ГОДИШНИК НА УНИВЕРСИТЕТА ПО АРХИТЕКТУРА, СТРОИТЕЛСТВО И ГЕОДЕЗИЯ СОФИЯ

Том Volume 55 2022 Брой Issue 3

ANNUAL OF THE UNIVERSITY OF ARCHITECTURE, CIVIL ENGINEERING AND GEODESY SOFIA

Получена: 24.06.2022 г.
Приета: 08.07.2022 г.

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ДИНАМИЧНИТЕ ПАРАМЕТРИ НА ДВИЖЕНИЕТО НА ЖЕЛЕЗОПЪТНИ ВОЗИЛА ПРИ ПРЕМИНАВАНЕ ПРЕЗ СТРЕЛКИ И КОЛОВОЗНИ СЪЕДИНЕНИЯ

С. Тодоров[1], М. Илиев[2]

Ключови думи: *железен път, железопътни стрелки*

РЕЗЮМЕ

Настоящият доклад разглежда поведението и взаимодействието на отделните елементи от железния път в условията на динамично натоварване от подвижния състав. Разглежда се еластичността на пътя както поелементно, така и като цялостна конструкция. Извеждат се причините за настъпване на резонанс в елементите при натоварване с хармоничен товар. Специално внимание се отделя на железопътните стрелки като най-специалния и сложен елемент от горното строене на железния път.

1. Въведение

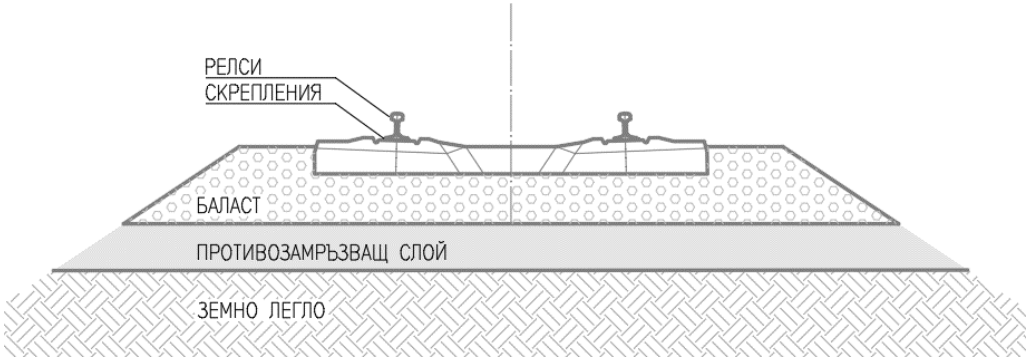
Ключов момент в развитието на железопътния транспорт и налагането му като основен в превоза на пътници и товари е възможността той да образува собствена мрежа. Реализирането на железопътна мрежа не би било възможно без специалните съоръжения, които позволяват преминаването на единични возила и цели състави от един коловоз на друг. Стрелките позволяват разклоняването на коловозите, разгръщайки пълния капацитет на железницата като вид транспорт. Стрелката е най-сложното съоръжение на горното строене, което я поставя на ключова позиция: от изправността и безотказната работа на стрелките зависи безотказната работа на целия железопътен транспорт, както и неговата сигурност.

[1] Стойо Тодоров, проф. д-р инж., кат. „Железници", УАСГ, бул. „Хр. Смирненски" № 1, 1046 София, e-mail: stoyo.todorov@gmail.com
[2] Матей Илиев, инж. докторант, кат. „Железници", УАСГ, бул. „Хр. Смирненски" № 1, 1046 София, e-mail: matey_iliev@outlook.com

Данните в българската литературна база относно разглеждането на железния път в светлината на взаимодействието между него и железопътните возила, както и наличните изчислителни процедури и методи у нас се ограничават най-вече до определянето на носимоспособност на пътя или отделните елементи от него. Добра предварителна теоретична подготовка по въпроса се предоставя в [1], където са разгледани няколко метода, оптимизирани за ръчни изчисления.

2. Елементи на железния път като еластична система

Настоящата разработка се фокусира изключително върху конвенционалния железен път като баластова конструкция върху еластична земна основа. Не са разгледани други типове специални железници, леки железници и железници върху монолитна основа. Конструктивните елементи на конвенционалния железен път по посоката на предаване на натоварването са: релси, скрепления, подложки, траверси, баластова призма, противозамръзващ слой [2], земно легло.



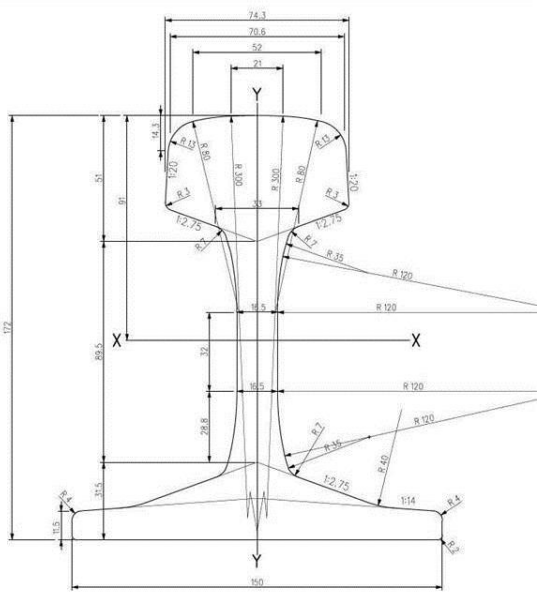
Фиг. 1. Схема на съставните елементи на железния път

2.1. Релси

Съвременният релсов профил е с плоска долна част и е модификикация на I-профила. Вместо плосък горен пояс обаче, горната част на релсовия профил е оформен в т.нар. „глава“ на релсата. Профилът е разработен от английския инженер Чарлс Виньол през 30-те години на XIX-и век.

