

THE LOW SPEED OF MOVEMENT OF THE FREIGHT TRAINS AS A FACTOR FOR DERAILMENT ON HORIZONTAL RAILWAY CURVES¹

Chief Assist. Prof. Svetoslav Martinov, PhD

Department of Railway Engineering,

Technical University of Sofia

Phone: (+359) 2 965 2772

E-mail: s.martinov@tu-sofia.bg

Abstract: *It is often necessary to be reduced speed of movement of the trains in mixed traffic railway sections where the tracks repair is carried out. The trains movement with lower speed than design speed through the horizontal curves in a railway section causes additional load on the inner rail in the curves. The cant excess has been studied in the report. It is appeared when the freight trains are passed on horizontal curves in a railway section where the speed of the trains is temporarily reduced. The norms for determining the cant when horizontal railway curves are designed on railway lines with track gauge 1435 mm have been studied. A study of rail accidents related to freight wagon derailments in horizontal curves in which the cant excess was a contributing or concomitant factor to the occurrence of the accident, was carried out. Results for the minimum speed of the freight trains movement below that the cant excess in the horizontal curve with relevant radius is observed have been presented in the paper. In this case the overloading of the inner rail of the track is increased and the conditions for derailment are available.*

Keywords: *Freight train, Horizontal curve, Horizontal alignment, Cant excess, Low speed, Speed limit*

ВЪВЕДЕНИЕ

Събитията в железопътния транспорт, нанасящи в различна степен вредни последици върху инфраструктурата, околната среда и/или хората, се класифицират (Ordinance №59/05.12.2006), според причинените увреждания, като тежки произшествия, произшествия, инциденти и ситуации, близки до инциденти. За най-значими от гледна точка на причинени материални и нематериални щети се считат тежките железопътни произшествия. Към тях се отнасят събития като сблъскване или дерайлиране на подвижен железопътен състав, причинили значителни увреждания на инфраструктурата, околната среда, подвижния състав, както и събития, довели до смърт или сериозни травми върху хора. Произшествията са следващата категория според причинените поражения, като към тях се отнасят събития, имащи вредни последици за железопътната система и/или са причинили здравословни увреждания на хора. Такива събития са сблъскване и дерайлиране на подвижен железопътен състав, събития с хора, настъпили при движение на подвижен железопътен състав, произшествия на железопътни прелези и др. Към категория „инциденти“ се отнасят събитията, които не се отнасят към предишните две категории и са свързани с експлоатацията на железопътния транспорт, като влияят върху безопасността на железопътните превози. В последната категория „ситуации, близки до инциденти“ се класифицират събития, свързани с повреди по железопътната инфраструктура и подвижния железопътен състав, нарушения на изискванията за безопасност и др., които не са произшествия и инциденти.

Дерайлиранията на подвижен железопътен състав са произшествия, които, в голяма част от случаите, причиняват значителни материални увреждания, както на подвижния състав, така и върху железопътната инфраструктура. Поради тази причина, дерайлирането се класифицира в двете най-отговорни категории, свързани с причинените увреждания – произшествията и

¹ Докладът е представен на секционен заседание на 28 октомври 2022 г. с оригинално заглавие на български език: НИСКАТА СКОРОСТ НА ДВИЖЕНИЕ НА ТОВАРНИТЕ ВЛАКОВЕ КАТО ФАКТОР ЗА ДЕРАЙЛИРАНЕ В ХОРИЗОНТАЛНИ ЖЕЛЕЗОПЪТНИ КРИВИ

тежките произшествия. За дерайлиране на подвижен железопътен състав се счита всеки случай, при който най-малко едно колело на возилото напусне железния път.

По данни от годишните доклади на Националния борд за разследване на произшествия в железопътния транспорт, през периода 2017 ÷ 2020 г. (NRAIB, Annual reports 2017 ÷ 2020) са станали 142 дерайлирания на подвижен железопътен състав от общо 1172 класифицирани като произшествия железопътни събития. Това означава, че средно през периода, дерайлиранията са с дял 12,1 % от произшествията и 5,4 % от общо 2622 събития. Информацията относно броя на железопътните събития и разпределението им по години през периода 2017 ÷ 2020 г. е посочена в табл. 1.

