

Є. І. Калінін<sup>1</sup>, М. А. Кусков<sup>2</sup>, О. М. Бельорін-Еррера<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

<sup>2</sup> Державний біотехнологічний університет, Харків, Україна

## ОСОБЛИВОСТІ ПОВОРОТУ ШАРНІРНО-ЗЧЛЕНОВАНОГО ТРАКТОРА

**Анотація.** Предметом досліджень статті є динаміка повороту колісного трактора з шарнірно-зчленованою рамою при особливих умовах функціонування еластичного пневматика. Метою роботи є аналіз моделі руху колісного трактора з шарнірно-зчленованою рамою при врахуванні особливостей формування дотичної сили тяги колеса та динаміки повороту. Завдання дослідження полягають у отриманні залежностей кінематичних характеристик та моменту опору колісного трактора при повороті. Застосовувані методи: методи системного аналізу результатів експериментальних та теоретичних досліджень. Отримані результати: розглянуто задачу повороту трактора з шарнірно-зчленованою рамою на агрофонах з різною несучою здатністю. Проаналізовано формування моменту опору повороту трактора в залежності від кута між повздовжніми вісями секцій. Встановлено, що аналіз процесу повороту, проведений з позицій кінематики окремих секцій, повною мірою не відображає специфіку повороту трактора в різних умовах його експлуатації. Спотворення заданої траєкторії криволінійного руху є наслідком впливу сил взаємодії еластичних пневматиків коліс з ґрунтом і відцентрових сил, що виявляються під час руху на швидкостях, які перевищують 6 км/год. Практична значущість роботи полягає у тому, що, на основі проведеного системного аналізу, введені вимоги на виконання транспортних робіт з метою підвищення тягово-зчіпних властивостей та покращення прохідності транспортно-технологічного агрегату.

**Ключові слова:** трактор; шарнірно-зчленована рама, поворот, момент опору, кінематичні характеристики, гакове навантаження, ведучий міст.

### Вступ

У підвищенні ефективності сільськогосподарського виробництва та прискоренні науково-технічного прогресу значна роль приділяється новій сільськогосподарській техніці, яка повинна підвищити продуктивність праці на основному обробітку ґрунту в 1,5...1,8 рази та знизити питому витрату палива на 10...12%.

Тенденція, що спостерігається в останні роки, до широкого використання колісних шарнірно-зчленованих тракторів пояснюється їх універсалізацією та кращою агрегатованістю з різними сільськогосподарськими, дорожніми та вантажними машинами, а також підвищеною маневреністю у порівнянні з тракторами, що мають керовані колеса. Завдяки високим швидкостям руху та встановленому спеціальному обладнанню такі трактори протягом усього року можуть використовуватися з багатовісними причепами на транспортних роботах, успішно конкуруючи за собівартістю виконаної роботи з великовантажними автомобілями.

У найбільш загальному випадку колісна машина відтворює дуже складні рухи.

Водночас, від сил, що діють у контактні колісного рушія з дорогою, залежать такі основні експлуатаційні властивості колісних машин, як тягово-швидкісні характеристики, поворотність, стійкість, прохідність та деякі інші.

У розвитку теорії руху колісних машин велика частка робіт належить таким вченим як Г.В. Зімельев, Б.С. Фалькевич, А.С. Литвинов, Я.М. Певзер, Р.В. Ротенберг, В.Ф. Бабков, головних конструкторів заводів та багатьох інших вчених та інженерів [1 – 8].

Поворотність – властивість колісної машини здійснювати повороти із заданою кривизною на місцевості [9, 10].

Теорія повороту колісного трактора із шарнірно-зчленованою рамою давно цікавить дослідників. Немає досліджень повороту трактора з шарнірно-зчленованою рамою при зміні зчіпних властивостей колеса. Саме тому сформована мета роботи, яка полягає в наступному.

**Мета роботи** – аналіз моделі руху колісного трактора з шарнірно-зчленованою рамою при врахуванні особливостей формування дотичної сили тяги колеса та динаміки повороту.