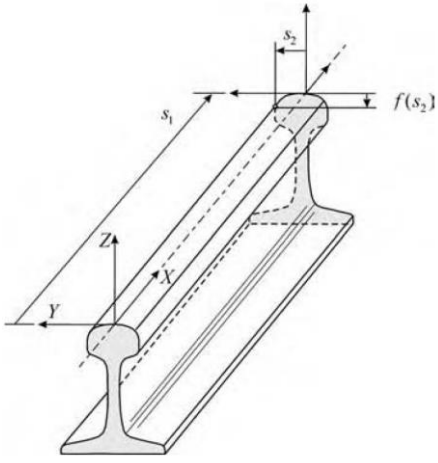
По същество релсите са надлъжни на пътя еластично подпрени греди с дискретно подпиране в траверсите. Те дават на возилата гладка повърхност за движение, направляват возилата, поемат пространственото натоварване от колоосите и го разпределят върху близките траверси. Релсите са част от токовата верига при електрифицираните жп линии, а при някои видове системи на осигурителната техника електропроводимостта на релсите се използва също за проследяване на местоположението на колоосите и предаване на съобщения за целите на сигнализацията.

В съвремието в Европа най-използван е профилът 60E1, съответстващ на линейно тегло на релсата от 60 kg/m'.



Фиг. 2. Релсов профил 60E1

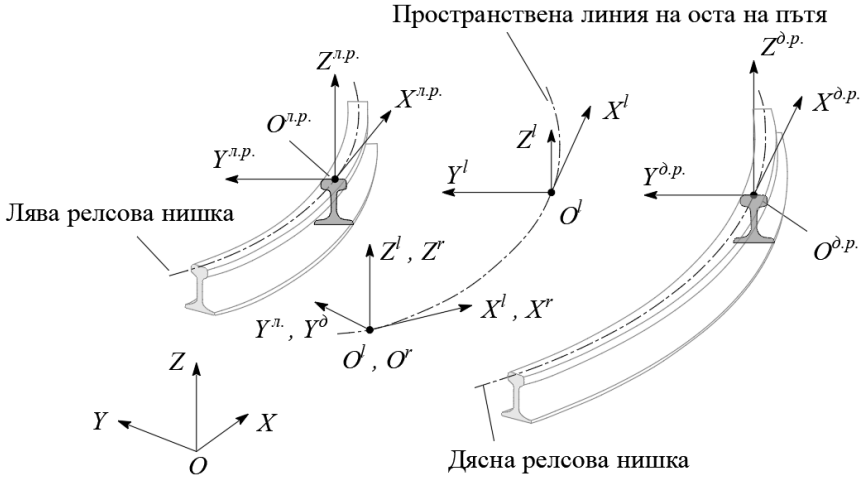
Трасето на железния път се нормира и проектира в оста на жп линията, между двете релсови нишки, на нивото на главата на релсата [3]. Релсите от своя страна са елементите на горното строене, които направляват возилата в пространствената линия, която е трасето на пътя. За целите на моделирането се използват постановките от диференциалната геометрия на кривите, чрез които релсовата повърхност може да се опише в параметричен вид. Описанието на тази повърхност трябва да бъде такова, че да е възможно изразите да работят за различни релсови профили и геометрии на релсовите нишки, например с данни в табличен вид от измервания на място. Добра формулировка по този въпрос е налична в [4]. В случая на право релсово парче параметризацията има вид, показан на фиг. 3.



Фиг. 3. Параметризация на релсовата повърхност

$$\left.\begin{aligned} X &= s_1 \\ Y &= s_2 \\ Z &= f\left(s_2\right) \end{aligned}\right\}. \qquad (1)$$

Параметърът s_1 е разстоянието надлъжно по релсата, а s_2 е напречното разстояние до вертикалната осова равнина на релсата. Функцията $f\left(s_2\right)$ се подбира според конкретната необходимост, като за нови релсови профили често се използват синусоидни форми. За профили, получени от измервания на място на износени релси например може да се използват сплайн-функции, с променлива s_2, които да опишат гладка крива около измерените точки. В случаите, в които релсовото сечение се изменя по дължината на кривата $Z = f\left(s_1, s_2\right)$.



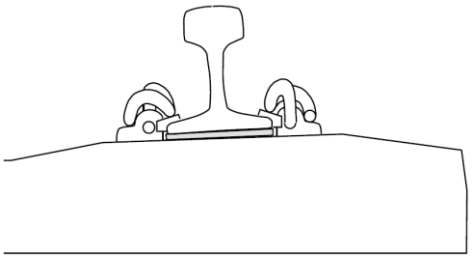
Фиг. 4. Координатни системи при моделиране на релсите

В общия случай трасето на пътя е пространствена крива. Необходимо е да се опише и положението и ориентацията на напречното сечение на релсата, като функция от s_1. За отчитането на различните конфигурации (например разширения в междурелсието, надвишение) е необходимо двете релсови повърхности да бъдат независимо моделирани. Важно е също всяка от релсовите нишки да бъде независимо тяло от другата, със собствени степени на свобода, натоварване, подпиране и деформируемост. Такава генерализация се постига чрез въвеждането на няколко координатни системи, видни на горната фигура. В [5] се предлага добър теоретичен модел.

2.2. Скрепления (със или без подложки)

В горното строене на конвенционалния железен път се използват стоманобетонови траверси – предварително напрегнати, или не. От гледна точка на динамичната характеристика на горното строене в този случай скрепленията и подложките играят много важна роля и влияят пряко върху цялостната коравина на системата. Те предпазват тра-

версите от ударите вследствие на еластичните деформации на релсата. Освен това, скрепленията позволяват реализирането на по-голяма деформация на релсата, което разпределя динамичния товар от возилата върху повече на брой траверси. По-деформируемите подложки демпферират високочестотните вибрации на релсата и възпрепятстват тези вибрации да се разпространят надолу към траверсите, баластовата призма и основата.



Фиг. 5. Релсово скрепление към стоманобетонна траверса с гумена подложка между релсата и траверсата

Налични са литературни данни по отношение на динамичните свойства на подложките. В [6] са дадени резултати от лабораторни изпитвания за коравината и степента на затихване на подложките. Изследваните видове подложки показват коравина от 1000 – 3000 kN/mm и коефициент на затихване от 29 – 34 kN.s/m. Еластичните скрепителни системи, използвани у нас за стоманобетонови траверси обаче, имат значително по-ниска коравина от порядъка на 50 – 100 kN/mm. Необходимостта от по-еластични подложки и скрепления се дължи на многократно по-голямата коравина на стоманобетонните траверси спрямо, например, дървените траверси.

