

Сахно В.П., завідувач кафедри автомобілів, д.т.н., проф.
Поляков В.М., професор кафедри автомобілів, к.т.н.
Човча І.В., аспірант кафедри автомобілів
Національний транспортний університет

ДО ВИЗНАЧЕННЯ МАНЕВРЕНОСТІ І СТІЙКОСТІ РУХУ ПРИЧІПНОГО АВТОПОЇЗДА

Сучасний розвиток громадського та вантажного транспорту веде до збільшення запитів щодо міських автобусів великої місткості та вантажних транспортних засобів. Ця тенденція обґрунтовує аргументи економії енергії та зниження рівня забруднення навколишнього середовища, обумовлених обмеженням кількості транспортних засобів і водіїв, необхідних для перевезення великої кількості вантажів і людей. Як слідство, все більш широкого розповсюдження отримують як вантажні, так і пасажирські автопоїзди.

У роботі [1] показана перспективність використання причіпних пасажирських автопоїздів. Виконана порівняльна оцінка дизельного автобуса А70132 і електробуса А701 при їх роботі у складі автобусного поїзда. Доведена ефективність використання такого автобусного поїзда при роботі на міських маршрутах. Проте при створенні таких автопоїздів необхідно вирішити ряд практичних завдань, пов'язаних, у першу чергу, з їх маневреністю і стійкістю руху. Тому вибір автобуса і причепа для автобусного поїзда є на сьогодні актуальним.

У даний час задача визначення умов стійкості вантажних автопоїздів є достатньо вивченою. Так, у роботі [2] розроблені тривимірні динамічні моделі автомобіля та причепа, на основі яких побудована динамічна модель поїзда. На основі теорії наближення першого порядку звичайних диференціальних рівнянь та теорії бифуркації Хопфа вивчається лінійна та нелінійна стійкість кожного елемента та автопоїзда в цілому при прямолінійному русі. Чисельні результати показують, що для нелінійної і лінійної моделі критичні швидкості мало розрізняються між собою. У роботі [3] побудована модель поїзда із 31 ступенем вільності за допомогою пакету AutoSim, і показані напрямки поліпшення стійкості поїзда. У роботі [4] складені диференціальні рівняння плоскопаралельного руху для визначення показників маневреності триланкових автопоїздів. У роботі [5] наведена система рівнянь, що описує плоскопаралельний рух автопоїзда, яка доповнена рівняннями для самовстановлювального колісного модуля (СКМ).

Показники маневреності автопоїзда, зокрема координати центра мас автобуса, кут складання автопоїзда, зовнішній і внутрішній габаритні радіуси, габаритна смуга руху автопоїзда, як і показники стійкості руху, визначалися шляхом інтегрування чисельними методами вихідної системи рівнянь як з некерованою причіпною ланкою, так і її управлінням за рахунок СКМ.

Розрахунок показників маневреності автопоїзда і стійкості руху було виконано за вихідних параметрів автобуса А70132 і причепа на його базі.

За обраними вихідними даними на першому етапі розрахунків визначалися координати центра мас автобуса. Розрахунки виконані як для автобуса з некерованим причепом, так і причепом, обладнаним СКМ за кута повороту керованих коліс автобуса $\theta=0,57$ рад і СКМ причепа $\theta_4=0,24$ рад. (при цьому забезпечується радіус повороту автобуса на рівні 10,2 м і внутрішній габаритний радіус повороту автопоїзда $R_{вн}=5,3$ м) і швидкості 5 м/с, коли відцентровими силами і креном ланок автопоїзда можна знехтувати. Результати розрахунку наведено на рис. 1.

