

МЕТОД ЗА ОТКРИВАНЕ НА МЕСТА С НЕИЗПРАВНОСТИ ПО ЖЕЛЕЗНИЯ ПЪТ

METHOD FOR DETECTING FAULTS ON RAILWAY TRACK

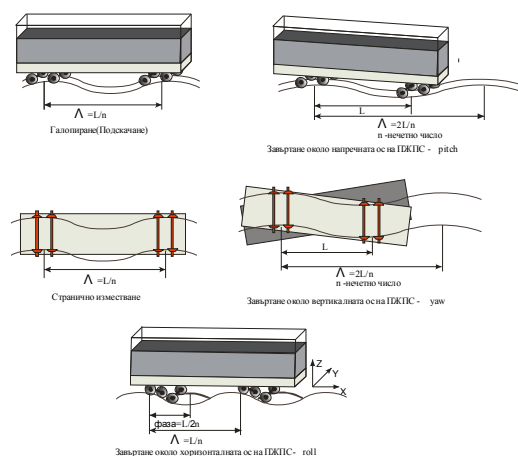
Гл. ас. Йончев Ем. Ив.¹, доц. д-р Милетиев Р. М.², гл. ас. д-р Симеонов Ив.³
Висше транспортно училище „Т. Каблешков“, Технически университет – София

Abstract: The evaluation and measurement of the railway crosslevel, horizontal and vertical alignment, and the control of the railway standards are the main tasks of the rail administration for the maintenance, control and safety. Nowadays these procedures are accomplished by track recording coach. Due to the high cost of these recording vehicles, the measurements are accomplished only for a short railway section and long periods of time which is a precondition for the sufficient railway alterations. The low price of the GPS receivers and MEMS inertial sensors allows designing measurement modules, which could be installed directly on the railway vehicles of the regular use. These modules are capable of measurement, recording and transferring of the railway dynamic reaction. Received data are collected and processed by appropriate algorithms to obtain the evaluation of the current railway track condition.

Keywords: RAILWAY TRACK, TRANSFER FUNCTION WHEEL-RAIL, GPS RECEIVER, MEMS INERTIAL SENSORS

1. Увод

Железният път е проектиран да взаимодейства с подвижния железопътен състав (ПЖПС) и да осигурява постоянен път за неговото движение. Безопасно и комфортно движение се определя от динамичното взаимодействие между ПЖПС и пътя. Отклоненията от първоначалното проектно положение на пътя нарастват, тъй като състоянието му се влошава с неговото използване. Неизправностите в геометрията на пътя могат да бъдат периодични, аperiодични или случайни[1]. На фигура 1 са показани различните режими на колебания на коша на ПЖПС от неравности в пътя.



Фиг.1. Колебания на коша на ПЖПС, от неравностите по пътя.

Съвместно с неравностите по колелата на ПЖПС, неизправностите довеждат до възбуждане на трептене на влака и пътя, и предизвикване на сили действащи на контакта колело-релса с висока честота. Ако силите имат хармоничен характер с честота близка до собствената на ПЖПС, довеждат до циклични деформации в пътя на някакво разстояние след мястото с неизправност. Големи динамични сили се получават не само от синусоидални неравности, а и от пространствени комбинации на показаните неравности.

Реакцията на ПЖПС на неизправностите на пътя е индивидуална и не всякога е пропорционална на големината им. Тя зависи от индивидуалните характеристики на возилото, от дължината на неравностите и скоростта, с която се преминават. Има реализирани математични модели, с които се определя вертикалната сила на взаимодействието

колело-релса, при преминаване през неравност и методи за нейното ограничаване [2], [3].

2. Методи за измерване на железният път

Измерване и оценяване на надвишението на железният път, неговото хоризонтално, и вертикално подравняване, както и тяхното привеждане в необходимите норми, са основните задачи на администрациите за контрол, и безопасност, и подържането на пътя. В зависимост от това дали процеса на измерване и привеждане на пътя в необходимите норми се извършва едновременно се различават:

- Системи с едновременно измерване и отстраняване на отклоненията. Представители на този вид са системите Palas, GeoROG [4].