2.3. Траверси

Траверсите са опорите на релсовите нишки, осигуряват междурелсието, оста и нивото на железния път. Засипването им с баласт до горната повърхност позволява те да предават вертикалните, надлъжни и странични на железния път сили от релсите към баластовата призма. Най-разпространени в съвременния железен път са моноблоковите предварително напрегнати стоманобетонни траверси. В конкретни случаи приложение намират двублоковите стоманобетонни траверси, стоманените и дървените траверси. Настоящото изследване се фокусира върху предварително напрегнатите моноблокови стоманобетонни траверси. Широко разпространени у нас са траверсите тип „B91“, разработени от ЖПСВ, както и българския им еквивалент „СТ-6“.

За данни относно параметрите на траверсите се позовава на [7], където са дадени следните характеристики:

$i_{\text{тр}}$ е относителна коравина на траверсата [kNm];

$E_{\text{тр}}$ – еластичен модул на материала [kN/m^2];

$I_{\text{тр}}$ – инерционен момент на траверсата при огъване в хор. равнина [m^4];

i – инерционен радиус [cm];

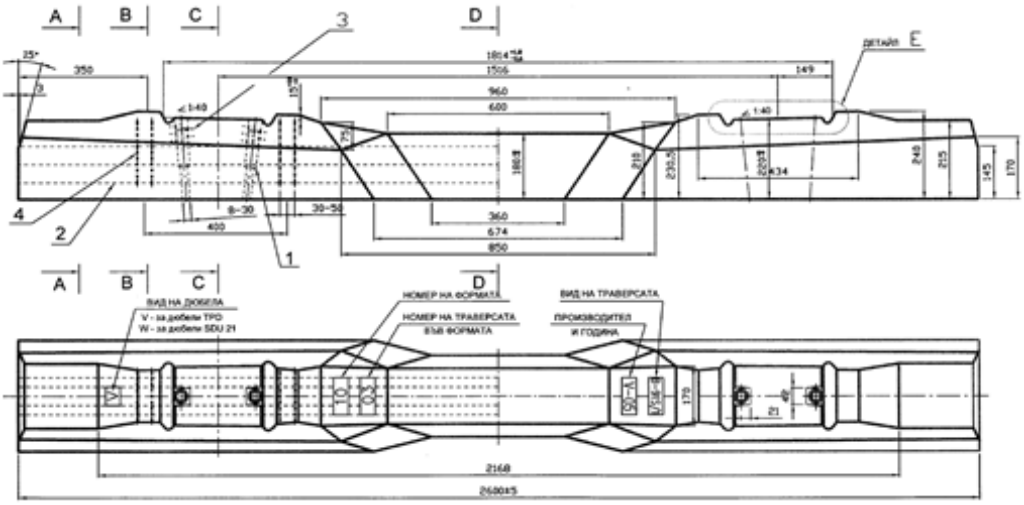
$S_{\text{обща}}$ – обща площ на долната повърхност на траверсата [m^2];

$S_{\text{полезна}}$ – полезна площ на долната повърхност на траверсата [m^2].

Стойностите на величините са дадени в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики на стоманобетонна траверса тип B91

Величина	Подрелсово сечение C-C	Средно сечение D-D
$i_{тр}$	1357	1232
$E_{тр}$	36.10^6	36.10^6
$I_{тр}$	98.10^{-6}	89.10^{-6}
i	7,4	6,2
$S_{обща}$	0,738	0,738
$S_{полезна}$	0,597	0,597



Фиг. 6. Общ вид на стоманобетонна траверса тип B91 [7]

За разлика от специалната форма на траверсите в открития път, стрелковите траверси са с правилна форма на паралелепипед и постоянно напречно сечение по дължината си. Съгласно [8] стрелковите траверси са с 280 – 300 mm широчина и 220 mm височина. При прието напречно сечение 300/220 mm величините от горната таблица придобиват следните стойности (за относителната коравина е приета минималната дължина 2,60 m).

Таблица 2. Характеристики на стрелкова стоманобетонна траверса

Величина	Подрелсово сечение C-C	Средно сечение D-D
$i_{тр}$	3686	3686
$E_{тр}$	36.10^6	36.10^6
$I_{тр}$	$266{,}2.10^{-6}$	$266{,}2.10^{-6}$
i	6,4	6,4

2.4. Баласт

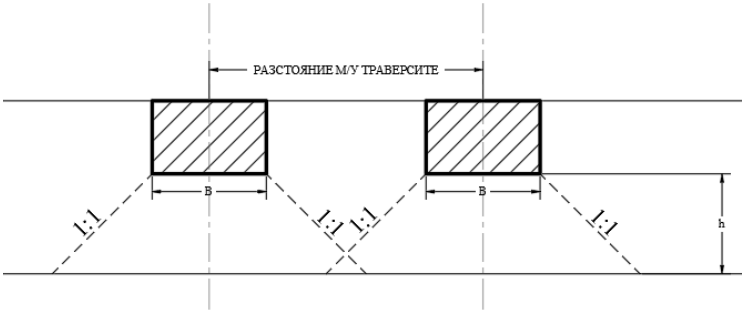
Фракциониран трошен камък с ръбеста форма на зърната се използва за оформяне на т.нар. „баластова призма“. На европейско ниво чрез [9] механичните и зърнометричните свойства на този пласт са предварително установени. Прилагат се фракции 31,5 – 50 mm, както и 31,5 – 63 mm.

Поради големите количества, нужни за строителството, направата на баласта не е ограничена до конкретни геоложки разновидности. Може да бъде от гранит, сиенит, базалт, варовик и т.н., стига готовият материал да постига необходимите параметри на дробимост, мразоустойчивост, износоустойчивост, устойчивост на изветряне и т.н., описани подробно в горепосочения европейски норматив.

Геометричните размери на баластовата призма в напречен профил са предварително установени с нормативни изисквания според проектната скорост на железопътната линия, както и нейната категория. Обичайно под долната повърхност на траверсите минималната дебелина на призмата е 33 cm, а страничната засипка на двете чела на траверсите варира от 30 до 50 cm. Откосът на призмата не трябва да бъде по-стръмен от 1:1,25, обичайно се изпълнява 1:1,50.

Данните за динамичното поведение на баластовото легло са емпирични. Реферираните литературни източници не предоставят дефинитивни теоретични модели за динамичната работа на баласта в железния път – изчислителните схеми са строго индивидуални според характера на изследването. В нормативите на национално и европейско ниво са дадени емпирично получени стойности, описващи поведението на баласта под различни видове натоварване.