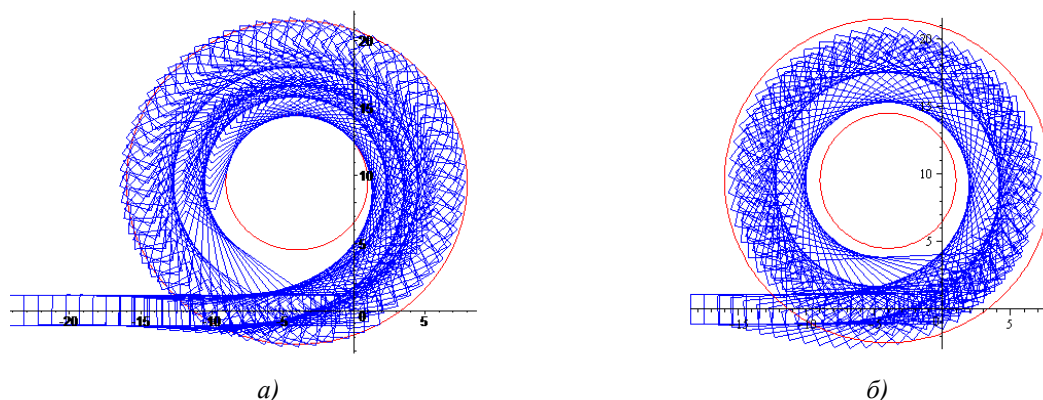


Рис. 1 – ГСР автопоїзда з некерованим причепом (а) і керованим за рахунок СКМ (б)

Аналіз результатів розрахунку наведених даних показує, що за швидкості 5 м/с автобус з некерованим причепом не задовольняє вимогам Директиви ($R_{зг}=12,98$ м, $R_{вг}=5,3$ м, $B_r=7,68$ м), у той час як автопоїзд з управлінням за рахунок СКМ причепа ($R_{зг}=12,5$ м, $R_{вг}=5,42$ м $B_r=7,08$ м) цим вимогам задовольняє. При цьому поперечна швидкість і поперечне прискорення центру мас причепа при вході автопоїзда в поворот за швидкості 5 м/с не перевищує 1,4 м/с² для некерованого причепа і 1,6 м/с² для керованого причепа, що свідчить про стійкість у цьому режимі обох автопоїздів. Проте при збільшенні швидкості руху автопоїзда до 10 м/с різко збільшуються прискорення причепа (прискорення автобуса для обох автопоїздів не перевищують 4,25 м/с², тобто рух автобуса є стійким), які хоч і менші для автопоїзда з некерованим причепом (5,83 м/с²) у порівнянні з автопоїздом з керованим причепом за рахунок СКМ (6,78 м/с²), проте більші максимально допустимих. При цьому обидва поїзди характеризуються недостатньою поворотністю, що може служити запорукою стійкості руху (рис. 2).

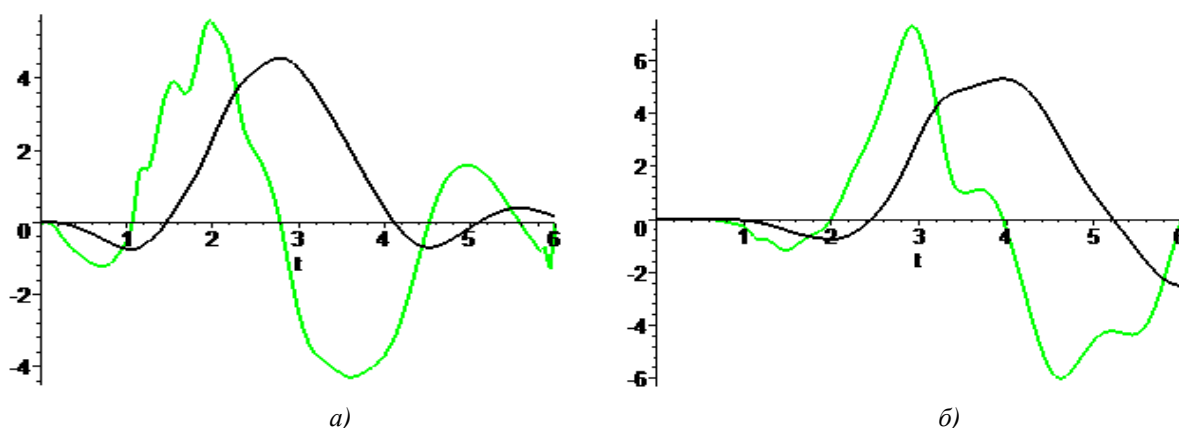


Рис. 2 – Зміна бічної швидкості і бічного прискорення центру мас причепа при вході автопоїзда в поворот за швидкості 5 м/с: (а) – автопоїзд з некерованим причепом, (б) – автопоїзд з причепом із СКМ

Про стійкість автопоїзда у прямолінійному русі можна судити по величині критичної швидкості руху автопоїзда та швидкості появи коливальної нестійкості.