Таблица 1. Разпределение на събитията по години

Година	Дерайлирания	Произшествия	Инциденти	Ситуации, близки до инциденти	Общо събития	Дял на дерайлиранията спрямо броя на произшествията	Дял на произшествията спрямо броя на събитията	Дял на дерайлиранията спрямо броя на събитията
	бр.	бр.	бр.	бр.	бр.	%	%	%
2017	43	343	53	350	746	12,5	46,0	5,8
2018	38	294	39	306	639	12,9	46,0	5,9
2019	33	269	59	296	624	12,3	43,1	5,3
2020	28	266	38	309	613	10,5	43,4	4,6

При движение на влаковете в хоризонтални железопътни криви със скорост по-ниска от проектната се получават отрицателни стойности на ускоренията и повишено натоварване на вътрешната железопътна релса в кривата. Обикновено, ограничения на скоростта, значително под максимално допустимата скорост на преминаване на влаковете, се въвеждат в участъци в които се извършват ремонтни дейности, включително и по железния път. Намалената скорост на движение, съчетано с движението на тежки товарни влакове създава значителни натоварвания върху вътрешната релса в хоризонталните железопътни криви. Това е предпоставка за пропадане на вътрешната релса в кривата и повишаване на надвишението над проектните стойности, особено в железопътни участъци с голямо товаронапрежение от преминаващите влакове. Тези условия създават предпоставки за дерайлиране на товарните влакове при преминаването им в хоризонтални криви с въведени ограничения на скоростта и стойности на надвишението, отговарящи на проектната скорост.

Препоръки относно проектните параметри на кривите при железопътни линии със смесено движение са посочени в (Alqatawna, A., et al., 2022) и (Fathali, M., et al., 2019), като авторите предлагат методики за анализ на параметрите. В литературата (Lazarevic, L., et al., 2018) е извършен анализ на параметрите на хоризонталните кръгови криви с цел подобряване на регулациите относно проектиране на железопътни линии при смесено движение. Резултатите от експериментално изследване на вертикалните и хоризонталните сили, възникващи при движението на влаковете в хоризонтални криви в зависимост от надвишението и скоростта на движение на влаковете са публикувани от авторите в (Powell, A., & Gräbe, P., 2017). Възможностите за проектиране на криви в железопътни участъци със сложно пространствено трасе при високоскоростни железопътни линии са представени от авторите (Shkurnikov, S., et al., 2022). Недостигът и излишък на надвишение по хоризонтални железопътни криви е изследван в (Todorov, S., 2014), като автора препоръчва да се въведат в железопътната практика двата параметъра – недостиг и излишък на надвишение. В доклада е посочено, че излишъкът на надвишение може да достигне до 110 mm. В (Valehrach, J., et al.,

2017) авторите изследват излишъка и недостига на надвишение според скоростта на движение на влаковете и дефектите в релсовия път, които те предизвикват.

ИЗЛОЖЕНИЕ

През 2021 г. в България са настъпили поне две дерайлирования на вагони от товарни влакове при движението им в хоризонтални железопътни криви със скорост по-ниска от предписаната за съответния железопътен участък, поради въведени временни ограничения на скоростта.

На 12.03.2021 г. в междугарието Шивачево – Твърдица по 3-та главна железопътна линия дерайлира предпоследният 16-ти вагон от директен товарен влак №30610, теглен от електрически локомотив. Според текста на окончателния доклад на разследващата комисия (NAMRTAIB, Final report – derailment on 12.03.2021), в момента на дерайлирането влака се е движил със скорост 37 km/h при допустима максимална скорост 60 km/h за товарните влакове и 75 km/h за пътническите за междугарието Твърдица – Шивачево. Вагонът дерайлира с двете колооси на първа талига по посока на движението, като първо възниква дерайлиране вляво на втората колоос, а впоследствие и на първата колоос на първата талига. Покачването на реборда на лявото колело на втората колоос върху главата на релсата е настъпило в дясна кръгова крива с радиус 300 m в участък с 13,7 ‰ в нагорнище. Минимално допустимото надвишение, посочено в доклада е 125 mm. Влакът е превозвал насипен товар, като е установено, че товара в дерайлирания 16-ти вагон и в последния 17-ти вагон от състава е неравномерно разположен по напречната и надлъжната ос на вагоните, като по-голямата част от него е разположена в дясната надлъжна половина на вагоните по посока на движението. При измерване на вагоните от състава е установено, че натоварването на левите и десните колела на последните три вагона от състава – 15-ти, дерайлираният 16-ти и последния 17-ти вагон са с разлика в натоварванията по отделните колооси в съотношение дясно към ляво колело със стойности над нормативно допустимата стойност 1,25 при 9 от 12-те колооси на трите последни вагона. Три от колоосите на дерайлирания вагон и всички четири колооси на последния 17-ти вагон от състава на влака са с натоварване на дясно към ляво колело в съотношение изменящо се между 1,30 и 1,49. Съгласно нормативните документи, странично изместване на товара във вагоните е допустимо в съотношение на натоварването на колелата на една и съща колоос, в напречно направление до 1,25:1. В резултат на дерайлирането са причинени значителни щети на железния път в участък с дължина над 3000 m, както и увреждания по дерайлирания вагон. В заключението на доклада е посочено, че основната причина за дерайлирането е неравномерното натоварване на вагона, което е довело до изместване на масовия му център към десните колела. Допринасящи фактори за настъпване на произшествието са съчетанието на несиметрично по напречната ос натоварване на вагоните, ниската скорост на движение на влака в дясна хоризонтална крива с малък радиус и отклонения в нивото на железния път.