- Системи, при които предварително се измерва пътя и след това се отстраняват отклоненията, GNBAHN [5], EM-SAT[6], EM-SAT-GPS, Swiss Trolley[7]

При системите от вторият вид измерването може да се извърши по три начина:

- посредством ръчно придвижвани пътеизмервателни вагонетки
- специализирани пътеизмервателни мотриси
- специализирани измервателни системи монтирани на ПЖПС

Първият начин се използва за измерване на сравнително къси участъци. В зависимост от измерваните параметри на пътя и използвания принцип на работа са разработени различни конструкции. Вторият начин е с пътеизмервателни мотриси [8], [1], посредством, които геометрията на пътя периодично се оценява директно от направените измервания съгласно европейския стандарт EN 13848-5[9]. Класификацията на железния път на базата на направени измервания се извършва на базата на алгоритми описани в [10]. Приетите нормативни параметри за оценка на железния път у нас, с пътеизмервателна мотриса са дадени в [11]. Геометричната оценка на пътя на базата на горният стандарт има много слаба корелация между количествените оценки и предизвиканите сили от пътя в ПЖПС. Това е стимулирало създаването на третия начин, при който се използват различни измервателни конфигурации за измерването на определени параметри характеризиращи динамичната реакция на ПЖПС, които се обработват с подходящи алгоритми за получаване на оценка за текущото състояние на пътя. При тези методи, сензорите се монтират на ПЖПС, който е в ежедневна експлоатация и се движи по установения график. По този начин не се изисква

движението да бъде спирано за да се направят измерванията. С многократно преминаване по дадено направление се съберат данни, които се обработват с методи от статистиката за получаване на оценка за текущото състояние на пътя. Те се разделят на:

- директни
- индиректни

При първите повърхностите на релсите и на колелата се сканират директно и независимо едно от друго. Те имат ограничена точност в определянето на общата неравност, дължаща се на несигурността на филтровия ефект в контакта между колело-релса. При вторият метод се оценява общата неравност на колело-релса. За оценяване на неизправностите, когато е използван индиректният метод за измерване може да се използват два метода за обработка на данните. При първият се прилагат алгоритми за обработка на получения сигнал, така че да се установи превишаване на зададени норми [12], [13], [14]. Недостатък на този начин, е че причината за тези по-големи стойности не може точно да се посочи дали е вследствие на повреда на окачването или неравности по пътя. При вторият метод освен, че се правят измервания и обработки на сигнала, имаме разработен математичен модел на окачването на возилото и на тази база се следи неговото състояние [15]. Получените данни се вземат предвид при крайната оценка. По този начин сме сигурни, че причината за по-големите стойности е състоянието на пътя.

3. Параметри характеризирани динамичната реакция на ПЖПС

Първият параметър е шума излъчван от возилото в околното пространство. Неговото измерване посредством микрофон е често използван метод при определяне на вълнообразните износвания в релсите [16], [17]. В Европейският стандарт EN3095 [18] са описани допустимите нива на шума предизвикани от неравностите в пътя, в зависимост от тяхната дължина и скорост на движение на возилото.

Вторият параметър са динамични сили действащи на колоосите на ПЖПС. В [19] се доказва, че размера на предизвиканите динамични сили във возилото имат силна корелация с неизправностите в пътя. Те се определят

приблизително с израза (1) $F \approx \frac{zV^2}{\lambda^2}$ [20], където z е

амплитудата на неравността, V е скоростта на движение и λ е дължината на неравността. За тяхното измерване се използват тензорезистори залепени върху колелата [21], [22], [23] или сензори за преместване и тензорезистори залепени на релсите [24]. Изчисляването им е описано в европейският стандарт EN 14363 [25]. Тяхната големина се използва като критерий за оценка на безопасността на движение по пътя и неговата товароносимост. Този метод, не е приложим за превантивна поддръжка, понеже е с висока стойност и изисква сложна измервателна система.

