



Получена: 07.07.2023 г.

Приета: 21.07.2023 г.

ОЦЕНКА НА КОМФОРТА НА ПЪТУВАНЕ ПРИ ДВИЖЕНИЕ ПО ЖЕЛЕЗОПЪТНАТА ИНФРАСТРУКТУРА

С. Тодоров¹, М. Илиев²

Ключови думи: динамика на возилата, стрелки, коловозни съединения, коловози, комфорт на пътуване

РЕЗЮМЕ

Текущото състояние на железния път, железопътните стрелки и коловозните съединения пряко влияят върху динамиката на движение на возилата и на комфорта на пътуване на пътниците. Националната нормативна уредба не третира комфорта на пътуване с железопътния транспорт като фактор от гледна точка на подсистема „Инфраструктура“. В настоящото изследване е направен преглед на най-разпространените алгоритми за оценка, като същите са приложени за конкретни участъци от Българската железопътна мрежа и са изведени стойности. Демонстрирана е пряката зависимост между различните видове неизправности и съответната рязка промяна на индекса на комфорт.

1. Въведение

В международната практика комфортът на пътуване намира все по-широко приложение и е обект на множество изследвания, особено в последните две десетилетия. Актуалността му се обуславя от необходимостта железопътните превозвачи и управителите на железопътна инфраструктура да предоставят качествена услуга на превозваните пътници, както и от необходимостта качеството на тази услуга да се контролира.

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

Изискванията към качеството на возене, плавността на хода и др. аналогични на индекса на комфорт параметри се поставят като изискване изключително към производителите на пътнически подвижен състав. Всички тези параметри се установяват по сравнително прав железен път с нормирани максимални стойности на неизправностите или с максимално допустим индекс на качеството на инфраструктурата. В настоящото изследване концепцията е реципрочна – използвана е част от методиката за оценка на комфорта по стандарта EN 12299 в светлината на неизправностите на железния път – проведени са измервания по различни опитни участъци с едно и също возило, като част от един и същи влаков състав. Демонстрирана е пряката зависимост между различните видове неизправности и съответната рязка промяна на индекса на комфорт.

Както в проучванията, така и в нормативните документи по темата се подчертава, че понятието „комфорт“ е само по себе си субективно и не подлежи на общовалидна количествена оценка. Всеки човек има различна толерантност към вибрации с определена амплитуда и честота. Всеки човек има близки, но де факто различни, собствени честоти на отделните органи (сърце, мозък, стомах и т.н.). Резонантните честоти на частите от човешкото тяло са както следва: очи 12 – 27 Hz, гърло 6 – 27 Hz, гръден кош 2 – 12 Hz, крайници 2 – 8 Hz, глава 8 – 27 Hz, стомах 4 – 12 Hz [1]. При по-значителни по амплитуда вибрации в честотния диапазон 4 – 10 Hz се наблюдават и болезнени усещания и дискомфорт вследствие на резонанса на системата гърди-стомах.

Освен от вибрацията, усещането за комфорт се влияе от акустичния шум във возилото, температурата и влажността на въздуха [2]. По тази причина изследванията и нормативните документи по темата не се стремят да изведат количествени показатели, които да са пряк измерител на комфорта от гледна точка на човешките възприятия, а показатели, които да са в пряка корелация с него. На базата на конкретни стойности на изведените показатели посредством статистически проучвания се извеждат интервали и ограничителни стойности, които съответстват на определени нива на комфорт.

За термина „комфорт на пътуване“, предвид спецификата на настоящото изследване, е формулирана следната дефиниция: **Усещането, породено у пътник, вследствие на динамичните параметри на движението (вибрации, ъглови ускорения, инерционни сили и др.), предадени от возилото към тялото на пътника по време на движение по железния път.**

2. Съществуващи методики и изследвания

а. Индекс на Шперлинг

Изследването на комфорта на пътуване започва през 40-те и 50-те години на миналия век. Шперлинг (Sperling, E.) провежда изследване за реагирането на човешкото тяло на редица честоти и предлага тегловна функция, която да филтрира спектъра на вибрациите, за да се оцени влиянието им върху пътниците. С тези изследвания се предлага първата изчислителна процедура за количествена оценка на комфорта [3, 4]. В сравнение с по-скорошните методики индексът на Шперлинг може да се изчисли доста по-лесно и с общодостъпен софтуер. Резултат от процедурата е т.нар. **индекс на Шперлинг**, за който е изведена следната корелация с човешките възприятия:

