



Получена: 25.01.2020 г.

Приета: 15.04.2020 г.

## ИЗСЛЕДВАНЕ НА ФАКТОРИТЕ, ОБУСЛАВЯЩИ БЕЗОПАСНОСТТА НА ДВИЖЕНИЕ НА ВЛАКОВЕТЕ ПРИ СПИРАЧЕН РЕЖИМ

С. Тодоров<sup>1</sup>, К. Куцарова-Димитрова<sup>2</sup>, М. Илиев<sup>3</sup>

*Ключови думи:* спираща ефективност, проектиране на жп линии, оперативна съвместимост

### РЕЗЮМЕ

Железопътната мрежа на РБ е част от Европейската железопътна инфраструктура. За да е конкурентна на пазара на транспортни услуги, жп мрежата трябва да осигурява безопасно движение с висока скорост и оттам кратко време пътуване. Хоризонталните криви с малки радиуси се смятат за основен фактор, ограничаващ скоростта. При необходимост от по-висока проектна скорост линията се реконструира и се увеличават радиусите на кривите. Влиянието на наклоните на елементите на надлъжния профил върху скоростта рядко се отчита. Нормите за проектиране и строителство на жп линии в РБ допускат 20% максимален наклон за хълмист терен за скорост 100 ÷ 120 km/h на товарния влак. В настоящата разработка са разгледани надолница със стойност на надлъжния наклон над 14%, както и трудностите при експлоатация и поддръжка, ограниченията в скоростта на движение на товарните влакове при спускане. Мерки, които могат да се предприемат за повишаване на скоростта на движение в тези участъци.

---

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

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

<sup>3</sup> Матей Илиев, докторант, кат. „Железници“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: matey\_iliev@outlook.com

## 1. Въведение

Ограниченията на скоростта могат да са породени от елементите на плана, наклоните на нивелетата и отклоненията от проектното положение при поддръжка на жп линията. Влиянието на елементите на плана (хоризонтални криви с малки радиуси, преходни криви с недостатъчна дължина, сложни криви) е добре описан проблем. Ограничението на скоростта, породено от големите надлъжни наклони на нивелетата обаче, почти не се засяга като проблем.

Наклонът като фактор, ограничаващ скоростта:

- наклон нагоре – проблемът с ограничението на скоростта може да бъде решен, ако се използват по-мощни локомотиви;
- наклон надолу – проблемът с ограничението на скоростта не може да бъде решен чрез промяна на подвижния състав поради ограничението на максималната сила на натиск за спирачния блок.

За нуждите на разработката е направено обследване на жп мрежата на РБ с оглед наличието на опасни участъци при спускане и влиянието на наклона върху горното строене на железния път и елементите на спирачната система на влака.

## 2. Обследване на железопътната мрежа на РБ

Железопътната мрежа на РБ се състои от 9 жп линии. Предмет на изследването са участъците, в които се очаква движение на влаковете в спирачен режим, за да може да поддържа безопасна скорост или да спре пред препятствие. Критериите за оценка на дадено надолнище като продължително са разработени на база на Наредба 58 [1], Регламент (ЕС) No 1302/2014 [2] и Regulation (EU) No 1299/2014 [3].

### 2.1. Критерии за оценка на продължително надолнище

- Дължина

Според Наредба 58 [1] за правилата за техническата експлоатация, движението на влаковете и сигнализацията в железопътния транспорт пред сигналните спирачни разстояния за стандартните жп линии са 1500, 1200, 1000 и 700 m. Освен това не се допуска спирачният път да надвишава предсигналното спирачно разстояние за даденото междугарие.

- Стръмнина

Отново според Наредба 58 [1] продължителни надолнища, по-големи от 15%, трябва да бъдат специално обозначени. Когато профилът на железния път между предупредителния и входния светофор е в надолнище към гарата с наклон 14% и повече, дежурният ръководител движение дава съгласие за приемане на влак, само ако има свободен приеман коловоз, маршрутът е подготвен за него и маневрата е прекратена.

- Съчетание на съседни елементи

Според Регламент (ЕС) No 1302/2014 [2] в частта за изчисления във връзка със способността за поемане на топлинно натоварване максималният наклон на линията, съответната дължина и експлоатационната скорост, за която е проектирана спирачната

система във връзка със способността за поемане на топлинно натоварване се определя чрез изчисляване при състояние на „максимално спирачно натоварване“, като работната спирачка се използва за поддържане на постоянна експлоатационна скорост на влака. Еталонният случай за наклон, който следва да бъде взет предвид, е поддържане на скорост 80 km/h по наклонен участък с постоянен наклон 21‰ в рамките на 46 km.

Според Наредба 58 [1] „Продължително надолнище“ е отсечка от железния път с надлъжен профил над 14‰ спускане с дължина, равна или по-голяма от предсигналното спирачно разстояние. Според Regulation (EU) No 1299/2014 [3] от гледна точка на оперативната съвместимост е допустима пълзяща средна стойност на наклона в рамките на 10 km по-малка или равна на 25‰.

Предвид гореизброените условия като продължителни надолнища се определят участъци с еднопосочни последователни наклони между 13‰ и 27‰ и дължина повече от 3000 m. В тези участъци с дължини, значително по-големи от предсигналното спирачно разстояние, се предполага, че за поддържане на безопасна скорост по надолнище ще е необходимо да се използва спирачка.

## 2.2. Описание на участъците

За нуждите на проучването ни бяха предоставени данни за състоянието на железния път към 01.11.2016 на ДП „НКЖИ“. От тези данни за всяка от деветте линии са извадени продължителните надолнища.

За проверка на оперативната съвместимост на наклоните и дължините на надлъжните профили разглежданите участъци са представени чрез дължината и средния си наклон (табл. 1).

**Таблица 1. Дължина и среден наклон на стръмните надолнища**

|                   | Направление              | Междугарие                 | Дължина, м          | Среден наклон, ‰ |       |
|-------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|------------------|-------|
| I л-я             | София – Калотина         | Сливница – Алдомировци     | 5160                | 15,37            |       |
|                   |                          | Алдомировци – Драгоман     | 4720                | 15,56            |       |
|                   |                          | Драгоман – Драгоил         | 6080                | 19,02            |       |
|                   |                          | Драгоил – Калотина         | 3890                | 20,00            |       |
|                   | София – Ихтиман          | Калотина – граница Сърбия  | 3005                | 18,74            |       |
|                   |                          | Побит камък – Вакарел      | 8410                | 23,44            |       |
| II л-я            | Ихтиман – Септември      | Вакарел – Ихтиман          | 7920                | 18,46            |       |
|                   |                          | Немирово – Сестримо        | 7660                | 23,34            |       |
|                   | Червен бряг – Плевен     | Червен бряг – Долни Дъбник | 8917                | 15,45            |       |
|                   |                          | Плевен – Левски            | Плевен – Гривица    | 6030             | 15,36 |
|                   |                          |                            | Гривица – Пордим    | 4410             | 18,02 |
|                   | Горна Оряховица – Попово | Гривица – Пордим           | 5270                | 17,77            |       |
| Горица – Медовина |                          | 7325                       | 24,26               |                  |       |
| III л-я           | Медовина – Попово        | Медовина – Попово          | 4360                | 14,22            |       |
|                   |                          | Макоцево – Мирково         | 4940                | 13,93            |       |
|                   | Столник – Пирдоп         | Пирдоп – Мирково           | 4940                | 13,93            |       |
|                   |                          | Пирдоп – Карлово           | Пирдоп – Копривщица | 6320             | 13,70 |
|                   | Тулово – Зимница         | Клисура – Христо Даново    | 7092                | 13,74            |       |
|                   |                          | Твърдица – Шивачево        | 4100                | 13,90            |       |
| V л-я             | София – Радомир          | Горна баня – Владая        | 7666                | 24,71            |       |
|                   |                          | Владая – Драгичево         | 4792                | 22,32            |       |
|                   | Радомир – Дупница        | Делян – Марек              | 3500                | 15,47            |       |