Третият параметър са вертикалните и страничните ускорения, и ъгловата скорост на завъртане на ПЖПС. Получените стойности на ускоренията се използват, като индекс за контролиране на неизправностите на пътя. Измерването на ускоренията се прави с акселерометри, като те се монтират на ПЖПС или върху релсите [26], [27], [24]. Тази възможност за измерване на неравностите на големи разстояния, използвайки вертикалното ускорение на буксовия възел, като индиректен метод е предложено от няколко железопътни администрации, като Vanverket в Швеция, British Network Rail в Англия и ProRail в Холандия [28]. Методът измерва комбинираната неравност на релсата и колелото като използва свободни колооси. Ако колелата са

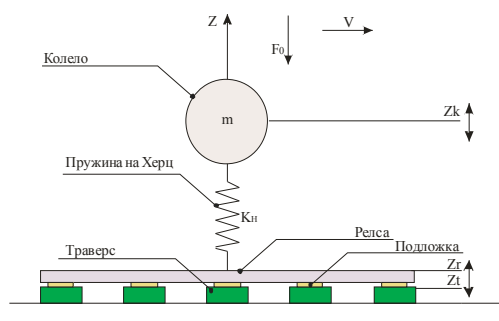
сравнително гладки, неравностите на релсите могат да бъдат оценени. В някои системи [15], [29] освен вертикално ускорение се измерва и странично ускорение и крен ъгъла (roll) на возилото с помощта на жирокоп, като по този начин се различават ускоренията предизвикани от нивото на пътя. В [14] е представена система (ARMS), която следи ефективната и пикова стойност на измерените ускорения дали превишават предписаните норми от [13].

4. Метод за оценка на участък от железният път

4.1. Предавателна функция

Профила на пътя може да се опише с предавателна функция, с която се изразява връзката между геометричните параметри на пътя и динамичната реакция на ПЖПС в честотната област. Пример за използването ѝ за преминаване от измерено ускорение към ниво на неравности е показан в [28]. Тези функции са калибрирани посредством сравняване на спектъра на измерените ускорения и спектъра на измерените неравности, при различни скорости на движение. В Европейските стандарти за окачествяване на пътя се задават граници, които обикновено са функции на дължината на неравността. Пример за такъв стандарт е EN 13231-3 за контрол на релсите след шлайфане.

Динамичната реакция на буксовия възел е квази-статична и е предизвикана от неравностите на железният път разпределени по неговата дължина, и скоростта на движение на ПЖПС. На фигура 2 е представен модел на взаимодействието колело-релса, където Z_k е преместването на буксовия възел, Z_r са неравностите в релсата, Z_t е преместване на пътя.



Фиг.2. Модел на взаимодействие колело-релса.

Динамичната компонента на контакта колело-релса е равна на инерционата сила предизвикана от масата m и коефициента на еластичност, на връзката колело-релса. Силите се предават посредством контактната площ между колелото и релсата. Връзката между тях е представена от контактната пружина на Херц, която има нелинеен коефициент на еластичност C_H зависещ от радиуса на колелото и характеристиките на материала на колелото и релсата, и е с размерност $[Nm^{-3/2}]$. Силата се определя с

израза: (2) $F = C_H z^{\frac{3}{2}}$ В повечето случаи линеаризирана

контактна пружина може адекватно да представи връзката колело-релса. Това опростява модела на взаимодействие. В този случай коефициента на еластичност се определя с

израза: (3) $k_H = \frac{3}{2} C_H \sqrt{\Delta z_0}$, където Δz_0 е

препокриването на колело-релса при статично натоварване

F_0 . Този коефициент може да се линеаризира и като се

използва израза (4) $k_H = \frac{3}{2} c_H^{\frac{2}{3}} F^{\frac{1}{3}}$ предложен в [30]:

При използване на модела с една степен на свобода, представен на фигура 2, динамичната сила се определя с

$$(5) m \frac{d^2 z_k}{dt^2} = k_H z_r + k_H z_t - k_H z_k$$

При предположение, че пътя не се премества $z_t = 0$,

$$(6) m \frac{d^2 z_k}{dt^2} = k_H z_r - k_H z_k$$

Ако се вземе предвид собствената честота на трептене на

системата, която се определя с израза (7) $w_0 = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{k_H}{m}}$,

горният израз може да се презапише в следният вид

$$(8) \frac{d^2 z_k}{dt^2} + w_0^2 z_k = w_0^2 z_r$$

След извършване на преобразуване на Лаплас на израза, се получава предавателната функция:

$$(9) (p^2 + w_0^2) Z_k(p) = w_0^2 Z_r(p), \text{ или}$$

$$(10) W(p) = \frac{Z_k(p)}{Z_r(p)} = \frac{w_0^2}{p^2 + w_0^2}$$

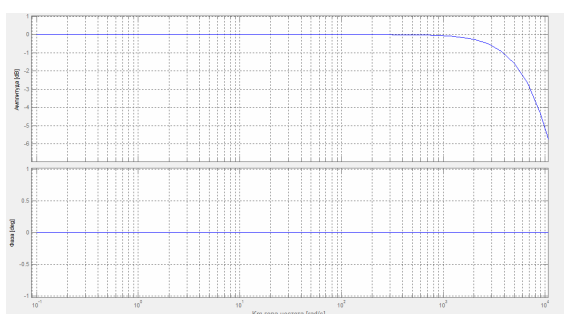
От (10) след полагане се получава и преобразуването на Фурие на разгледаната

$$(11) W(\omega) = \frac{w_0^2}{w_0^2 - \omega^2}$$

където ω е кръгова честота. Този израз ни дава връзката между трансформацията на Фурие на ускорението на буксовия възел $S_k(\omega)$ и трансформацията на Фурие на неравностите на пътя $S_r(\omega)$. Примерна стойност на w_0 за колело с маса

$$506 \text{ kg и } k_H = 1,6 \cdot 10^9 \text{ е } f_0 = \sqrt{\frac{1,6 \cdot 10^9}{506}} = 1778 \text{ Hz или}$$

$w_0 = 11165,84 \text{ rad/s}$. Графики на амплитудно-честотната и фазо-честотната функции на взаимодействието колело-релса, са представени на фигура 3.



Фиг.3. Амплитудно честотна и фазо честотна характеристика

Коефициента на предаване е със стойност 0 dB за много широк честотен обхват. Фазовата характеристика е 0 [rad/s] за целия честотен обхват. Това показва, че ако намерим спектралната плътност на ускорението в буксовия възел, чрез предавателната функция ще получим и спектралната

плътност на неравностите на пътя (12) $S_r(\omega) = \frac{S_k(\omega)}{W(\omega)}$.

Тези спектрални плътности са идентични за широк честотен диапазон. Така също от получената спектрална плътност на ускорението и предавателната функция може да се получи дисперсията на неравностите на пътя с израза