Таблица 1. Усещане за комфорт спрямо стойностите на индекса на Шперлинг

Индекс на Шперлинг	Качество на возене	Ниво на вибрациите
< 1,0	Много добро	Едва забележимо
1,0 ~ 2,0	Добро	Ясно забележимо
2,0 ~ 2,5		Ясно изразено, но не неприятно
2,5 ~ 3,0	Търпимо	Силно, но търпимо
3,0 ~ 3,5		Много силно, неприятно
3,4 ~ 4,0	Нетърпимо	Изключително силно, неприятно

Приемайки хипотезата, че честотният спектър е непрекъсната интегрируема функция в интервала от f_0 до f_1 , индексът на Шперлинг $W_{z,f}$ се определя от равенството:

$$W_{z,f} = 10 \sqrt{\int_{f_0}^{f_1} [a^3(f) B^3(f) df]}, \quad (1)$$

където a е амплитудата [m/s^2] на съответната честота f от спектъра, B е филтърът:

$$B(f) = k \sqrt{\frac{1,911f^2 + (0,25f^2)^2}{(1 - 0,277f^2)^2 + (1,563f - 0,0368f^3)^2}}, \quad (2)$$

където k е коефициент, който нормализира $B_{\max}(f)$ за хоризонтални ($k = 0,737$) и вертикални ($k = 0,588$) ускорения [5]. Алтернатива на израза (1) е филтрираните амплитуди да се интегрират по времето t , а не по честотата f . В този случай:

$$W_{z,t} = 10 \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_1} [a_B^3(t) dt]}, \quad (3)$$

където $a_B(t)$ е функцията на филтрирания чрез $B(f)$ сигнал, получена посредством обратната трансформация на Фурие; $T = t_1 - t_0$ е общото време, за което се търси $W_{z,t}$, t_0 и t_1 са началният и крайният момент на измерването, съответно. По-подходящо е да се търси $W_{z,t}$ като измерител на комфорта на пътуване, понеже W_z е величина, която се изменя във времето. $W_{z,f}$ от друга страна е по-практична величина от изчислителна гледна точка, понеже не се налага обратна трансформация на Фурие преди интегрирането.

Резултати от скорошно изследване (2019 [6]) показват, че при еднакви други условия $W_{z,f} > W_{z,t}$. Друга особеност на резултатите от същото изследване е, че индексът дава по-консистентни резултати при повдигане на 2-а степен, вместо на 3-а в изразите (1) и (3). Още повече – изследването доказва, че поради дискретния характер на измерванията и на техния честотен спектър изчислителният метод за определяне на W_z е консистентен при различни продължителности на измерване T и различни честоти на измерване f_s само, когато степенният показател е 2.

в. ISO 2631 „Вибрация и удар. Оценяване на излагането на вибрации на цялото човешко тяло“ [2, 7]

Част 1 от стандарта третира общите положения и дава методите за оценка на ефектите от вибрациите върху човека. Част 4 от стандарта третира спецификите при оценката на вибрациите специално за релсов транспорт.

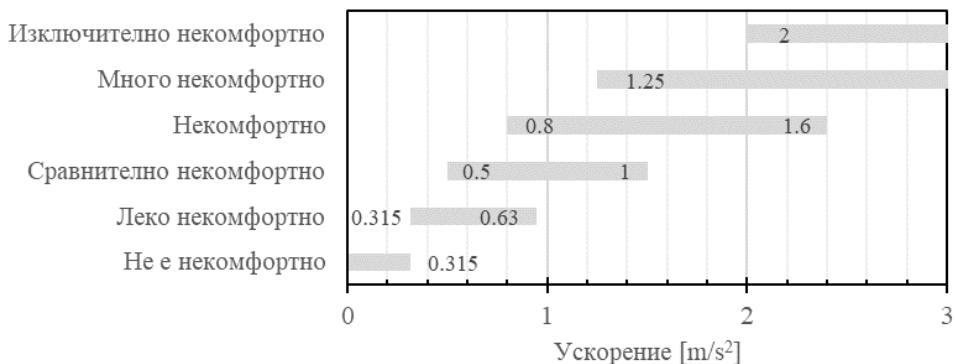
Базовата оценка се състои в определянето на честотно претегленото средноквадратично ускорение за дадения период от време. То се определя по подобен начин на индекса на Шперлинг $W_{z,t}$ както следва:

$$a_w = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt} . \quad (4)$$

Допустима е също оценка на честотно претеглено подвижно средноквадратично ускорение за даден подинтервал $t_0 - \tau$ към момента t_0 :

$$a_w(t_0) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} a_w^2(t) dt} . \quad (5)$$

Претеглянето се осъществява с трансферни функции, чиито филтри са изведени в табличен вид спрямо терцоктави. От основните филтри интерес представлява филтърът в част 1, означен с W_k . Аналогичен, но разработен специално за железопътно приложение филтър е даден в Част 4, означен с W_b . За окончателната оценка са дадени информативни интервали.



