

Д. М. КОЗАЧЕНКО (Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна)

ЕФЕКТИВНІ РЕЖИМИ ГАЛЬМУВАННЯ ВІДЧЕПІВ НА СОРТУВАЛЬНИХ ГІРКАХ

Формалізована та вирішена задача вибору режимів гальмування відчепів як задача пошуку таких швидкостей їх виходу з гальмових позицій, що забезпечують мінімальну величину вікон на сортувальних коліях та мінімальний ризик нерозділення відчепів на стрілках при заданому рівні безпеки сортувального процесу.

Ключові слова: сортувальна гірка, гальмування вагонів.

Формализована и решена задача выбора режимов торможения отцепов как задача поиска таких скоростей их выхода из тормозных позиций, которые обеспечивают минимальную величину окон на сортировочных путях и минимальный риск неразделения отцепов на стрелках при заданном уровне безопасности сортировочного процесса.

Ключевые слова: сортировочная горка, торможение вагонов.

The problem of braking modes of cuts of cars choice has been formulated and solved as a search problem of such speeds of cars leaving braking positions, which would ensure minimum gaps on sorting tracks and minimum risk of fail in uncoupling of cuts on switches at the prescribed safety level of classification process.

Key words: sorting hump, breaking up of cars.

Основним заходом, що забезпечує підвищення безпеки руху, покращення умов праці та зменшення експлуатаційних витрат на переробку вагонопотоків на сортувальних станціях є автоматизація процесу розформування-формування составів на сортувальних гірках.

В сучасних умовах розроблені методи вирішення задачі вибору режимів гальмування відчепів в детермінованій постановці [1]. Такі методи можуть використовуватись для вирішення задач проектування сортувальних гірок. В той же час, реальні системи керування швидкістю скочування при виборі режиму гальмування відчепа повинні забезпечити дотримання умов інтервального та прицільного гальмування в умовах відсутності точної інформації про ходові властивості відчепів і неточній реалізації гальмовими позиціями заданих режимів. Вирішення вказаних задач перш за все повинно ґрунтуватись на удосконаленні алгоритмів управління скочуванням відчепів так, як це вимагає значно менше коштів чим ускладнення технічного забезпечення сортувальних гірок. В умовах невизначеності інформації про ходові характеристики відчепів в якості управляючого параметру може розглядатись режим гальмування відчепа \mathbf{v} , що характеризується заданою швидкістю його виходу з першої (ВГП) та другої (СГП) гальмових позицій, відповідно v' та v'' . Оцінка ефективності режимів регулювання швидкості їх руху здійснюється за двома імовірнісними показниками: математичне очікуван-

ня величини вікна, що утворюється на сортувальній колії \bar{l}_B та ризик нерозділення відчепів r_n . Задача регулювання швидкості скочування відчепа полягає у пошуку таких режимів гальмування \mathbf{v} , що забезпечують досягнення найкращих показників інтервального та прицільного гальмування при безумовному виконанні показників безпеки руху і формулюється як задача мінімізації критеріїв:

$$\begin{cases} \bar{l}_B(\mathbf{v}) \rightarrow \min \\ r_n(\mathbf{v}) \rightarrow \min \\ \mathbf{v} \in \Omega_d \end{cases},$$

де Ω_d – область допустимих режимів гальмування відчепів.

Область Ω_d визначається як $\Omega_d = \Omega_n \cup \Omega_{n1}$, де Ω_n – область допустимих режимів гальмування по вимогам прицільного регулювання швидкості скочування відчепів, Ω_{n1} – область допустимих режимів гальмування по вимогам інтервального регулювання швидкості скочування відчепів. При цьому область Ω_n складається з двох підобластей Ω_{n1} та Ω_{n2} , в першій з яких середня величина вікна на сортувальній колії зменшується при підвищенні швидкості виходу відчепа з другої гальмової позиції (СГП) так, що

$$\bar{l}(v'_1, v''_1) > \bar{l}(v'_1, v''_2) \text{ при } v''_1 < v''_2 \text{ де } \mathbf{v} \in \Omega_{n1} \quad (1),$$

а в другій має постійне значення і не залежить від швидкості руху відчепа по спускній частині гірки.