Ці швидкості були розраховані за методикою, представленою у роботі [5]. Для цього вихідна система рівнянь була лінеаризована. Після цього був знайдений визначник системи, розв'язок якого чисельними методами за допомогою програмного забезпечення Maple 14 і дав критичну швидкість руху автопоїзда.

У результаті розрахунків для автопоїзда з некерованим причепом критична швидкість складала $v_{кр}=35,21$ м/с, а для автобуса з керованим причепом за рахунок СКМ $v_{кр}=15,14$ м/с. Оскільки критична швидкість автопоїзда значно менша максимальної швидкості його руху, то при досягненні цієї швидкості СКМ причепа повинен блокуватися і тоді автопоїзд з керованим причепом перетворюється в автопоїзд з некерованим причепом.

Дослідимо тепер вплив конструктивних і компоувальних параметрів автопоїзда на його критичну швидкість руху. Для цього будемо змінювати один із параметрів автопоїзда, залишаючи усі інші незмінними. Розрахунки будемо проводити за відносними параметрами, що представляють собою відношення вихідного параметра, прийнятого у попередніх розрахунках, до можливого його значення в конструкціях автомобільних поїздів. У якості таких відносних параметрів були прийняті: бази тягача і напівпричепа; відстані від центру мас тягача до передньої керованої осі, до точки зчіпки автомобіля-тягача з напівприцепом; коефіцієнти опору відведення коліс передньої керованої осі тягача k_1 , некерованих коліс тягача k_2 , коліс осей напівпричепа k_3 . Результати розрахунку представлені на рис. 3. Аналіз даних показує, що збільшення критичної швидкості руху можливе за рахунок збільшення бази автобуса (а) і причепа (б) і зменшення координати центру мас автобуса а (наприклад, збільшенням навантаження на керовану вісь автобуса) і переміщення точки зчіпки автобуса з причепом ближче до центру мас автобуса.

Для автопоїздів критична швидкість прямолінійного руху, як правило, перевищує швидкість появи коливальної нестійкості, тобто про стійкість руху автопоїзда можна судити по його швидкості появи коливальної нестійкості. Ця швидкість визначалася наступним чином. Послідовно зі збільшенням задавалася швидкість поступального руху автопоїзда і знаходилися корені характеристичного рівняння. Поява першого додатнього кореня свідчила про появу коливальної нестійкості.

Результати розрахунку коренів характеристичного рівняння за різних швидкостей прямолінійного руху автопоїзда з некерованим причепом наведені у таблиці. Аналіз цих результатів показує, що перший додатній корень з'явився за швидкості 29,2 м/с, яку можна вважати швидкістю появи коливальної нестійкості руху автобуса з некерованим причепом. Ця швидкість на 17,06 % менша за критичну

швидкість прямолінійного руху автопоїзда ($v_{кр}=35,21$ м/с) і в розрахунках параметрів стійкості необхідно приймати саме цю швидкість.

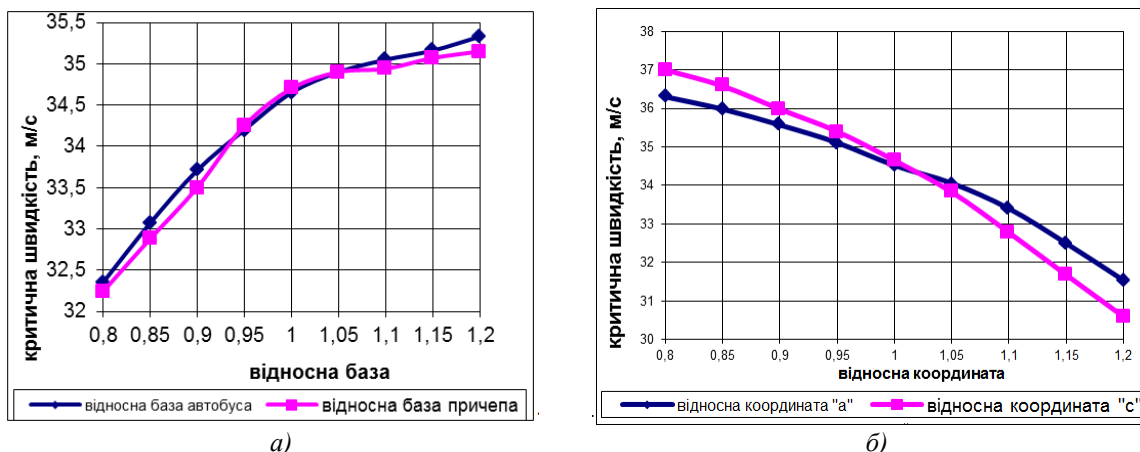


Рис. 3 – Критична швидкість руху автопоїзда у функції відносних параметрів: бази тягача і напівпричепа (а) координати центру мас тягача, відстані між центром мас автобуса і точкою зчипки (б)