Фиг. 1. Диапазони за приблизителна оценка на a_w по ISO 2631-1

с. БДС EN 12299:2009 – Железопътна техника. Комфорт на пътуване за пътници. Измерване и оценка [8]

За разлика от по-общия характер на ISO 2631-1 в Европейския стандарт са разработени методи за оценка и измерване на комфорта на пътуване конкретно за железопътния транспорт. Дадени са препоръки и насоки за използването на разгледаните методи, както и за тяхната приложимост в различни условия. Освен това, в стандарта се разграничават с отделни методики интегралната оценка на средния комфорт на пътуване (*mean comfort*) и оценката за комфорт на пътуване като функция от времето (*continuous comfort*).

Средното ниво на комфорт в стандарта се определя посредством взаимовръзката между измерените във возилото ускорения и дадените от представителна група пътници оценки за нивото на комфорт във времеви интервали от по 5 минути.

Стандартен метод:

Индексът за средно ниво на комфорт се бележи N_{MV} и се изчислява до първия знак след запетаята:

$$N_{MV} = 6 \sqrt{\left(a_{XP95}^{W_d}\right)^2 + \left(a_{YP95}^{W_d}\right)^2 + \left(a_{ZP95}^{W_b}\right)^2}, \quad (6)$$

където a е ускорението в съответното координатно направление, горният индекс показва използваната филтърна крива, долният индекс P означава, че ускорението е получено от измерване на пода на возилото, 95 % фрактил. Този индекс се изчислява за целия набор данни в рамките на разглеждан 5-минутен интервал.

Пълен метод:

Дефиниран е индекс N_{VA} за седящи пътници и индекс N_{VD} за правостоящи.

$$N_{VD} = 3 \sqrt{16\left(a_{XP50}^{W_d}\right)^2 + 4\left(a_{YP50}^{W_d}\right)^2 + \left(a_{ZP50}^{W_b}\right)^2} + 5a_{YP95}^{W_d}, \quad (7)$$

$$N_{VA} = 4\left(a_{ZP95}^{W_b}\right) + 2\sqrt{\left(a_{YA95}^{W_d}\right)^2 + \left(a_{ZA95}^{W_b}\right)^2} + 4\left(a_{XD50}^{W_d}\right), \quad (8)$$

където долният индекс A означава, че измерването е от седалката, а D за измерване от облегалката. Видно е, че за пълния метод са необходими поне 3 инструмента, които да мерят по едно и също време във возилото. Необходими са и две различни статистически обработки за намиране на 95 %-ия и 50 %-ия фрактил на всяко ускорение съответно.

Стойността на получения индекс се разчита спрямо табл. 2.

Таблица 2. Интервали за индекса N_{MV}

N_{MV}		Ниво на комфорт:
\leq	$<$	
0	1,5	Много комфортно
1,5	2,5	Комфортно
2,5	3,5	Средно
3,5	4,5	Некомфортно
4,5		Много некомфортно

За индексите N_{VD} и N_{VA} не е дадена интерпретация на стойностите.

3. Коментар на съществуващите методи

Наблюдава се значително развитие в методиките за оценка на нивото на комфорт на пътуване. Докато при индекса на Шперлинг филтрирането на данните се осъществява

с една функция с различен нормализиращ коефициент k , при разработените стандарти се дават отделни филтърни криви, които са различни за различните направления и видове въздействия.

От друга страна, с отчитането на повече фактори и задълбочаването на анализите, нараства сложността на предлаганите алгоритми. Сложността нараства до степен, че за пълния метод за оценка в самия стандарт EN 12299 се коментира, че е изчислително трудоемък, и не се дават диапазони за оценка на получените индекси, макар и да се твърди, че последните по-добре корелират с човешкото усещане за комфорт.