|                         | Направление                  | Междугарие                    | Дължина,<br>m | Среден наклон,<br>‰ |
|-------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------|---------------------|
| IV л-я                  | мост р. Дунав – Г. Оряховица | Русе – Доростол               | 6780          | 16,78               |
|                         |                              | Борово – Морунница            | 3168          | 23,22               |
|                         |                              | Морунница – Полско Косово     | 6341          | 24,94               |
|                         |                              | Янтра – Акация                | 4960          | 15,00               |
|                         | Г. Оряховица – Кръстец       | Плачковци – Радевци           | 6970          | 23,21               |
|                         |                              | Радевци – Кръстец             | 8640          | 22,40               |
|                         | Кръстец – Дъбово             | Кръстец – Борушица            | 6540          | 22,49               |
|                         |                              | Борушица – Радунци            | 5005          | 22,83               |
|                         |                              | Радунци – Яворовец            | 8360          | 22,54               |
|                         |                              | Яворовец – Дъбово             | 5260          | 17,96               |
|                         | Тулово – Стара Загора        | Ягода – Змейово               | 5735          | 18,71               |
|                         |                              | Змейово – Стара Загора        | 11575         | 20,87               |
| Димитровград – Перперек | Царева поляна – Мост         | 5450                          | 21,83         |                     |
| VI                      | Кюстендил – Гюешево          | Соволяно – Церовица           | 8346          | 16,27               |
|                         |                              | Долно село – Преколница       | 5580          | 20,00               |
| VII л-я                 | Мездра – Враца               | Руска Бела – Враца            | 4300          | 15,78               |
|                         | Враца – Брусарци             | Враца – Враца Запад           | 4220          | 15,86               |
|                         |                              | Медковец – Брусарци           | 4185          | 22,00               |
|                         | Брусарци – Видин             | Дреновец – Воднянци           | 7050          | 15,63               |
|                         |                              | Орещец – Димово               | 7400          | 21,44               |
|                         |                              | Срацимир – Видбол             | 6895          | 21,32               |
| IX л-я                  | Русе разпред. – Разград      | Русе разпр. – Образцов чифлик | 3790          | 23,54               |
|                         | Разград – Каспичан           | Висока поляна – Хитрино       | 9950          | 16,05               |
|                         |                              | Каменяр – Велино              | 4110          | 16,99               |

Средният наклон за всяко разглеждано междугарие е изчислен по формулата:

$$i_{cpj} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i \times i_i}{\sum_{i=1}^n l_i}, \quad (1)$$

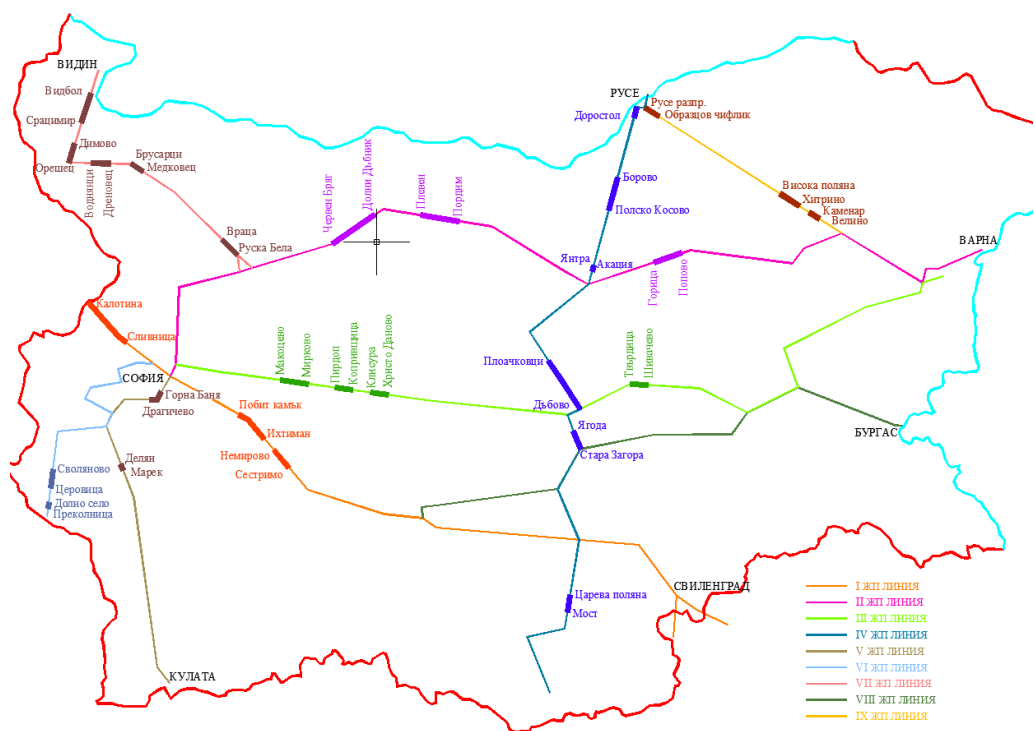
където  $i_{cpj}$  е средният наклон за междугарието, ‰;

$l_i$  – дължина на профилен елемент от разглежданото междугарие, m;

$i_i$  – наклон на профилен елемент от разглежданото междугарие, ‰.

От табл. 1 се вижда, че профилните участъци са с последователни еднопосочни наклони със средна стойност между от 13,70‰ до 24,94‰ и обща дължина от 3000 до 11500 m, което означава, че са спазени изискванията за оперативна съвместимост на наклоните, залегнали в Regulation (EU) No 1299/2014 [3].

Описаните в табл. 1 дълги надолнища са отразени върху картата на железопътната мрежа на ДП „Железопътна инфраструктура“ (фиг. 1).



