

УДК 629.4.027.2:629.45

РОЗРАХУНКОВА ОЦІНКА ДИНАМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ШВИДКІСНОГО ВАГОНА

Дьомін Р.Ю.

CALCULATED ESTIMATION OF DYNAMIC INDICATORS OF A HIGH-SPEED WAGON

Domin R.

В статті представлено результати комп'ютерного моделювання динаміки швидкісного вагона локомотивної тяги типу «Мета». Досліджено залежність показників динаміки руху вагона від характеристик системи демпфірування коливань. Здійснено оцінку впливу на визначені динамічні показники вагона гасителів коливань впливання візків, а також параметрів геометричної взаємодії коліс і рейок.

Ключові слова: швидкісний вагон, динаміка руху, комп'ютерне моделювання, динамічні показники.

Вступ. За минулі десятиліття спостерігався бурхливий процес розвитку технічних рішень щодо удосконалення залізничного транспорту. З огляду на досягнутий нині рівень теоретичних досліджень динамічних процесів, які супроводжують рух рейкового рухомого складу, оцінку показників динаміки швидкісного пасажирського рухомого складу та його взаємодії з колією доцільно виконувати з залученням сучасних засобів комп'ютерного моделювання. За таким підходом відкривається можливість підвищення ефективності визначення впливу на динамічні показники безпеки руху й комфортність перевезень пасажирів конструкційних особливостей ходових частин, призначених для швидкісного руху. В свою чергу, результати комп'ютерного моделювання будуть сприяти прийняттю обґрунтованих рішень щодо допуску швидкісного рухомого складу до експлуатації, уникаючи проблем, що мали місце при впровадженні в систему швидкісних пасажирських перевезень електропоїзда HRCS2 [1].

Питанням математичного моделювання динаміки швидкісного рухомого складу присвячено чисельні дослідження. Значна робота в цьому напрямку виконана українською науковою школою академіка В.А. Лазаряна [2]. Так, ще в 1971-72 роках за ініціативи В.А. Лазаряна було проведено серію унікальних експериментів зі швидкісним вагоном-лабораторією (ШВЛ), який приводився в рух спар-

кою реактивних двигунів літака ЯК-40, встановлених над кабіною машиніста головного вагона електропоїзда ER22P. Під час випробувань ШВЛ на Придніпровській залізниці було досягнуто рекордної для залізниць колії 1520 мм швидкості руху – 250 км/год. За результатами цих випробувань було перевірено раніше побудовану математичну модель просторових коливань ШВЛ [3]. У подальшому ця модель як базова використовувалась при дослідженнях динаміки швидкісного рухомого складу, наприклад, вагонів електропоїзда ЕР-200 [4].

Метою цієї роботи є дослідження впливу на динамічні якості швидкісного пасажирського вагона конструкційних параметрів системи демпфірування і характеристик геометричної взаємодії коліс і рейок.

Об'єкт досліджень. В якості досліджуваного об'єкта прийнято швидкісний вагон «Мета» на візках типу моделі 68-7041 з пневмопідвішуванням побудови КВБЗ (рис. 1). Математичну модель динаміки цього вагона створено в пакеті програмного комплексу UM за методом підсистем [5]. За структурою розрахункова модель вагона подібна до раніше побудованої і верифікованої базової моделі [6]. Загальну систему «Швидкісний вагон» сформовано з 19-ти твердих тіл, 18-ти лінійних і 22-х біполярних силових елементів.



Рис. 1. Швидкісний вагон виробництва КВБЗ

На динамічні показники рухомого складу може суттєво впливати стан колії, який визначається ная-

вними нерівностями. Для моделювання нерівностей колії використано алгоритм формування реалізації випадкового процесу за наданими функціями спектральної щільності [7].

Залежність показників динаміки руху вагона від конструкційних параметрів системи демпфірування коливань. Рациональні параметри ресорного підвішування швидкісних ходових частин визначаються головним чином за результатами математичного моделювання. Це, перш за все, жорсткісні параметри. Відносно систем демпфірування коливань слід відзначити певні розбіжності у рекомендаціях виробників. Так, візки для швидкісних вагонів Тверського вагонобудівного заводу перших партій виробництва постачалися гідравлічними демпферами у буксовому підвішуванні. У подальшому, за рекомендаціями, розробленими за експериментальними даними, візки цього типу були модифіковані шляхом усунення буксових гасителів.

