

В.В. Стельмашук, к.т.н., доц.
В.В. Лотиш, к.т.н., доц.
В.М. Придюк, ст. викл.
В.П. Онищук, асист.
М.В. Придюк, аспір.

Луцький національний технічний університет

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МАНЕВРНОСТІ І СТІЙКОСТІ РУХУ ДОВГОБАЗОВОГО АВТОПОЇЗДА-КОНТЕЙНЕРОВОЗА

У роботі наведено перевірку адекватності моделі розрахунку параметрів маневреності та стійкості довгобазового автопоїзда-контейнеровоза на базі експериментальних досліджень.

Постановка проблеми. Ефективність використання рухомого складу автомобільного транспорту і його продуктивність залежать, як відомо, від вантажопідйомності і середньої швидкості руху, а також сукупності техніко-експлуатаційних властивостей, які виявляються в процесі експлуатації і зумовлюють придатність рухомого складу до застосування в заданих експлуатаційних умовах.

При перевезеннях усієї гами існуючих контейнерів неповністю використовується нормована довжина автопоїзда (22 м). Крім того, при перевезеннях легких вантажів також неповністю використовується і максимально допустима маса автопоїзда (40–42 т). Тому доцільним є розробка конструкції автопоїзда-контейнеровоза, яка могла б нівелювати ці недоліки.

Проте збільшення довжини автопоїзда без відповідного вибору ряду параметрів погіршує його експлуатаційні властивості, у тому числі маневреність. Забезпечення необхідного для конкретних умов експлуатації рівня маневреності довгобазових автопоїздів є важливою і не цілком вирішеним завданням. Науково обґрунтований вибір конструктивних параметрів, складу і маршруту руху таких автопоїздів набуває особливої важливості у зв'язку з перспективою їхнього широкого застосування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [1] розглянута конструкція автопоїзда-контейнеровоза, загальна довжина якого складає 22 м, що допустимо за Правилами дорожнього руху в Україні. Основним недоліком такого автопоїзда є погіршення маневреності і стійкості руху.

Однак, як показує аналіз, це не є достатньою підставою для висновку про неперспективність такої конструкції автопоїзда-контейнеровоза. У роботі [2] досліджена кінематика повороту такого автопоїзда. Зокрема показано, що нормовані значення зовнішнього і внутрішнього габаритних радіусів і габаритної смуги руху можуть бути отримані або за тільки керованої третьої осі автомобіля-тягача, або за керованого візка-напівпричепа. У роботі [3] розглянуто закон управління задньою віссю візка напівпричепа та приводу управління до неї. У роботі [4] отримана система диференціальних рівнянь руху автопоїзда-контейнеровоза у поздовжній та поперечній площинах. Розв'язок системи рівнянь дозволив визначити та проаналізувати показники маневреності і стійкості руху автопоїзда.

Аналітичні дослідження показників маневреності і стійкості руху автопоїзда-контейнеровоза проведені за деяких допущень, зокрема про характер залежності та величини кута бічного відведення від бічної сили, про величину моменту інерції кожної ланки, про можливість застосування “плоскої” розрахункової схеми автопоїзда тощо. Тому **метою** даного дослідження стала перевірка адекватності математичної моделі розрахунку параметрів маневреності та стійкості автопоїзда-контейнеровоза.

Викладення основного матеріалу і результати дослідження. Перевірка адекватності математичної моделі включала в себе експериментальні дослідження для визначення показників маневреності та стійкості руху автопоїзда.

У Луцькому національному технічному університеті був створений автопоїзд-контейнеровоз. Цей автопоїзд (рис. 1) складався із сидельного тривісного серійного автомобіля-тягача КамАЗ-53212 і напівпричепа KAISER S 38 EL 1 А.

На шасі автомобіля-тягача з подовженою рамою та сидельно-зчпним пристроєм передбачається встановлювати 20-футовий контейнер, а на рамі напівпричепа – 40-футовий.