Критерії \bar{l}_b та r_n не є компромісними. Так у прикладі, представлено на рис. 1, виконано оцінку режимів гальмування $v_1 = \{2,8; 3,1\}$ та $v_2 = \{2,8; 2,5\}$ за вказаними критеріями. При використанні режиму v_1 математичне очікування величини вікна на сортувальній колії складає 7,84 м, а ризик нерозділення 0,0048. Використання режиму v_2 , який передбачає зменшення швидкості виходу відчепа з СГП з 3,1 до 2,5 м/с, дозволяє збільшити інтервал між першим та другим відчепами розрахункової групи і зменшити ризик нерозділення відчепів до 0,000027. В той же час, зменшення швидкості виходу відчепа з СГП викликає збільшення математичного очікування величини вікна на сортувальній колії до 14,2 м.

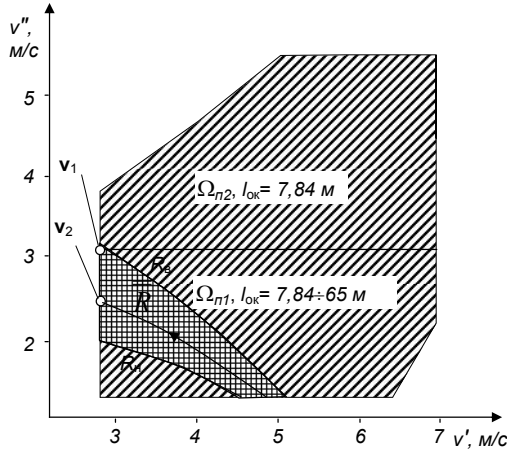


Рис. 1. Положення режимів, що забезпечують мінімум критеріїв \bar{l}_b та r_n в Ω_d .

Нехай \mathbf{d} – векторний критерій, що характеризує режим гальмування $\mathbf{d} = (\bar{l}_b, r_n)$, який приймає значення із деякого простору оцінок R^2 . Будь яке значення $\mathbf{d}(\mathbf{v}) = (\bar{l}_b(\mathbf{v}), r_n(\mathbf{v})) \in R^2$ векторного критерію \mathbf{d} при деякому $\mathbf{v} \in \Omega_d$ являє собою векторну оцінку режиму гальмування \mathbf{v} . При цьому,

$$\mathbf{d}(\mathbf{v}_1) > \mathbf{d}(\mathbf{v}_2) \Leftrightarrow \mathbf{v}_1 > \mathbf{v}_2 \text{ якщо } \bar{l}_b(\mathbf{v}_1) \leq \bar{l}_b(\mathbf{v}_2) \text{ та } r_n(\mathbf{v}_1) < r_n(\mathbf{v}_2)$$

Враховуючи, що для оцінки режимів гальмування використовується два критерії, то виникає задача пошуку ефективних (незрівнянних по Парето) рішень Ψ_e :

$$\Psi_e = P_d(\Omega_d) = \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{v}^* \in \Omega_d \text{ | не існує} \\ \text{такого } \mathbf{v} \in \Omega_d, \text{ що } \mathbf{d}(\mathbf{v}) > \mathbf{d}(\mathbf{v}^*) \end{array} \right\}$$

Конфігурація області Ψ_e залежить від взаємного розташування області Ω_n та лінії мініма-

льних ризиків \bar{R} . Відповідно до досліджень, виконаних у [2] для розрахункових груп з трьох відчепів, напрям зменшення ризиків нерозділення відчепів вздовж лінії \bar{R} залежить від співвідношення координат входу $s_{вх}(v_1)$ та виходу $s_{вх}(v_2)$ середнього відчепа на розділові стрілки у першій v_1 та другій v_2 парах.

Відповідно, для розрахункових груп із трьох відчепів можуть мати місце наступні варіанти.

Варіант 1: режим, що забезпечує мінімальний ризик нерозділення v_{mp} належить області $\Omega_{п1}$ $v_{mp} \in \Omega_{п1}$ (див. рис. 2, а та б).