Завдання дослідження полягають у отриманні залежностей кінематичних характеристик та моменту опору колісного трактора при повороті.

### Усталений поворот колісного трактора з шарнірно-зчленованою рамою

В процесі дослідження кута між осьовими лініями задньої секції шарнірно-зчленованого трактора та причіпного агрегату на повороті слід розрізняти три періоди.

1. Період входу в поворот, який поділяється на дві фази: трактор та причіпний агрегат рухаються за змінними радіусами; трактор рухається із постійним радіусом повороту, а причіпний агрегат ще із змінним.

2. Період усталеного руху на повороті, коли трактор і причіпний агрегат рухаються навколо єдиного центру повороту.

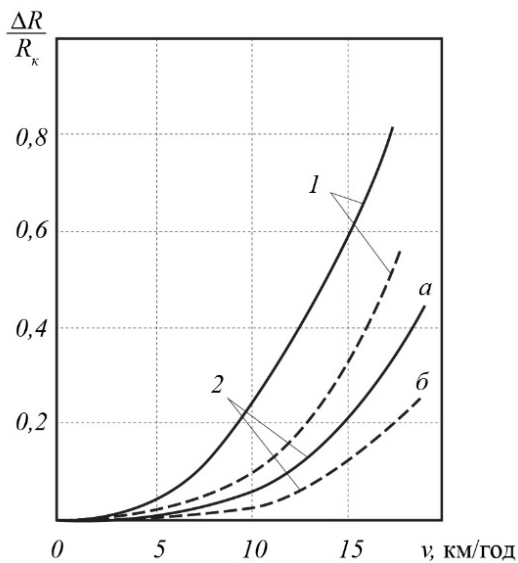
3. Період виходу із повороту. Він поділяється на дві фази: трактор та причіпний агрегат рухаються зі змінними радіусами повороту; трактор рухається прямолінійно, а причіпний агрегат ще кривою змінної кривизни.

Аналіз процесу повороту, проведений з позицій кінематики окремих секцій [9 – 21], повною мірою не відображає специфіку повороту трактора в різних умовах його експлуатації.

Спотворення заданої траєкторії криволінійного руху є наслідком впливу сил взаємодії еластичних пневматиків коліс з ґрунтом і відцентрових сил, що виявляються під час руху на швидкостях, які перевищують 6 км/год.

Істотний вплив на стійкість руху та керованість трактора надають вертикальні навантаження на колеса, характеристики шин, внутрішній тиск у них та конструкція гідравлічного приводу рульового управління.

Приріст  $\Delta R$  кінематичного радіусу  $R_k$ , що визначається кутом  $\alpha$  між поздовжніми вісями секцій, відбувається в результаті сумарної дії бічного відведення коліс та поперечного зміщення ґрунту (рис. 1).



**Рис. 1.** Залежність відносного приросту радіусу повороту  $\frac{\Delta R}{R_k}$  від швидкості руху трактора  $v$ , внутрішнього тиску в шинах  $p_{ш} = 0,08$  МПа (1) та  $p_{ш} = 0,15$  МПа і вертикального навантаження на колеса при повороті трактора на щільному ґрунті без плугу (а) та в агрегаті з плугом ПЛН-5-35 (б)

На щільних ґрунтах, при достатньому зчепленні пневматичного колеса із ґрунтом, збільшення радіусу повороту визначатиметься переважно бічним відведенням коліс, що функціонально залежить від еластичності встановлених шин.

На м'яких ґрунтах, особливо при поворотах з ексцентрично прикладеним гаковим навантаженням, що має місце при виконанні орних робіт, помітний вплив на траєкторію руху має пластична деформація ґрунту. Зменшення внутрішнього тиску в шинах  $p_{ш}$  завжди призводить до зниження коефіцієнту опору відведення, а збільшення вертикальних навантажень на колеса підвищує здатність шин протистояти бічному відведенню.

