

## ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ РУХУ МЕТРОБУСА

**В. О. Ткачук**

здобувач вищої освіти другого (магістерського) рівня  
спеціальності «Автомобільний транспорт»,  
навчально-науковий механічний інститут

Науковий керівник – к.т.н., доцент Р. М. Марчук

*Національний університет водного господарства та природокористування,  
м. Рівне, Україна*

**Дослідження стійкості метробуса у перехідних режимах руху, зокрема при виконанні маневрів «ривок рульового колеса» і «переставка», є актуальною задачею. Встановлено критичну швидкість прямолінійного руху триланкового метробуса, яка склала 32,06 м/с, а обмежуючим фактором при виконанні різних маневрів є як автобус, так і друга причіпна ланка, проте значення прискорень не перевищують допустимих 0,4g. Ключові слова:** метробус, причіп, ланка, стійкість, маневр.

**The study of the metrobus stability in transitory modes of movement, in particular when performing the «steering wheel jerk» and «shuffle» maneuvers, is an urgent task. The critical speed of straight-line movement of a three-link metrobus was established, which was 32,06 m/s, and the limiting factor when performing various maneuvers is both the bus and the second trailer link, but the acceleration values do not exceed the permissible 0,4g.**

**Keywords:** metrobus, trailer, link, stability, maneuver.

**Останнім часом** в багатьох містах світу стали запроваджувати так звані «метробуси» або BRT (Bus Rapid Transit) системи, які стали більш дешевою альтернативою метрополітену та іншого рейкового транспорту, зокрема трамваїв. На сьогодні BRT-транспорт функціонує вже у понад 200 містах світу. Тому, вважаємо доречним вивчити цей досвід і переваги системи міського транспорту, можливості запровадження в Україні, адже поява метробусів допоможе еволюційним шляхом витіснити «маршрутки» з українських міст та перейти на більш прогресивну модель функціонування міського транспорту.

Метробуси, як правило, являють собою автобуси, які їздять за визначеними маршрутами і мають підвищену пасажиромісткість та довжину (18–25 м). В такому випадку відмінністю від класичних міських маршрутів є те, що метробуси переміщуються особливою (виділеною) смугою із невеликими інтервалами. Варто зазначити, що важливим аспектом BRT-системи є зупинки, які мають вигляд, так званих, терміналів (станцій), які обладнуються турнікетами, для здійснення оплати за проїзд [1].

До переваг BRT-систем також відносимо швидкість будівництва таких ліній, оскільки в основі можуть бути існуючі магістралі населених пунктів. Якщо брати до уваги терміни будівництва, то лінія BRT-системи будується за один-два роки, тоді як будівництво трамвайних ліній або метрополітену може тривати від трьох до десяти років.

Значного розвитку метробуси зазнали із появою 3-ланкових автобусів, які мають можливість одночасно вміщувати до 300 пасажирів, в порівнянні зі 180 пасажирами у 2-ланковому транспортному засобі. Відтак, використовуючи 3-ланкові автобуси, які курсують

з малими інтервалами (від однієї до п'яти хвилин), лінія метробусу має потенціал до вирішення проблем транспорту великої кількості міст нашої країни [1].

**Безпечний рух** будь-якого автомобільного транспортного засобу, в тому числі і метробуса, досить часто визначається його динамічними властивостями, а саме, стійкістю і керованістю. Нині завдання встановлення умов стійкості динамічної системи є ґрунтовно вивченим, проте як показує практика, дослідження характеру поведінки системи в області нестійкості і встановлення причин їх виникнення на сьогодні все ще є достатньо актуальними.

Характеристики стійкості руху автомобільних транспортних засобів встановлюються комбінацією масово-геометричних, експлуатаційних і конструктивних показників його ланок (для метробусів – це автобус і причіпні ланки). Загалом оптимальні комбінації зазначених показників з точки зору стійкості, навіть для одного і того ж транспортного засобу, в межах експлуатаційних швидкостей руху і навантажень бувають різними. Тому є труднощі отримання на початкових етапах створення автомобільних транспортних засобів чітких кількісних показників і конструкційних параметрів за критеріями стійкості руху [2]. Прогрес у вирішенні схожих завдань залежить від того, наскільки оптимально підібрана математична модель та її істотні параметри, що характеризують поведінку динамічної системи, чим для нашого прикладу є 3-ланковий метробус [3–5].

В працях [2–5] наведено диференціальні рівняння плоско-паралельного руху, які відображають показники стійкості і маневреності руху. Але, як показано у праці [6], дані рівняння можуть характеризувати стійкість автомобільних транспортних засобів лише для прямолінійного руху. Таке використання для оцінки стійкості автомобільних транспортних засобів в перехідних режимах руху може призвести до значних відхилень. Тому метою роботи є визначення показників стійкості метробуса у перехідних режимах руху, а саме при виконанні таких маневрів як «переставка» і «ривок рульового колеса».

