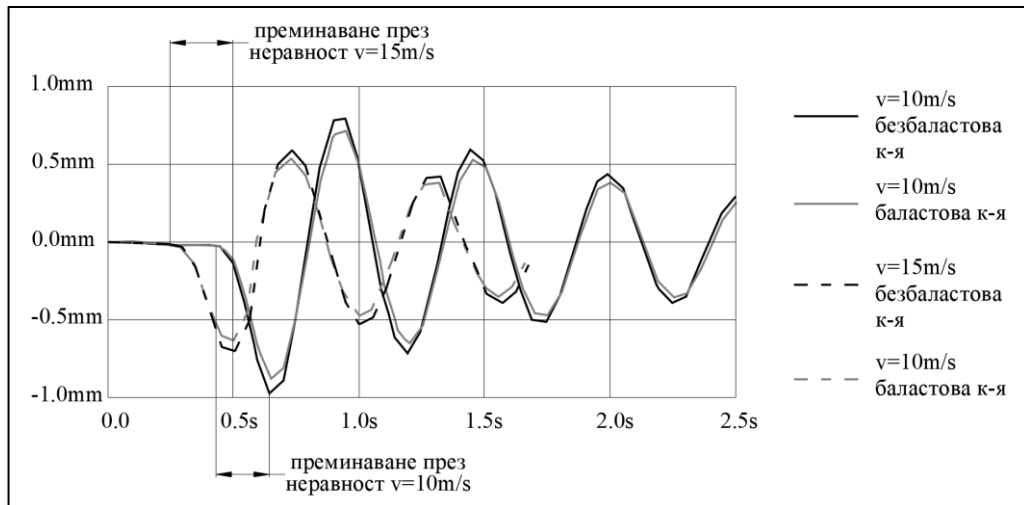


Фиг. 9. Вертикално преместване при скорост на движение 15 m/s за безбаластов път

Изводите, които могат да се направят въз основа на симулацията, са:

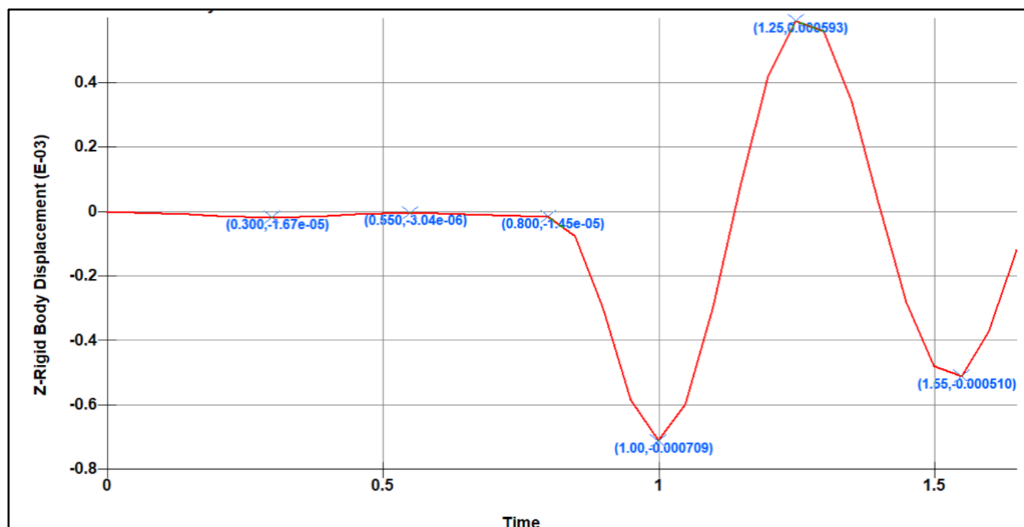
- неравностите по глава релса, причинени от износване или пропадания, са причина за възбуждане на трептения в конструкцията на пътя при преминаване на превозното средство;
- периодът и амплитудата на тези трептения намаляват с нарастване на скоростта на движение на превозното средство;

- при баластова конструкция на горното строене амплитудите при трептенето са по-малки, което означава, че по-добре поема динамичното натоварване.