З рис. 1 видно, що збільшення відносного радіусу повороту  $\frac{\Delta R}{R_k}$  трактора ХТЗ-243К.20 при  $\alpha_{max}$  значно збільшується, з підвищенням швидкості руху,

досягаючи при  $v = 15$  км/год і  $p_{ш} = 0,08$  МПа величини 0,6. При цьому, замість заданого куту  $\alpha_{max}$  мінімального радіуса повороту в 5,5 м, дійсний радіус повороту дорівнює 8,8 м.

Інтенсивність збільшення підвищується з падінням внутрішнього тиску в шинах. Відцентрові сили, що зростають з підвищенням швидкості руху, викликають збільшення кутів відведення за рахунок поперечної податливості шин і зміщення ґрунту.

Поворот колісного шарнірно-зчленованого трактора без гакового навантаження можна представити як поворот кожної секції навколо вісі симетрії свого моста та підтягування секції, що має менше вагове навантаження.

Поворот трактора ХТЗ-243К.20 здійснюється підтягуванням задньої секції, вага якої становить 36% від загальної ваги трактора. При навішуванні плуга ПЛН-5-35 навантаження на передній та задній мости вирівнюються і зближення секцій відбувається за рахунок їх підтягування.

Значне гакове навантаження зміщує центр повороту задньої секції. Відбувається поворот її з ковзанням навколо точки прикладання гакового навантаження та підтягуванням передньої секції трактора.

При повороті ( $\alpha = const$ ) трактора, шарнір повороту якого знаходиться посередині поздовжньої бази, колеса задньої секції рухаються по сліду, прокладеному колесами більш навантаженої передньої секції.

При вході в поворот і виході з нього гідравлічним приводом рульового управління секціям надається відносний рух.

Поворот їх в абсолютному русі відбувається навколо різних миттєвих центрів обертання, і траєкторії руху коліс зміщуються.

Колеса задньої секції, зсуваючись з ущільненого сліду, прокладають нову колію, деформуючи ґрунт як у вертикальному напрямку, так і у напрямках дії бічної сили та зворотному вектору швидкості руху трактора (у разі роботи коліс у ведучому режимі).

Величина коефіцієнту опору коченню задньої секції на ораному полі збільшується до 220% у порівнянні з рухом за раніше ущільненим ґрунтом.

Крім того, спостерігається підвищення бічного зміщення коліс, викликаного пластичністю рихлого недеформованого ґрунту.

Додаткові опори повороту трактора, що з'являються, долаються повертаючою силою, що розвивається в циліндрі повороту. Для правильного вибору основних параметрів гідравлічного приводу та механізму рульового управління необхідно знати величину та характер сил, що діють на трактор при повороті.

На тракторі ХТЗ-243К.20 поставлений експеримент, метою якого було виявити залежність моменту опору повороту від різних експлуатаційних факторів (швидкості руху, навантажень на колеса, ґрунтової несучої поверхні та кількості включених мостів). Момент опору повороту визначався як добуток сили, що повертає, на плече прикладання її відносно шарніра повороту.

Зі збільшенням кута  $\alpha$  між секціями момент опору повороту  $M$  зростає при повороті трактора на місці (рис. 2). Навантаження в системі рульового управління зручно оцінювати за величиною страгуючого моменту  $M_0$  при  $\alpha = 0$  і крутості характеристик

$$K_m = \frac{dM}{d\alpha}$$

моменту опору повороту  $M$ . Зі зменшенням щільності ґрунту та збільшенням вагового навантаження на колеса величина  $M_0$  зростає.