В [1] е даден метод за определяне на дебелината на баластовата призма под долната повърхност на траверсите. Формиращият фактор за намирането на оптималната дебелина е товарните конуси под долните поръхности на траверсите да се пресичат на нивото на основната площадка под баласта – постигайки сравнително равномерно натоварване на основата. По този метод получената стойност за дебелината е от порядъка на 25 – 30 cm, според разстоянието между траверсите и възприетия ъгъл на образувателната на товарния конус. У нас е приета минималната дебелина от 33 cm от технологична гледна точка лопатките на подбивните машини да не достигат и, съответно да компрометират, основната площадка под баласта.



Фиг. 7. Оптимална дебелина на баластовата призма [1]

Баластовата призма може да се представи като еластична основа, моделирана с еластични пружини. Поради това, че траверсите са засипани с уплътнен баласт до горната си повърхност, призмата оказва известно съпротивление на преместването на релсотраверсовата скара в надлъжно, напречно и вертикално направление. Във вертикално

направление могат да се използват литературни данни за коефициента на леглото, отговарящ на пласт от трошен камък. Предлага се коефициент на леглото от 60 000 kN/m^3.

Призмата, със страничната засипка пред челата на траверсите, оказва и съпротивление срещу страничното изместване на пътя по ос. В [10] са дадени емпирични стойности на това съпротивление (означено с B [kN/m]) за различни видове траверси. За целите на настоящото изследване ще се приеме:

$$B = 2000 \text{ kN/m}. \tag{2}$$

Необходимо е да се вземе предвид, че в [10] стойностите са дадени **за линеен метър железен път.** При обичайно разстояние между траверсите от 600 mm за една траверса се получава:

$$B_{\text{тр}} = 2000.0,6 = 1200 \text{ kN/m}. \tag{3}$$

2.5. Противозамръзващ слой (предпазен пласт)

Фракциониран трошен камък с по-ситна фракция от баласта се използва за направата на този пласт. Той разделя баластовата призма от земната основа, недопускайки смесването им. Предпазва земната основа от замръзване, повишава коравината на основата, върху която лежи баластовата призма. Може да бъде получен от различни геоложки разновидности, стига да постига нормативните критерии за деформационни модули на пласта и материала, зърнометрични изисквания и филтрационни критерии [2, 11].

Този пласт е с различни параметри от баластовото легло. Предвид по-ниските изисквания за деформационен модул се препоръчва по-нисък коефициент на леглото от ок. 40 000 kN/m.

2.6. Земна основа

Това е уплътнената и профилирана земна площадка, върху която лежат всички елементи на железния път. Тя е много важен компонент с оглед на това, че веднъж изпълнена, същата не е обект на текущото поддържане на пътя. След полагането на железния път е изключително трудно да се извършват ремонтно-възстановителни дейности по земната основа.

Тук коефициентът на леглото варира в широки граници според конкретните геотехнически и геоложки условия.

3. Еластичност на железния път и резонанс

Под еластичност на железния път в тази точка ще се има предвид реципрочната стойност на коравината на еквивалентна на пътя пружина, подложена на вертикално натоварване, по аналогия с термините от теоретичната механика:

$$c_{\text{o}} = \frac{1}{k_{\text{o}}}, \text{ [m/N]}, \tag{4}$$

където k_{o} в N/m е обща коравина за цялата конструкция на пътя във вертикално направление.

За получаването на $k_{\text{о}}$ е необходимо да са известни поотделно коравините на всички елементи на железния път, разгледани в предишната точка. $k_{\text{о}}$ се получава от следната зависимост:

$$\frac{1}{k_{\text{о}}} = \frac{1}{k_{\text{р.}}} + \frac{1}{k_{\text{скр.}}} + \frac{1}{k_{\text{трав.}}} + \frac{1}{k_{\text{бал.}}} + \frac{1}{k_{\text{п.п.}}} + \frac{1}{k_{\text{з.о.}}}, \tag{5}$$

където $k_{\text{р.}}$ е коравината на релсите;

$k_{\text{скр.}}$ – коравината на скрепленията;

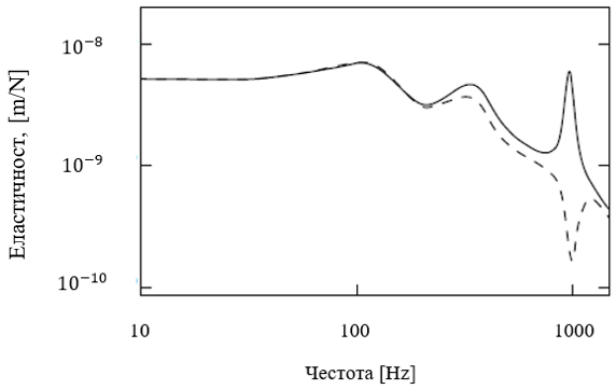
$k_{\text{трав.}}$ – коравината на траверсите;

$k_{\text{бал.}}$ – коравината на баластовото легло;

$k_{\text{п.п.}}$ – коравината на предпазния пласт (ако е наличен);

$k_{\text{з.о.}}$ – коравината на земната основа.

В условията на прав, хоризонтален железен път величината $c_{\text{о}}$ може да бъде изследвана чрез прилагане върху релсите на хармоничен товар с различна честота. Такова натурно изпитване е правено и се разглежда в [5]. Долната фигура показва еластичността на пътя като функция на честотата на товара в логаритмичен мащаб.



Фиг. 8. Еластичност на железния път под действието на хармоничен товар с различна честота. С плътната линия са стойностите при натоварване в средата между 2 траверси. С пунктир са стойносите при натоварване осово над една траверса

Конкретните стойности по ординатата на горната графика варират според различните типове елементи на горното строене, както и състоянието им. Графиката показва принципното поведение на пътя и обичайната му деформируемост, илюстрирайки зависимостта между честотата на приложения товар и получената вертикална деформация. Открояват се 3 участъка от графиката, при които се наблюдава резонанс.

Първият, с честоти около 100 Hz (може да варира от 50 Hz до 300 Hz според конкретните условия), се обяснява с трептенето на цялата релсо-траверсова скара (в ролята на пружина) върху баластовото легло (в ролята на демпфер). Кривата в този диапазон е изпъкнала сравнително слабо, което потвърждава целесъобразността на баласта като среда, която да демпферира вибрациите.