З метою перевірки допустимості технічного рішення щодо позбавлення буксового підвішування швидкісних візків демпфірування коливань шляхом комп'ютерного моделювання проведено відповідну оцінку динамічних якостей вагона. При цьому розглянуто два розрахункових варіанти: 1 – коефіцієнт демпфірування буксового гасителя має номінальне значення; 2 – випадок відсутності демпфера.

За результатами розрахунків отримані значення середньоквадратичних відхилень (СКВ) сил взаємодії коліс і рейок, тобто сил Y і Q , а також прискорень рам візків і кузова. Ці значення наведені в таблицях 1, 2 і 3, де в чисельнику вказані розрахункові дані для вихідного варіанту, а в знаменнику – дані, отримані у випадку відсутності демпфірування у буксовому ступені ресорного підвішування.

Таблиця 1

Максимальні СКВ сил взаємодії

СКВ	Швидкість руху, км/год							
	80	100	120	140	160	180	200	220
Y , кН	<u>1,77</u> 1,77	<u>2,29</u> 2,43	<u>2,85</u> 2,94	<u>3,39</u> 3,67	<u>3,75</u> 4,02	<u>4,42</u> 4,77	<u>5,12</u> 5,36	<u>5,73</u> 5,84
Q , кН	<u>3,72</u> 3,84	<u>4,77</u> 5,92	<u>5,93</u> 7,39	<u>7,49</u> 11,44	<u>8,89</u> 11,24	<u>10,58</u> 13,66	<u>12,19</u> 12,59	<u>13,43</u> 11,29

Як видно з даних табл. 1, суттєві зміни в системі буксового підвішування стосовно демпфірування коливань практично не відбиваються на бокових силах Y . Разом з тим, з порівняння даних розрахунків виходить, що відсутність сил в'язкого опору суттєво змінює залежності вертикальних сил Q . Так, якщо рівень цих сил поступово зростає з нарощуванням швидкості руху екіпажу з номінальними параметрами, то для конструкційного варіанту, що відповідає випадку відсутності буксових гасителів рівень сил Q значно підвищується у швидкісному діапазоні 140-160 км/год.

Дані табл. 2 свідчать про істотний вплив параметрів демпфірування в першому ступені підвішування на рівень вертикальних прискорень рам візків a_z майже у всьому розрахунковому діапазоні швид-

костей руху. Значно менше відзначається вплив цих параметрів на рівень горизонтальних прискорень a_y .

Таблиця 2

Максимальні СКВ прискорень рам візків

СКВ	Швидкість руху, км/год							
	80	100	120	140	160	180	200	220
a_z , м/с ²	<u>1,63</u> 4,68	<u>2,52</u> 10,30	<u>3,89</u> 14,02	<u>5,74</u> 27,23	<u>7,50</u> 25,23	<u>9,60</u> 30,50	<u>11,48</u> 27,95	<u>12,84</u> 19,80
a_y , м/с ²	<u>0,45</u> 0,65	<u>0,66</u> 1,21	<u>0,93</u> 1,65	<u>1,32</u> 2,95	<u>1,70</u> 3,03	<u>2,30</u> 3,96	<u>2,97</u> 3,95	<u>3,72</u> 3,95

За Пам'яткою UIC 518 рівень горизонтальних поперечних прискорень рам візків виступає також критерієм безпеки руху [8]. За цим критерієм СКВ горизонтальних поперечних прискорень рами візка обмежені певним чином у залежності від маси візка. Так, виходячи з того, що маса візка швидкісного вагона становить 6,68 т, граничне значення СКВ прискорень a_y дорівнює 5,33 м/с². За даними табл. 2 виходить, що СКВ горизонтальних поперечних прискорень рам візків значно нижче допустимого рівня. Отже безпека руху вагона у всьому діапазоні швидкостей руху забезпечена з суттєвим запасом стійкості.

В табл. 3 наведено максимальні значення СКВ прискорень кузова. З приведених результатів розрахунків видно, що виключення з роботи буксових демпферів дещо підвищує рівень прискорень кузова.