**При дослідженні** стійкості руху автопоїзда зазвичай досліджують плоско-паралельний рух його ланок. Одночасно приймають, що нормальні реакції опорної поверхні на колеса лівого і правого борту є однаковими. Для такої умови, стійкість руху розглядається для плоскої моделі автопоїзда.

В праці [6] можемо бачити систему диференціальних рівнянь, яка описує плоско-паралельний рух ланок 3-ланкового шарнірно-зчленованого автобуса, при цьому, вона може бути використана для пошуку 5 невідомих:  $\omega$ ,  $u$ ,  $v$ ,  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$ . До такої системи рівнянь також входять бокові і поздовжні реакції дороги на колеса складових ланок автопоїзда. Напрямок та величина поздовжніх реакцій  $X_i$  залежать від режиму руху автопоїзда (гальмування, розгін, усталений вільний рух). Бічні реакції  $Y_i$  залежать від обраної моделі деформації колеса в бічному напрямку.

Рух метробуса у виділених смугах та маневрування в граничних режимах руху з великою швидкістю може спровокувати суттєву зміну реакцій опорної поверхні на колеса ланок автопоїзда. Відтак, паралельно з рухом автопоїзда в горизонтальній площині, який описаний диференціальними рівняннями плоско-паралельного руху, варто розглянути рух автопоїзда в поперечній та поздовжній вертикальних площинах.

Для нашого випадку, сили взаємодії в тягово-зчіпному та опорно-зчіпному пристроях не впливають на перерозподіл навантажень щодо бортів ланок автопоїзда. Відтак, достатньо складну систему – 3-ланковий метробус можливо досліджувати як 3 системи – автобус, перша причіпна ланка (за напівпричіпною схемою) та друга причіпна ланка (за причіпною схемою), які креняться незалежно. Одночасно приймаємо, що вісь крену кожної ланки є паралельною опорній поверхні, а рух ланок метробуса у вертикальній площині по кутам галопування (диференту, тангажу) та крену впливають на боковий рух в основному за рахунок зміни вертикальних навантажень на колеса, змінюючи, тим самим, вертикальні

реакції опорної поверхні. З врахуванням таких міркувань і було проведено розмежування руху на поздовжньо-поперечний і боковий [7].

Використовуючи загальноприйняті позначення, розрахункову схему, яка еквівалентна 3-ланковому метробусу в поздовжній вертикальній площині, можна зобразити у вигляді, рисунок.

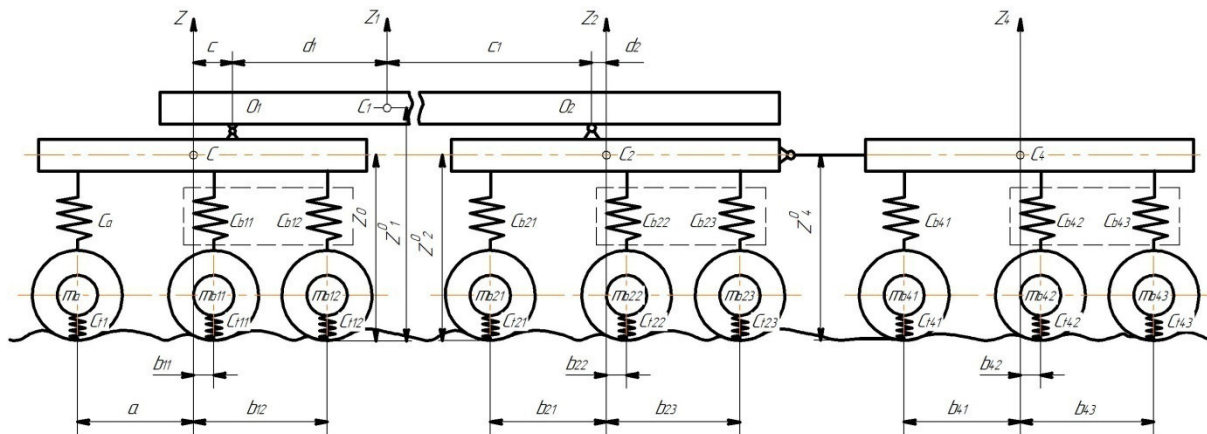


Рисунок. Схема 3-ланкового метробуса

В праці [7] показано систему рівнянь, яка описує довантаження і розвантаження бортів автопоїзда при виконанні ним різних маневрів. Дану систему з певним коректуванням можливо застосовувати також і для метробуса.

При дослідженні показників стійкості автобусів, в тому числі і зчленованих, приймаємо, що автобус завантажений повністю, пасажери не переміщуються по салону, а також вся підресорена маса представляє собою одне тверде тіло [6].