$$(13) \sigma^2 = \int_0^{\infty} |W(\omega)|^2 S_k(\omega) d\omega$$

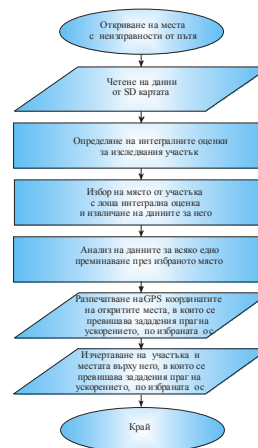
4.2. Измервателна система

Измервателното устройство представлява самостоятелен модул, който получава захранване от електрическата система на ПЖПС. Неговата вътрешна архитектура е разгледана в [31]. За нормална му работа трябва да се свърже и GPS антена, монтирана на открито място за по-добра видимост на спътниците. На всеки тактов сигнал от GPS приемника се записват данните от триосният акселерометър, жирокоп и географските координати на мястото, където се намира транспортното средство. В зависимост от големината на използваната SD карта се определя и колко е възможната продължителност на записа. При обем на картата от 1GB, върху нея може да се записват данни в продължение на 22 дни, без прекъсване. Това предполага и многократно преминаване на ПЖПС по едно и също направление. Устройството се монтира върху буксовия възел на ПЖПС, като се вземат мерки контакта помежду им да е стабилен и да липсват междинни елементи, които биха променили вида на предавателната функция. Само по този начин може да сме сигурни, че предизвиканите ускорения са вследствие на динамиката на ПЖПС, а не от преместване на устройството спрямо буксовия възел.

4.3. Алгоритъм за обработка на данните

След достигане на желан от нас брой преминавания по определено направление, записаните данни в SD картата се прочитат и се подлагат на обработка за получаване на интересувашата ни информация. Цялостно процеса на откриване на местата с неизправности е показан с блоковата схема на фигура 4.

С прочитането на данните се извършва преобразуване на получените числови кодове за всяка една от величините, в съответстваща физична величина и образуване на отделни вектори с тях. С изчислението на интегралната оценка на всеки един участък, с дължина избрана от нас, се цели да се получи разпределение на енергията на отделните ускорения по изследваното направление. Участъците с най-голяма стойност на енергията се визуализират върху изследваното направление.

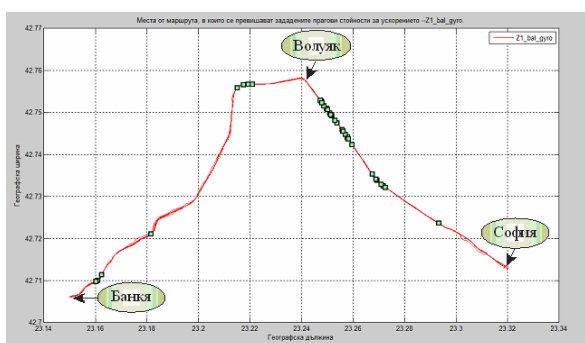


Фиг.4. Блокова схема на алгоритъма за обработка на получените данни

На избран такъв участък се прави последващ задълбочен анализ за откриване местата с неизправности и получаване на стойности на отделните величини във времевата и честотна области. На локализираните места, в които се превишава изчисления праг, се извличат географските координати и се изчертават върху траекторията на участъка. Това е информацията, която се предава на отдела за поддръжане на железният път, за последваща проверка и отстраняване на неизправностите.

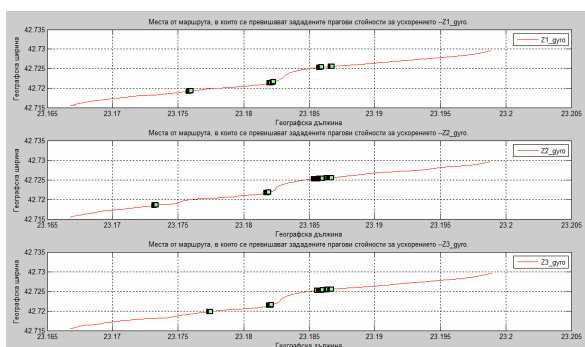
5. Експериментални резултати

Експеримент за проверка на предложения метод е проведен по направлението София-Банкя. То се обслужва от електрически и дизелови мотриси на фирмата Siemens. Експеримента е направен с електрическата мотриса, на която на двете букси на колооста на предната талига са монтирани два измервателни модула, които са захранени от електрическата система на мотрисата. В статията са представени резултатите само от едното устройство. По избраното направление бяха направени общо шест преминавания с мотрисата. След прочитане на данните и намиране на интегралните оценки се откриха участъците с по-големи стойности на ускоренията, които са показани на фигура 5.