Таблиця 3

Максимальні СКВ прискорень кузова

СКВ	Швидкість руху, км/год							
	80	100	120	140	160	180	200	220
a_z , м/с ²	<u>0,30</u> 0,35	<u>0,31</u> 0,39	<u>0,36</u> 0,44	<u>0,34</u> 0,41	<u>0,35</u> 0,42	<u>0,35</u> 0,42	<u>0,36</u> 0,42	<u>0,36</u> 0,39
a_y , м/с ²	<u>0,20</u> 0,21	<u>0,28</u> 0,31	<u>0,37</u> 0,40	<u>0,44</u> 0,51	<u>0,47</u> 0,52	<u>0,53</u> 0,61	<u>0,61</u> 0,66	<u>0,68</u> 0,70

Оцінка впливу на динамічні показники вагона гасителів коливань виляння візків. За вимогами, що діють на залізницях колії 1435 мм, одиниці швидкісного рухомого складу мають оснащуватися гасителями коливань виляння (ГКВ). З огляду на світову практику впровадження швидкісного руху має сенс дослідити вплив демпферів цього типу на динамічні характеристики рухомого складу вітчизняного виробництва. З цією метою за допомогою розробленої комп'ютерної моделі виконано відповідні розрахунки.

Ефективність застосування ГКВ оцінювалась шляхом порівняння вихідних величин за відсутності гасителів і включення їх в роботу. В таблицях 4, 5 і 6 наведено максимальні значення СКВ сил Y і Q , а також прискорень рам візків і кузова. Тут в чисельнику приведено розрахункові дані, коли ГКВ відсутні, а в знаменнику – дані, отримані за наявності ГКВ.

З порівняння значень СКВ горизонтальних сил, приведених в табл. 4, можна констатувати, що введення в дію ГКВ загалом призводить до пониження рівня бокових сил при максимальній швидкості ру-

ху, проте загалом у розглянутому швидкісному діапазоні спостерігається збільшення цих сил, зокрема по першій колісній парі. На рівень вертикальних сил ГКВ практично не впливають.

Таблиця 4

Максимальні СКВ сил взаємодії

СКВ	Швидкість руху, км/год							
	80	100	120	140	160	180	200	220
Y, кН	1,77	2,29	2,85	3,39	3,75	4,42	5,12	5,73
	3,48	3,62	4,35	4,55	4,46	4,69	4,99	4,92
Q, кН	3,72	4,77	5,93	7,49	8,89	10,58	12,19	13,43
	3,68	4,67	5,91	7,34	8,62	10,22	11,64	12,63

За даними табл. 5, де наведено максимальні значення СКВ прискорень рам візків, виходить, що включення ГКВ практично не впливає на рівень вертикальних прискорень рам візків. Водночас ці демпфери значно знижують рівень горизонтальних прискорень. Тим самим за розглянутим вище критерієм безпеки руху суттєво збільшується запас стійкості вагона.

Таблиця 5

Максимальні СКВ прискорень рам візків

СКВ	Швидкість руху, км/год							
	80	100	120	140	160	180	200	220
a_z , м/с ²	1,63	2,52	3,89	5,74	7,50	9,60	11,48	12,84
	1,63	2,51	3,88	5,72	7,45	9,50	11,34	12,66
a_y , м/с ²	0,45	0,66	0,93	1,32	1,70	2,30	2,97	3,72
	0,41	0,57	0,77	0,98	1,14	1,31	1,45	1,53

В табл. 6 наведено максимальні значення СКВ прискорень кузова. З наведених розрахункових даних випливає, що демпфірування коливань впливають не впливає на рівень вертикальних прискорень кузова, натомість уведення цього демпфірування суттєво знижує рівень горизонтальних прискорень.

Таблиця 6

Максимальні СКВ прискорень кузова

СКВ	Швидкість руху, км/год							
	80	100	120	140	160	180	200	220
a_z , м/с ²	0,30	0,31	0,36	0,34	0,35	0,35	0,36	0,36
	0,30	0,32	0,36	0,34	0,35	0,35	0,35	0,35
a_y , м/с ²	0,20	0,28	0,37	0,44	0,47	0,53	0,61	0,68
	0,18	0,24	0,31	0,35	0,36	0,38	0,41	0,42