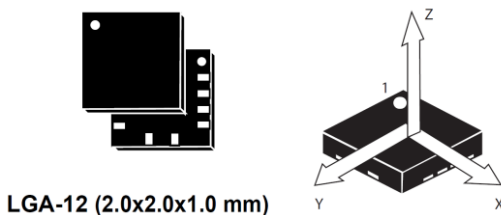
От изложените методики единствено ISO 2631 дава насоки за оценка на влиянието на времето за излагане на вибрациите, под хипотезата, че негативните ефекти са пропорционални на вибрационната енергия. Дефинирано е понятието „дневно излагане на вибрации“ (*daily vibration exposure*) като произведението между a_w и времето за излагане. От гледна точка на конвенционалния железопътен транспорт времепътуването се изменя в широки граници, като може както да е по-малко от 5 минути, така и да превиши 8 часа. Натрупването на умора вследствие на пътуването изостря сетивата и, следователно, увеличава усещането за дискомфорт от пътуването. Освен от ускорения и вибрационна енергия усещането за дискомфорт несъмнено зависи и от времепътуването. Предвид логаритмичния характер на човешките сетива, допустимите стойности на индекса на комфорт на пътуване следва да се редуцират с логаритмичен времеви декремент, аналогично за допустимите вибрационни дози в ISO-2631. Това е извън обхвата на настоящото изследване, но може да бъде обект на бъдещи изследвания – влиянието на времепътуването върху усещането за комфорт и върху индекса на комфорт на пътуване.

4. Полеви измервания. Оценка на комфорта

а. Използвана апаратура. Методика

Бяха направени измервания на участъци от железопътни линии по българската железопътна мрежа, като избраният метод за обработка на данните е стандартният метод на EN 12299. Изчислен е N_{MV} с база на статистическа обработка на измерванията на интервали от по 5 s.

Използваният сензор за измерванията е вграден триаксиален сензор за инерциални измервания, модел LIS2HH12 на STMicroelectronics [9]. Сензорът интегрира триаксиален акселерометър с триаксиален жирокоп. Бяха получени ускоренията в трите посоки $\ddot{x}(t)$, $\ddot{y}(t)$ и $\ddot{z}(t)$. Направленията на осите са дадени на фиг. 2.



Фиг. 2. Главни оси на сензора [9]

Акселерометърът е цифров, кондензаторен, MEMS. Поради статичния си принцип на действие освен ускорението на устройството се измерва и ускорението вследствие на гравитацията. Изходните данни са сума на двете ускорения. Максималната честота на изход на данни (*output data rate, ODR*) на сензора е 800 Hz. Поддържа обхват $\pm 2g$, $\pm 4g$ и $\pm 8g$. Типичната чувствителност на сензора S_{2g} при температура 25 °C е 2^{14} LSB/g – т.е. в диапазона от $-9,81 \text{ m/s}^2$ до $+9,81 \text{ m/s}^2$ отчетите са със стъпка $0,6 \text{ mm/s}^2$.

Честотата на снемане на отчети беше зададена на 200 Hz. Това означава, че с този тип измервания могат да се анализират данни в честотния диапазон от 0 до 100 Hz, което е задоволително – диапазонът съвпада със зоната на интерес на настоящото изследване от 0,4 до 80 Hz.

За локализиране на моменти, които биха представлявали интерес (например моменти с рязко влошаване на комфорта) паралелно с измерването на ускоренията се записаха и данни за текущата локация на смартфон. Синхронизацията на различните измервания се осъществи чрез записване на процесорното време на смартфона по време на измерването.

За обработка на данните беше използван софтуерният продукт MATLAB 2019b с лиценз за образователни цели № 729750, закупен от УАСГ – София. Измерванията бяха извършени на 25.01.2023 и 26.01.2023 на бърз влак № 3637 София – Варна. Вагонът, в който бяха извършени измерванията, е с номер 51 52 1940 161-6.



Фиг. 3. Общ вид на вагон 51 52 1940 161-6

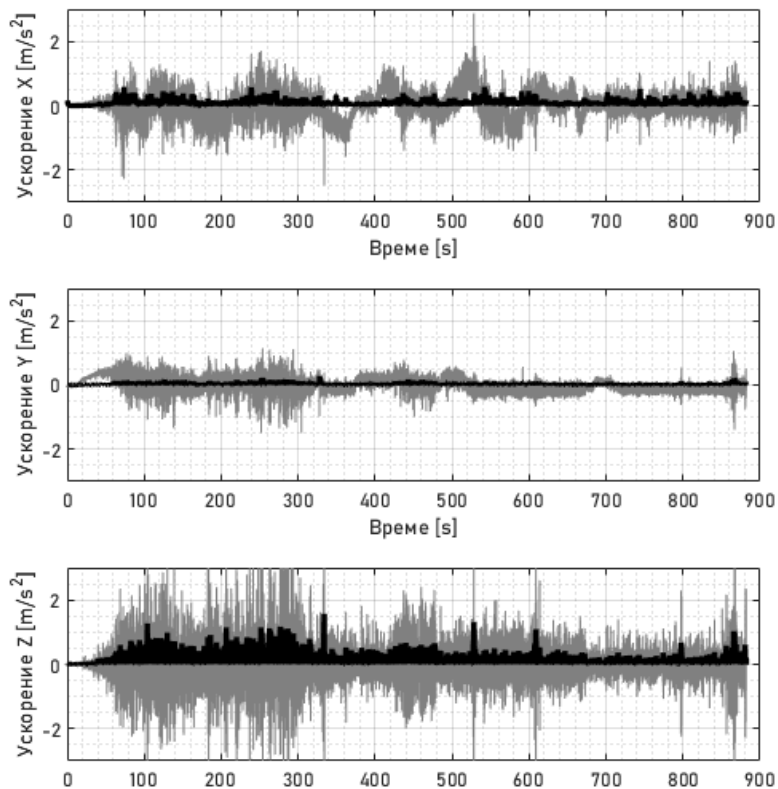
В рамките на пътуването с вагона бяха избрани два участъка за измерване със сходни дължини ($\sim 17 \text{ km}$) и времеопътувания ($\sim 13 - 14 \text{ min}$):