Фиг. 1. Карта на опасните надолници по жп мрежата на РБ

### 3. Анализ и сравнение на методите за определяне на спирачната сила

Оразмеряването на жп линията става за максималния ръководящ наклон, по който може да се движи с постоянна скорост влак с дадено тегло, теглен от един локомотив. Това е определението за оразмеряване на жп линията при разчетни елементи на подсистемите инфраструктура и подвижен железопътен състав. При трудни теренни условия и необходимост от преодоляване на значителна денивелация между гарите може да се използва и кратна тяга (влакът да бъде теглен от два или три локомотива). Това позволява използването на по-голям наклон за преодоляване на денивелацията и скъсяване на дължината на линията. Какво става обаче при движение на влака при спускане по този граничен оразмерителен наклон или близък до него? Явно влакът ще трябва:

- да се движи на спирачен режим или частично спиране,
- да спазва ограничението за максимална скорост в участъка и
- да спазва максималната скорост за спиране пред препятствие.

Определянето на масата на влаковете, построяването на графици за движение, изчисляването на спирачния път и решаването на някои оптимизационни задачи е основано на зависимостта  $S = f(v)$ . Тези задачи се решават с тягови и спирачни изчисления, базирани на решаването на уравнението за движение на влака (УДВ).

От гледна точка на взаимодействието между влаковите състави и железния път е достатъчно приблизителното определяне на спирачната сила в зоната на контакт между

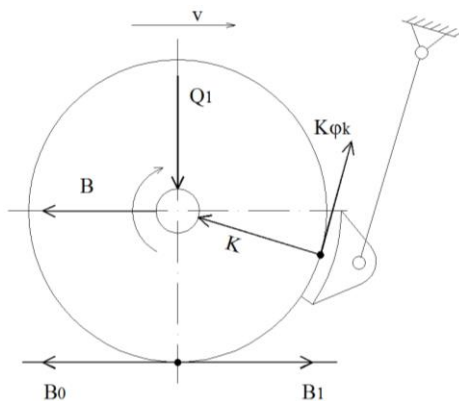
колелата и релсите. По този начин може да се изчисли допълнителното натоварване на елементите на горното строене на пътя, обусловено от действието на спирачната сила.

Съществуват различни методи за изчисляване на спирачната сила, интегриране на УДВ, пресмятане на спирачния път и анализ на движението на влака. В разработката са разгледани и сравнени методът на ОСЖД (до сега преподаван в УАСГ) и методът, заложен в предписанията на фиш UIC – 544-1 [4].

### 3.1. Метод на ОСЖД, преподаван в УАСГ

#### 3.1.1. Определяне на спирачната сила въз основа на триенето между калодките и колелото

В университета се преподава изчисляване на спирачната сила по нагледен и лесен за прилагане начин. Тази система е възприета в страните от бившия Съветски съюз, ОСЖД и до сега. Основава се на триенето между калодките и бандажите на колелата. Максималният размер на спирачната сила за едно колело –  $B$  – се ограничава от силата на сцепление между колелото и релсата –  $B_0$  (фиг. 2) [5, 6].



Фиг. 2. Създаване на спирачната сила

$$B_0 = K\varphi_k \leq \psi Q_1, \quad (2)$$

където  $K$  е натиск на калодките върху една спирачна ос, t/ос;

$\varphi_k$  – коефициент на триене между калодката и бандажа;

$Q_1$  – осево натоварване на една спирачна ос, t;

$\psi$  – коефициент на сцепление между колелото и релсата.

Коефициентът  $\psi$  зависи от осевото натоварване и от скоростта на движение. Коефициентът  $\varphi_k$  зависи от материала на триещите се повърхности, скоростта на движение  $V$  [km/h] и натискът на една калодка  $k$  [t], [7].

$$k = \frac{1}{m} \left( \frac{\pi d^2}{4} p_c \eta_c - F_1 - F_2 - F_3 \right) n \eta_p, \quad (3)$$

където  $m$  е броят на калодките, върху които действа усилието на един спирачен цилиндър;

$d$  – диаметър на спирачния цилиндър;  
 $p_c$  – проектно налягане в спирачните цилиндри;  
 $\eta_c, \eta_p$  – коефициенти на загуба на сила вследствие на триене;  
 $F_1, F_2, F_3$  – усилия, приведени към различни части на пружината на спирачния цилиндър;  
 $n$  – предавателно число.

Натискът на калодките за една ос  $K$  се ограничава от условието да няма закланване на спирачните колела.

$$K \leq Q_1 \frac{\Psi}{\varphi_k}, \quad (4)$$

$\frac{\Psi}{\varphi_k} = \delta$  е коефициент на натиск на калодките за една ос.

Коефициентът на натиск на калодките е променлива величина и зависи от скоростта на движение и от състоянието на релсите. Стойностите на  $\delta$  са дадени в [5]. За изчисляване на спирачната сила се работи със стойности на натиск на калодките за една ос  $K$  70 kN/ос за пълни товарни вагони и  $K$  35 kN/ос за празен товарен вагон.

Пълната спирачна сила за целия  $B_k$  [t] влак е  $B_k = \sum B_0 = \sum K\varphi_k$ .

Описаният метод позволява да се пресметне допълнителното натоварване върху горното строене на железния път, предизвикано от реакцията на релсата  $\sum B_0$  в момента на действие на спирачната сила.

### 3.1.2. Анализ на движението на влака и допустимите скорости във функция от наклона на пътя

При движение на влака по какъвто и да е наклон, скоростта му се стреми към една постоянна величина, характерна за големината на наклона [5]. За анализ на движението на влака и допустимата скорост във функция от наклона на пътя се използват диаграмите на относителните равнодействащи сили (ДОРС). За построяването на диаграмата на относителната резултантна спирачна сила се използва уравнението:

$$r_c = w_{\text{от}} + zb, \quad (5)$$

където  $r_c$  е относителна резултантна сила в спирачен режим на движение, dN/t;

$w_{\text{от}}$  – относително съпротивление на влака при движение в безтягов режим, dN/t.

Представлява сума от съпротивленията, действащи на влака постоянно при движението му по прав хоризонтален участък. Стойностите на общото относително съпротивление зависят от скоростта на движение и се дават с емпирично изведени формули от вида  $w_{\text{от}} = a + bv + cv^2$ , където  $a$ ,  $b$  и  $c$  са опитно получени коефициенти.

Относителната спирачна сила  $b$  [dN/t], зависи от скоростта, е:

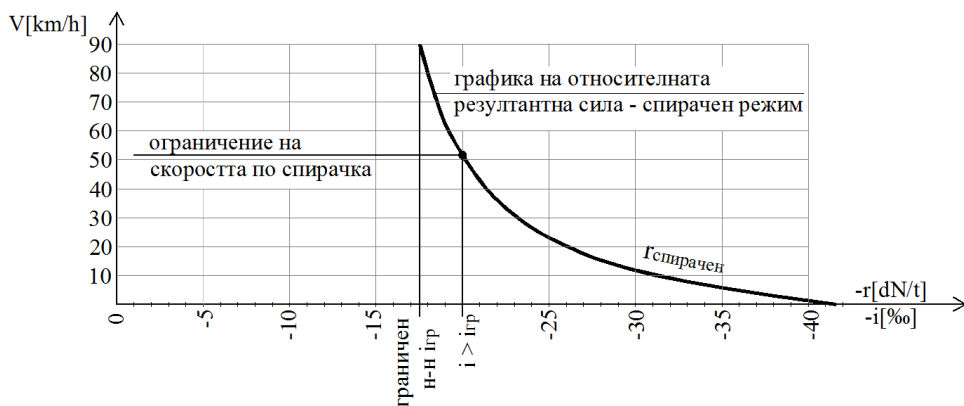
$$b = 1000\varphi_k\theta, \quad (6)$$

където  $\theta = \frac{\sum K}{Q}$  е спирачен коефициент на влака.