Вплив параметрів геометричної взаємодії коліс і рейок на контактні сили і прискорення екіпажної частини. Як свідчать численні дослідження коливань та стійкості руху рейкових екіпажів, геометричні характеристики взаємодії коліс і рейок належать до чинників, що визначають динамічні властивості рухомого складу [9]. Тому при дослідженні умов безпечної та комфортної експлуатації рухомого складу, призначеного для експлуатації з підвищеними швидкостями, перш за все, слід оцінити вплив характеристик геометричної взаємодії коліс і рейок. З метою визначення міри цього впливу прийнято до розгляду розрахункові випадки, коли колеса досліджуваного екіпажу мають профілі за

ГОСТ 9036 і ДМетІ [10]. Останній профіль було розроблено у Дніпропетровському металургійному інституті (тепер – Національна металургійна академія). При цьому приймається до уваги дія гасителів коливань виляння візків.

На рис. 2 представлено графіки залежностей середньоквадратичних відхилень (СКВ) бокових сил контактної взаємодії Y від швидкості руху. Тут через пл(п) позначено графіки СКВ бокових сил взаємодії з рейкою лівого (правого) колеса n-ої колісної пари. Як видно, значення бокових сил для коліс зі стандартним профілем мають розширене поле розкиду (рис. 2 а) у порівнянні з випадком застосування коліс з профілем ДМетІ (рис. 1 б). До того ж рівень бокових сил, що діють на колеса з профілем ДМетІ, нижчий ніж у випадку стандартних і підвищується з ростом швидкості руху приблизно з однаковими градієнтами для всіх коліс.

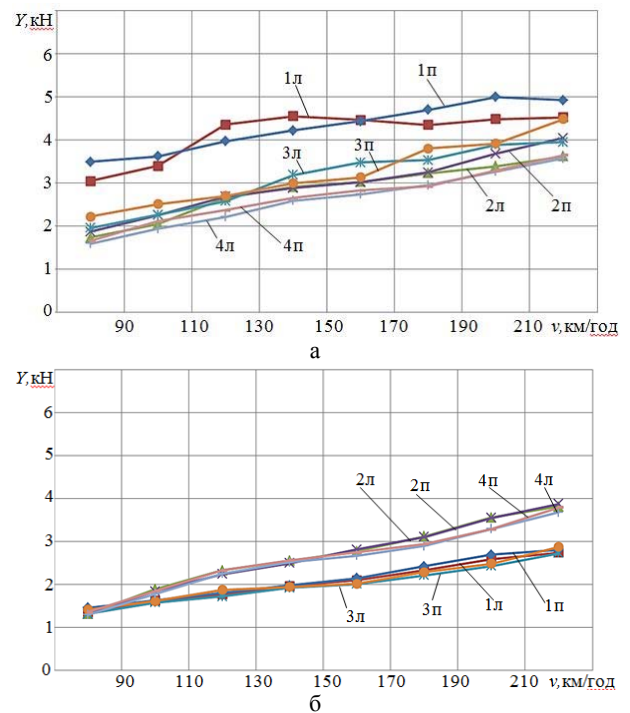


Рис. 2. СКВ горизонтальних сил взаємодії Y : а – колеса з профілем ГОСТ; б – колеса з профілем ДМетІ

Отримані розрахункові значення вертикальних сил взаємодії коліс і рейок свідчать про практичну відсутність їх залежності від геометрії поверхонь кочення коліс. Висновок про нечутливість до зміни профілю коліс стосується також як вертикальних, так і горизонтальних прискорень рам візків.

Як показують результати щодо оцінки прискорень кузова, рівні вертикальних прискорень практично не залежать від вибору профілю поверхонь кочення коліс. Аналогічний висновок також відноситься до горизонтальних прискорень, про що свідчать графіки, представлені на рис. 2.

Відповідно до чинної методики [11] за прискореннями кузова розраховувались показники плавності ходу W_z . За результатами моделювання динамі-

ки руху екіпажа визначено, що залежності значень показника W_z у вертикальному напрямку від швидкості у розглянутих розрахункових випадках залишаються однаковими. Таким чином, цей показник не чутливий до зміни профілів поверхонь кочення коліс – за ГОСТ у початковому і зношеному стані та ДМетІ. Більше того, виявилось, що введення в дію демпферів проти автоколиваний впливання візків також не позначається на плавності ходу вагона у вертикальному напрямку. В цілому, показники плавності ходу не перевищують 2,7, тобто значно нижче гранично допустимого значення – 3,25. Отже плавність ходу по вертикалі задовольняє вимогам комфортності перевезень пасажирів.