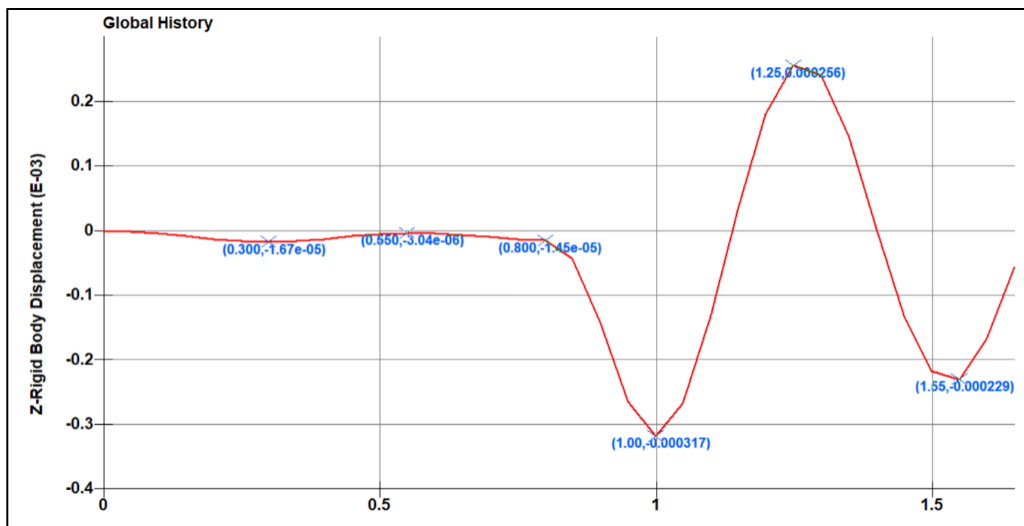


**Фиг. 10. Обобщение на всички премествания**

За отчитане на влиянието на големината на неравностите върху вибрациите са зададени две различни стойности на пропадане в зона от 5 траверси, разпределени между 12,0 и 14,4 метър от дължината на пътя. Изследването е за безбаластова конструкция на пътя и скорост на движение на колооста 15 m/s фиг. 11 и фиг. 12.



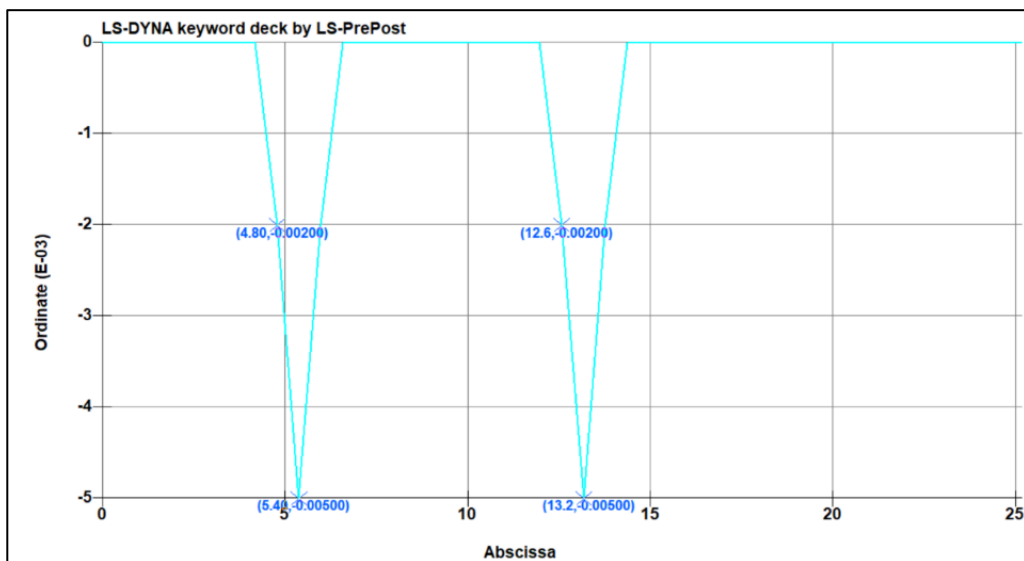
**Фиг. 11. Вертикално преместване при пропадане от 5 mm при безбаластова конструкция**



