

*А.П. КОЖУШКО, О.С. ТРЕМБАЧ*

## **ВПЛИВ ТРАНСПОРТУВАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ЦИСТЕРНИ НА ЕЛЕМЕНТИ ТРАНСМІСІЇ КОЛІСНОГО ТРАКТОРА В ПРОЦЕСІ РОЗГОНУ**

Побудовано загальну математичну модель колісного трактора та напівпричіпної цистерни в вертикальній і горизонтальній площинах руху. Окреслена модель враховує рух підресорених та невідресорених мас транспортного засобу, а також хлюпання рідини в цистерні. Виконано аналіз зміни показника динамічної навантаженості елементів трансмісії трактора при транспортуванні сільськогосподарської напівпричіпної цистерни в процесі розгону. Як результат, отримано можливість оцінювати динамічні показники елементів трансмісії колісного трактора при виконанні транспортної роботи з перевезення рідкого вантажу.

**Ключові слова:** колісний трактор, трансмісія, цистерна, розгін, коливання, хлюпання рідини, динамічна навантаженість.

*A. KOZHUSHKO, O. TREMBACH*

## **INFLUENCE OF AGRICULTURAL TANK TRANSPORTATION ON TRANSMISSION ELEMENTS WHEELED TRACTOR DURING ACCELERATION**

Today's technical level of agricultural wheeled tractors has the ability to be aggregated with various agricultural means for efficient performance of traction (plowing, sowing, harrowing, harvesting, etc.) and transport (transportation of solid and liquid loads) works. Among the variety of agricultural works, the greatest test of the tractor's reliability is the performance of field work on plowing the soil. But also one of the priority studies, which affects the reliability of the power plant of a wheeled tractor, is the work on the transportation of partially filled agricultural tanks. Therefore, the material of this article aims to analyze the change in the indicator of the dynamic load of the tractor transmission elements during the transportation of an agricultural semi-trailer tank during acceleration. When solving the set goal, a technique was used, which involved the formation of a general mathematical model of a wheeled tractor and a semi-trailer tank in the vertical and horizontal planes of movement. The outlined model takes into account the movement of sprung and unsprung masses of the vehicle, as well as the sloshing of liquid in the tank. As a result, it was possible to evaluate the dynamic parameters of the transmission elements of a wheeled tractor when performing transport work for the transportation of liquid cargo. The practical significance of the work lies in the possibility of its use in evaluating the dynamic performance of a wheeled tractor, which is equipped with various types of transmissions when transporting agricultural tanks.

**Key words:** wheeled tractor, transmission, tank, acceleration, oscillations, liquid splash, dynamic load.

**Вступ.** Сучасний технічний рівень сільськогосподарських колісних тракторів має можливість агрегатуватись з різноманітними аграрними засобами для ефективного виконання тягових (оранка, посів, боронування, збирання врожаю, тощо) та транспортних (перевезення твердих та рідких вантажів) робіт. Серед різноманіття сільськогосподарських робіт найбільшим випробуванням на надійність трактора є виконання польової роботи з оранки ґрунту. Але також одним з пріоритетним досліджень, який впливає на надійність силової установки колісного трактора, є робота з транспортування частково заповнених сільськогосподарських цистерн. Це пов'язано з впливом вільної поверхні рідини в цистерні на вертикальну та горизонтальну складову руху, внаслідок чого збільшується енергія коливань рідкого вантажу, що впливає на динамічні показники руху транспортного засобу.

Зважаючи на це, актуальним є формування комплексної математичної моделі руху трактора при транспортуванні цистерни, що дає змогу оцінити динамічну навантаженість елементів трансмісії в процесі розгону.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Компіляція динамічних навантажень є важливою частиною аналізу втомного режиму та параметрів надійності [1, 2]. Динамічна навантаженість характеризує енергетичну складову всієї машини або елемента за фактичних робочих умов. Зазвичай вона описується у формі функції навантаження від часу, інформації про середню частоту або амплітуду-частоту, одновимірного або двовимірного програмного спектру [3].

Концепція визначення динамічної навантаженості була вперше запропонована в 1930-х роках. Спектр навантажень було швидко розроблений в аерокосмічній галузі, транспортних засобах і будівельних машинах завдяки своїй здатності відображати зміни навантаження. В даний час він широко використовується в проектуванні технічного продукту, аналізі втом, тощо [4 – 6]. Трансмісія є основною частиною трактора для передачі потужності та забезпечує ефективне водіння та тягу. Натомість трансмісія схильна до втомної поломки [7]. Тому дуже важливо вивчити та проаналізувати динамічні навантажувальні характеристики трансмісії трактора в умовах оранки з великим навантаженням для оптимізації конструкції, перевірки надійності навантаження та аналізу довговічності на втому.