Фиг.5. Траектория на направление София-Банкя, с участъци, в които има предпоставки за неизправности

От визуализираните участъци с интегрални оценки е избран участък близо до Банкя, с начални координати 42.7155N и 23.1668E и крайни координати 42.7297N и 23.199E.

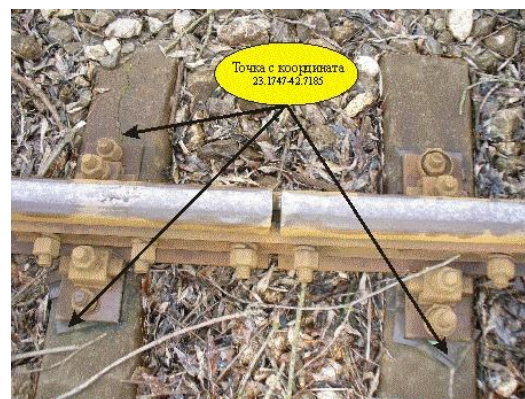


Фиг.6. Траектория на анализирания участък с откритите места с неизправност

На фигура 6 е показана траекторията на участъка с посочените по-горе координати, по които мотрисата е преминала три пъти, в посока от Банкя към София. Забелязва се, че има две местата, в които ускорението във вертикална посока превишава изчислените прагови стойности и при трите преминавания. Това са местата, които трябва да бъдат проверени от отдела по поддръжане на железния път.

Беше направена съвместна проверка с представител на отдела за поддръжане на железния път на откритите места. Състоянието на точка с координати 23.1747-42.7185 намираща се в началото на траекторията на втората графика от фигура 6, е показано на фигура 7. Забелязват се

разхлабените скрепления на релсата, пукнатият траверс в мястото на среплението, което е предпоставка за възникване на отчетените по-големи ускорения.



Фиг.7. Състояние на пътя в точка с координати 23.1747-42.7185

6. Заключение

В статията е описан метод за откриване на места с неизправности по железния път. Изведена е предавателната функция, с която се доказва, че ускоренията в буксовия възел са идентични с тези създадени от пътя в широк честотен диапазон, което е в основата на предложения метод. Предложеният алгоритъм за обработване на получените данни е онагледен с получените резултати от проведените експерименти. От тях е видно, че има повтаряемост на местата с неизправности, при различни преминавания по избраният участък, с което се доказва работоспособността на метода.

7. Благодарност

Тази публикация беше подготвена с финансовата подкрепа на Националният фонд „Научни изследвания“ с договор No.ДТК02/2-2009

8. Литература

1. R.B. Lewis, Track-recording techniques used on British Rail, IEE Proceedings, Vol. 131, Pt. B, No. 3, May 1984
2. Ненов Н., Димитров Е., Ружеков Т., Влияние на закона за формиране на дисипативните сили в ресорната система на локомотива върху реакцията му при преминаване на изолирани неравности на пътя, XIV Научна конференция с международно участие, Транспорт 2004.
3. Димитров Е., Ненов Н., Ружеков Т., Дилов Кр., Гешев Г., Изследване реакцията на екипажната част на локомотив на смущения от пътя, XV Научна конференция с международно участие, Транспорт 2005.
4. <http://www.sbg.se/index.php?module=htmlpages&func=display&pid=38>
5. GNBahn, <http://www.geopp.com/gnbahn/page1.html>
6. <http://www.plassertheurer.at/>
7. Ralph Glaus, The Swiss Trolley – A Modular System for Track Surveying, Siebzigerster Band, Volume 70, 2006 стр.52
8. EN 13848-5, Track geometry quality – Geometric quality levels, 2008
9. Presle Gerard, The EM250 high-speed track recording coach and the EM-SAT 120 track survey car, as networked track geometry diagnosis and therapy systems, Rail Engineering International Edition 2000 Number 3, pp 14-16
10. International union of railways, UIC 518: Test and approval of railway vehicles from the points of view of dynamic

behaviour, safety, track fatigue, and ride quality. Leaflet, Paris, France, 1995.