Стойностите на спирачния коефициент зависят от най-високата допустима скорост на движение и от най-стръмния наклон за дадения маршрут.

$z$  – коефициент, който характеризира степента на използване на спирачната сила. Изменя се в границите  $z = 0,5$  при служебно спирачно действие  $z = 1,0$  при извънредно (аварийно) спиране.

От диаграмата на относителната резултантна сила в спирачен режим се отчита стойността на граничния наклон за максималната скорост за жп линията, за дадения подвижен състав (фиг. 3). При наклони, по-големи от граничния, се налага ограничаване на скоростта по спирачка, а не заради геометрията на пътя.



Фиг. 3. Гранична стойност на наклона по надолнище

Изминатият спирачен път се получава след интегриране на уравнението за движение на влака (УДВ) за спирачен режим, но точното интегриране на УДВ е доста трудно поради факта, че съпротивленията и спирачната сила зависят от изменението на скоростта. За целта се използва приблизително интегриране като се приема, че относителната резултантна сила е константна величина за всеки скоростен интервал.

Изминатият елементарен спирачен път  $\Delta S$  [m] за даден скоростен интервал е:

$$\Delta S = \frac{4,17(v_1^2 - v_2^2)}{(w_{\text{от}} + zb \pm i)}, \quad (7)$$

където  $v_1$  и  $v_2$  са началната скорост и крайната скорост за интервала, km/h;

$w_{\text{от}}$  – относително съпротивление на влака при движение в безтягов режим, dN/t;

$b$  – относителната спирачна сила, dN/t;

$z$  – коефициент, характеризиращ степента на използване на спирачната сила;

$+i$  – стойност на наклона при качване, ‰;

$-i$  – стойност на наклона при слизане, ‰.

Изминатият спирачен път от дадена начална скорост до  $v_{\text{кр}} = 0$  е  $S = \sum \Delta S_i$ .

## 3.2. Метод на UIC

Оценка на спирачната ефективност според [4] са спирачният процент  $\lambda$  и спирачната маса  $B$ . Стойността на спирачния процент зависи от дължината на спирачния път и от скоростта, от която започва спирането.

### 3.2.1. Процес на образуване на спирачната сила при возила с калодки (Tread brake unit) според EN 14531-6 [9]

Спирачната сила за една калодка може да се пресметне, ако се знае налягането на изхода на спирачния цилиндър  $F_c$ , [9], както следва:

$$F_{B,C} = F_n \mu, \quad (8)$$

където  $F_n = F_c i_{rig} \eta_{rig,dyn} + F_{s,rig}$  е натискава сила, приложена на калодката [9].

$\mu$  – коефициент на триене.

Коефициентът на триене зависи като цяло от скоростта на движение, температурата, натиска на калодката, влажността. Методите за определянето му са дадени в EN15328 [10].

Спирачната сила за целия влак се получава като сума от спирачните сили на всички калодки.

### 3.2.2. Определяне на външните сили (съпротивления при движение напред и съпротивление от наклон)

- Съпротивление на влака при движение напред

Числените стойности на това съпротивление се получават като се използват данни за подобни превозни средства или опитно. Формулите за пресмятане съдържат първи член ( $A$ ), независещ от скоростта на движение, втори член ( $B$ ), пропорционален на скоростта (взаимодействие между возилото и пътя) и трети член ( $C$ ), пропорционален на силата на скоростта, аеродинамично съпротивление.

$$F_{Ra} = A + Bv + Cv^2, \quad (9)$$

където  $F_{Ra}$  е моментна стойност на съпротивлението на влака [9];

$v$  – моментна скорост;

$A$ ,  $B$ ,  $C$  – характеристични коефициенти на возилото.

Коефициентите  $A$ ,  $B$ ,  $C$  са функция на различни параметри като маса, дължина и т.н.

- Съпротивление от наклон

$$F_g = \frac{m_{st} g_n i}{\sqrt{i^2 + 1}}, \quad (10)$$

където  $F_g$  е сила на теглото на влака;

$m_{st}$  – статична маса на влака;

$g_n$  – стандартно ускорение от свободно падане;  
 $i$  – наклон (изкачващият наклон е с положителен знак).

### 3.2.3. Изчисляване на спирачния път

Спирачният път може да се изчисли по стъпки, като се използва общият метод, основан на уравнението на движение. Времето, необходимо за спиране на влака, се разделя на интервали  $\Delta t \leq 1$  s и се изчислява ускорението за всеки интервал.

$$a_i = \frac{\sum F_i + W_i}{m_e}, \quad (11)$$

където  $\sum F_i$  е сума от забавящите (спирачните) сили на всички спирачки за времеви интервал  $i$ ;

$W_i$  – съпротивление срещу движението напред за времеви интервал  $i$ ;

$m_e$  – еквивалентна маса на возилото (включват се и въртящите маси);

$a_i$  – забавящо ускорение за времеви интервал  $i$ .

Скоростта в края на интервала е  $v_{i+1} = v_i - a_i \Delta t$ .

Спирачният път за дадения интервал  $\Delta t$  е  $\Delta S_i = v_{mi} \cdot \Delta t$ .

Изминатият спирачен път от дадена начална скорост  $v_n$  до  $v_{кр} = 0$  е  $S = \sum \Delta S_i$ .

### 3.2.4. Спирачна маса $B$ и спирачен процент $\lambda$

Спирачната възможност на дадено возило (вагон, локомотив) се състои в това да се осигури спиране в рамките на определено разстояние. Ненадвишаването на това спирачно разстояние трябва да е гарантирано за всички възможни конфигурации на пътя. За доказване на спирачния път са проведени редица тестове с различни возила, оборудвани с различни спирачни системи. На базата на изчисления и корекции според резултатите от тестовете за различните видове вагони се определя спирачната им маса. Спирачната маса представлява оценка на спирачните възможности на дадено возило (вагон). Спирачната маса  $B$  [t] задължително се надписва върху всеки вагон.

За оценка на спирачната ефективност на влака като цяло се използват „криви за оценка на спирачката“ [4]. Тези криви са изведени опитно като са различни настройки на спирачките и начална скорост на спиране. От кривите за оценка на спирачката може да се отчете спирачния процент на влака  $\lambda$  [%], във функция на скоростта, от която започва спирането, и изискуемият спирачен път.