Існує низька публікацій, в яких дослідники досліджують процеси моделювання та аналізують навантажувальні характеристики елементів трансмісії сільськогосподарських тракторів. В роботі [8] виконано аналіз впливу вибору передачі на показник динамічної навантаженості, що діє на елементи трансмісії під час ротаційного обробки ґрунту. Загальна навантаженість розраховувалась за допомогою модифікованого правила Майнера для кожного вибору передач. Автори роботи [9] продемонстрували вплив встановлення довжини верхньої тяги триточкової навіски на зміну навантаження ведучих коліс під час оранки. Результати роботи для навісного плугового комплексу показали можливості балансування навантаження на задні колеса трактора при зміні довжини верхньої тяги триточкової навіски. В роботі [10] показано зміна динамічної поведінки шліцьових з'єднань викликаних явищем биття, що виникає при збільшенні/зменшенні коливальних швидкостей обертання. Експериментально досліджено вплив допуску на шліцюванні на динамічну навантаженість та шум від биття шестерні валу відбору потужності для чотирьох різних рівнів допуску на шліцювання. В роботі [11] запропонована математична модель, яка характеризує передачу динамічних навантажень під час оранки трактора. Ця модель складається з моделі трансмісії, моделі взаємодії шини з ґрунтом і моделі динаміки трактора, щоб проаналізувати характеристики навантаження на трансмісійний вал. Представлена теоретична модель і результати, на думку авторів [11], забезпечують практичне керівництво для структурної оптимізації конструкції, аналізу довговічності, втом та перевірки на надійність навантаження трансмісії трактора. Вищенаведені дослідження наведені з динамічного моделювання та аналізу динамічних навантажень механічного приводу трансмісії колісного трактора при виконанні тягових робіт з обробки ґрунту. Однак дослідження у рамках виконання транспортних робіт виконано не в повній мірі. Також відомі наукові роботи [12 – 13], які присвячено розкриттю питань, пов'язаних з дослідженням зміни динамічної навантаженості елементів трансмісії колісних тракторів в процесі розгону. В цих роботах перш за все досліджується робота муфти зчеплення на перехідному режимі русі. Однак динаміка зміни навантажень у трансмісії колісного трактора з урахуванням впливу навантажень при транспортуванні частково заповнених цистерн не розглянута.

**Мета дослідження, постановка задачі.** Метою роботи є аналіз динамічної навантаженості елементів трансмісії трактора при транспортуванні сільськогосподарської напівпричіпної цистерни в процесі розгону.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- формування загальної математичної моделі руху трактора з цистерною;
- аналіз результатів моделювання руху колісного трактора ХТЗ-240К з напівпричіпної цистерною МЖТ-10 в процесі розгону.

**Загальна математична модель колісного трактора з цистерною.** Дослідження динамічних навантажень в трансмісії трактора базується на представленні її у вигляді крутильної системи з зосередженими параметрами. Комплексна дія зовнішніх та внутрішніх сил на силову установку трактора вимагає врахувати, як вертикальну, так і горизонтальну складову руху (рис. 1). Адже змінний зовнішній вплив, який діє на крутильну систему трансмісії впливає на баланс енергії в ній та викликає складний рух інерційних мас. Саме тому динамічну навантаженість трансмісії трактора при транспортуванні частково заповнених

цистерн досліджувати без врахування коливальної системи не можливо.