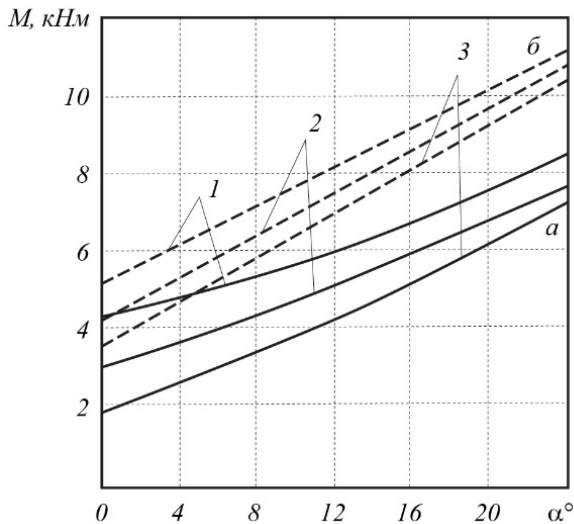


Рис. 2. Графік зміни моменту опору  $M$  в залежності від кута між повздовжніми вісями секцій  $\alpha$  при повороті трактора на місці на ораному полі (1), стерні колосових (2) та цілині (3)

На рис. 3 представлена залежність  $M = f(\alpha)$  при різних гакових навантаженнях, постійній швидкості руху трактора  $v = 2,6$  км/год, одному (криві 4, 5) і двох (криві 1, 2, 3) ввімкнених мостах.

### Висновки

При повороті трактора, що рухається з одним ввімкненим мостом (криві 4, 5), момент опору повороту зі збільшенням кута  $\alpha$  падає, причому з підвищенням швидкості руху інтенсивність падіння  $M$  збільшується.

Відцентрові сили, що сприяють зближенню секцій при вході трактора в поворот і перешкоджають виходу його з криволінійного руху, мають складну залежність від швидкості руху, кута  $\alpha$  і швидкості його зміни.

Потужність, що витрачається гідравлічним приводом, зі зростанням кута  $\alpha$  падає, що особливо відчутно при русі трактора з високими швидкостями.

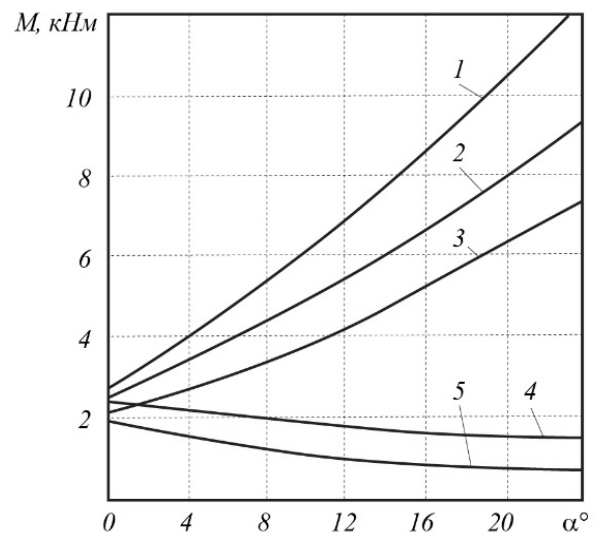


Рис. 3. Графік зміни моменту опору повороту  $M$  трактора, що рухається з постійною швидкістю в залежності від кута  $\alpha$  та вагового навантаження  $P_{\text{зак}} = 33$  кН (1),  $P_{\text{зак}} = 22,6$  кН (2),  $P_{\text{зак}} = 1,4$  кН (3),  $P_{\text{зак}} = 1,38$  кН (4) та  $P_{\text{зак}} = 0$  кН (5)

Незважаючи на зайве поворотність та прагнення до збільшення кута  $\alpha$ , мимовільний поворот трактора неможливий.

Встановлені в рульовому управлінні запірні клапани виключають можливість ризикання трактора, що визначається зоною нечутливості золотникового розподільника, яка навіть при незначних навантаженнях у зовнішньому гідравлічному ланцюгу становить  $\pm 1,5 \dots 2,2$  мм.

Встановлено, що ввімкнення другого моста (криві 1, 2, 3) змінює характер залежності  $M = f(\alpha)$ . Пояснюється це закручуванням замкнутої трансмісії, пропорційним величині зближення центрів мостів.