На 23.04.2021 г. в междугарието Ветово – Сеново по 9-та главна железопътна линия дерайлират пет пълни с бензин вагон-цистерни от състава на директен товарен влак №90593. Железопътната линия е конвенционална със скорости на движение до 100 km/h. При произшествието дерайлират 5-ти, 6-ти, 7-ми, 8-ми и 9-ти вагони, като дерайлирането е започнало от шестия вагон. Влакът е бил в състав 28 вагона, от които 2 вагона предохрана - един начело и един в края на влака. Влакът е обслужван от три локомотива – помощен и влаков локомотив начело и бутащ помощен локомотив. Според данните от окончателния доклад на разследващата комисия (NAMRTAIB, Final report – derailment on 23.04.2021), в момента на дерайлирането, влакът се е движил със скорост 19 km/h при въведено, поради извършван ремонт на железния път, ограничение на скоростта 25 km/h. Дерайлирането е настъпило в лява кръгова крива по посока на движението на влака с радиус 482 m, нормално надвишение 105 mm и нагорнище 2,3‰. Допустимата максимална скорост за товарните влакове в участъка е 60 km/h и 80 km/h за пътническите. Установено е, че при движението на влака дясното колело на първата колоос на шестия от състава на влака вагон се покачва върху главата на външната дясна релса. Впоследствие дерайлира и втората колоос от първата талига на шестия вагон и

останалите четири вагона. Установено е, че при въведеното ограничение на скоростта 25 km/h е налице отрицателно странично ускорение в кривата на дерайлирането, което води до претоварване на вътрешната релсова нишка от преминаващите железопътни возила. Според окончателния доклад, непосредствената причина за възникване на произшествието е голямото надвишение в лявата кръгова крива в която е започнало дерайлирането, възникнало вследствие на недобро укрепване на железния път след извършен ремонт. Допринасящ фактор за дерайлирането е голямото товаронапрежение от преминаващите през периода от 17.04.2021 г. до момента на дерайлирането товарни влакове в съчетание с ниската скорост от въведеното ограничение 25 km/h в участъка на дерайлирането. Това е предизвикало недопустими отклонения в нивото на пътя за кратък период от време. При дерайлирането в значителна степен е увреден около 2500 m железен път, както и дерайлиралите вагони.

Непогасеното странично ускорение се определя от разликата между изчисленото странично ускорение, което действа върху железопътното возило при движение в кръгова крива с радиус R и страничното (отрицателно) ускорение, създавано от надвишението на външната релса в кривата. Допустимите непогасени странични центробежни ускорения за проектната скорост по железопътен участък са до $0,65 \text{ m/s}^2$ при цялостна реконструкция на участъка и при изграждане на нови железопътни линии и до $0,85 \text{ m/s}^2$ при частични реконструкции (Ordinance №55/29.01.2004), като стойността на страничното непогасено ускорение в хоризонтална железопътна крива ($A, \text{ m/s}^2$) се определя по:

$$A = \frac{V_{\max}^2}{13.R} - \frac{H}{153}, \frac{m}{s^2}, \quad (1)$$

където: V_{\max} е максималната проектна скорост на движение на железопътните возила, km/h; R – радиусът на кръговата хоризонтална крива, m; H – надвишението на външната релсова нишка в кривата, mm.