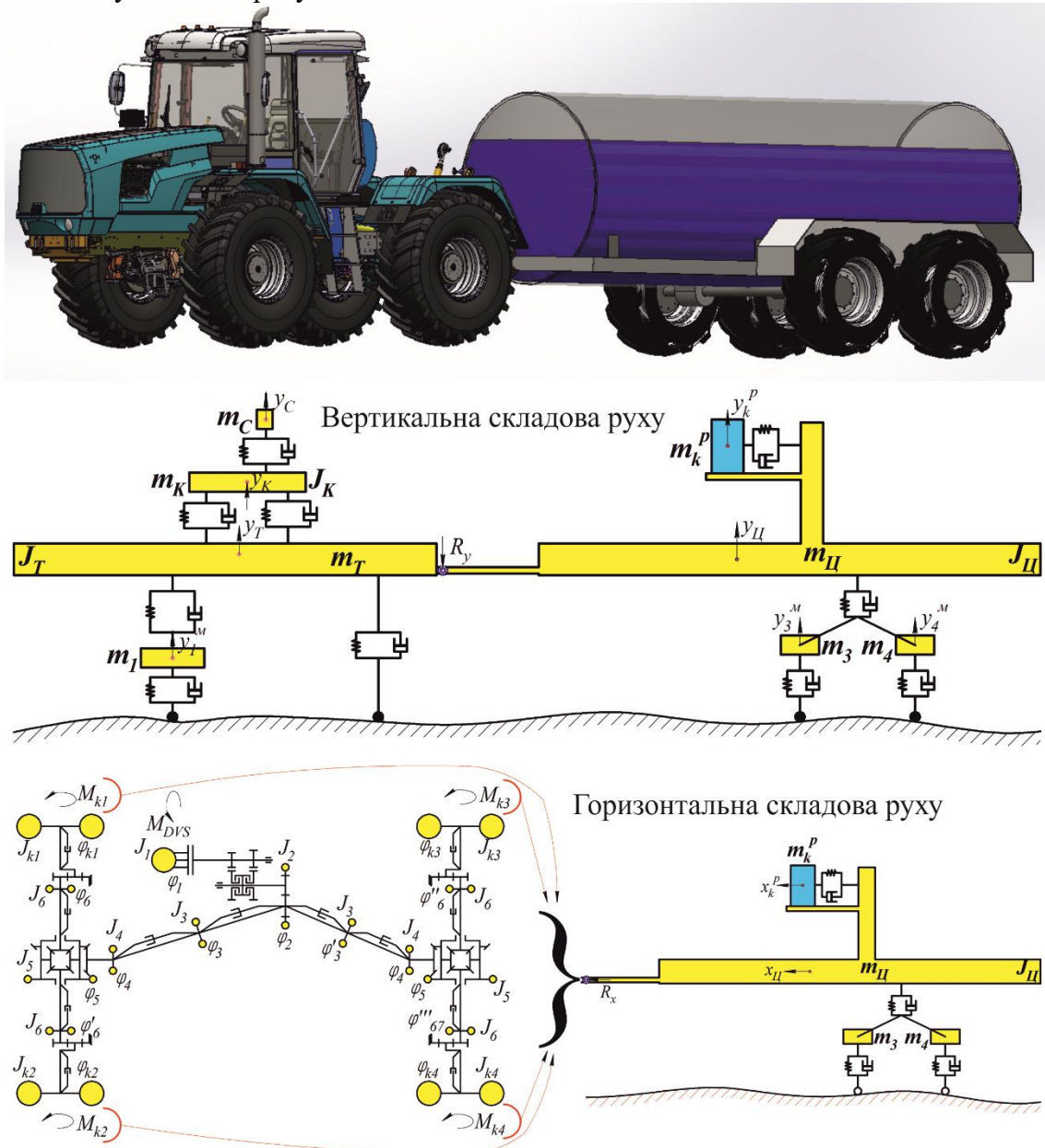


Рис. 1 – Схеми сил, що діють на колісний трактор при транспортуванні сільськогосподарських цистерн

Математичний опис руху колінчастого валу двигуна ґрунтується на врахуванні завантаження по крутному моменту і по частоті його обертання [12]. Даний підхід також враховує гармонійну складову крутного моменту

$$J_1 \cdot \ddot{\phi}_1 = \left( \mu_{\text{норм}} + \frac{1 - \dot{\phi}_1}{k_x - 1} \right) \cdot M_{\text{ном}} + \Delta M - (M_{k1} + M_{k2} + M_{k3} + M_{k4}) \quad (1)$$

де  $J_1$  – приведений до колінчастого валу момент інерції махових мас двигуна;  $\ddot{\phi}_1$ ,  $\dot{\phi}_1$  – кутове прискорення та кутова швидкість ланки колінчастого валу двигуна;  $\mu_{\text{норм}}$  – нормований крутний момент двигуна внутрішнього згорання;  $k_x$  – коефіцієнт, що визначає крутизну регуляторної гілки зовнішньої швидкісної характеристики;  $M_{\text{ном}}$  – номінальний крутний момент на колінчастому валу двигуна внутрішнього згорання;  $\Delta M$  – гармонійна складова

крутного моменту двигуна;  $M_{k1-4}$  – момент опору руху.