## 3.3. Сравнение на методите на ОСЖД и UIC

Разглеждайки описаното в точки 3.1 и 3.2 можем да кажем следното:

1. Двата метода дават възможност да се определи силата на натиск на една калодка, а чрез нея и спирачната сила за една калодка.

2. При двата метода има възможност за определяне на съпротивленията при движение във функция от скоростта на база на сходни емпирични зависимости.

3. Двата метода използват за основа на изчисленията спирачния път, получен чрез интегриране на уравнението за движение на влака. Въз основа на изискуемия (допустим, препоръчителен) спирачен път се избира:

- Спирачният коефициент на влака  $\theta = \frac{\sum K}{Q}$  според ОСЖД.
- Спирачният процент на влака  $\lambda = \frac{B}{B_{train}} 100$  според УИС.

Видно е, че методът за изчисляване на спирачния път според УИС е съпоставим с метода преподаван в УАСГ до сега. И в двата случая се работи с крайни нараствания на времето и с константни средни стойности на силите за дадения скоростен интервал.

4. Главната разлика между двата метода е, че оценката на спирачната ефективност (спирачен коефициент ОСЖД или спирачен процент УИС) се базира на различни параметри. При ОСЖД метода е базирана на сумарната натискова сила на всички калодки, докато при УИС метода е базирана на спирачната маса.

### 3.4. Зависимости между сумарния спирачен натиск $\Sigma K$ и спирачната маса $B$

Основен нормативен документ, даващ правилата за техническа експлоатация, движението на влаковете и сигнализация в железопътния транспорт в РБ, е наредба 58. Изследването на факторите показва, че наредба 58 е хармонизирана с изискванията на фиш 544-1 на УИС и регламент No 1302/2014 на ЕК. Това означава, че по действащата към момента у нас нормативна уредба основна част от техническите характеристики на спирачната система на вагоните е спирачната маса. В приложение 12 на наредба 58 са дадени спирачните проценти на влаковете за бързодействащи или бавнодействащи спирачки в съответствие с предсигналното разстояние, скоростта на движение и наклона.

За да може да се използва графичният начин за интегриране на УДВ за определяне на скоростта на движение във функция от надлъжния наклон на пътя, времепътуването и разходите на енергия за движение на влака, е необходимо да се намери връзката между спирачната маса  $B$  и сумарната сила на притискане на всички калодки  $\Sigma K$ .

Спирачната маса на пътническия подвижен състав се определя по формулата [7]:

$$B = \sum Kq, \quad (12)$$

където  $\sum K$  е сумарна сила на притискане на чугунените калодки в 10 kN;

$q$  – емпиричен коефициент, получен като функция от силата на притискане на спирачната калодка.

Коефициентът  $q$  отразява практически установеното съотношение между сумарната натискова сила, действаща във фрикционните възли на една колоос към предаваната от тази колоос към релсата нормална сила.

Спирачната маса на товарни вагони се определя по формулата [7]:

$$B = \frac{10}{7} \sum K\gamma, \quad (13)$$

където  $\sum K$  е сумарна сила на притискане на чугунените калодки в 10 kN;

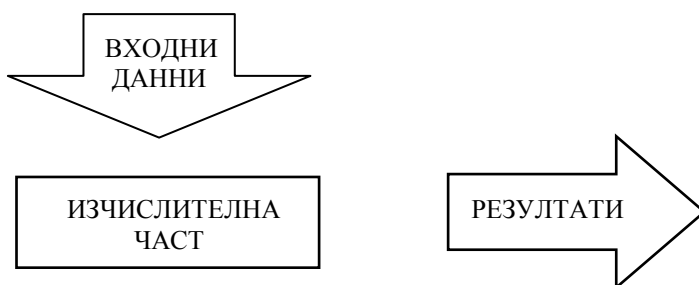
$\gamma$  – емпиричен коефициент, получен като функция от времето за напълване на спирачния цилиндър, скока на началното налягане и силата на притискане на спирачната калодка.

Диаграмите за определяне на коефициентите  $q$  и  $\gamma$  са дадени в [7].

Ако се знае спирачната маса на всеки от вагоните, може от уравнения (12) и (13) да се получи сумарната сила на притискане на чугунените калодки за вагона. При зададен спирачен процент, съобразен с необходимата дължина на спирачния път, може да се намери спирачната маса за влака като цяло, а оттам и сумарното притискане на всички чугунени калодки  $\sum K$ . Според  $\sum K$  се пресмята спирачният коефициент на влака  $\theta$  и относителната спирачна сила  $b$ .

#### 4. Програма за изчисляване на спирачния път

Въз основа на изложените дотук методи и сравнението между тях в среда на Excel е разработен алгоритъм за решаване на спирачни задачи, като заложените постановки са валидни за конвенционален жп състав, чиито фрикционни възли са с калодки. Най-общо този алгоритъм е представен на следващата блок-схема.



##### ВХОДНИ ДАННИ

1. Задаване на целева точка (точка от трасето, където влакът трябва да спре или да премине с определена скорост). Целевата точка се дефинира с километрично положение и допустима скорост.

2. Данни за трасето в близост до целевата точка.

Елементи на хоризонталната геометрия (прави и криви). Моделират се с километрично положение на точките на промяна на кривината.

Нивелетна линия – елементите на надлъжния профил се дефинират с наклон и дължина или с километрично положение на чупката и стойности на предходен и следващ наклон.

3. Данни за подвижния състав.

- Маса на локомотива и вагоните (маса на влака).
- Дължина на влака.
- Спирачна обезпеченост на влака (задаване на спирачен процент, пресмятане на спирачната маса и оттам връзка между спирачна маса и  $\sum K$ ).

За коректно отчитане на инерционните характеристики на състава се дефинира коефициент  $\gamma$ , който е отношението между въртящите се и транслиращи се маси в състава.

## ИЗЧИСЛИТЕЛНА ЧАСТ

### 1. Теоретични постановки

Влакът се разглежда като материална точка с маса, съсредоточена в центъра на тежестта. Фрикционни възли се приемат с калодки и се използва осреднен спирачен натиск, еднакъв за всички калодки. Разглеждат се само външните сили, действащи на влака. Основните съпротивления на подвижния състав се моделират като квадратни функции на скоростта. Използва се аналитична функция на скоростта за получаване на коефициента на сцепление във фрикционния възел. Независимата променлива, по която се интегрира диференциалното уравнение за движение на влака, е разстоянието  $S$ . Избира се дискретизационен интервал по разстояние  $\Delta S$ . За подобряване на крайния резултат се дефинира критерий за намаляване на дискретизационния интервал по разстояние, който изглажда е окончателната крива в участъците, където първата производна на функцията на резултатната сила е с голяма стойност. Нивелетната линия се приема като поредица от прави елементи с постоянни наклони. Кривината на трасето се моделира като билинейна функция на километража.