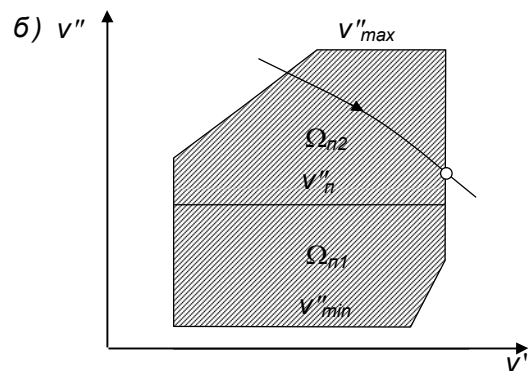
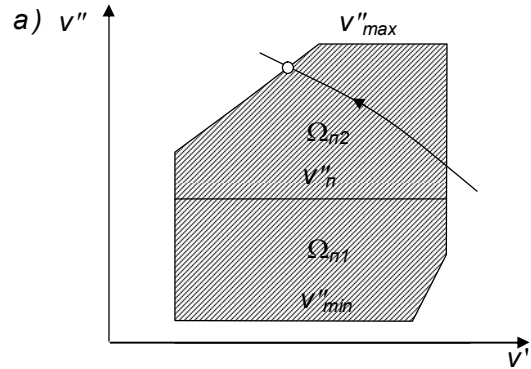


Рис. 2. Оптимальні режими гальмування відчепів при $v_{mp} \in \Omega_{п1}$: а – $s_{вх}(v_1) < s_{вх}(v_2)$; б – $s_{вх}(v_1) > s_{вх}(v_2)$.

Інші випадки мають місце, коли $v_{mp} \in \Omega_{п2}$.

В цих умовах обмеження швидкості виходу відчепів з СГП, яке необхідне для зменшення ризику нерозділення відчепів на стрілках, призводить до збільшення математичного очікування величини вікон на сортувальних коліях; тобто мають місце суперечності між умовами інтервального та прицільного регулювання швидкості скочування відчепа. При цьому мають місце наступні варіанти:

Варіант 2: режим v_{mp} відповідає точці перетину лінії \bar{R} з верхньою межею $\Omega_{п1}$ (див. рис. 3). Такі випадки можуть мати місце, коли $s_{вх}(v_1) < s_{вх}(v_2)$ та $\Omega_{п2} = \emptyset$. В цих умовах $v_{mp}'' = \max_{v \in \Omega} \{v''\}$ і, згідно з (1), в ОДР

відсутні режими такі, що $\bar{l}_B(\mathbf{v}) < \bar{l}_B(\mathbf{v}_{MP})$. Враховуючи, що $r(\mathbf{v}_{MP}) = \min_{\mathbf{v} \in \Omega_{п1}} r(\mathbf{v})$, то не існує такого режиму гальмування, що $\mathbf{v} \succeq \mathbf{v}_{MP}$, $\mathbf{v} \in \Omega_{п1}$ і режим \mathbf{v}_{MP} є оптимальним.

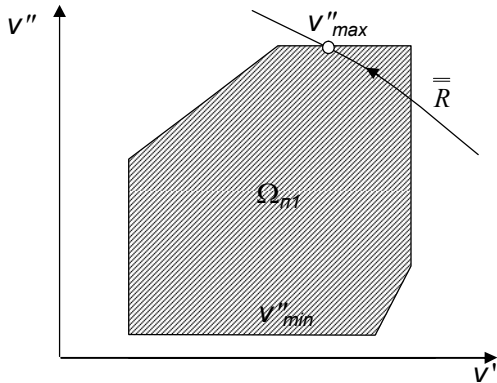


Рис. 3. Оптимальні режим гальмування відчепу в умовах, коли режим \mathbf{v}_{MP} відповідає точці перетину лінії \bar{R} з верхньою межею $\Omega_{п1}$.

Варіант 3: режим \mathbf{v}_{MP} відповідає точці перетину лінії \bar{R} з лівою межею $\Omega_{п1}$ (див. рис. 4). Такі випадки мають місце при $s_{Bx}(v_1) < s_{Bx}(v_2)$. Враховуючи умову (1), та те що $v''_{MP} = \max_{\mathbf{v} \in \Omega} \{v''\}$, то серед режимів таких що $v'' < v''_{MP}$ не може бути ефективних. Режими, такі що $v'' > v''_{MP}$ переважають режим \mathbf{v}_{MP} за критерієм \bar{l}_B .