Результати розрахунків при вихідних характеристиках геометричної взаємодії коліс і рейок показали, що плавність ходу вагона у горизонтальному напрямку відповідає вимогам у всьому діапазоні швидкостей руху. Натомість у разі зношеності поверхонь кочення коліс з початковим профілем за ГОСТ умови плавності ходу задовольняються лише до швидкості руху 140 км/год.

Висновки

1. За результатами дослідження засобами комп'ютерного моделювання впливу конструкційних параметрів екіпажної частини на динамічні показники швидкісного вагона встановлено:

- при вихідних параметрах ходових частин забезпечуються умови безпеки руху вагона у розглянутому швидкісному діапазоні включно 220 км/год;

- внесення в буксове підвішування змін, пов'язаних з вилученням гідравлічних гасителів коливань, хоч і невідчутно впливає на рівень прискорень кузова, водночас призводить до інтенсивних вертикальних коливань рам візків, що негативно позначиться на ресурсі несучої конструкції;

- демпфірування автоколивань впливання візків, не впливаючи практично на показники вертикальної динаміки вагона, значно знижує інтенсивність горизонтальних коливань, що особливо спостерігається при підвищених швидкостях руху.

2. З дослідження впливу на динамічні показники швидкісного вагона конфігурації поверхонь кочення коліс відмічено певні переваги застосування коліс з профілем ДМетІ у порівнянні з варіантом застосування коліс з профілем за ГОСТ 9036.

3. За результатами аналізу розрахованих показників плавності ходу встановлено, що позбавлення першого ступеню ресорного підвішування демпфірування негативним чином позначається на плавності ходу як у вертикальному, так і в горизонтальному напрямках. Введення в дію гасителів коливань впливання візків значно покращує плавність ходу вагона в горизонтальному напрямку, не впливаючи на показники плавності ходу у вертикальному напрямку, які задовольняють нормативні вимоги у всьому дослідженому діапазоні швидкостей руху.

Література

1. Дьомін Р.Ю. Визначення показників безпеки руху швидкісного електропоїзда шляхом комп'ютерного моделювання динаміки його вагонів / Р.Ю. Дьомін, Ю.В. Дьомін, Г.Ю. Черняк // Вагонний парк – 2016. – №1-2. – С. 32-34.
2. Лазарян В.А. Динамика транспортных средств: Избр. тр. – К.: Наук. думка, 1985. – 528 с.
3. Лазарян В.А. Экспериментальная проверка методов исследования устойчивости движения рельсовых экипажей / В.А. Лазарян, Ю.В. Демин, Г.Ф. Осадчий // Некоторые задачи механики скоростного наземного транспорта. – К.: Наук. думка, 1974.
4. Коротенко М.Л. Исследование влияния коэффициента псевдоскольжения на устойчивость движения моторного вагона электропоезда ЭР200 / М.Л. Коротенко, Ю.В. Демин, Г.Ф. Осадчий // Динамика и прочность высокоскоростного наземного транспорта. – К.: Наук. думка, 1976.
5. Pogorelov D.Yu. Simulation of Rail Vehicle Dynamics with Universal Mechanism Software / D.Yu. Pogorelov // Rail vehicle dynamics and associated problems. Gliwice: Silesian University of Technology, 2005. – P. 13-58.
6. Черняк Г.Ю. Базова комп'ютерна модель просторової динаміки пасажирського вагона для швидкісного руху / Г.Ю. Черняк, Ю.В. Щербина // Залізничний трансп. України. – 2012. - №6. – С. 55-58.
7. Черняк А.Ю. Моделирование случайных возмущений в системе «рельсовый экипаж – путь» / А.Ю. Черняк // Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. Наук. журнал. Техн. науки. Серія «Транспорт 1», 2003. — № 9 (67). — С. 173–177.
8. Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour – Safety – Track fatigue – Ride quality. UIC Code 518, International Union of Railways, Paris, 2009.
9. Polach O. Influence of wheel/rail contact geometry on the behaviour of a railway vehicle at stability limit / O. Polach // In: ENOC-2005, Eindhoven, Netherlands. – Pp. 2203-2210.
10. Кулешов В.П. Об эффективности работ по программе «колесо-рельс» в локомотивном хозяйстве Украины / В.П. Кулешов, А.В. Сладковский // Залізничний трансп. України. – 2001. - №3. – С. 22-24.
11. СОУ МПП 45.060-204:2007. Вагони пасажирські. Плавність руху. Методи визначення. – К.: Мінпромполітики України, 2007. – 12 с.

