Дослідження Можливості Застосування Закону Керування, Синтезованого на Основі Кінематичної Моделі, для Керування Динамічною Моделлю РеверсногоРуху Автопоїзда

Володимир Вербицький
кафедра Програмногозабезпечення автоматизованих систем
Запорізька державна інженерна академія
Запоріжжя, Україна
oxsidan@ukr.net

Дмитро Татієвський
кафедра Програмногозабезпечення автоматизованих систем
Запорізька державна інженерна академія
Запоріжжя, Україна
dtdissert@gmail.com

Анатолій Безверхий
кафедра Програмногозабезпечення автоматизованих систем
Запорізька державна інженерна академія
Запоріжжя, Україна
anatoliy.bezverkhyi@hotmail.com

Studying a Possibility to Apply the Control Law Synthesized on the Basis of the Kinematic Model to Control the Dynamic Model of Reverse Road Train Motion

Volodymyr Verbytskyy
dept. Software of Automated Systems
Zaporizhzhia State Engineering Academy,
Zaporizhia, Ukraine
oxsidan@ukr.net

Dmytro Tatievskyi
dept. Software of Automated Systems
ZaporizhzhiaState Engineering Academy,
Zaporizhia, Ukraine
dtdissert@gmail.com

Anatoliy Bezverkhyi
dept. Software of Automated Systems
Zaporizhzhia State Engineering Academy,
Zaporizhia, Ukraine
anatoliy.bezverkhyi@hotmail.com

***Анотація*–У цьому дослідженні проведено вивчення стану вирішення проблеми, пов'язаної з реверсним рухом автопоїзда, що складається з тягача і напівпричепа зі зчіпним пристроєм точно над задньою віссю тягача ("on-axle hitching" модель). На основі аналізу підходів до синтезу законів управління таким автопоїздом, прийнято рішення реалізувати синтез управління для кінематичної моделі, з використанням методу функцій Ляпунова. Основна ідея дослідження полягає в перевірці можливості застосування синтезованого закону до управління динамічною моделлю.Для вивчення поведінки синтезованих законів для різних моделей, проводився порівняльний аналіз фазових**

портретів траєкторій, кутів складання і управління, а також виконувався аналіз якості перехідних процесів при зміні швидкості руху автопоїзда. Синтез керування та чисельне інтегрування виконані у системі Maple.Такий аналіз дозволяє зробити висновок про можливість застосування синтезованого, для кінематичної моделі, закону управління до моделі динамічної, при русі з малими швидкостями, малими початковими збуреннями за кутом складання та для малих часових проміжків.

***Abstract*–**
Thecurrentresearchcontainsstudyingofanissuesolutionstaterelate dtoreversemotionofaroadtrainconsisting of a tractor truck and a semitrailer with a hitching unit on the tractor truck rear axle directly (an "on-axle hitching" model). Based on analyzing approaches towards the kind of road train steering laws synthesis it's decided to synthesize kinematic model controlling using Lyapunov's functions method. The main research idea is in checking the possibility to apply the synthesized law to control a dynamic model. Comparative analysis of trajectory phase portraits, folding and steering angles and also analyzing transitions quality when changing road train motion speed have been performed to study synthesized laws behaviour for different models. Steering synthesis and computational integration are done in the Maple system. The kind of analysis allows making a conclusion that it's possible to use the steering law synthesized for a kinematic model to control a dynamic model when moving at low speeds, with small folding angle initial disturbance and for short time intervals.

***Ключові слова*–автопоїзд; динаміка; закон керування рухом; кінематична модель; модель реверсного руху**
***Keywords*–roadtrain; motion steering law; kinematic model; reverse motion model**

I. Вступ

Автопоїзди, що складаються із тягача та пасивних напівпричепів, відносяться до класу нелінійних, неголономних, структурово нестійких (при реверсному русі) динамічних систем. Внаслідок цього, завдання керування їх рухом є актуальним з точки зору практичної реалізації програмного руху із заданими обмеженнями.

Завдання керування рухом автопоїзда з напівпричепому припущенні реалізації неголономних зв'язків (відсутність бічного ковзання опорних коліс) має велике теоретичне та прикладне значення. Дослідження в цій галузі стимулюються численними прикладними завданнями [1, 2], оскільки існує проблема управління такою системою при русі реверсом (виконанні парковки, в'їзді в обмежений простір (dock), маневруванні при виїзді заднім ходом з доку та інше).Без належного управлінського впливу, ланки автопоїзда будуть «видавлювати» один одного, що супроводжується необмеженим ростом кута складання, явище, відоме як jackknifing, в той час як при русі вперед напівпричіп відстежуватиме курсовий кут тягача. Тому автономні системи вантажоперевезень є в даний час об'єктом численних дослідницьких проектів, серед яких можна виділити роботи по синтезу законів керування для реверсного руху таких систем.