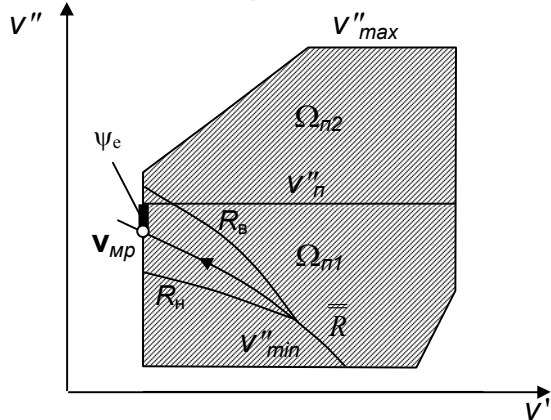


Рис. 4. Ефективні режими гальмування відчепу в умовах, коли режим \mathbf{v}_{MP} відповідає точці перетину лінії \bar{R} з лівою межею $\Omega_{п1}$.

Серед режимів таких, що $v'' > v''_{п1}$ не може бути ефективних так як, враховуючи (1) та гладкість поверхні відгуку, для будь якого режиму із області $\Omega_{п2}$ на верхній межі області $\Omega_{п1}$ можна знайти режим такий, що $\bar{l}(v'_1, v''_п1) < \bar{l}(v'_1, v''_2)$ та $r_H(v'_1, v''_п1) < r_H(v'_1, v''_2)$.

Для аналізу впливу швидкості виходу відчепів з ВГП v' на умови їх розділення з суміжними виконано моделювання скочування відчепів

при фіксованих значеннях v'' за умов

$$\begin{cases} v'' > v''_{MP} \\ s_{Bx}(v_1) < s_{Bx}(v_2) \end{cases} \quad (2)$$

Аналіз отриманих результатів показав, що при виконанні умов (2) справедливим є твердження

$$r_H(\mathbf{v}_1) < r_H(\mathbf{v}_2) \text{ якщо } v'_1 < v'_2 \text{ та } v''_1 = v''_2 \quad (3)$$

Із (3) слідує, що ефективний режим гальмування для кожного значення v'' відповідає мінімально допустимому значенню v' і знаходиться на лівій межі $\Omega_{п1}$. Таким чином, при виконанні умов (2) для деякого фіксованого значення v'' переважним буде режим з мінімальним допустимим значенням v' , так як усі режими, що мають однакове значення v'' мають однакові значення критерію \bar{l}_B , а значення критерію r_H зменшується зі зменшенням v' .

В результаті можна зробити висновок, що при $s_{Bx}(v_1) < s_{Bx}(v_2)$ область ефективних режимів визначається умовою

$$v''_{MP} \leq v'' \leq v''_{п1}, v' = \min\{v'(v'')\}, \mathbf{v} \in \Omega_{п1} \cup \Omega_{д1},$$

при цьому ефективні режими завжди розташовуються на лівій межі ОДР.

Варіант 4: режим \mathbf{v}_{MP} відповідає точці перетину лінії \bar{R} з правою (див. рис. 5, а) чи нижньою (див. рис. 5, б) межею $\Omega_{п1}$.

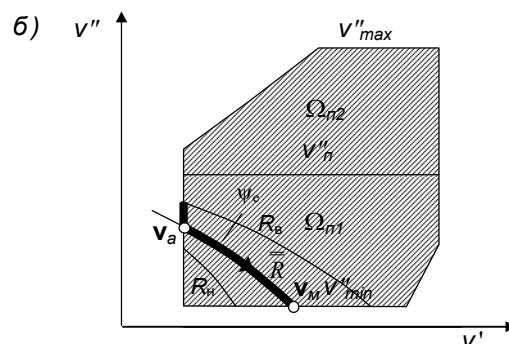
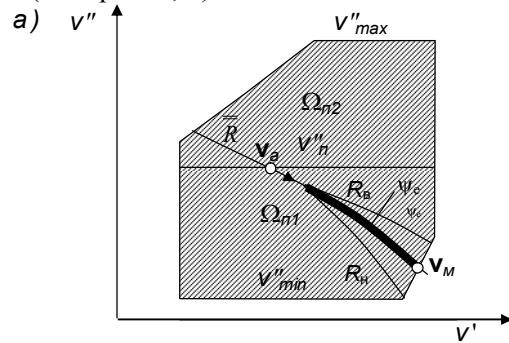


Рис. 5. Ефективні режими гальмування відчепів при $s_{Bx}(v_1) > s_{Bx}(v_2)$: а - лінія \bar{R} перетинає ліву межу $\Omega_{п1}$; б - лінія \bar{R} перетинає нижню межу $\Omega_{п1}$.