### 2. Математически модел на решението

$$V_2 = \sqrt{V_1^2 - 2\zeta\Delta S(r(v) - w_i - w_r)}, \quad (14)$$

където  $V_2$  е търсена скорост в края на дискретизационния интервал, km/h;

$V_1$  – търсена скорост в началото на дискретизационния интервал, km/h;

$\zeta$  – ускорение, което влакът би получил при действие на относителна резултатна сила  $r = 1 \text{ dN/t}$ ;

$\Delta S$  – дискретизационен интервал по разстояние, m;

$r(v)$  – относителна резултатна (равнодействаща) сила при спирачен режим, dN/t;

$w_i$  – допълнително съпротивление от наклон, dN/t;

$w_r$  – допълнително съпротивление от крива, dN/t.

Уравнение (14) се решава итерационно до достигане на началната скорост/прага на сходимост. Разликата между километража, в който се достига началната скорост и километража на целевата точка дава действителния спирачен път.

Общият спирачен път  $S_0$  е:

$$S_0 = S_{\text{п}} + S_{\text{д}}, \quad (15)$$

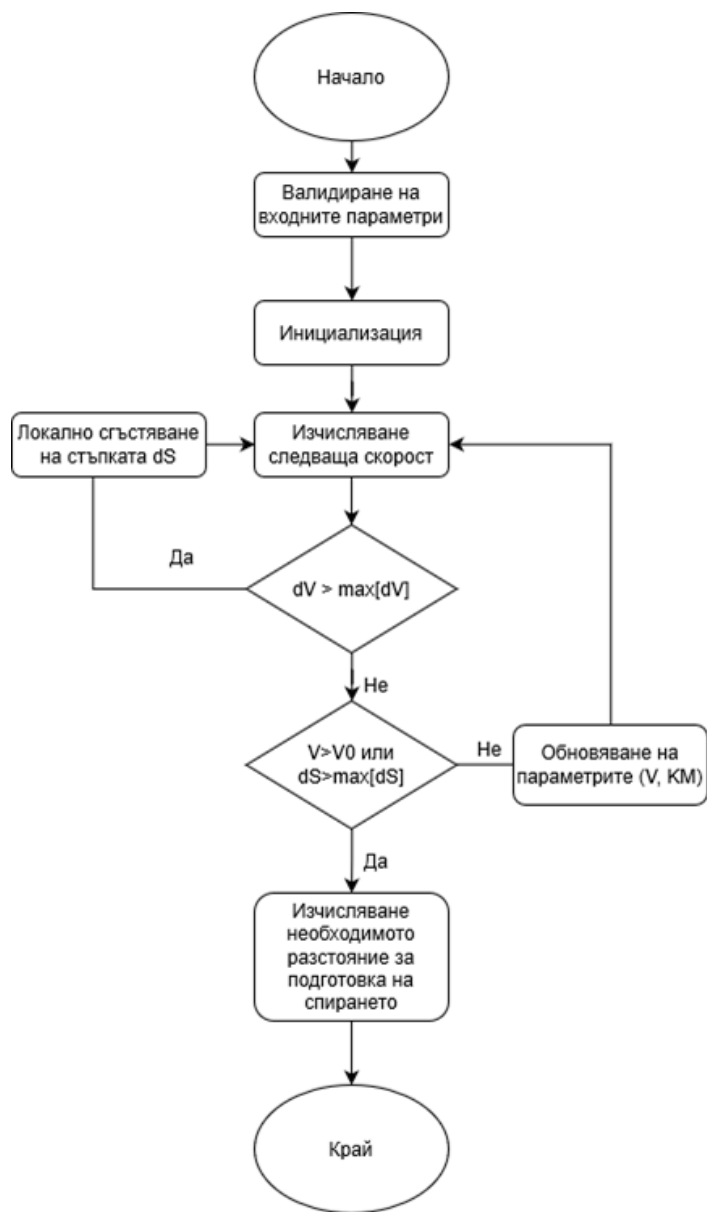
където  $S_{\text{п}}$  е подготвителен спирачен път, m.

Методът за определянето на подготвителния спирачен път е даден в [6].

$S_{\text{д}}$  – действителен спирачен път, m.

## РЕЗУЛТАТИ

Дължината на спирачния път в графичен вид и таблица със стойностите на скоростта във функция от пътя.



Фиг. 4. Интерфейс на програмата

#### 4.1. Сравнение между предписанията на наредба 58 [1], фиш UIC [4] и пресметнатия с програмата за спиращи изчисления спиращен път.

В следващата таблица е дадено сравнение между спиращен процент и спиращен път.

Таблица 2. Дължина и среден наклон на стръмните надолнища

| Наклон,<br>% | V,<br>km/h | Спирачен<br>път,<br>m | Спирачен<br>процент по<br>наредба 58 | Изчислен с<br>програмата<br>сп. път | Спирачен<br>процент по<br>UIC фиш | Изчислен с<br>програмата<br>сп. път |
|--------------|------------|-----------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| 1            | 2          | 3                     | 4                                    | 5                                   | 7                                 | 8                                   |
| -20          | 50         | 400                   | 57                                   | 312                                 | 68                                | 261                                 |
| -20          | 60         | 400                   | 77                                   | 344                                 | 93                                | 293                                 |
| -20          | 50         | 700                   | 37                                   | 602                                 | 45                                | 427                                 |
| -20          | 60         | 700                   | 48                                   | 612                                 | 56                                | 484                                 |
| -20          | 70         | 700                   | 61                                   | 634                                 | 72                                | 517                                 |
| -20          | 80         | 700                   | 78                                   | 639                                 | 90                                | 549                                 |
| -20          | 60         | 1000                  | 39                                   | 883                                 | 46                                | 648                                 |
| -20          | 70         | 1000                  | 49                                   | 874                                 | 55                                | 725                                 |
| -20          | 80         | 1000                  | 61                                   | 877                                 | 68                                | 757                                 |
| -20          | 90         | 1000                  | 74                                   | 900                                 | 80                                | 817                                 |
| -20          | 100        | 1000                  | 90                                   | 904                                 | 96                                | 840                                 |
| -10          | 50         | 400                   | 42                                   | 370                                 | 51                                | 306                                 |
| -10          | 60         | 400                   | 61                                   | 393                                 | 74                                | 329                                 |
| -10          | 60         | 700                   | 36                                   | 670                                 | 41                                | 577                                 |
| -10          | 70         | 700                   | 48                                   | 684                                 | 55                                | 601                                 |
| -10          | 80         | 700                   | 63                                   | 708                                 | 72                                | 624                                 |
| -10          | 90         | 700                   | 82                                   | 712                                 | 93                                | 637                                 |
| -10          | 80         | 1000                  | 47                                   | 962                                 | 51                                | 877                                 |
| -10          | 90         | 1000                  | 59                                   | 975                                 | 64                                | 900                                 |
| -10          | 100        | 1000                  | 74                                   | 980                                 | 95                                | 782                                 |

## 4.2. Изводи

Анализът на данните от табл. 2 показва:

1. При еднакъв спирачен път навсякъде спирачният процент според наредба 58 е по-малък от този според фиш UIC 544-1.