Для проведення експериментальних досліджень на полігоні Луцького національного технічного університету була нанесена відповідна розмітка (рис. 2).



Рис. 1. Експериментальний автопоїзд-контейнеровоз



Рис. 2. Види випробувань автопоїзда-контейнеровоза для проведення досліджень його маневреності

При виконанні таких маневрів, як усталений рух по колу, “поворот на 90°”, “поворот на 180°”, “поворот на 270°”, “S-подібний поворот” тощо оціночним критерієм служитиме максимальна ширина габаритної смуги руху (ГСР). Під час випробувань “поворот на 180°” додатковим оціночним критерієм буде величина ширини коридору, необхідного для розвороту автопоїзда-контейнеровоза.

Для проведення експериментальних досліджень було створено комплекс обладнання, яке складається з персонального комп’ютера, аналого-цифрового перетворювача L-CARD E14-140, акселерометрів MMA7260QR2 виробництва фірми Freescale Semiconductor, датчика переміщення підвіски WABCO № 441 050 100 0 (працює за принципом кута повороту), датчика кута повороту керованих коліс та датчика кута складання ланок автопоїзда, функції якого виконує датчик WABCO № 441 050 100 0. Крім того, під час випробувань маневрених властивостей використовувалися гідравлічні відмітники траєкторії, а для визначення швидкості входу в маневр – фотоствори.

Реєстрація й опрацювання показань усіх датчиків здійснювалася за допомогою бортового обчислювального комплексу на базі ПК.

Похибки стандартних приладів і обладнання, що використовувалися під час проведення експериментальних досліджень, приймалися із паспортів на це обладнання. Загальна похибка вимірювань не перевищувала 7,0 %.

Програма випробувань автопоїзда складалася із двох частин, зокрема визначення показників маневреності та стійкості.

У першій частині програми під час визначення показників маневреності проводилися такі дослідження: усталений рух по колу, “поворот на 90°”, “поворот на 180°”, “поворот на 270°” і “S-подібний поворот”.

У другій частині випробувань дослідження включали: зміна смуги руху (“переставка”), “маневр ISO”, вхід і рух на повороті (“поворот”).

Дорожні випробування проводилися на рівному асфальтобетонному майданчику розміром 100 x 120 м, що розташований на полігоні Луцького НТУ і рівній горизонтальній асфальтованій дорозі Луцьк–Рівне (31...35 км).

Методикою виконання кожної із робіт передбачалося три повторюваності дослідів (якщо це не обумовлювалося умовами виконання того чи іншого етапу експериментальних досліджень). Як результуюче приймалося середнє значення по всіх повторюваностях.

Визначення кінематичних параметрів і відхилень траєкторій ланок при сталому круговому русі автопоїзда. Підготування до випробувань полягало у нанесенні на поверхню дороги лінії постійної кривизни. Радіуси кривизни обиралися від $R = 12,5$ до $R = 50$ метрів. Перед контрольними заїздами водій виконував декілька пробних заїздів з метою визначення кута повороту керованих коліс і забезпечення руху автомобіля-тягача заданою траєкторією. Після включення вимірювальної апаратури проводився контрольний заїзд із установленою швидкістю. Перехід автомобіля-тягача з прямолінійної траєкторії руху на кругову здійснювався як за $K_n = \infty$, коли водію необхідно було зупинитися, повернути кероване колесо тягача на обраний раніше кут, а потім продовжити рух, не змінюючи положення рульового колеса, так і за $K_n \neq \infty$, коли поворот керованих коліс відбувався в русі. Відхилення траєкторії руху автомобіля-тягача від заданої враховувалися під час опрацювання результатів експерименту.

Під час підготовки до випробувань щодо поворотів автопоїзда на 90° , 180° , 270° та S-подібному, крім перерахованих у першому етапі робіт, на поверхні дороги задавалася S-подібна траєкторія (два сполучені півкола радіусом 15 м).