Нехай v_a – інша точка перетину \bar{R} з $\Omega_{п1}$. Враховуючи умову (1), та те що $v''_{mp} = \max_{v \in \Omega} \{v''\}$, то серед режимів таких, що $v'' < v''_{mp}$, не може бути ефективних. Режими такі, що $v'' > v''_{mp}$, переважають режим v_{mp} за критерієм \bar{l}_B . Враховуючи те, що для кожного значення v'' $v''_{mp} < v'' \leq v''_a$ мінімальний ризик досягається на лінії \bar{R} , то справедливим є твердження, що не існує таких режимів гальмування, для яких

$$v \geq v^*, v \in \Omega_{п1} \cup \Omega_{п2} \cup \bar{R}, v''_{mp} < v'' \leq v''_a.$$

Для аналізу впливу швидкості виходу відчепів з ВГП v' на умови їх розділення з суміжними виконано моделювання скочування відчепів при фіксованих значеннях v'' за умов

$$\begin{cases} v'' > v''_a \\ s_{вх}(v_1) > s_{вх}(v_2) \end{cases} \quad (4)$$

Аналіз отриманих результатів показав, що при виконанні умов (4) справедливим є твердження

$$r_n(v_1) < r_n(v_2) \text{ якщо } v'_1 < v'_2 \text{ та } v''_1 = v''_2$$

Звідси слідує, що при $v'' > v''_a$ ефективні режими розташовуються вздовж лівої межі $\Omega_{п1}$.

В умовах розформування можуть мати місце такі випадки, що коли в області можливих режимів гальмування відсутні режими, що одночасно задовольняють вимогам прицільного і інтервального гальмування відчепів $\Omega_{д} = \Omega_{п1} \cup \Omega_{п2} = \emptyset$. В цих умовах у якості найбільш ефективного режиму приймається режим, що забезпечує мінімальний ризик нерозділення відчепів при виконанні умов прицільного гальмування

Таким чином, область ефективних режимів гальмування визначається умовою

$$\Psi_{e,i} = \begin{cases} v_{mp} \text{ при } v_{mp} \in \Omega_{п2} \cup \Omega_{п1} \text{ або } \Omega_{д} = \emptyset \\ v'' > v''_{mp}, v' = \min(v'(v'')), v \in \Omega_{п1} \cup \Omega_{п2}, s_1 < s_2 \\ v''_{mp} \leq v'' \leq v''_a, v \in \Omega_{п1} \cup \Omega_{п2} \cup \bar{R}, s_1 > s_2 \\ v'' > v''_a, v' = \min(v'(v'')), v \in \Omega_{п1} \cup \Omega_{п2}, s_1 > s_2 \end{cases},$$

$$i=2..n-1.$$

В складі також присутні два відчепи, умови управління скочуванням яких суттєво відрізняються від інших – це перший та останній відчепи.

Умови управління скочуванням першого відчепу у складі відрізняються від умов управ-

ління скочуванням інших відчепів тим, що для нього відсутній попередній відчеп. У зв'язку з цим для першого відчепу склада оптимальним є швидкий режим скочування (див. рис. 6)

$$v_{1opt} = \left\{ \max_{v \in \Omega_{п1}} (v'), v''_{max} \right\}.$$

По-перше, цей режим передбачає мінімально допустиме гальмування відчепу уповільнювачами спускної частини гірки та забезпечує найшвидше звільнення стрілочної зони і найменший ризик нерозділення першого та другого відчепу склада. По-друге, у зв'язку з тим, що режиму v_{1opt} відповідає максимально допустима швидкість виходу відчепу з СГП, то, з урахуванням (1), в $\Omega_{п1}$ не може бути такого режиму, що $\bar{l}_B(v) < \bar{l}_B(v_{1opt})$.