Друг участък на резонанс личи приблизително между 200 Hz и 600 Hz. Този резонанс се обяснява с трептенето на релсите (в ролята на пружина) върху подложките (в ролята на демпфер). Кривата в този диапазон отново е изпъкнала сравнително слабо, по което се съди за способността на подложките да погасяват вибрациите с този честотен спектър.

Третият резонанс в зоната на 1 kHz е с много слабо затихване. Той е виден само в плътната линия (при натоварване между 2 траверси), докато в същия диапазон пунктираната линия е в „антирезонанс“ – вертикални деформации над траверсата почти не се регистрират. Поведението на железния път в този честотен диапазон се обяснява със собствената честота на релсата, разгледана като двойно-запъната греда на неподвижни опори. В затихването не участва нито един елемент на горното и долното строене на железния път с изключение на материала на релсите – в този честотен диапазон се регистрират симетрични по посока вертикални деформации единствено в релсите; енергия почти не се изразходва в останалата част от конструкцията. Този резонанс се потвърждава и по теорията на Ойлер-Бернули. Съгласно теорията за собствената честота на трептене на едноотворна просто подпряна греда:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi}\pi^2\sqrt{\frac{EI}{mL^4}}\,, \tag{6}$$

където EI е огъвната коравина на гредата;

m – линейната маса;

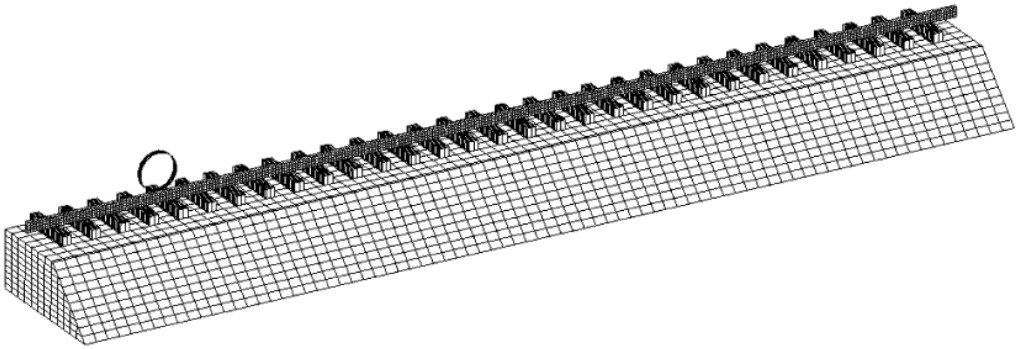
L – отворът на гредата (1 междутраверсово разстояние).

За релсов профил 60E1 с $m \approx 60$ kg/m, $EI = 6400.10^3$ Nm^2 и обичайно междутраверсие $L = 0,60$ m изразът дава $f = 1425$ Hz. При междутраверсие $L = 0,65$ m, $f = 1214$ Hz. Теоретичните собствени честоти са по-високи спрямо емпиричните данни заради факта, че теоретичният модел дава добри резултати при малки стойности на отношението между височината на гредата и дължината на вълната. Тук дължината на вълната $\lambda = 2L$ е от порядъка на 1,20 m до 1,30 m, а релсовият профил 60E1 е с височина $h = 172$ mm, което дава отношение от около $\lambda \approx 7,25h$.

4. Регулярност на конструкцията на железния път

За „регулярност“ в дадена строителна конструкция се съди спрямо това в каква близост са нейният **масов център** (център на тежестта) и **инерционен център** (център на коравините). При използване на координатната система, въведена във фиг. 4, може да се разглежда регулярност в равнините Oxz (вертикалната равнина, надлъжна на пътя) и Oyz (вертикалната равнина, напречна на пътя).

В напречен профил железният път е регулярна конструкция, понеже притежава симетрия спрямо вертикалната си ос. В случая на прав безнастав железен път същото може да се твърди с достатъчна точност и в надлъжно отношение. Траверсите са стандартни елементи, разположени на константно разстояние една от друга, с достатъчно високи изисквания към качеството при производството им. Релсите са с еднакво напречно сечение по дължината си, т.е. може да се приеме, че свойствата им не се изменят по дължината на пътя.

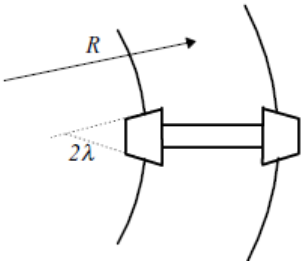


Фиг. 9. Тримерен модел на железен път. Релса върху траверси с баластово легло и еластична основа. Чрез използване на осовата симетрия се моделира едната половина на конструкцията на пътя

В практически план обаче, в конструкцията на железния път са налични множество нерегулярности. Земната основа подлежи на консолидационни процеси и е анизотропна среда. В нея се пораждат пластични деформации, които, макар и малки, се натрупват след определено време на циклично натоварване от преминаващите влакове. Това поражда нерегулярности в горното строене с дължина на вълната в порядък от няколко метра до стотици метри.

Друг повод за нерегулярности в конструкцията е наличието на непостоянни разстояния между траверсите. Това променя коравината на конструкцията по дължината ѝ. Променливото напречно сечение по дължината на релсите (например вследствие на износването) също индуцира трептения в системата с дължина на вълната от порядъка на 1 до няколко метра. Бандажите на колелата на возилата също не са с постоянен радиус – дори и в рамките на нормативно заложените допуски.

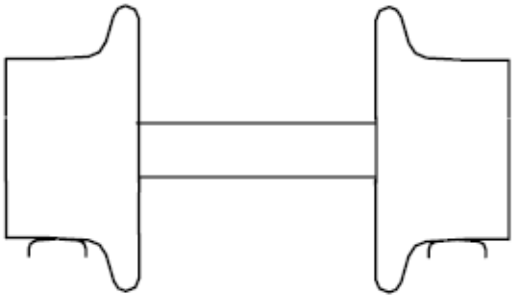
5. Особености в предаването на натоварването от колоосите



Фиг. 10. Ъгъл на коничност на бандажите в колооста

Контактът между колелото и релсата формира позицията и посоката на товара, който се предава върху пътя. Вследствие на естественото лъкатушене и нелинейните контактуващи помежду си повърхности в процеса на движението позицията и посоката на товара се изменят по време на движение. Теоретичният модел и спецификата на предаването на товара в контактната зона колело-релса е проблем, който за първи път се изучава от Heinrich Hertz през 80-те години на XIX-и век. В [12] са изложени основните параметри на проблема, като се набляга на коничността на бандажите на колелата, като основен фактор за предаването на товара. От ъгъла на коничност зависи дължината на вълната на лъкатушното движение, както и динамичната стабилност на всяка колоос, изразена в способността ѝ да се самоцентрира в хода на движението си при странични отмествания.