Стойността на нормалното надвишение ($H_H, \text{ mm}$) на външната релса в железопътни криви в междугария при движение на влаковете до 120 km/h се определя (Instruction concerning the structure and maintenance of the superstructure of the railroad and railroad switches, 2022) по:

$$H_H = \frac{8.V_{\max}^2}{R}, \text{ mm}. \quad (2)$$

Изчислените стойности на нормалното надвишение се закръгляват към по-голямата стойност, кратна на 5, като минималната стойност на надвишението е 20 mm.

Нормалното надвишение при дерайлирането в междугариято Шивачево – Твърдица на 12.03.2021 г. изчислено по формула 2 за кръгова крива с радиус 300 m и максимална скорост 75 km/h е $H_H = 150 \text{ mm}$. Страничното ускорение, възникващо при това надвишение, е $0,46 \text{ m/s}^2$. При скорост на движение на влака в момента на дерайлирането $V_T = 37 \text{ km/h}$, страничното ускорение, възникнало при преминаване през кривата, е отрицателно със стойност $A = -0,63 \text{ m/s}^2$, което е предпоставка за допълнително натоварване на вътрешната релсова нишка.

Нормалното надвишение при дерайлирането в междугариято Ветово – Сеново на 23.04.2021 г. изчислено по формула 2 за кръгова крива с радиус 482 m и максимална скорост 80 km/h е 106 mm, като съгласно нормативите се приема по-голямата стойност, кратна на 5 и надвишението трябва да е $H_H = 110 \text{ mm}$. Страничното ускорение, възникващо при това надвишение и скорост 80 km/h, е $0,3 \text{ m/s}^2$. При въведеното ограничение на скоростта 25 km/h, страничното ускорение, възникнало при преминаване през кривата, е отрицателно със стойност $A = -0,62 \text{ m/s}^2$, което е предпоставка за повишено натоварване на вътрешната релсова нишка. Скоростта на движение на влака при започване на дерайлирането е $V_T = 19 \text{ km/h}$, което е понижило допълнително стойността на отрицателното странично ускорение.

Излишъкът на надвишение при дерайлирането в междугарието Шивачево – Твърдица на 12.03.2021 г., изчислен съгласно (Todorov, S., 2014), достига 96 mm при скорост на движение на състава 37 km/h в хоризонталната крива с радиус 300 m и надвишение 150 mm. За дерайлирането в междугарието Ветово – Сеново на 23.04.2021 г., излишъкът на надвишението е 101 mm и е определен за скорост на движение 19 km/h в хоризонталната крива с радиус 482 m и надвишение 110 mm.

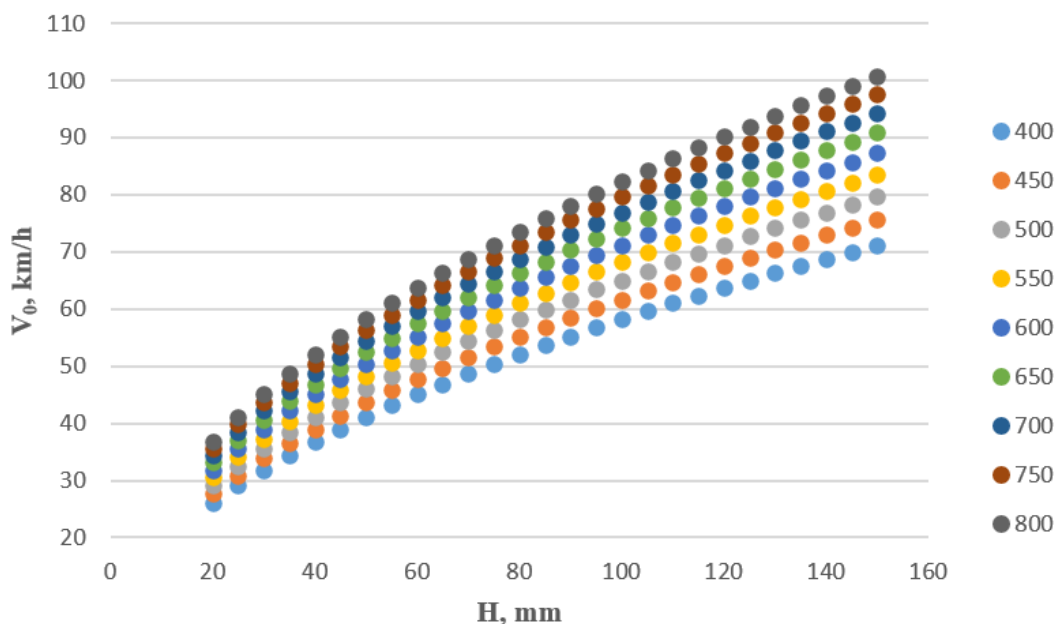
Допълнително натоварване на вътрешната релсова нишка в хоризонталните криви възниква при скорост на движение на влака $V_T < V_0$, при която страничното ускорение приема отрицателни стойности ($A < 0 m/s^2$). Граничната стойност на скоростта V_0 се определя по:

$$V_0 = \sqrt{\frac{H.R}{11,8}}, \frac{km}{h}, \quad (3)$$

където: H е надвишението на външната релса на хоризонталната крива, mm.