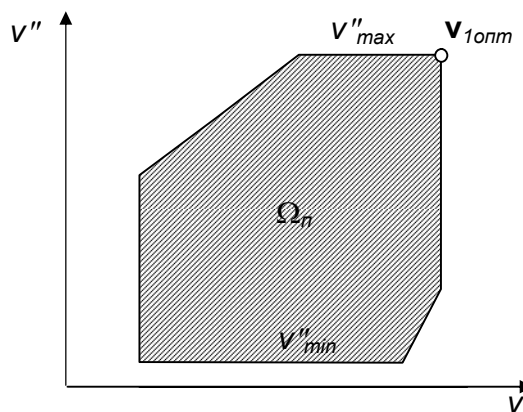


Рис. 6. Область ефективних режимів гальмування першого відчепу склада

Відповідно область ефективних режимів першого відчепу склада визначається умовою

$$\Psi_{e,1} = v_{1opt} = \left\{ \max_{v \in \Omega_{п1}} (v'), v''_{max} \right\}.$$

Умови управління скочуванням останнього відчепу у складі відрізняються від умов управління скочуванням інших відчепів тим, що для нього відсутній наступний відчеп. В цих умовах найменший ризик нерозділення відчепів забезпечує повільний режим скочування відчепів

$$v_{mpo} = \left\{ \min_{v \in \Omega_{п1}} (v'), v''_{min} \right\},$$

що передбачає мінімальну швидкість виходу відчепу з гальмових позицій спускної частини гірки (див. рис. 7).

Згідно з (1) будь який режим гальмування такий, що $v'' > v''_{mpo}$, переважає режим v_{mpo} за

критерієм \bar{l}_B . При цьому для двох будь-яких режимів v_1 та v_2 справедливим є твердження, що $r_n(v_1) < r_n(v_2)$ при $v'_1 < v'_2$ та $v''_1 = v''_2$.

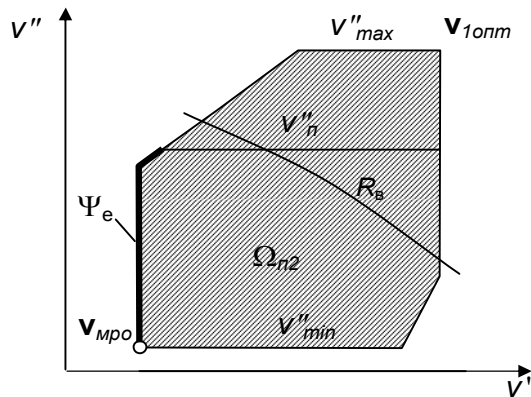


Рис. 7. Область ефективних режимів гальмування останнього відчепа состава

Серед режимів таких, що $v'' > v''_n$, не може бути ефективних, так як для будь якого такого режиму на верхній межі області Ω_{n1} можна знайти режим такий, що $\bar{l}(v'_1, v''_n) < \bar{l}(v'_1, v''_2)$ та $r_n(v'_1, v''_n) < r_n(v'_1, v''_2)$. В результаті, область ефективних режимів останнього відчепа состава розташовується на лівій межі ОДР та визначається умовою

$$\Psi_{e,o} = \{v \in \Omega_d \mid v'' \leq v''_n, v' = \min(v'(v''))\}.$$

Таким чином, ефективні режими завжди розташовуються на лівій чи верхній межі області Ω_n , або на лінії мінімальних ризиків \bar{R} . При

цьому одному значенні v'' не може відповідати два ефективних режими. Враховуючи, що область ефективних режимів Ψ_e являє собою неперервну лінію з прямолінійних та криволінійних ділянок, то кожен її режим може бути заданий параметричним виразом $v_e = f(v'', \Psi_e)$. Виділення області ефективних режимів гальмування Ψ_e для кожного відчепа дозволяє перейти від двовірної задачі пошуку оптимальних режимів гальмування $v = \{v', v''\}$ області допустимих режимів гальмування Ω_d до одновірної задачі пошуку оптимальної швидкості виходу відчепа з СГП v'' в області ефективних режимів Ψ_e , що забезпечує суттєве скорочення тривалості вирішення задачі управління швидкістю скочування відчепів состава.

БІБЛОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Бобровский, В. И. Оптимизация режимов торможения отцепов на сортировочных горках [Текст]: монография / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко, Н. П. Божко, Н. В. Рогов, Н. И. Березовый, А. В. Кудряшов – Дн-вск: Изд-во Маковецкий, 2010. – 260 с.
2. Бобровский, В. И. Исследование влияния режимов торможения отцепов на условия их разделения на стрелках [Текст] / В. И. Бобровский, Д. Н. Козаченко, Т. В. Болвановская // Залізн. трансп. України – 2011. – № 3. – С 3-6

Надійшла до редколегії 07.11.2011.
Прийнята до друку 10.11.2011.