Синтезовані при цьому закони керування можуть бути безпосередньо використані для програмного управління робототехнічними установками відповідних моделей, розробки машини Дубінса для цих моделей, для побудови автоматичних систем управління, які б допомагали водієві керувати автомобілем з причепом при русі зворотним ходом.

Щодо згаданих моделей, слід зазначити, що для автопоїздів досить типовим є розташування тягово-зчіпного пристрою як точно над задньою віссю тягача (on-axle hitching), так ізі зміщенням зчіпних пристроїв щодо задньої осі тягача (off-axle hitching). У даному дослідженні кінематичне керування синтезовано для першого типу моделей.

II. Методи дослідження

Для моделі, що досліджується, пропонуються методи керування та планування із застосуванням різноманітного математичного апарату. Серед методів, що використовуються найчастіше, виділимо метод зворотних зв'язків [3, 4] та ланцюгових систем [5].

Також, використовуються методи, зумовлені виключно геометричними особливостями кінематики моделі, що сформульовані у каскадній формі [6].

Синтез закону керування може бути виконаний після лінеаризації моделізворотним зв'язком, згідно із станом, використовуючи апарат алгебри Лі [7] та нечіткої логіки (fuzzy logic) [8].

Використовується каскадна стратегія керування (VFO) [4]. Застосовуються лінійно-квадратичні контролери [9], нільпотентна апроксимація [10] та інше.

Якісний аналіз таких систем виконано у дослідженнях А.А. Мартинюка та Н.В. Нікітіна[11].

При цьому синтез законів керування розробляється, як правило, для динамічної та кінематичної моделей окремо.

Мета дослідження полягає в реалізації синтезу закону керування для кінематичної моделі, із застосуванням методу функцій Ляпунова та у перевірці можливості керування реверсним прямолінійним рухом дволанковогоавтопоїзда, що описується динамічною моделлю за допомогою синтезованого закону.

III. Результати дослідження

Синтезуємо закон керування реверсним рухом автопоїзду для кінематичної схеми, що наведена на рис. 1.

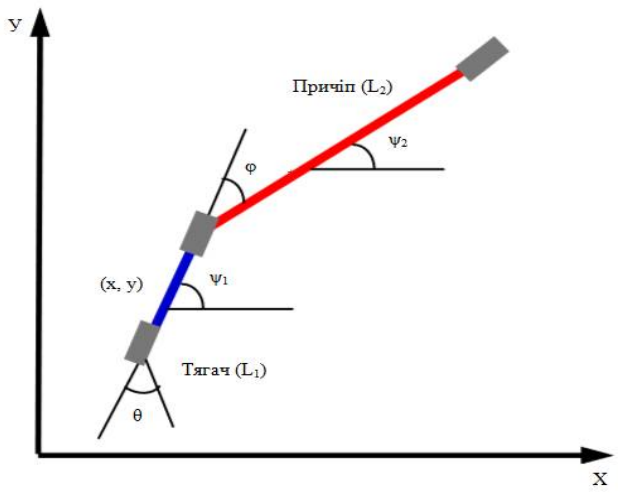

Рис. 1. Кінематична схема дволанкового автопоїзда

Тут ψ1, ψ2 – орієнтаційні (курсові) кути об'єктів системи, L1, L2 – їх лінійні розміри, θ – керування (кут повороту рульових коліс тягача), φ = ψ2 – ψ1 – кут складання між тягачем та напівпричепом. До цього кута застосовується обмеження |φ| < π/2, обмеження кута θ визначаються технічними можливостями керування.

Вважаючи $\psi_1=\psi$, модель такого автопоїзда описується наступною системою диференціальних рівнянь (1):

$$\begin{aligned} x_1 &= \nu \cdot cos(\psi); \\ y_1 &= \nu \cdot sin(\psi); \\ \omega &= \nu \cdot tan(\theta) / L_1; \\ \varphi &= \nu \cdot sin(\varphi) / L_2 - \nu \cdot tan(\theta) / L_1; \\ \theta &= Theta; \\ \psi &= \omega, \end{aligned} \qquad (1)$$

у якій вираз Theta (2) є похідною керування за часом, що синтезована за допомогою методу функцій Ляпунова [12]. Даний метод використовувався для синтезу кінематичного керування [13].