Участъкът **Лозарево – Подвис – Прилеп – Ведрово** беше избран заради разнообразния характер на трасето – много на брой и дълги хоризонтални криви, контракриви, извършвани подновявания на горното и долното строене в различни години. Скоростта на движение варира между 80 km/h и 100 km/h , а междугарието Лозарево – Подвис е и с наставов железен път. В този участък се очакват влошени параметри на комфорта на пътуване.

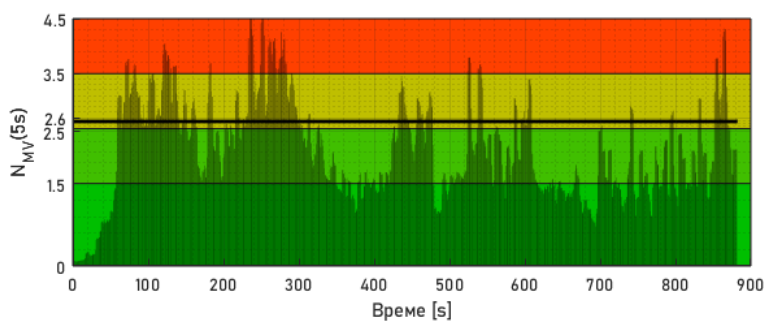
Участъкът **Казичене – Столник** беше избран заради хомогения си характер от гледна точка на геометрия на трасето и скорости на движение. Скоростта на движение е 100 km/h , а железният път в голямата си част е безнаставов. По този участък се очакват по-добри параметри на комфорта на пътуване.

в. Обработка на резултатите

Лозарево – Ведрово



Фиг. 4. Измерени (в сиво) и честотно-претеглени (в черно) ускорения



Фиг. 5. Индекс на комфорт N_{MV}^{5s}

За цялото измерване 95 % фрактили на ускоренията са:

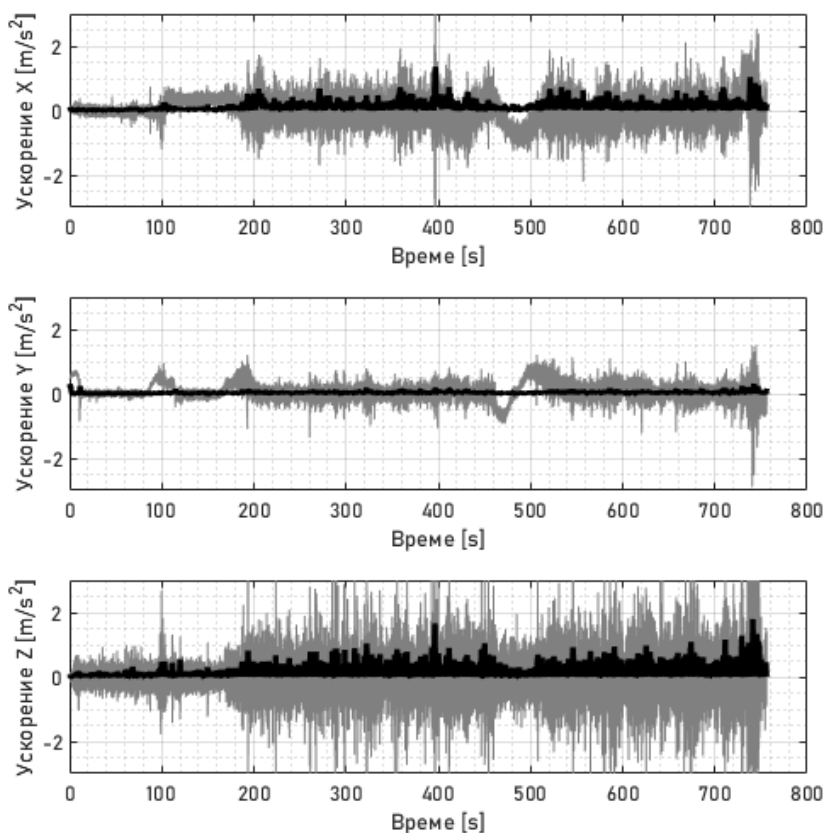
$$a_{XP95}^W = 0,27 \text{ m/s}^2; a_{YP95}^W = 0,09 \text{ m/s}^2; a_{ZP95}^W = 0,33 \text{ m/s}^2.$$