2. Спирачният път, пресметнат с програмата (графа 8) при задания в предписанията на фиш UIC 544-1, е по-кратък, като за по-високите скорости на движение съвпадението е по-добро (графа 8).

3. Отклонението от дължината на спирачния път (графа 6), пресметнат въз основа на сирачните проценти от наредба 58, е по-малко, но в някои случаи се получава по-дълъг от нормативния спирачен път.

4. Доброто съвпадение на дължината на спирачния път дава основание софтуерът да бъде използван при обучението на студенти и докторанти в катедра „Железници“.

## 5. Състояние на железния път

До тук се излага теоретичната страна на проблема при идеализирана среда или стандартни условия. Например надлъжен наклон по проект, състояние на пътя в рамките на техническите допуски, експлоатационно състояние на возилото и т.н. На практика возилото, влакът или автономното возило може да се движи при: лошо състояние на возилото в резултат на недостатъчна спирачна сила, променен коефициент на триене, недоб-

ро състояние на железния път, влошени условия на средата и др. За целта се изследват и параметрите на железния път:

- опасни участъци в железопътната мрежа съгласно нормативната уредба,
- състояние на железния път вследствие на неизвършено навреме текущо поддържане, но с параметри в рамките на допустимите за разрешената максимална скорост и
- забавени или непроведени ремонти с намаляване на максимално разрешената скорост в участъка.

### **5.1. Наблюдавани проблеми при експлоатацията на някои силно наклонени участъци**

От табл. 1 се вижда, че участъците с най-голям среден наклон и най-голяма дължина се намират по IV жп линия. Данни относно състоянието на железния път (наклони, радиуси на хоризонталните криви, релсо-траверсова скара), възникнали аварии, проблеми при текущото поддържане на пътя по IV жп линия ни бяха предоставени от жп секция Горна Оряховица. Наблюдавани са следните проблеми:

1. В участъка Моруница – Бяла са регистрирани два случая на запалване на траверсите от хвърчащи искри от композитни калодки на товарни влакове. В този участък от km 66+235 до km 73+576 средният наклон на пътя е 24,9‰ и 2842 m от участъка са с дървени траверси. Проблеми със запалвания на елементи от горното строене на железния път има само в участъците с дървена траверсова скара. В участъците Плачковци – Кръстец (наклон 23,21‰, дължина 6970 m) Кръстец – Радунци (наклон 22,83‰, дължина 5005 m) не са регистрирани проблеми, но там пътят е подновен и новото горно строене е безнаставов релсов път (БРП) с и траверси СТ – 6.

2. В участъците с наставов релсов път с траверси СТ-4 се забелязва надлъжно свличане на релсовите нишки по наклона, водещо до нерадиалност на наставите. При някои настави изместването е доста голямо и връзката между двете релси излиза извън зоната на двойния дървен траверс. Това е много трудно за оправяне при текущото поддържане на пътя. В участъците, подновени от 2011 г. насам, които са с БРП, релси 60E1 и траверси СТ – 6 не се наблюдава надлъжно свличане на релсите. Траверсите в тези участъци са 1720 ÷ 1760 бр./km. Няма регистрирани случаи на скъсвания на заварки, породени от голям надлъжен наклон.

3. При недобре притегнато скрепление, особено ПАК -68, започва процес на завъртане на траверса спрямо надлъжната им ос. Впоследствие проблемът се задълбочава и това води до невъзможност за поддържане на междурелсието и проектното ниво на релсовите нишки.

4. В участък Янтра – Акация (наклон 15‰, дължина 4960 m), горно строене – БРП (траверси СТ – 6, релси 49E1) се наблюдават проблеми, предизвикани от свличане на езика на първата входна стрелка на гара Янтра.

5. Участъците с големи надлъжни наклони в профил често са съчетани в план с хоризонтални криви с малък радиус. За илюстрация на казаното може да се използват участъците Борово – Моруница от km 62+417 до km 65+585 с наклони между 21 и 27‰, 10 хоризонтални криви с радиуси 250 и 355 m; Плачковци – Кръстец от km 185+400 до km 192+945 с наклони между 17 и 26‰, 15 криви с радиуси между 275 и 300 m; Кръстец – Радунци от km 202+915 до km 205+890 с наклони между 22,5‰ и 27‰, 8 криви с радиус 275 m и участък Янтра – Горна Оряховица от km 111+180 до km 115+292 с наклони от 14,28‰ до 16,34‰, 5 криви с радиус 300 m. При малки радиуси на кривите има интензивно износване на релсовите нишки (фиг. 5).



**Фиг. 5. Износване на релсата**



**Фиг. 6. Участък със странично износване**

Налага се използването на лубриканти за намаляване на износването (фиг. 6), но се намалява сцеплението между колелото и релсата и се затруднява спирането. Необходимо е много прецизно дозиране на лубриканта, но въпреки това са регистрирани проблеми.

6. Освен при спускане, проблеми се наблюдават и при изкачването на стръмните участъци. През 2016-та година тежък влак с 3 локомотива (единият в последствие се оказва повреден) не успява да изкачи междугарието Янтра – Акация. Вследствие от буксуването при трите опита за изкачване са нанесени съществени повреди на релсите (фиг. 7).



**Фиг. 7. Повредени релси вследствие буксуване на товарен влак**

Беше направено и обследване на състоянието на пътя и в участък Вакарел – Веринско по I жп линия. Подновяване на участъка е направено през 2001 – 2002 г. Стръмният участък в това междугарие е с дължина 6160 m, средната стойност на наклона е 21%, минимален радиус на хоризонталните криви – 500 m. Конструкцията на горното строене е БРП с траверси СТ – 6 и релси тип S49. Линията е двупътна, което означава, че по единия коловоз (път 2) се движат качващите се влакове, а по другия (път 1) слизациите. При направения оглед не бяха констатирани разлики в износването на релсовите нишки на двата коловоза. Не се забелязва и завъртане на траверсите около надлъжната им ос. Наблюдават се обаче надлъжни пукнатини върху траверсите и на двата пътя, като може да се каже, че при път 1 са повече. На места има подменени траверси (фиг. 8), поради отваряне на пукнатини, по-големи от допустимите.



**Фиг. 8. Компрометирани траверси в участък Вакарел – Веринско**

## **5.2. Изводи**

От направеното проучване на състоянието на пътя и проблемите при експлоатацията на някои силно наклонени участъци може да се каже следното:

1. Завъртането на траверсите, изваждането на ПАК-болтовете, счупването на пружинни пръстени на скрепленията, надлъжното свличане на релсите са по-големи в участъците с по-интензивно товарно движение.

2. За избягване на евентуални пожари от хвърчащи от калодките искри дървените траверси в участъците с наклон, по-голям от 15%, е добре поетапно да се заменят със стоманобетонни.