Інтегрування системи рівнянь, яка описує 3-ланковий метробус у вертикальній площині, паралельно з рівняннями, які описують плоско-паралельний рух, дає можливість дослідити характер поведінки кутової швидкості рискання та бічного прискорення при виконанні класичних маневрів, зокрема «переставка» і «ривок рульового колеса».

Дослідження демонструють, що найбільше навантаження осей і крен метробуса характерні для останнього причепа, який і є лімітуючим показником за величиною  $V_{кр}$ . Кут повороту керованих коліс тягача викликає зміну напрямку руху метробуса, відтак відповідно з'являються кути складання певних його ланок. При збільшенні кута повороту керованих коліс автобуса, збільшується і різниця в кутах складання ланок, при цьому другий кут складання значно перевищує перший, особливо з врахуванням крену кузова метробуса.

Кутова швидкість рискання та бічні прискорення окремих ланок метробуса при виконанні маневру «переставка» і «ривок рульового колеса», демонструють, що лімітуючим показником при виконанні різних маневрів є як автобус, так і друга причіпна ланка, але величини прискорень не перевищують допустимих  $0,4g$  (прискорення вільного падіння).

**Встановлено, що** значення стійкості руху метробуса при виконанні класичних маневрів, зокрема «переставка» і «ривок рульового колеса», доцільно визначати методом інтегрування системи рівнянь, які характеризують 3-ланковий метробус у вертикальній площині, паралельно із рівняннями, які характеризують його плоско-паралельний рух. При такій умові визначаємо кути складання ланок метробуса.

Встановлюємо, що зі збільшенням кута повороту керованих коліс автобуса збільшується і різниця в кутах складання ланок, при цьому другий кут складання значно перевищує перший, особливо з врахуванням крену кузова метробуса. Варто зазначити, що

навантаження осей і найбільший крен метробуса властиві останньому причепу, який і є лімітуючим показником по параметру критичної швидкості. Зокрема, коефіцієнт посилення бічного прискорення кузова метробуса, з врахуванням крена кузова, збільшується на 22,2% у порівнянні з його відсутністю, тому дану умову доцільно враховувати при аналізі конструкції метробусів, зокрема підвіски та ходової частини.

Кутова швидкість рискання та бічні прискорення окремих ланок метробуса при виконанні маневрів «переставка» і «ривок рульового колеса», демонструють, що лімітуючим показником при виконанні різних маневрів є як автобус, так і друга причіпна ланка, проте значення прискорень не перевищують допустимих 0,4g (прискорення вільного падіння), відповідно його стійкість за таких умов забезпечується.

1. Сахно В. П., Біліченко В. В., Поляков В. М., Омельницький О. Є. Маневреність метробусів. *Вісник машинобудування та транспорту*. Вінниця, 2018. № 2(8). С. 106–118.
2. Volodymyr Sakhno, Igor Murovanyi, Victor Poliakov, Svitlana Sharai. Improving of transitway operating properties. *Current Problems of Transport : Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Scientific Conference*, May 28–29. Ternopil, 2019. P. 133–140.
3. Volodymyr Sakhno, Victor Polakov, Igor Murovanyi, Vadim Seleznirov, Yuriy Vovk. Analysis of transverse stability parameters of hybrid buses with active trailers. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. Katowice, 2018. Vol. 101. P. 185–201. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2018.101.17>.
4. Sakhno V. P., Marchuk M. M., Marchuk R. M. Study of long haul truck movement along the curvilinear trajectory while steering a carryall semi-trailer – container by braking the wheels of one axle. *INMATEN : Agricultural Engineering*. Bucharest, 2017. Vol. 49. № 2. P. 107–112.
5. Volodimir Sakhno, Juraj Gerlici, Victor Poliakov, Alexandr Kravchenko, Oleg Omelnitsky, Tomas Lask. Road train motion stability in BRT system. *XXIII Polish-Slovak Scientific Conference Machine Modelling and Simulation*. Book of abstracts, September 4–7, 2018, Rydzyna, 2018. P. 49. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201925403007>.
6. Sakhno V. P., Yashchenko D. M., Marchuk R. M., Marchuk N. M., Lyashuk O. L. Research of a truck train movement when driving remitrailer by slowing down of wheels of one axis pin on the model. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. Pahang, 2020. Vol. 17, № 1. P. 7749–7757. DOI: <https://doi.org/10.15282/ijame.17.1.2020.21.0576>.
7. Lobas L. G., Sakhno V. P., Tarnopol'skaya T. I. Theory of stability of the motion of three-member pneumowheel machines. *Prikladnaya Mekhanika*. Kyiv, 1991. Vol. 27, Issue 1. P. 96–103.