Колеса обох секцій з ковзанням перекочуються при зростанні бічних і дотичних навантажень, що залежать від жорсткості трансмісії, що закручується, і зчеплення з ґрунтом.

Збільшення  $P_{\text{кр}}$  призводить до зміщення показників у бік збільшення  $M_0$  і  $K_m$ .

При певних значеннях  $P_{\text{кр}}$  поворот трактора на великі кути  $\alpha$  стає неможливим внаслідок обмеження максимальної сили, що повертає, налаштуванням запобіжного клапана гідравлічної системи рульового управління.

Таким чином, слід зазначити, що для зменшення зносу шин другий міст слід включати на транспортних роботах тільки у випадку, якщо необхідно підвищити зчепні якості та покращити прохідність.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Вершинський Л.В., Позин Б.М., Трояновская И.П. (2006) "Модель стационарного поворота колесной машины с шарнирно-сочлененной рамой", *Вестник ЧГАУ*, Т.47, С. 17–21
2. Лебедев А.Т., Калінін Є.І., Шуляк М.Л., Колеснік І.В. (2016) "Аналitична модель повороту трактора з шарнірнозчленованою рамою", *Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка*, Вип. 173, С. 161 – 167.
3. Калінін Є.І. (2010) "Аналіз зміщення центра ваги напівнавісної машини при її функціонуванні", *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: Зб. наук. пр. УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого*, Вип. 14 (28), С. 216-224.

4. Fashutdinov M., Khafizov K., Galiev I., Gabdrifikov F. and Khaliullin F. (2020) "Research of dynamics of turning of machine-tractor aggregate with tractor on wheeled-crawler mover", *BIO Web Conf. International Scientific-Practical Conference "Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources"*, 17, pp. 1-4, DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20201700056>
5. Masahisa Watanabe, Kenshi Sakai (2020) "Numerical analysis of steering instability in an agricultural tractor induced by bouncing and sliding", *Biosystems Engineering*, 192, pp. 108-115, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.01.014>
6. Ahmed O.B., Goupillon J.F. (1997) "Predicting the ride vibration of an agricultural tractor", *Journal of Terramechanics*, 34, pp. 1-11, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-4898\(97\)00013-X](https://doi.org/10.1016/S0022-4898(97)00013-X)
7. Crolla D.A., Horton D.N.L., Stayner R.M. (1990) "Effect of tyre modelling on tractor ride vibration predictions", *Journal of Agricultural Engineering Research*, 47, pp. 55-77, DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(90\)80029-T](https://doi.org/10.1016/0021-8634(90)80029-T)
8. Fanga H., Ruixia Fan, Thuilot B., Martinet P. (2006) "Trajectory tracking control of farm vehicles in presence of sliding", *Robotics and Autonomous Systems*, 54(10), pp. 828-839, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2006.04.011>
9. Xiongze Han, Hak-Jin Kim, Chan Woo Jeon, Hee Chang Moon, Jung Hun Kim, Sang Yup Yi (2019) "Application of a 3D tractor-driving simulator for slip estimation-based path-tracking control of auto-guided tillage operation", *Biosystems Engineering*, 178, pp. 70-85, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.11.003>
10. Hubert M., Ludewig F., Dorbolo S., Vandewalle N. (2014) "Bouncing dynamics of a spring", *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 272, pp. 1-7, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physd.2014.01.002>
11. Вершинский Л.В. (2005) "Поворотливость сочлененной колесной машины", *Актуальные проблемы автомобильного, железнодорожного, трубопроводного транспорта: материалы научно-технической конференции*, С. 249-255
12. Лебедев А.Т., Калінін Є.І. (2009) "Оцінка можливості підвищення тягово-енергетичних властивостей машинно-тракторного агрегату при виконанні орних робіт на агрофоні підвищеної вологості шляхом встановлення здвоєних шин", *Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка. Серія: Тракторна енергетика в рослинництві*, Вип. 89, С. 37-45.
13. Kayacan Erk., Kayacan Erd., Ramon H., Saeys W. (2015) "Towards agrobots: Identification of the yaw dynamics and trajectory tracking of an autonomous tractor", *Computers and Electronics in Agriculture*, 115, pp. 78-87, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.05.012>
14. Zhen Li, Muneshi Mitsuoka, Eiji Inoue, Takashi Okayasu, Yasumaru Hirai, Zhongxiang Zhu (2016) "Parameter sensitivity for tractor lateral stability against Phase I overturn on random road surfaces", *Biosystems Engineering*, 150, pp. 10-23, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.07.004>
15. Kovalenko, A. and Kuchuk H. (2018), "Methods for synthesis of informational and technical structures of critical application object's control system", *Advanced Information Systems*, Vol. 2, No. 1, pp. 22-27, DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
16. Donets V., Kuchuk N., Shmatkov S. Development of software of e-learning information system synthesis modeling process. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 2. С. 117-121. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.20>
17. Зиков І. С., Кучук Н. Г., Шматков С. І. Синтез архітектури комп'ютерної системи управління транзакціями e-learning. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 3. С. 60-66. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.3.10>
18. Nechausov A., Mamusuc I., Kuchuk N. Synthesis of the air pollution level control system on the basis of hyperconvergent infrastructures. *Сучасні інформаційні системи*. 2017. Т. 1, № 2. С. 21 - 26. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2017.2.04>
19. Кучук Н. Г. Метод зменшення часу доступу до слабкоструктурованих даних / Н. Г. Кучук, В. Ю. Мерлак, В. В. Скороделов // *Сучасні інформаційні системи = Advanced Information Systems*. – 2020. – Т. 4, № 1. – С. 97-102. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.1.14>
20. Chaoran Sun, Hiroshi Nakashima, Hiroshi Shimizu, Juro Miyasaka, Katsuaki Ohdoi (2019) "Physics engine application to overturning dynamics analysis on banks and uniform slopes for an agricultural tractor with a rollover protective structure", *Biosystems Engineering*, 185, pp. 150-160, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.06.005>
21. Yoon J., Cho W., Kang J., Koo B., Yi K. (2010) Design and evaluation of a unified chassis control system for rollover prevention and vehicle stability improvement on a virtual test track", *Control Engineering Practice*, 18 (6), pp. 585-597, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2010.02.012>