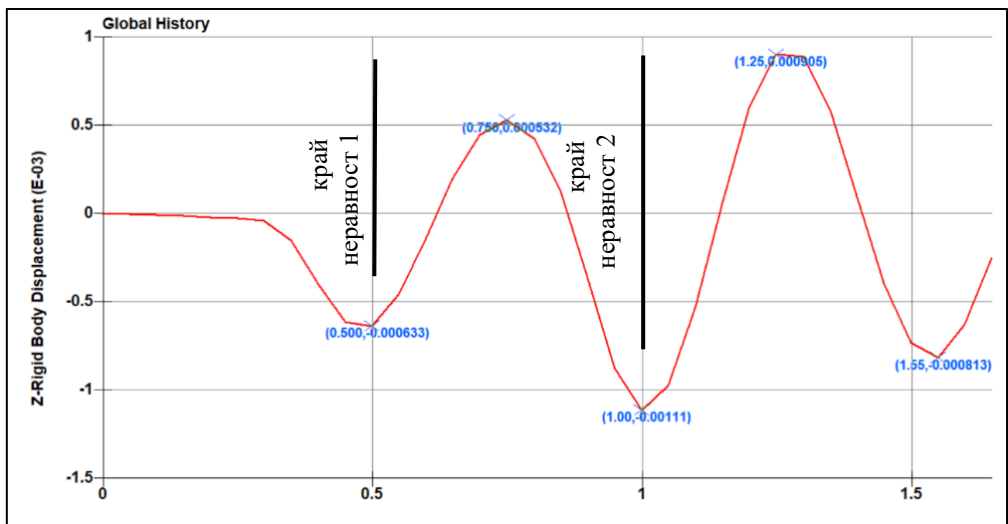
Фиг. 12. Вертикално преместване при пропадане от 2 mm при безбаластова конструкция

Ясно се вижда, че амплитудата на трептенията е пропорционална на големината на неравностите.

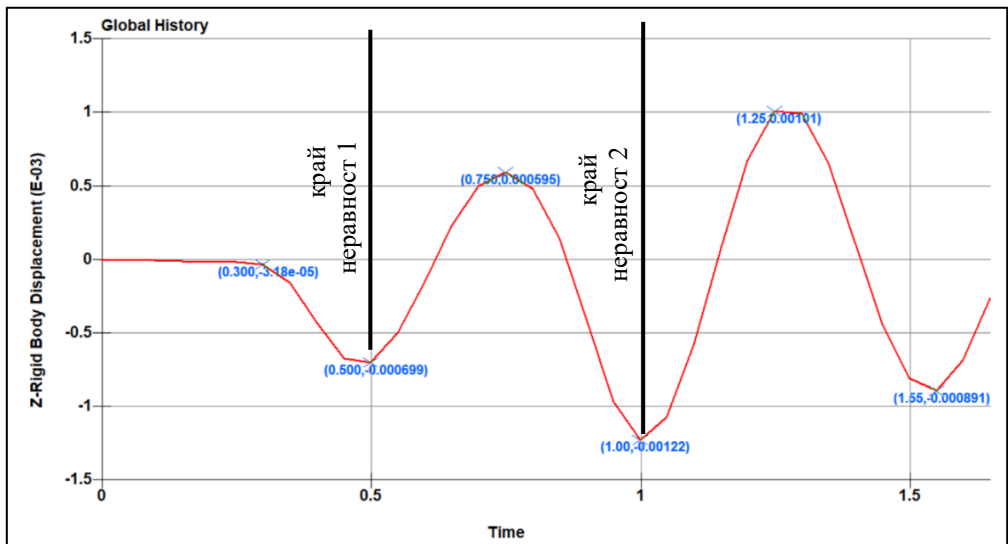
До тук бяха разгледани единични зони с неравности по една от релсовите нишки. Доста често обаче може да се случи да има повече от една неравност. За изследване на влиянието върху вибрациите на последователно разположени пропадания по едната релсова нишка в цифровия модел беше зададена LCUR1 (фиг. 13). Движение на колооста със скорост 15 m/s, при баластова и безбаластова конструкция. Резултатите са дадени на фиг. 14 и 15.