References

1. Domin R.Yu. Determination of safety indicators of high-speed electric trains by computer simulation of dynamics of its cars / R.Yu. Domin, Yu.V. Domin G.Yu. Cherniak // Wagon Park - 2016. - No. 1-2. - P. 32-34.
2. Lazaryan V.A. Vehicle dynamics: Selected Pros. - K.: Nauk. dumka, 1985. - 528 p.
3. Lazaryan V.A. Experimental verification of methods for studying the stability of the movement of rail vehicles / V.A. Lazaryan, Yu.V. Domin, G.F. Osadchiy // Some problems of the mechanics of high-speed land transport. - K.: Nauk. Dumka, 1974.
4. Korotenko M.L. Investigation of the effect of the pseudo-slip coefficient on the stability of motion of a motor wag-

- on of an electric train ER200 / M.L. Korotenko, Yu.V. Domin, G.F. Osadchiy // Dynamics and strength of high-speed ground transportation. - K.: Nauk. Dumka, 1976.
5. Pogorelov D.Yu. Simulation of Rail Vehicle Dynamics with Universal Mechanism Software / D.Yu. Pogorelov // Rail vehicle dynamics and associated problems. Gliwice: Silesian University of Technology, 2005. – P. 13-58.
 6. Cherniak G.Yu. Basic computer model of spatial dynamics of a passenger car for high-speed traffic / G.Yu. Cherniak, Yu.V. Shcherbyna // Railway trans. of Ukraine. - 2012. - No. 6. - P. 55-58.
 7. Cherniak A.: Simulation of random disturbances in the system “railway rolling stock – track”. Reporter of Volodymyr Dahl East Ukrainian National University. Academic periodical. Engineering sciences. Series “Vehicles 1”, 9 (67), 2003, pp.173-177.
 8. Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour – Safety – Track fatigue – Ride quality. UIC Code 518, International Union of Railways, Paris, 2009.
 9. Polach O. Influence of wheel/rail contact geometry on the behaviour of a railway vehicle at stability limit / O. Polach // In: ENOC-2005, Eindhoven, Netherlands. – Pp. 2203-2210.
 10. Kuleshov V.P. On the effectiveness of work on the program "wheel-rail" in the locomotive economy of Ukraine / V.P. Kuleshov, A.V. Sladkovsky // / Railway trans. of Ukraine. - 2001. - №3. - P. 22-24.
 11. SOU WPP 45.060-204: 2007. Passenger cars. Smooth traffic. Methods of determination. - K.: Ministry of Industrial Policy of Ukraine, 2007 - 12 p.

Демин Р.Ю. Расчетная оценка динамических показателей скоростного вагона

В статье представлены результаты компьютерного моделирования динамики скоростного вагона локомотивной тяги типа «Мета». Исследована зависимость показателей динамики движения вагона от характеристик системы демпфирования колебаний. Осуществлена оценка влияния на определенные динамические показатели вагона гасителей колебаний виляния тележек, а также параметров геометрического взаимодействия колес и рельсов.

Ключевые слова: скоростной вагон, динамика движения, компьютерное моделирование, динамические показатели.

Domin R. Calculated estimation of dynamic indicators of a high-speed wagon

The paper presents the results of computer simulation of the dynamics of a high-speed wagon of locomotive traction of the "Meta" type. The dependence of the dynamics of the wagon motion on the characteristics of the oscillation damping system is investigated. The impact on certain dynamic indicators of the wagon of vibration damping oscillators of trolleys as well as parameters of geometric interaction between wheels and rails was assessed.

Key words: high-speed car, dynamics of movement, computer modeling, dynamic indicators.

Дьомін Р.Ю. – к.т.н., докторант кафедри залізничного, автомобільного транспорту, підйомних та транспортних систем СНУ ім. В. Даля,
e-mail: r.domin@1520mm.com

Рецензент: д.т.н., проф. **Глікін М.А.**

Стаття подана 09.12.2017.