Това са стойностите, които не се превишават в 95 % от данните. Следователно за средното ниво на комфорт за цялото пътуване:

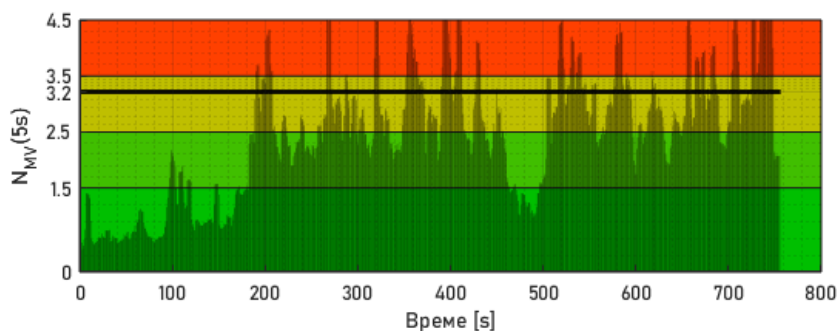
$$N_{MV} = 6\sqrt{0,27^2 + 0,09^2 + 0,33^2} = 2,6. \quad (9)$$

Полученото средно ниво на комфорт е показано с плътна черна линия на горната фигура.

Казичене – Столник



Фиг. 6. Измерени (в сиво) и честотно-претеглени (в черно) ускорения



Фиг. 7. Индекс на комфорт N_{MV}^{5s}

За цялото измерване 95 % фрактили на ускоренията са:

$a_{XP95}^{W_d} = 0,40 \text{ m/s}^2$; $a_{YP95}^{W_d} = 0,09 \text{ m/s}^2$; $a_{ZP95}^{W_b} = 0,35 \text{ m/s}^2$. Това са стойностите, които не се превишават от 95 % от данните. Следователно за средното ниво на комфорт за цялото пътуване:

$$N_{MV} = 6 \sqrt{0,40^2 + 0,09^2 + 0,35^2} = 3,2. \quad (10)$$

Полученото средно ниво на комфорт е показано с плътна черна линия на горната фигура.

5. Съпоставка на резултатите

Интерес представлява моментът, че трасето с повече хоризонтални криви и с по-малки радиуси Лозарево – Ведрово дава по-добър индекс на комфорт на пътуването, отколкото по-правия и хомогенен откъм трасе участък Казичене – Столник. За Лозарево – Ведрово $N_{MV} = 2,6$, а за Казичене – Столник $N_{MV} = 3,2$. Резултатите опровергаха очакванията за стойности на индекса на комфорт на пътуване.

По по-скорошно подновените участъци Подвис – Прилеп и Прилеп – Ведрово пътуването е комфортно, видно от фиг. 5. Интерес представлява достигането на стойности $N_{MV} = 3,5 - 4,5$ непосредствено преди сп. Ведрово предвид факта, че участъкът беше реконструиран скоро – през 2020 г. Възможна причина е повторното активизиране на слабо място в земната основа в тази зона, което беше констатирано и заздравено по време на ремонта.