Фиг. 13. LCUR1-curve, отразяваща две пропадания на пътя



Фиг. 14. Вертикално преместване при баластова конструкция



Фиг. 15. Вертикално преместване при безбаластова конструкция

От фигури 14 и 15 е видно следното:

- при преминаване през първата неравност амплитудата на трептението нараства до  $1,29 \cdot 10^{-3}$  m;
- при преминаване през втората неравност амплитудата става  $2,23 \cdot 10^{-3}$  m, което е 1,7 пъти повече спрямо  $1,29 \cdot 10^{-3}$  m.

## 5. Изводи

Изводите, които могат да се направят въз основа на симулацията, са:

- Последователните неравности увеличават амплитудата на трептенията.
- При пътя с баластово легло амплитудите са по-малки отколкото при безбаластовата конструкция. Това означава, че баластовата конструкция по-добре поема динамичното натоварване.

Проведени са наблюдения върху отделения шум в атмосферата при движение на трамваите по ул. „Граф Игнатиев“ и булевард „Христо Смирненски“. Трамвайното трасе по „Граф Игнатиев“ беше наскоро ремонтирано. По него се движат обаче различни видове трамваи (част от мотрисите са с капаци отстрани на колелата, друга част нямат такива). Прави впечатление, че различните видове мотриси при движението си генерират различно количество шум. Шумът се усилва, ако има някаква техническа неизправност в мотрисата. Освен това едни и същи мотриси генерират различно количество шум при движението си по ул. „Граф Игнатиев“ и булевард „Христо Смирненски“. Това може да се обясни с влошеното състояние на трамвайната линия по „Христо Смирненски“.

## Благодарности

Изказваме благодарност на ръководството на ЦНИП, защото настоящата научноизследователска разработка по договор БН-274/23 е подкрепена финансово от Центъра за научни изследвания и проектиране при УАСГ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Iwnicki, S., Spiryagin, M., Cole, C., McSweeney, T.* Handbook of Railway Vehicle Dynamics. Second Edition, eBook ISBN 9780429469398, 2 Dec 2019, p. 913.
2. *Witt, S.* The Influence of Under Sleeper Pads on Railway Track Dynamics, 2008-06-16, LIU-IEI-TEK-A- -08/00442- -SE, Sweden, p. 55.
3. *Esveld, C.* Modern Railway Track Second Edition, Delft University of Technology, 2001, ISBN 978-1-326-05172-3, MRT-Productions, p. 745.

# VIBRATION PROPAGATION FROM URBAN RAIL TRANSPORT

**S. Todorov<sup>1</sup>, K. Kutzarova-Dimitrova<sup>2</sup>**

*Keywords: rails, vibrations, public transport, metro, tram*

## ABSTRACT

With the passing of trains in the subway and trams, vibrations and noise normally occur both during the normal movement of the vehicles on the tracks and the acceleration and stopping of vehicles in the area of stops. They are amplified in case of passing above the ground of the metro line, movement of the trams in a curve as well as a track on a facility.

Vibrations propagate better in dense materials, and are attenuated in elastic materials, loose soils and discontinuous air spaces. With non-welded, unevenly worn rails, vibrations are amplified. The normal motion of the colossi is a sine wave, which also generates vibrations. They are amplified in the case of track gauge not maintained within the technical tolerances, one-sided and two-sided failures of the rails, etc. The research project aims to establish the relationship between road construction, travel speed, rail roughness and vibration by constructing a theoretical model and subsequent studies of characteristic states.

---

<sup>1</sup> Stoyo Todorov, Prof. Dr. Eng., Dept. "Railway Construction", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: [Stoyo\\_fte@uacg.bg](mailto:Stoyo_fte@uacg.bg)

<sup>2</sup> Kina Kutzarova-Dimitrova, Chief. Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. "Railway Construction", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: [kina\\_kutzarova@abv.bg](mailto:kina_kutzarova@abv.bg)