В действителност колелата не са с чисто конична форма. Към коничната повърхност е добавен реборд, който ограничава дерайлирането и води колооста в кривите.



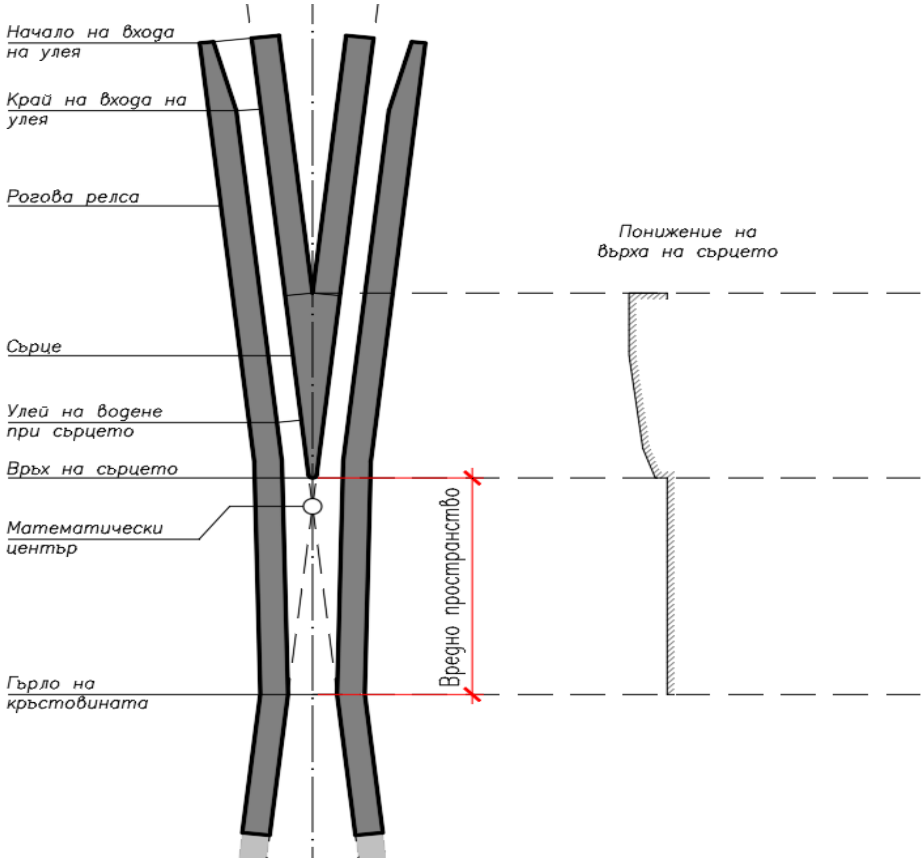
Фиг. 11. Действителен профил на колелата в колооста

С добавянето на реборд обаче, профилът на колооста спира да бъде с линейна форма и задачата за определяне на контактната зона колело-релса се усложнява значително. Релсата също е с нелинеен контур, както беше описано в т. 2.1. С цел опростяване на проблема се въвежда понятието **еквивалентна коничност**, което е ъгълът на коничност на линеен бандажен профил, който има същата дължина на лъкатушната вълна като разглеждания действителен **нелинеен** профил. Обзор на изчислителните процедури и методи за определянето на еквивалентната коничност е даден в [13].

В общия случай по-голям ъгъл на еквивалентна коничност води до по-малка дължина на вълната на лъкатушното движение – т.е. високочестотни вибрации. Това означава, че с увеличаването на скоростта на движение е необходимо да се постигне по-малка еквивалентна коничност [14]. Активна роля играе и наклонът на релсите. С накланянето на релсите към оста на пътя се намалява еквивалентната коничност. Ъгълът се нормира с тангенса си в диапазона от 1:20 до 1:40. В определени случаи е допустимо такъв наклон да не се изпълнява, но дължините на участъците от пътя без наклон на релсите към оста на коловоза се ограничава спрямо големината на проектната скорост на конкретното място [14]. Обичайно участъците от пътя без наклон на релсите са именно стрелките и кръстолинията, понякога и късите релсови парчета между тях в гърловините на гарите.

6. Някои специфични характеристики на стрелковите елементи

Железопътните стрелки са една особена нерегулярност в коравината на пътя по дължината му. В тях железният път губи симетрията си, т.е. езиковите релси и релсите в сърцето на стрелката са с различна коравина от тази на раменните релси, които до голяма степен запазват коравината си такава, каквато е в открития път. Тази разлика се проявява най-силно в зоната на кръстовината на стрелката. Широко разпространена практика е сърцата на стрелките да са от различен тип стомана с по-голяма твърдост [8] от обикновените релси. Прилагат се стомани с повишено съдържание на манган. Освен това се налагат блокови сърца, при които цялата кръстовина е един елемент заедно с роговите релси. При този вид сърца мястото на кръстовината е допълнително вкоравено от неколкократно по-голямата маса на елементите. Общ вид на сърцето на стрелка е даден на фиг. 12:



Фиг. 12. Основни елементи на кръстовината на стрелката

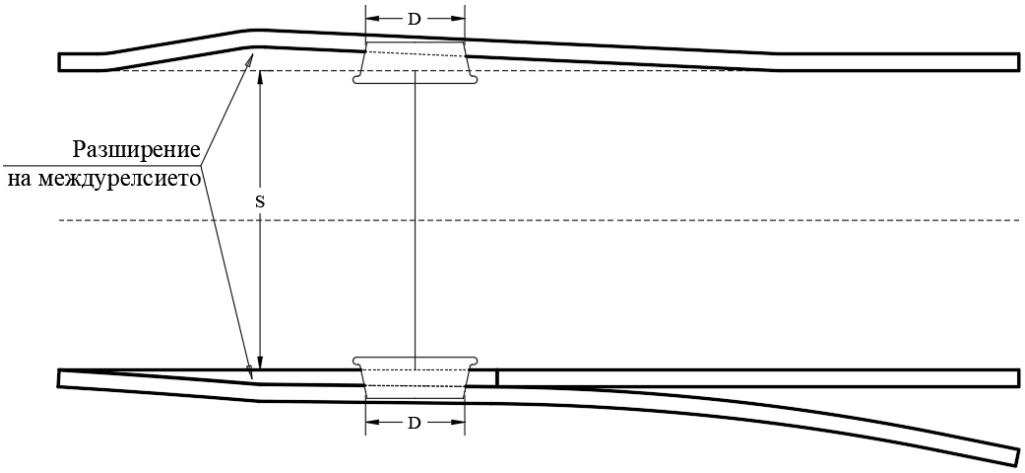
Друг момент на нерегулярност на железния път в зоната на стрелките е междурелсието. В откритията път междурелсието е константна величина в рамките на допуските на текущото поддържане за категорията на железопътната линия с изключение на кривите с радиуси, по-малки от 300 m. В стрелките се наблюдават 2 зони на нерегулярност на междурелсието – една при върховете на езиците и втора при вредното пространство на кръстовината.