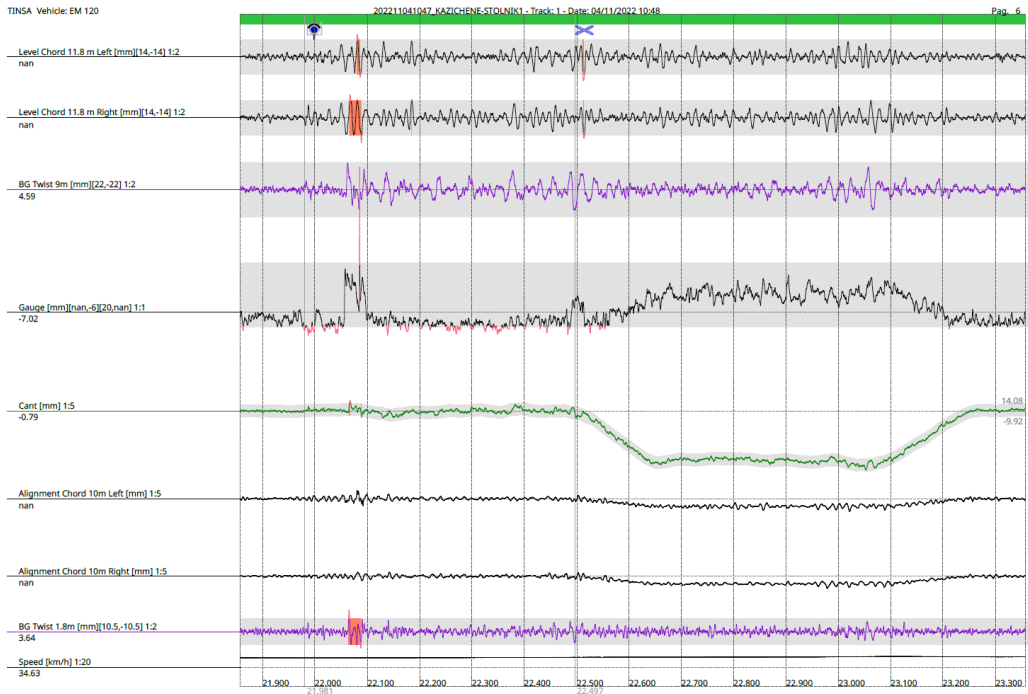
При Казичене – Столник са идентифицирани по-голям брой единични влошавания на комфорта, които са и с по-големи стойности. Участъците с влошаване на комфорта на пътуване успешно са локализирани и са:

- прелез при km 20+020, път за с. Равно поле;
- четна и нечетна гърловина на гара Мусачево, по-специално стрелка 1:9-300 на km ~22+200, отклонение за гара Яна;
- прелез при km 22+500, път Ш-6602 за гр. Елин Пелин;
- прелез при km 30+700, път Ш-105 за с. Столник;
- четна гърловина гара Столник.

Индексът на комфорт на пътуване N_{MV}^{5s} е показател, който зависи както от характеристиките на возилото, така и от качеството на инфраструктурата. От гореизложеното може да се заключи, че рязкото изменение на индекса по трасето е в пряка връзка с качеството на инфраструктурата. Зависимостта на показателя индекс на комфорт на пътуването от състоянието на железния път може да бъде потвърдена от скорошните измервания с пътеизмерителна лаборатория, които констатират единични неизправности на идентични места, на които N_{MV} е с рязко повишена стойност, и на които беше обърнато внимание по-горе. Измерванията бяха предоставени на авторите от ДП „НКЖИ“ след писмена молба, с писмо изх. № ЖИ-7211/15.02.23.

Резултатите от измерванията с пътеизмерителна лаборатория се представят във вид на графична разпечатка на стойностите на параметрите по дължината на жп линията,

както и таблично. На долната фигура е показан общият вид на графичната разпечатка за участъка Казичене – Столник. С червено са участъците с единични неизправности – места, където едно или повече от отклоненията е недопустимо голямо.



Фиг. 8. Графика на параметрите на железния път от 21+900 до 23+300 в участък Кз-Стк (с разрешение от ДП „НКЖИ“)

Графичните разпечатки бяха анализирани и сравнени с резултатите от настоящото изследване.

Последните измервания с пътеизмерителна лаборатория в участъка Казичене – Столник са проведени на 04.11.2022 г. В лентата от измерването се констатира следните неизправности:

- при прелез 20+020 – отклонения по ниво на база 11,8 m вляво;
- при стрелка ~22+200 – отклонения по ниво на база 11,8 m вляво и вдясно, както и шахматно пропадане на база 1,8 m;
- при прелез 22+500 – отклонения по ниво на база 11,8 m вляво и вдясно след прелеза;
- при прелез 30+700 – отклонения по ниво на база 11,8 m вляво и вдясно преди прелеза;
- при стрелка № 2 гара Столник – шахматно пропадане на база 9 m след стрелката, отклонения по ос;
- няколко участъка с недопустими отклонения по междурелсие. При излизането от първата хоризонтална крива се наблюдава отклонение до -8 mm; между 22+200 и 22+500 отклонение до -8 mm; между 24+250 и

24+450 единични стойности над +20 mm; в гара Столник след стрелките в четната гърловина -9 mm.