Синтез керування та чисельне інтегрування виконані у системі Maple:

$$\begin{aligned} Theta = & cos^2(\theta) \cdot ((\nu \cdot sin(\varphi) / L_1 - \\ & - \nu \cdot tan(\theta) / L_2) \cdot (1 + cos(\varphi) \cdot L_2 / L_2) - \\ & - tan(\theta) + \varphi + sin(\varphi) \cdot L_2 / L_1). \end{aligned} \qquad (2)$$

Цей вираз використовувався у якості керування для динамічної моделі [14]. У маплеті реалізована можливість порівняння необхідних фазових портретів. Для цього спочатку відпрацьовує динамічна модель, потім – кінематична. Після цього отримані фазові портрети об'єднуються для порівняльного візуального аналізу. Чисельне інтегрування СДР виконано за однакових початкових умов (умови Коші).

Нижче зображені траєкторії характерної точки в площині руху (рис. 2), інтегральні криві за кутами складання (рис. 3) та залежність закону керування як функції від часу (рис. 4) для обох розглянутих моделей.

При швидкості v=1м/с траєкторії тягача носять прямолінійний характер у часовому інтервалі, що дорівнює приблизно 10 сек. від початку руху, надалі їх бокові зміщення носять різноспрямований характер із більшою тенденцією до зростання їх норми у кінематичній моделі.

Напрямок цих зміщень однозначно визначається кутом складання (зміщення міняють знак при зміні знака цього кута).

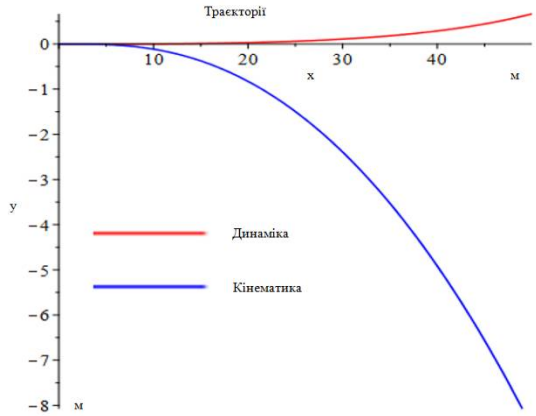

Рис. 2. Траєкторії характерної точки тягача в площині руху для різних моделей

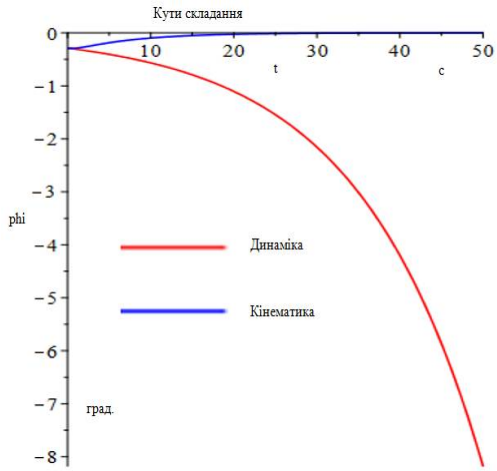

Рис. 3. Інтегральні криві кутів складання для обох моделей

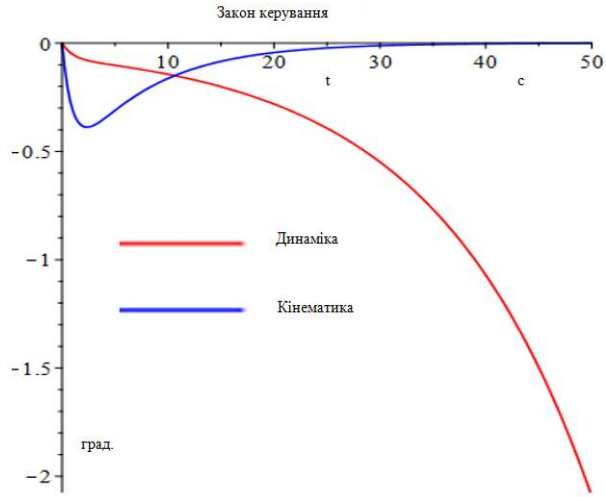

Рис. 4. Кут керування як функція від часу для кінематичної та динамічної моделей

При цьому, кут складання для кінематичної моделі наближається до нуля, у той час як, для динамічної моделі спостерігається його неперервне зростання з посиленням цієї тенденції при зростанні швидкості руху. Ця ж тенденція характерна і для динаміки керування для обох моделей.