При върховете на езиците основен проблем е прилепването на изтънения езиков профил към раменната релса и щаденето му от пряк контакт с преминаващите колооси. Налага се обработване на раменните релси – отнема се от напречното им сечение, отново чрез промяна на инерционните и масовите им характеристики. Производителите на стрелки и елементи за тях прилагат различни оптимизации на профилите на езиковите и на раменните релси. Тук се разглеждат два от най-разпространените методи.

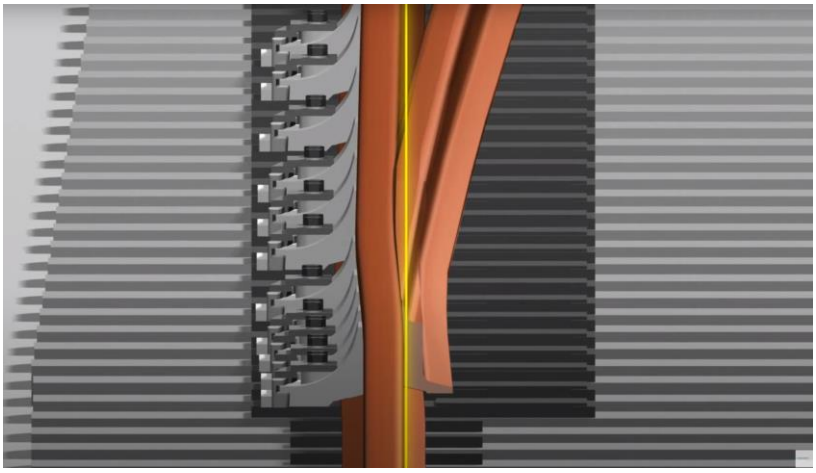
KGO (Kinematic Gauge Optimization) / (FAKOP – Fahrkinematisch optimierte Zungenvorrichtung) – Кинематична оптимизация на езиковото устройство [15]

В обикновената стрелка в мястото, където върхът на езика поема воденето на колооста от раменната релса контактната точка между колело и релса от вътрешната страна се измества заради центробежната сила. Това води до неблагоприятни ефекти от

външната страна, където ребордите започват да опират странично в релсата, водейки возилото в отклонение. Чрез разширяването на междурелсието от срещуположната на езика страна на всяко направление (вж. фигурата [15]) се постига по-мощно сечение на съответния език, както и оптимално водене на колооста.



Фиг. 13. Геометрична схема на кинематичната оптимизация

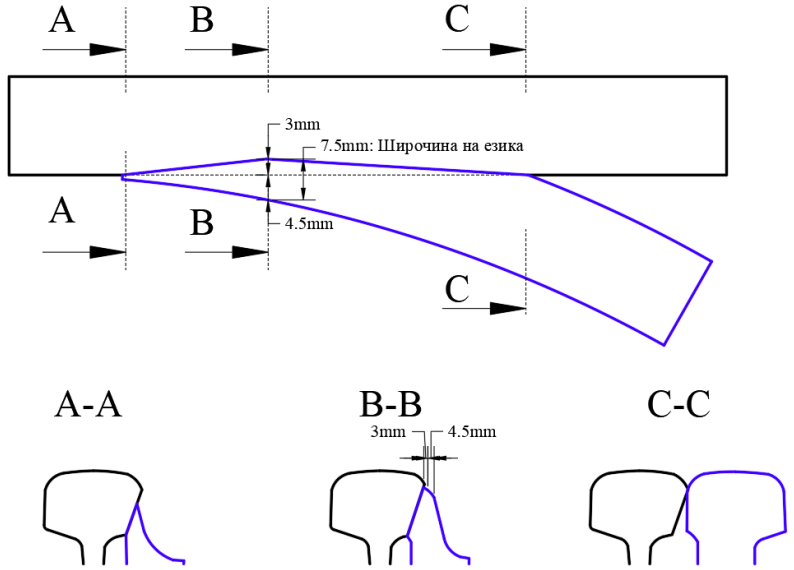


Фиг. 14. Положение на раменна релса спрямо линията на междурелсието [15]

Това решение доказано подобрява воденето на колоосите и комфорта на движение, както и намалява износването на върховете на езиците. Разширението на междурелсието обаче достига 15 mm в сечение 1 на схемата. Такова разширение често е отвъд допуските по междурелсие на железопътните администрации за прав железен път. Като недостатъци могат да се отбележат липсата на взаимозаменяемост между частите на стрелки със и без оптимизацията, както и голямото локално разширение на междурелсието в правото направление.

TOZ (Tragfähigkeitsoptimierten Zungenvorrichtung) – оптимизирано езиково устройство за товароносимост [15]

По-простата алтернатива на кинематичната оптимизация е т.нар. „TOZ“ система, която преодолява недостатъците на KGO.



Фиг. 15. Геометрична схема на оптимизацията „TOZ“

Фиг. 16. Визуализация на прилепване на езика при „TOZ“ [15]

Системата е широко разпространена, понеже не променя конструктивното оформяне на елементите от езиковата част на стрелката.

Отнема се от сечението на раменната релса така, че сечението на езика да се развие за по-малка дължина и в най-тънката си част езикът да се „прибере“ под главата на раменната релса.

Основно предимство е, че се запазва правото направление на правата раменна релса – отворите в траверсите за скрепленията в езиковата част на стрелката са на едни и същи места, а монтажът на обикновена стрелка се води от правата раменна релса. Основен недостатък е сложната форма на обработка на релсовия профил на раменната релса.