За двете дерайлирания в междугарията Шивачево - Твърдица на 12.03.2021 г. и Ветово – Сеново на 23.04.2021 г., граничната стойност на скоростта под която се явява излишък на надвишение в кривите на дерайлиране е съответно 62 km/h и 67 km/h. Движението на возилата със скорост под посочените стойности е довело до допълнително натоварване на вътрешната релсова нишка в хоризонталните криви.

Граничните стойности на скоростта на движение на железопътните возила (V_0) под която се наблюдава отрицателно странично ускорение и допълнително натоварване на вътрешната релсова нишка за хоризонтални железопътни криви с радиус между 400 и 800 m при съответно надвишение на външната релса са посочени на фиг. 1.



Фиг. 1. Гранична стойност на скоростта на движение (V_0)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С оглед на значителните материални и нематериални вреди, които би могло да предизвика всяко дерайлиране на железопътен подвижен състав е целесъобразно, да се ограничат до минимум възможностите за възникване на подобни произшествия. Това включва и дерайлиранията при които основен или допълнителен фактор за възникването им е намалената скорост на движение на влаковете в железопътен участък с хоризонтални криви, проектирани с надвишение на външната релса за по-високи скорости на движение. Движението на железопътните возила със скорост по-ниска от проектната за железния път поражда високи стойности на излишъка на надвишение в хоризонталните железопътни криви.

Това допълнително натоварва вътрешната железопътна релса в кривата и е фактор, който е възможно да благоприятства или да е основна причина за настъпване на дерайлиране.

При необходимост от ограничаване на скоростта на движение на влаковете в железопътен участък се препоръчва, стойността на ограничението да се определя, като се отчитат и допълнителни фактори, които биха могли да окажат влияние върху техническото състояние на железния път в хоризонталните криви и бързо да го влошат. Подобни фактори са товаронапрежението от преминаващите влакове през участъка, рискът за преминаване на товарни състави с отклонения от допустимите норми за натоварване, пропуски при поддържането на пътя и др. С отчитането на тези фактори при определяне на стойността на ограничението на скоростта би могло да се намали въздействието, което оказва излишъка на надвишение върху натоварването на вътрешната релса в кривата при преминаване на железопътни возила със скорост по-ниска от проектната за участъка.

REFERENCES

Alqatawna, A., Sánchez-Cambronero, S., Gallego, I., & López-Morales, J. M. (2022). A Graphical Method for Designing the Horizontal Alignment and the Cant in High-Speed Railway Lines Aimed at Mixed-Speed Traffic. *Sustainability* 2022, 14, 8377. <https://doi.org/10.3390/su14148377>.

Fathali, M., MoghadasNejad, F., & MoghadamAli, H. (2019). Horizontal Curve Design of Railway Tracks Incorporating Safety Criteria. *International Journal of Railway Research*, ISSN: 2423-3838, Vol. 6, No. 2, (2019), 63-72.

Lazarevic, L., Popovic, Z., Vilotijevic, M., & Mirkovic, N. (2018). Track alignment parameters on modern railway lines for mixed traffic. *Proceedings of the XVIII Scientific-Expert Conference on Railways in RAILCON '18*, Niš, Serbia, 11–12 October 2018; 77–80.

Powell, A., & Gräbe, P. (2017). Exploring the relationship between vertical and lateral forces, speed and superelevation in railway curves. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, ISSN 1021-2019, Vol 59, No3, September 2017, Paper 1736, 25–35.

Shkurnikov, S., Bulakaeva, O., & Anisimov, V. Complex Spatial Geometry of Curved Sections on High-Speed Railways. (2022). *Bulletin of scientific research results*, 2022, iss. 2, (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2022-2-164-178, 164–178. (**Оригинално заглавие:** Шкурников, С., Булакаева, О., Анисимов, В. Сложная пространственная геометрия криволинейных участков трассы высокоскоростных железнодорожных магистралей. Бюллетень результатов научных исследований, 2022, Вып. 2. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-2-164-178, 164–178).