Received (Надійшла) 24.11.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 19.01.2022

### Features of rotation of the articulated tractor

Ye. Kalinin, M. Kuskov, O. Bellorin-Herrera

**Annotation.** The subject of research is the dynamics of turning a wheeled tractor with an articulated frame under special conditions for the functioning of an elastic pneumatic. The goal of the work is to analyze the model of movement of a wheeled tractor with an articulated frame, taking into account the features of the formation of the tangential force of the wheel traction and the dynamics of the turn. The tasks of the study are to obtain the dependences of the kinematic characteristics and the moment of resistance of a wheeled tractor when turning. **Applied methods:** methods of system analysis of the results of experimental and theoretical studies. **The obtained results:** the problem of turning a tractor with an articulated frame on agricultural backgrounds with different bearing capacity is considered. The formation of the moment of resistance to the rotation of the tractor is analyzed depending on the angle between the longitudinal axes of the sections. It has been established that the analysis of the turning process, carried out from the point of view of the kinematics of individual sections, does not fully reflect the specifics of turning the tractor in various conditions of its operation. The distortion of the given trajectory of the curvilinear movement is a consequence of the influence of the interaction forces of the elastic tires of the wheels with the ground and the centrifugal forces detected when moving at speeds exceeding 6 km/h. **The practical significance of the work** lies in the fact that, on the basis of the conducted system analysis, requirements were introduced for the performance of transport work in order to increase the traction and coupling properties and improve the patency of the transport and technological unit.

**Keywords:** tractor; articulated frame, rotation, moment of resistance, kinematic characteristics, hook load, drive axle.