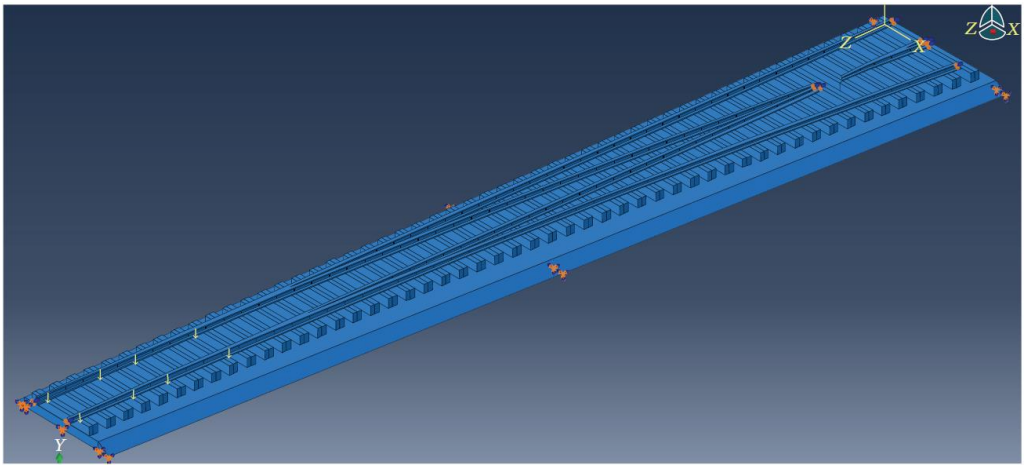
7. Заключение. Изводи

Гореописаните нерегулярности в зоната на стрелките променят изцяло характера на движение на возилото през една железопътна стрелка в сравнение с движението по открития път, независимо от това дали се преминава по правия, или по отклонителния коловоз на стрелката. За изследването на параметрите на движението на возилата през железопътни стрелки е необходимо то да се моделира.

В литературата [4, 5] се дават различни методи за моделиране на динамичното взаимодействие между железния път и возилата.

- Греда на непрекъсната еластична основа (по теорията на Винклер).
- Система на взаимодействие „премостване“ (подвижна маса върху просто подпряна греда).
- Непрекъсната греда с дискретизирано подпиране (със/без баластовото легло).
- Релси върху траверси в непрекъсната среда, включително модели по МКЕ.

Поради спецификата на разглеждания проблем, конкретната зона на действие и нерегулярността в конструкцията на горното строене в зоната на стрелките се предпочита пространственият модел с отчитане на действието на баластовата призма. Такъв примерен модел е даден на фиг. 17.



Фиг. 17. Общ вид на пространствен модел на стрелка [16]

Благодарности

Настоящата научноизследователска разработка по договор Д-138/2021 е подкрепена финансово от Центъра за научни изследвания и проектиране (ЦНИП) при УАСГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ivanov, G*. Gorno stroene i poddarzhane na zheleznia pat. Sofia, 1980.

2. Naredba № 55 ot 29 yanuari 2004 g. Za proektirane i stroitelstvo na zhelezopatni linii, zhelezopatni gari, zhelezopatni prelezi i drugi elementi ot zhelezopatnata infrastruktura.

3. *Todorov, S.* Proektirane i stroitelstvo na zhp linii. Sofia, 2006.

4. *Shabana, A., Zaazaa, K., Sugiyama, H.* Railroad vehicle dynamics. A computational approach. CRC PRESS, 2008.

5. *Iwnicki, S., Spiryagin, M., Cole, C., Mcsweeney, T.* Handbook of railway vehicle dynamics, second edition. CRC PRESS, 2019.

6. *Esveld, C.* Modern railway track. Edition 3.1, Delft, 2014.

7. TS-ZhI-001-2005 – Traversi stomanobetonni za normalni zhp linii – 1435 mm V91.

8. Tehnicheski uslovia za dostavka na zhelezopatni strelki i chasti za tyah ot relsi tip 49E1 (S49) i 60E1 (UIC60). Vtoro preraboteno i dopalneno izdanie, NKZhI, Sofia, 2010.

9. BDS EN 13450:2003/AC:2005 Troshen kamak za zhp linii.

10. Tehnicheski normi za ustroystvo, postroyavane i remont na beznastavov relsov pat. NKZhI, Sofia, 2018.

11. Instruktsia za ustroystvo i poddarzhane na zemnoto platno za zhp linii. NKZhI, Sofia, 2010.

12. *Wickens, A. H.* Fundamentals of rail vehicle dynamics. Swets & Zeitlinger, 2003.

13. *Lepoev, M., Zhekov, V.* Metodi za opredelyane, izmervane i monitoring na ekvivalentna konichnost. XI Konferentsia po transportna infrastruktura s mezhdunarodno uchastie, 11-13.11.2018 g., Nesebar.

14. Reglament (ES) № 1299/2014 na Komisiyata ot 18 noemvri 2014 godina otnosno Tehnicheskite spetsifikatsii za operativna savmestimost po otnoshenie na pod-sistemata „Infrastruktura“ na zhelezopatnata sistema v Evropeyskia sayuz.

15. Training turnout design switch devices, design and engineering, voestalpine VAE, Austria, 2011.

16. *Siew, J., Mirza, O., Kaewunruen, S.* Nonlinear finite element modelling of railway turnout system considering bearer/sleeper-ballast interaction. Hindawi publishing corporation, Journal of structures, volume 2015, article ID 598562, 11 pages, 2015.

A STUDY OF THE DYNAMIC PARAMETERS OF THE MOVEMENT OF RAILWAY VEHICLES WHEN PASSING THROUGH SWITCHES AND CROSSINGS

S. Todorov[1], M. Iliev[2]

Keywords: *railway track, rails, switches, turnouts*

ABSTRACT

The paper examines the behavior and interaction of the individual elements of the railway track under dynamic rolling stock loading. The elasticity of the track is considered elementwise as well as as a whole structure. The reasons for the occurrence of resonance in the elements when loading with a harmonic load are presented. Special attention is paid to railway switches being the most special and complex element of the superstructure of the railway track.

[1] Stoyo Todorov, Prof. Dr. Eng., Dept. "Railways", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: stoyo.todorov@gmail.com
[2] Matey Iliev, Eng. PhD student, Dept. "Railways", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: matey_iliev@outlook.com