Рух автомобіля-тягача у всіх випробуваннях відбувався по заданій траєкторії зі швидкостями 5, 10, 15, 20, 25 км/год. Протягом одного заїзду швидкість руху залишалася, по можливості, постійною. Повороти рульового колеса проводилися плавно, без затримок і ривків. Затримка повороту рульового колеса більш ніж на 0,5 с, або повороти в зворотній бік не припускалися.

Можливі такі випадки руху на повороті, коли траєкторія руху автопоїзда складається тільки з перехідних кривих.

Визначення параметрів руху автопоїзда у випадку зміни смуги руху (“переставка”). Маневр “переставка” є типовим для руху автопоїзда в реальних дорожніх умовах і полягає у зміні смуги руху. Рух при цьому маневрі здійснюється з постійною швидкістю за мінімально можливий час.

Оціночними параметрами є кінематичні параметри автопоїзда і швидкість виконання маневру, що характеризується часом перехідного процесу [5].

Під час підготування експериментальної ділянки до раніше перерахованих робіт на поверхню дороги наносилися дві паралельні лінії на відстані 3,5 м одна від другої, на яких установлювалися вішки [5]. Довжина вимірювальної ділянки за маневром “переставка” складала 24 і 36 м. Крім того, виконувався маневр ISO 3888-1.

Перед контрольними заїздами водій робив пробні заїзди з метою відпрацювання маневру і виявлення можливостей автопоїзда до руху з різною швидкістю при переході на сусідню смугу і виконанні маневру ISO. При цьому підбиралася оптимальна кривизна траєкторій, необхідна для виконання маневру із заданою швидкістю. Інтенсивність “переставки” і маневру ISO обмежувалася можливостями водія.

Послідовність проведення контрольних заїздів містила в собі розгін автопоїзда до обраної швидкості по правій смузі. Потім після вмикання контрольно-вимірювальної апаратури водій, не змінюючи швидкості руху, виконував маневр “переставка” відповідно до обраної раніше інтенсивності. Заїзди, за яких автопоїзд після зміни смуги руху не укладався в ширину проїзної частини дороги по лівій смузі, бракувалися.

Підготування експериментальної ділянки під час виконання маневру ISO полягало у розставлянні вішок (маяків). Послідовність проведення контрольних заїздів та ж, що і під час руху з “переставкою”. Заїзди, під час яких автопоїзд зачіпав вішки, бракувалися.

Під час проведення випробувань фіксувалися: час проходження мірної ділянки “переставка”, швидкість автопоїзда на випробувальній ділянці, кути повороту рульового колеса, необхідні для забезпечення руху автопоїзда випробувальною ділянкою.

У результаті виконання першої частини експериментальних досліджень “усталений рух по колу”, “поворот на 90° ”, “поворот на 180° ”, “поворот на 270° ” і “S-подібний поворот” утворювалися масиви даних із записом кутів складання автопоїзда, кута повороту керованих коліс тягача, а також дані про шлях автопоїзда на криволінійній траєкторії при незмінному положенні керованих коліс тягача протягом кожного заїзду, що відповідали певному радіусу кола. Опрацювання масиву даних полягало у визначенні дійсних значень кутів під час проходження тягачем і напівпричепом кожного повного кола, а також при повороті автопоїзда на 90° , 180° і 270° та при виконанні “S-подібного повороту”. За отриманими значеннями кута повороту керованих коліс автомобіля-тягача і кутів складання, за наявності траєкторій характерних точок ланок автопоїзда, отриманих за допомогою гідровідмітників, обчислюються габаритні радіуси повороту і габаритна смуга руху.

На рисунку 3 для прикладу наведено результати опрацювання масиву даних із записом кутів складання між ланками експериментального автопоїзда при його повороті на 180° .