3. При конструкция на горното строене с безнаставов релсов път се наблюдават значително по-малко проблеми при поддържане и експлоатация на силно наклонените участъци. Това означава, че за поемане на допълнителните надлъжни сили, породени от движението на влаковете в спиращ режим, е необходима по-солидна конструкция на горното строене (БРП).

## **6. Мерки за подобряване на състоянието на пътя и безопасността на движението в силно наклонените участъци**

Решенията, свързани с опасните участъци при движение на влака в спиращ режим, са две.

- Премахване на опасните участъци.

Такива решения се налагат в участъците от жп мрежата на страната, свързващи европейските жп магистрали, като се прави цялостна реконструкция на дадения участък. Премахването на стръмните наклони води до намаляване на времетраенето, понеже отпадат ограниченията на допустимата максимална скорост по спирачка. Пример са решенията от оперативна програма „Транспорт и транспортна инфраструктура“ в участъка София – Пловдив. Чрез проектиране и строителство на големи тунели и мостове, наклоните в участъка Побит камък – Сестримо се намаляват и се осигурява оперативна съвместимост с железопътните магистрали на ЕС. Недостатък е цената, която е стотици милиони левове.

- Подобряване на оперативната работа или експлоатация на трасето с големите опасни наклони.

След опасния участък се строи контролна точка, т.нар. „чек пойнт“, в която се измерва температурата на буксата, колелото и калодката, осовото натоварване, разположе-

ние на натоварването по колооси, габарита, проверка за окопани бандажи. Ако детекторът установи превишаване на температурата, то влакът трябва да престои в най-близката гара и да изчака нормализиране на експлоатационната температура. Проблем пак е цената на контролните точки. В момента тя достига десетки хиляди левове. За участъците, които са включени в оперативни програми „Транспорт“ и „Транспорт и транспортна инфраструктура“, е предвидено изграждане на универсални контролни точки. В тях е предвидено и измерване на температурата на колооста – букса и спиращен блок. Ако детекторът установи превишаване на температурата, то влакът трябва да престои в най-близката гара и да изчака нормализиране на експлоатационната температура. Подробности относно устройството на контролната точка са дадени в [11]. Въз основа на сътрудничеството ÖBB – НК „ЖИ“, инж. д-р Андреас Шьобел от ТУ Виена предлага стратегия за определяне на рисковите участъци по цялата жп мрежа на РБ [11]. При степенуване на опасните надолници може да се използва подобен подход, основаващ се на:

- Дължина и среден наклон на надолницето;
- Статистически данни за брой преминаващи пътнически и товарни влакове;
- Данни за възникнали аварии.

Направените проучвания и изготвената карта с опасни надолници (фиг. 1) дават основание да се твърди, че по жп мрежата на РБ има общо 25 опасни участъка. Поради високата цена за изграждане не е възможно да се сложат контролни точки на всички. Освен това към момента интензивността на движение на влаковете не е голяма. Може да се направи изводът, че контролни точки за подобряване на оперативната работа и експлоатацията би следвало да се изградят приоритетно, в участъците от мрежата, намираща се по направление на трансевропейските коридори. Такива са:

- Участък Калотина – Сливница, част от жп линията София – граница с Република Сърбия (транспортен коридор 10);
- Плачковци – Дъбово, участък намиращ се по направлението Русе – Александруполис (транспортен коридор 9);
- Видбол – Орещец, участък намиращ се по направлението Видин – София – КПП „Кулата“ (транспортен коридор 4).

## ЛИТЕРАТУРА

1. НАРЕДБА 58 от 2.08.2006 г. за правилата за техническата експлоатация, движението на влаковете и сигнализацията в железопътния транспорт. Издадена от министъра на транспорта, обн. ДВ, бр. 73 от 5.09.2006 г., изм., бр. 88 от 2007 г., изм. и доп., бр. 43 от 2009 г., бр. 68 от 2014 г., и бр. 97 от 23.11.2018 г., в сила от 24.02.2019 г.
2. COMMISSION REGULATION (EU) No 1302/2014 of 18 November 2014 concerning a technical specification for interoperability relating to the ‘rolling stock — locomotives and passenger rolling stock’ subsystem of the rail system in the European Union, Official Journal of the European Union, L 356/228-393.
3. COMMISSION REGULATION (EU) No 1299/2014 of 18 November 2014 on the technical specifications for interoperability relating to the ‘infrastructure’ subsystem of the rail system in the European Union.
4. UIC CODE 544-1: Brakes – Braking performance. 6th edition, October 2014.
5. *Димитров, Т., Тотев, Й., Събев, М.* Железопътно строителство. София, УАСГ, 1991.
6. *Тодоров, Ст.* Проектиране и строителство на жп линии. София, УАСГ, 2006.

7. Гребенюк, П. Т. Правила тормозных расчетов. Интекст, Москва 2004, ISBN 5-89277-051-6, 112 стр.

8. *Иноземцев, В. Г., Казаринов, В. М., Ясенцев, В. Ф.* Автоматические тормоза. Москва, Транспорт, 1981.

9. DIN EN 14531-6:2009: Railway applications - Methods for calculation of stopping and slowing distances and immobilization braking - Part 6: Step by step calculations for train sets or single vehicles.

10. DIN EN 15328:2005 Railway applications – Braking – Brake pads; German version.

11. *Schöbel, A.* Wayside train observation at Austrian federal railways, International science practice conference УАСГ2009, 29-31 October 2009, Annual of UACG, свитък XI, Transportation engineering.

### **Благодарности**

Настоящата научноизследователска разработка по договор БН-218/19 е подкрепена финансово от Център за научни изследвания и проектиране при УАСГ.

## **RESEARCHING THE FACTORS DETERMINING THE SAFETY OF THE TRAIN MOVEMENT IN BRAKING REGIME**

**S. Todorov<sup>1</sup>, K. Kutsarova-Dimitrova<sup>2</sup>, M. Iliev<sup>3</sup>**

*Keywords: braking performance, design of railway lines, interoperability*

### **ABSTRACT**

The Bulgarian railway network is part of the European railway infrastructure. In order to be competitive in the transport market, the railway network must ensure safe high-speed freight traffic. As of maximum permissible speed, the radii of the horizontal curves are considered to be a major limiting factor. If a higher design speed is needed, the railway line is reconstructed and the radii of the curves are increased. The impact that railway grades have on permissible speed is rarely reported. Current regulation for the design and construction of railway lines in the Republic of Bulgaria allows a 20% maximum grade for hilly terrain at a design freight train speed of 100 ÷ 120 km/h. In the present study, grades of more than 14% are considered, as well as the difficulties in operation and maintenance, the restrictions imposed on freight train speed in steep descent sections, and the measures that can be taken to increase the speed of movement in these sections.

---

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

<sup>2</sup> Kina Kutsarova-Dimitrova, Chief Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. "Railway Construction", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: kina\_kutzarowa@abv.bg

<sup>3</sup> Matey Iliev, PhD student, Dept. "Railway Construction", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: matey\_iliev@outlook.com