11. Временна инструкция за оценка на железния път с пътеизмерителна мотриса EM – 120 "Plasser & Theurer", БДЖ, Дирекция "Пътно стопанство", стр.44 – 49
12. Y. Hayashi, T. Kojima, H. Tsunashima and Y. Marumo, Real time fault detection of rail way vehicles and tracks, Railway Condition Monitoring 2006, pp. 20-25
13. John J Mardente, Passenger safety vehicle track interaction task force, Report to the 34th Meeting of the Railroad Safety Advisory Committee (RSAC), February 20, 2008
14. Patrick Ackroyd, Steven Angelo, Boris Nejikovsky, Jeffrey Stevens, Remote ride quality monitoring of acela train set performance, 2002 ASME/IEEE Joint Rail Conference, Washington, DC, April 23-25, 2002
15. H. Tsunashima, T. Kojima, Y. Marumo, A. Matsumoto and T. Mizuma, Condition monitoring of railway track and driver using in-service vehicle
16. Y. Hayashi, T. Kojima, H. Tsunashima and Y. Marumo, Real time fault detection of rail way vehicles and tracks, Railway Condition Monitoring 2006, pp. 20-25
17. Andrea Bracciali, Paolo Folgarait, Rail Corrugation Measurements for Rolling Stock Type Testing and Noise Control, Techrail Workshop, Paris, 2002
18. European Standard EN ISO 3095:2005: Railway Applications—Acoustics—Measurement of Noise Emitted by Railbound Vehicles, August, 2005.
19. Hawari, H. M., Murray, M. H., Correlating track forces and track profile, Conference on Railway Engineering CORE2006.
20. Jan Spännar, A new approach of assessing rail roughness, The Swedish Railway Administration, Banverket
21. Per Gullers, Lars Andersson, Roger Lunden, High-frequency vertical wheel-rail contact forces—Field measurements and influence of track irregularities, Elsevier Wear 265, 2008, 1472–1478
22. Zlatan Šoškić, Dragan Petrović, Nebojša Bogojević, Ranko Rakanović, Suggestions for development of sensors for measurement of forces at wheel-rail contact, Mechanics Transport Communications, issue 1, 2007, article № 0082
23. Per Gullers, Lars Andersson, Roger Lunden, High-frequency vertical wheel-rail contact forces—Validation, Wear 265 (2008) 1472–1478
24. Yoshihiro Suda, Hisanao Komine, Kosuke Matsumoto, Yasunobu Endo, Takuji Nakai, Masuhisa Tanimoto, Feedback friction control between wheel and rail by detecting yaw moment of wheelset, Elsevier, Wear 265 (2008) 1512–1517
25. EN 14363, Railway applications – Testing for the acceptance of running characteristics of railway vehicles – Testing of running behaviour and stationary tests, 2005.
26. E. Verheijen, A survey on roughness measurements, Journal of Sound and Vibration 293 (2006), pp 784–794
27. Vittorio Belotti, Francesco Crenna, Rinaldo C. Michellini, Giovanni B. Rossi, Wavelet signal processing applied to railway wheelflat detection, XVII IMEKO World Congress Metrology in the 3rd Millennium, June 22–27, 2003, Dubrovnik, Croatia
28. Eric G. Berggren, Martin X.D. Li, Jan Spännar, A new approach to the analysis and presentation of vertical track geometry quality and rail roughness, Wear 265 (2008), pp 1488–1496
29. Xiang Jun, Li De-Jian, Zeng Qing-Yuan, Simulation of spatially coupling dynamic response of train-track time-variant system, Journal of central south university of technology, vol, 10 No. 3 Sep. 2003
30. Coenraad Esveld, Modern railway track, second edition, MRT Productions, 2001, pp.122
31. Iontchev E. Iv., Miletiev R. G., Event data recorder for land vehicles and cargo, pp 91-93, V Международная научно – практическая конференция "Trans-Mech-Art-Chem", Московский государственный университет путей сообщения МИИТ 2008.