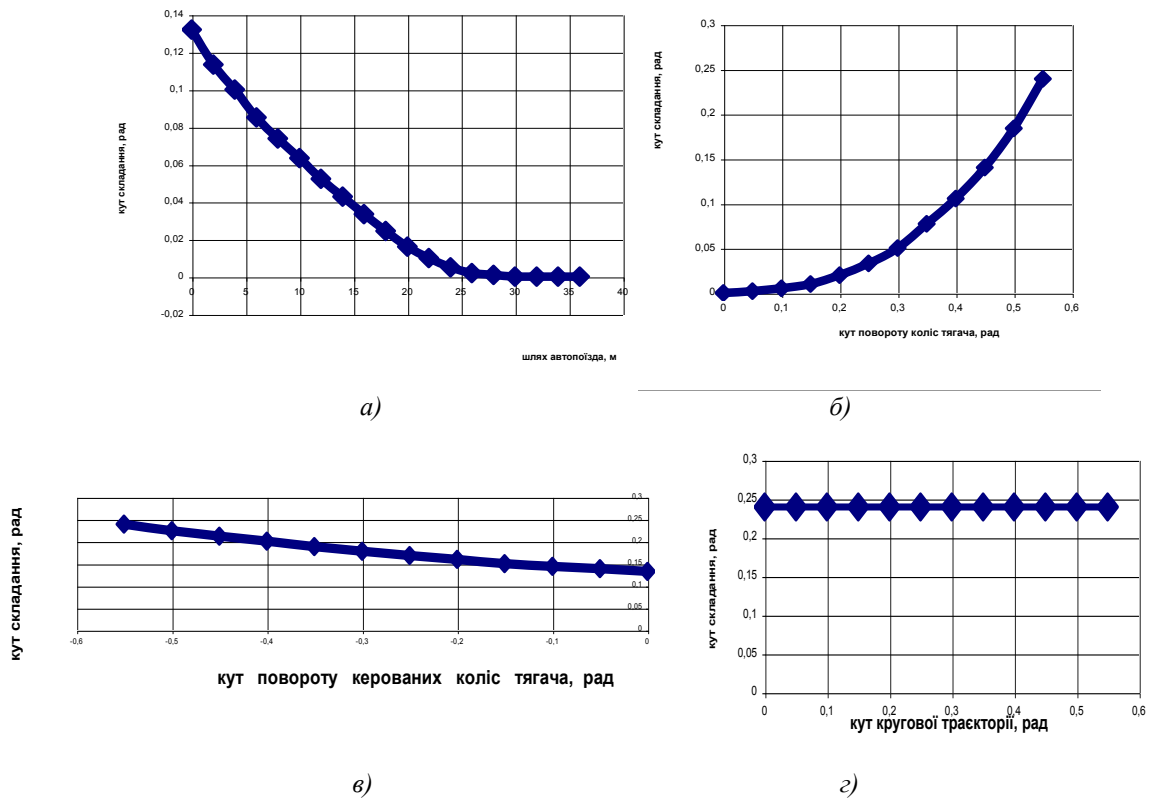


Рис. 3. Залежність кута складання ланок автопоїзда від кута повороту керованих коліс тягача під час входу у поворот (а), русі по колу (б), виходу із повороту (в) і під час руху автомобіля-тягача прямолінійною траєкторією (г)

Такі ж графіки будувалися і для інших поворотів автопоїзда. За графіками кутів складання визначалися габаритні радіуси повороту і габаритна смуга руху автопоїзда (табл. 1).

За результатами першої частини експериментальних досліджень можна зробити такі висновки:

- на неусталених поворотах автопоїзда-контейнеровоза зсув траєкторії напівпричепи щодо траєкторії тягача значно менший, порівняно з усталеним поворотом;
- відведення коліс автопоїзда призводить до збільшення зсуву напівпричепи щодо траєкторії тягача як на вході у поворот, так і на виході з повороту, а відповідно і до збільшення габаритної смуги руху;
- зсув траєкторії напівпричепи збільшується зі збільшенням швидкості руху автопоїзда;
- на розмір зсувів траєкторій руху напівпричепи щодо траєкторії тягача значно впливає режим неусталеного повороту тягача: із збільшенням режимного коефіцієнта повороту K_p зсув збільшується і, навпаки, при зменшенні K_p – зсув зменшується. Це підтвердило прийняте в аналітичних дослідженнях кінематики автопоїзда допущення, що найбільш екстремальні умови повороту мають місце при режимному коефіцієнті $K_p = \infty$;
- обмежувальним фактором під час виконання маневру ISO є порушення стійкості руху. Так вже за швидкості 30 км/год. спостерігався вихід тягача за межі смуги руху, а на швидкості 40 км/год. – відрив колеса напівпричепи від опорної поверхні;
- експлуатаційні чинники, що мають місце при криволінійному русі у реальних дорожніх умовах, не порушують основні кінематичні співвідношення, що отримані аналітичним методом для експериментального автопоїзда-контейнеровоза у складі автомобіля тягача КамАЗ-53212 і напівпричепи KAISER S 38 EL 1 А. Це дозволяє рекомендувати результати досліджень для інженерних розрахунків показників маневреності автопоїзда-контейнеровоза за кінематичною моделлю.

Таблиця 1

Габаритна смуга руху експериментального автопоїзда

Максимальна ширина ГСР під час руху, м		
по колу	під час повороту на 180°	під час повороту на 90°

експеримент	розрахунок за кінематичною моделлю	розрахунок за диференціальними рівняннями	експеримент	розрахунок за кінематичною моделлю	розрахунок за диференціальними рівняннями	експеримент	розрахунок за кінематичною моделлю	розрахунок за диференціальними рівняннями
7,96	7,59	7,76	7,65	7,36	7,43	7,55	7,70	7,62

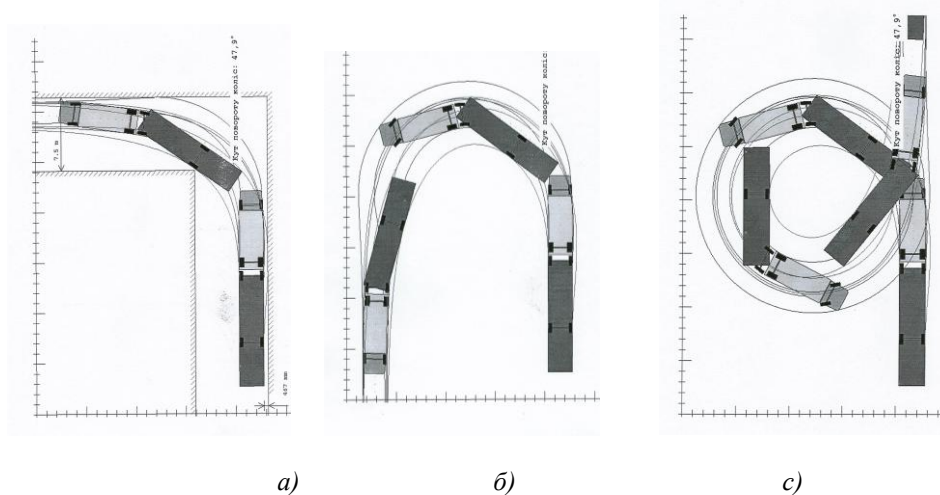


Рис. 4. Траєкторії руху автопоїзда за різних типів повороту

Співставляючи дані аналітичних і експериментальних досліджень, можна відзначити задовільну збіжність результатів як при застосуванні кінематичної моделі, так і моделі, що враховує бічне відведення шин та сили і моменти, що діють на автопоїзд при повороті. Так, максимальні відхилення у визначенні ГСР при русі по колу, повороті на 90°, 180° склали 9,18 % при застосуванні кінематичної моделі і 6,31 % – для моделі, що враховує бічне відведення шин та сили і моменти.

При виконанні маневру “переставка” були отримані дані про кінематичні параметри автопоїзда і швидкість виконання маневру, що характеризується часом перехідного процесу.