Висновки

Проведене дослідження дозволяє зробити висновки про те, що синтезоване для кінематичної моделі керування, може бути застосовано для динамічної моделі при русі з малими швидкостями, малими початковими збуреннями відносно кута складання та для малих часових проміжків. То ж за вищезазначених умов існує принципова можливість використання кінематичного керування динамічною моделлю.

ЛітератураReferences

[1] T.W.Erkert. Computersimulation of offtracking of truck and trailer combinations using forest roads: Department of Civil Engineering Oregon State University Publ., Oregon State, 1989.

[2] D.W.Harwood, I.B. Potts, D.J.Torbic. Highway/Heavy Vehicle Interaction: Transportation research board publ., Washington, 2003.

[3] P. Bolzern, R. M. DeSantis,A. Locatelli,D. Masciocchi. Path-Tracking for Articulated Vehicles with Off-Axle Hitching: IEEE transactions on control systems technology, 1998, vol. 6, № 4, pp. 515-523.

[4] C. Altafini. Path Following With Reduced Off-Tracking for Multibody Wheeled Vehicles: IEEE transactions on control systems technology, 2003, vol. 11, № 4, pp. 598-605.

[5] R. M. Murray, S. S. Sastry. Nonholonomic motion planning: steering using sinusoids: IEEE Trans. on Automatic Control, 1993, vol. 38, № 5, pp. 700-716.

[6] Michalek Maciej. Application of the VFO method to set-point control for the N-trailer vehicle with off-axle hitching: Poland, International Journal of Control, 2012, vol. 85, pp. 502-521 [On-line]. Available: http://etacar.put.poznan.pl/maciej.michalek/PublikacjePliki/MyT3ONTrackingVFORoMoCo.pdf.

[7] E. G. Sklyarenko. Stabilizaciya zadnego hoda avtopoezda s dvuhosnim pricepom metodom linearizacii obratnoi svyazyu po sostoyaniyu: Vestnik Nacionalnogo universiteta «HPI», 2010, 28, pp. 275-278.

[8] J. Cheng, B. Wang, Y. Zhang,Y. Xu. Backward Path Tracking Control for Mobile Robot with Three Trailers: China, School of Electrical Engineering, University of Jinan, 2016 [Online]. Available: http://www.uniobuda.hu/users/szakala/SMC%202016%20pendrive/1030_smc2016.pdf.

[9] N. Evestedt, O. Ljungqvist,D. Axehill. Motion planning for a reversing general 2-trailer configuration using Closed-Loop RRT: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2016, pp. 3690-3697 [Online]. Available: https://liu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1066727/FULLTEXT01.pdf.

[10] A. A. Ardentov, (2016). Controlling of a mobile robot with a trailer and its nilpotent approximation: Russia, Pereslavl-Zalessky, Yaroslavl Region, 152020, Program Systems Institute of RAS, 2016 [Online]. Available: https://arxiv.org/pdf/1612.01344.pdf.

[11] A. A. Martinyuk, N. V. Nikitina. O kachestvennom analize odnoi modeli transportnih mashin: Prikladnaya mehanika, 2018, № 2, pp. 110-115.

[12] A. M. Lyapunov. Collected Papers in 6 Volumes: Moskow, Izd. Akd. NaukSSSR, vol. 2, 1956.

[13] D. Tatievskyi. The synthesis of steering rules for stabilizing road train reverse motion to solve the task of reaching a set goal: Technology Transfer: fundamental principles and innovative technical solutions, 2017 [Online]. Available: www.google.com/url?q=http://eujr.eu/ttfpits/article/download/482/459&sa=U&ved=0ahUKEwj9lbrCrITZAhUJhaYKHfshDMcQFggYMAE&usg=AOvVaw3VTgy9M9_z1DKwW2jjahsJ.

[14] V. G. Verbitskii, A. D. Bumaga.Analyzing stability and handing of bolster–type road train with bearing semi-trailer axis control system model movement: Modern industrial and civil engineering, 2008, vol. 4, № 2, p. 65-76. [Online]. Available at: http://donnasa.org/publish_house/journals/spgs/2008-2/02_verbickij_bumaga.pdf.