Последните измервания с пътеизмерителна лаборатория в участъка Лозарево – Ведрово са направени на 28.11.2022 г. В лентата от измерването се констатира следните неизправности:

- участъци в поредицата хоризонтални криви след гара Лозарево в посока Подвис с недопустимо голямо разширение на междурелсието – +28 mm, +30 mm, +34 mm;
- отклонения по ниво на база 11,8 m последователно в лява и дясна релсова нишка в последната хоризонтална крива преди сп. Ведрово.

Видно е, че същите локации бяха идентифицирани и от измерванията в рамките на настоящото изследване.

6. Заключение. Изводи

От гореизложеното може да се заключи, че оценката на комфорта на пътуването може да даде ценна информация за наличието на неизправности по железопътната инфраструктура, които влияят конкретно на динамиката на движението. Такива неизправности са отклоненията по ниво и шахматните пропадания, които индуцират вибрации в напречната равнина на трасето. Големите отклонения в междурелсието (в положителна посока), видно от измерването Лозарево – Ведрово, също могат да влошат комфорта на пътуване.

Методиката за определянето на индекса на комфорт има следните предимства:

- Необходимата апаратура е общодостъпна. Необходими са акселерометрични датчици и GNSS-приемници, както и обща процесорна единица за обработка и времева синхронизация на потоците от данни. Също – крепежни елементи за закрепване на инструментите в набелязаните точки, подходящ софтуер за запис на данните.
- Не е изчислително трудоемка. За целите на настоящото изследване бяха написани малко над 500 реда код в програмната среда на Matlab, в общо 7 *.m-файла. В този обем код се вмества цялата изложена тук изчислителна процедура, както и визуализацията.
- Успешно се локализиращат неизправности по инфраструктурата, които влияят на комфорта на пътуването.

Недостатък, който може да се посочи:

- Стойностите в резултатите пряко зависят от модела и състоянието на вагона, в който се провеждат измерванията. Съпоставимост между отделни участъци от железния път се постига единствено, ако се измерва в един и същи вагон.

Благодарности

Настоящата научноизследователска разработка по договор Д-138/21-22 е подкрепена финансово от Центъра за научни изследвания и проектиране (ЦНИП) при УАСГ.

Авторите изразяват благодарност на ръководството ДП „НКЖИ“ за оказаното съдействие и предоставените материали.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Angelov, I., Ovcharov, V.* Vibratsii i shum v transportnite sredstva. Sofiya, 1985, 271.
2. ISO 2631-4:2001 – Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 4: Guidelines for the evaluation of the effects of vibration and rotational motion on passenger and crew comfort in fixed-guideway transport systems, 14.
3. *Sperling, E.* Verfahren zur Beurteilung der des Laufeigenschaften von Eisenbahnwesen. Organ Fortschritte des Eisenbahnwesens. 1941, 12, 176 – 187.
4. *Sperling, E., Betzhold, C.* Beitrag zur Beurteilung des Fahrkomforts in Schienenfahrzeugen. // Glasers Annalen. 1956, 80, 314 – 320.
5. *Vaiciunas, G., Steisunas, S.* Sperling’s comfort index study in a passenger car with independently rotating wheels. // Transport problems, Vol. 16, issue 2, 2021, 10.
6. *Deng, C. et al.* Analysis of the consistency of the Sperling index for rail vehicles based on different algorithms. Vehicle System Dynamics, 2019, 15.
7. ISO 2631-1:1997 – Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements, 31.
8. prBDS EN 12299:2023 – Zhelezopatna tehnika. Komfort na patuvane za patnitsi. Izmervane i otsenka, 85.
9. LIS2HH12. MEMS digital output motion sensor: ultra-low-power high-performance 3-axis “pico” accelerometer. STMicroelectronics, 12.2015, 47.

ASSESSMENT OF TRAVEL COMFORT WHEN DRIVING ON THE RAILWAY INFRASTRUCTURE

S. Todorov¹, M. Iliev²

Keywords: vehicle dynamics, switches, crossings, railway track, ride comfort

ABSTRACT

The current state of the railway track, switches and crossings directly affects the dynamics of vehicle movement and passenger ride comfort. The national regulatory framework does not treat ride comfort as a factor from the perspective of the “Infrastructure” subsystem. In the present study, an overview of the most common evaluation algorithms is made, the same are applied to specific sections of the Bulgarian railway network, and values are derived. A direct relationship is demonstrated between various types of track quality faults and the corresponding abrupt change in the comfort index.

¹ Stoyo Todorov, Prof. Dr. Eng., Dept. “Railways”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: stoyo.todorov@gmail.com

² Matey Iliev, Eng. PhD student, Dept. “Railways”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: matey_iliev@outlook.com