Значення граничних швидкостей під час виконання автопоїздом-контейнеровозом маневрів “переставка” довжиною 24 м і поворот радіусом 35 м наведено у таблиці 2, також наведені нормативні значення граничних швидкостей. Під час маневру “переставка” гранична швидкість автопоїзда-контейнеровоза обмежувалася заносом напівпричепа і виходом його за межі розміченої траєкторії. При маневрі “поворот” гранична швидкість автопоїзда також обмежувалася відривом коліс напівпричепа і небезпекою його перекидання. Проте швидкість, за якої виконувався цей маневр, перевищує її нормоване значення, тобто можна вважати, що автопоїзд-контейнеровоз під час виконання маневру “переставка” задовольняє нормативним вимогам. Максимальна розбіжність у визначенні критичної швидкості руху (за колюванням напівпричепа) не перевищує відповідно 8,7 %, що також свідчить про адекватність розробленої динамічної моделі автопоїзда.

Таблиця 2

Значення граничних швидкостей автопоїздів під час виконання маневрів “переставка” і “поворот”, км/год.

Автопоїзд	“Переставка”		“Поворот” R = 35 м	
	дані випробувань	нормативні значення	дані випробувань	нормативні значення
Автопоїзд-контейнеровоз	53,2	50,0	48,8	46,0

Аналогічні результати були отримані і під час виконання маневру “поворот” R = 25 м з тією різницею, що швидкість виконання маневру зменшувалася у середньому на 22...24 %. Отже можна вважати, що керованість автопоїзда-контейнеровоза під час виконання маневрів “переставка” і “поворот” є цілком достатньою.

Маневр ISO виконувався автопоїздом-контейнеровозом за різних швидкостей його руху. Результати експериментальних досліджень порівнювалися з результатами розрахунку параметрів руху автопоїзда.

На рисунку 5 наведено результати моделювання руху автопоїзда-контейнеровоза під час виконання ним маневру ISO.

$$V = 5 \text{ м/с}$$



$$V = 10 \text{ м/с};$$



$$V = 15 \text{ м/с}$$



Рис. 5. Траєкторії руху ланок автопоїзда-контейнеровоза при виконанні ним маневру ISO

За швидкості руху 5 м/с автопоїзд-контейнеровоз як за результатами розрахунків, так і експерименту вписується у нормований коридор руху. Проте за швидкості 10 м/с вже спостерігаються коливання ланок автопоїзда, але автопоїзд ще залишається у межах коридору. При цьому і величини бічних прискорень, що діють у центрах мас тягача і напівпричепи автопоїзда, за швидкості 10 м/с залишалися у межах допустимих, а за швидкості 15 м/с уже перевищували порогове значення ($4,5 \text{ м/с}^2$).

Виходячи з наведених результатів експериментального дослідження, можна зробити такі висновки:

- під час виконання маневру “переставка” довжиною 24 м і “поворот” радіусом 35 м гранична швидкість автопоїзда-контейнеровоза обмежувалася заносом напівпричепи і виходом його за межі розміченої траєкторії, проте швидкість, за якої виконувався цей маневр, перевищує її нормоване значення, тобто можна вважати, що автопоїзд-контейнеровоз під час виконання маневру “переставка” задовольняє нормативні вимоги;

- під час виконання маневру ISO за швидкості руху 5 м/с автопоїзд-контейнеровоз вписується у нормований коридор руху. Проте за швидкості 10 м/с уже спостерігаються коливання напівпричепи, а на 15 м/с – ці коливання перевищують допустимі;

- обмежувальним фактором виконання маневру є величина прискорень, що діють у центрі мас напівпричепи, яка на 24–35 % більша за прискорення у центрі мас тягача.

Для дослідної експлуатації таких автопоїздів необхідно провести комплекс досліджень і виявити такі параметри конструкції тягача і напівпричепи, які б забезпечили як необхідні параметри маневреності, так і стійкості руху.

Висновки. Проведеними експериментальними дослідженнями автопоїзда-контейнеровоза показано, що за основними оціночними показниками маневреності та стійкості руху він відповідає чинним нормативним документам.