Таблиця - Корені характеристичного рівняння за прямолінійного руху автопоїзда

Швидкість, м/с	Корені характеристичного рівняння
28,5	$eigv: -1.188124290 - 13.81337852 I, -1.188124290 + 13.81337852 I,$ $-.8039433500 - 1.208366854 I, -.8039433500 + 1.208366854 I,$ $-.5946136265 - 2/952947482 I, -.5946136265 + 2/952947482 I,$ $-.1166745032 - 1.537354363 I, -.1166745032 + 1.537354363 I$
29,2	$eigv: -1.176554315 - 13.80998651 I, -1.176554315 + 13.80998651 I,$ $-.9732548760 - 1.1755327653 I, -.9732548760 + 1.1755327653 I,$ $-.7637354430 - 3.4767346323 I, -.7637354430 + 3.4767346323 I,$ $.0109427630 - 5.1379202343 I, .0109427630 + 5.1379202343 I$

Висновки. Виконана порівняльна оцінка маневреності і стійкості руху причіпного автопоїзда як з некерованим, так і керованим за рахунок СКМ причепа. Встановлено, що за швидкості 5 м/с автобус з некерованим причепом не задовольняє вимогам Директиви ЄС ($R_{зг}=12,98$ м, $R_{вт}=5,3$ м, $V_r=7,68$ м), у той час як автопоїзд з управлінням причепа за рахунок СКМ ($R_{зг}=12,5$ м, $R_{вт}=5,42$ м $V_r=7,08$ м) цим вимогам задовольняє. При цьому поперечна швидкість і поперечне прискорення центру мас причепа при вході автопоїзда в поворот за швидкості 5 м/с не перевищує $1,4$ м/с² для некерованого причепа і $1,6$ м/с² для керованого причепа, що свідчить про стійкість у цьому режимі обох автопоїздів.

Визначена критична швидкість руху, яка для автопоїзда з некерованим причепом склала $v_{кр}=35,21$ м/с, а для автобуса з керованим причепом за рахунок СКМ $v_{кр}=15,14$ м/с. Оскільки критична швидкість автопоїзда значно менша максимальної швидкості його руху, то при досягненні цієї швидкості СКМ причепа повинен блокуватися і тоді автопоїзд з керованим причепом перетворюється в автопоїзд з некерованим причепом.

Література

1. Сахно В.П. До створення причіпного автобусного поїзда / В.П. Сахно, О.В. Диких // Науково-технічний збірник «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво». Випуск №111,2022.-С.175-184.
2. Ren Luo. Hunting stability analysis of train system and comparison with single vehicle model // April 2008 Journal of Mechanical Engineering 44(04) DOI: 10.3901/JME.2008.04.184/
3. Modeling and analyses of a connected multi-car train system employing the inerter/ Hsueh-Ju Chen, Wei-Jiun Su1 and Fu-Cheng Wang1 // Special Issue Article .Advances in Mechanical Engineering 2017, Vol. 9(8) 1–13, 2017 DOI: 10.1177/1687814017701703/
4. Сахно В.П. Маневреність метробуса / В.П.Сахно, В.В.Біліченко, В.М.Поляков, О.Є.Омельницький // Вісник машинобудування та транспорту: науковий журнал / Міністерство освіти і науки України, Вінницький національний технічний університет –Вінниця: ВНТУ, № 2(8), 2018. – С.106-118.
5. Сахно В.П. До розробки математичної моделі автопоїзда з причепом категорії О1 у поперечній площині // В.П.Сахно, С.М.Шарай, І.С.Мурований, І.В.Човча // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. Науковий журнал. –Луцький НТУ, 2021. - №2(17). – С.151-161.