Todorov, S. (2014). Train running on horizontal curves – the cant deficiency and excess. *Mechanics Transport Communications*, vol. 12, 3/3, 2014, ID 1055, ISSN 1312-3823, pp. VIII-9–VIII-15 (**Оригинално заглавие:** Тодоров, С., 2014. Движение на влака в хоризонтални криви – недостиг и излишък на надвишение. *Механика Транспорт Комуникации, том. 12, бр. 3/3, 2014, №1055, ISSN 1312-3823, стр. VIII-9–VIII-15*).

Valehrach, J., Ríha, T., & Dušek, E. (2017). Cant excess and cant deficiency evaluation in relation to train speed. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 11:80–85, 2017, doi: 10.14311/APP.2017.11.0080, 80–85.

Design guidelines Railway Alignment. (2021). Rail Baltica. RBDG-MAN-013-0105, pp. 21. Available online: <https://www.railbaltica.org/design-guidelines/> (accessed on 16 October 2022).

National railway transport accidents investigation board (NRAIB) – Annual reports 2017 ÷ 2020. Republic of Bulgaria. (**Оригинално заглавие:** Национален борд за разследване на произшествия в железопътния транспорт (НБРПЖТ). *Годишни доклади 2017 ÷ 2020 г., Република България*). Available online: <https://www.mtc.government.bg/en/category/182> (accessed on 16 October 2022).

National air, maritime and railway transport accidents investigation board (NAMRTAIB). Final report from Investigation of railway accident – derailment of direct freight train №30610 between the stations Shivatchevo – Tvarditsa on 12.03.2021. (**Оригинално заглавие:** *Национален борд за*

разследване на произшествия във въздушния, водния и железопътния транспорт (НБРПВВЖТ). Окончателен доклад от разследване на железопътно произшествие – дерайлиране на директен товарен влак №30610 между гарите Шивачево – Твърдица на 12.03.2021 г.). Available online: <https://www.mtc.government.bg/bg/archive-year/183/2021> (accessed on 16 October 2022, in Bulgarian).

National air, maritime and railway transport accidents investigation board (NAMRTAIB). Final report from Investigation of significant railway accident – derailment of full tank cars from the composition of direct freight train № 90593 between the stations Vetovo – Senovo on 23.04.2021 (**Оригинално заглавие:** *Национален борд за разследване на произшествия във въздушния, водния и железопътния транспорт (НБРПВВЖТ). Окончателен доклад от разследване на тежко железопътно произшествие – дерайлиране на пълни вагон цистерни от състава на директен товарен влак № 90593 между гарите Ветово – Сеново на 23.04.2021 г.*). Available online: <https://www.mtc.government.bg/bg/archive-year/183/2021> (accessed on 16 October 2022, in Bulgarian).

Ordinance №55/29.01.2004 on Designing and construction of railway lines, railway stations, railway level crossings and other components of the railway infrastructure. (2004). State Gazette 18/05.03.2004, Republic of Bulgaria. (**Оригинално заглавие:** *Наредба №55 от 29.01.2004 г. за Проектиране и строителство на железопътни линии, железопътни гари, железопътни прелези и други елементи от железопътната инфраструктура. Държавен вестник на Република България, бр. 18/05.03.2004 г.*). Available online: <https://dv.parliament.bg/DVWeb/showMaterialDV.jsp?idMat=21558> (accessed on 16 October 2022, in Bulgarian).

Ordinance №59/05.12.2006 on the rail transport safety management. (2006). State Gazette 102/19.12.2006, Republic of Bulgaria. (**Оригинално заглавие:** *Наредба №59 от 05.12.2006 г. за управление на безопасността в железопътния транспорт. Държавен вестник на Република България, бр. 102/19.12.2006 г.*).

Instruction concerning the structure and maintenance of the superstructure of the railroad and railroad switches. 2022. National Railway Infrastructure Company, Republic of Bulgaria. (**Оригинално заглавие:** *Инструкция за устройство и поддържане на горното строене на железния път и железопътните стрелки. 2022. ДП „НКЖИ“, България*). Available online: https://www.rail-infra.bg/upload/4269/normi_jelezen_pat_strelki_2022.pdf (accessed on 16 October 2022, in Bulgarian).