Список використаної літератури:

1. Сахно В.П. До визначення конструктивних і компоувальних параметрів автопоїзда-контейнеровоза / В.П. Сахно, В.П. Онищук, В.М. Придюк // Вісник Національного транспортного університету. – К. : НТУ, 2009. – Вип. 19. – С. 80–83.
2. Сахно В.П. До визначення показників маневреності автопоїзда-контейнеровоза / В.П. Сахно, Р.М. Кузнєцов, В.П. Онищук // Наукові нотатки : міжвуз. зб. (за галузями знань

- «Машинобудування та металообробка», «Інженерна механіка», «Металургія та матеріалознавство»). – 2010. – Вип. 28. – С. 478–484.
3. Сахно В.П. До вибору закону управління задньою керованою віссю напівпричепи автопоїзда-контейнеровоза / В.П. Сахно, М.М. Горбаха, В.М. Придюк та ін. // Автошляховик України. Окремий випуск. Вісник ЦНЦ ТАУ. – 2010. – Вип. 13. – С. 72–75.
 4. Сахно В.П. До визначення показників маневреності і стійкості руху автопоїзда контейнеровоза / В.П. Сахно, Р.М. Марчук, В.П. Онищук та ін. // Вісник ЖДТУ. – 2010. – № 2 (53). – С. 127–134.
 5. Сахно В.П. Експериментальні дослідження маневреності триланкових автопоїздів / В.П. Сахно, І.Ф. Вороніна, О.А. Енглезі та ін. // Автошляховик України. Окремий випуск. Проблеми автомобільного транспорту : зб. наук. праць міжнар. наук.-практ. конф. – К., 2005. – С. 88–91.

СТЕЛЬМАЩУК Валерій Віталійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів Луцького національного технічного університету.

Наукові інтереси:

– дослідження руху автопоїздів.

ЛОТИШ Володимир В'ячеславович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів Луцького національного технічного університету.

Наукові інтереси:

- дослідження руху автопоїздів.

ПРИДЮК Валентин Михайлович – старший викладач кафедри автомобілів Луцького національного технічного університету.

Наукові інтереси:

- дослідження руху автопоїздів.

E-mail: pred_mbf@mail.ru

ОНИЩУК Василь Петрович – асистент кафедри автомобілів Луцького національного технічного університету.

Наукові інтереси:

- дослідження руху автопоїздів.

E-mail: wasyl_o@mail.ru

ПРИДЮК Михайло Валентинович – аспірант кафедри автомобілів Луцького національного технічного університету.

Наукові інтереси:

- дослідження руху автопоїздів.

E-mail: Mishabox88@mail.ru

Стаття надійшла до редакції 02.09.2012

Стельмашук В.В., Лотиш В.В., Придюк В.М., Онищук В.П., Придюк М.В. Експериментальні дослідження маневреності і стійкості руху довго базового автопоїзда-контейнеровоза

Стельмашук В.В., Лотыш В.В., Придюк В.М., Онищук В.П., Придюк М.В. Экспериментальные исследования маневренности и устойчивости движения длиннобазового автопоезда-контейнеровоза

Stelmaschuk V., Lotysh V., Prydiuk V., Onyschuk V., Prydiuk M. Experimental research of maneuverability and stability of road train for transportation of containers movement

УДК 629.3.017

Экспериментальные исследования маневренности и устойчивости движения длиннобазового автопоезда-контейнеровоза / В.В. Стельмашук, В.В. Лотыш, В.М. Придюк, В.П. Онищук, М.В. Придюк

В работе приведена проверка адекватности математической модели расчета параметров маневренности и устойчивости длиннобазового автопоезда-контейнеровоза на базе экспериментальных исследований.

УДК 629.3.017

Experimental research of maneuverability and stability of road train for transportation of containers movement / V.Stelmaschuk, V.Lotysh, V.Prydiuk, V.Onyschuk, M.Prydiuk

Experimental confirmation of the model on certain criteria, the experimental study confirms the adequacy of the model.