Рівняння руху мас еквівалентної системи трансмісії можливо отримати використовуючи принцип Даламбера та складаючи рівняння рівноваги для кожної інерційної маси. В загальному виді рівняння руху системи виглядає наступним чином

$$J_j \ddot{\varphi}_j - C_{ij}(\varphi_i - \varphi_j) - K_{ij}(\dot{\varphi}_i - \dot{\varphi}_j) + C_{jk}(\varphi_j - \varphi_k) + K_{jk}(\dot{\varphi}_j - \dot{\varphi}_k) = 0 \quad (2)$$

де  $J$  – момент інерції рухомих мас трансмісії;  $C$  – жорсткість елементів трансмісії;  $K$  – коефіцієнт загасання.

Динамічні навантаження визначаються за рівнянням

$$\delta = \frac{C_{ij}(\varphi_i - \varphi_j)}{\left( \mu_{\text{норм}} + \frac{1 - \dot{\varphi}_1 / \dot{\varphi}_{\text{норм}}}{k_x - 1} \right) \cdot M_{\text{норм}}} \quad (3)$$

Під навантаженням розуміють момент опору на ведучих колесах:

$$M_k = \left( (M_{tr1} \cdot g + 2C_{sh1} \cdot v_{sh1}) + (M_{tr2} \cdot g + M_{ц1} \cdot g + 2C_{sh2} \cdot v_{sh2}) \right) \cdot \frac{r \cdot f}{i_{tr} \cdot \eta_{tr}} + R_x \quad (4)$$

де  $M_{tr1}$  та  $M_{tr2}$  – маси підресорених частин трактора, що припадають на передню і задню частину остова;  $C_{sh1}$  та  $C_{sh2}$  – жорсткість пневматичних шин переднього та заднього моста трактора;  $v_{sh1}$  та  $v_{sh2}$  – деформації пневматичних шин переднього та заднього моста трактора;  $M_{ц1}$  – маса передньої частини напівпричіпної цистерни, котра доводиться на задню вісь трактора;  $r$  – радіус кочення коліс трактора;  $f$  – коефіцієнт опору кочення;  $i_{tr}$  – загальне передаточне число трансмісії трактора;  $\eta_{tr}$  – загальний механічний коефіцієнт корисної дії трансмісії трактора

Алгоритм роботи муфти зчеплення наступний:

$$M_M = \begin{cases} M_{\text{норм}} \cdot \beta & \text{при } t \geq T_{cl} + T_{on}; \\ M_{\text{норм}} \cdot \beta / T_{on} & \text{при } t \geq T_{cl}; \\ 0, & \end{cases} \quad (5)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт запасу муфти зчеплення;  $T_{cl}$  – час роботи муфти зчеплення;  $T_{on}$  – час початку роботи муфти зчеплення.

Формування математичної моделі опису зміни вертикальної складової руху трактора з напівпричіпної цистерною ґрунтується на роботах [14, 15], в яких автори впроваджують ряд допущень і спрощень:

- пружними зв'язками між окремими агрегатами транспортного засобу нехтуємо;
- вагове навантаження по бортах розподілене рівномірно;
- пружні та демпфіруючі елементи розглядаємо у вигляді безмасової моделі, враховуємо тільки їхню жорсткість та коефіцієнти демпфірування;
- вважаємо, що транспортний засіб рухається прямолінійно, профіль міняється синхронно під колесами правого та лівого бортів. Такий режим руху є максимально несприятливий з точки зору зовнішнього впливу;
- контакт шини з опорною поверхнею точковий, шина котиться без відриву від опорної поверхні;
- розглядаємо коливання остову в межах малих відхилень.

Модель коливального руху рідини в цистерні для області низькочастотних коливань описується наступними рівняннями [16]:

$$m_k^p \cdot \ddot{x}_k^p + f_k^p \cdot (\dot{x}_k^p - \dot{x}_{ц}) + c_k^p \cdot (x_k^p - x_{ц}) = 0, \quad k = 1, 2, 3 \quad (6)$$

$$R_x = \sum_{k=1}^3 \left[ f_k^p \cdot (\dot{x}_{ц} - \dot{x}_k^p) + c_k^p \cdot (x_{ц} - x_k^p) \right] \quad (7)$$

де  $m_k^p$  – це парціальна маса рідини;  $\ddot{x}_k^p$ ,  $\dot{x}_k^p$ ,  $x_k^p$  – прискорення, швидкість та переміщення шару рідини;  $f_k^p$  – коефіцієнт демпфірування коливань  $k$ -го шару рідини;  $c_k^p$  – коефіцієнт жорсткості (або пружності) коливань  $k$ -го шару рідини;  $R_x$  – сумарна сила, яка діє на платформу цистерни з боку рідини в горизонтальній площині руху.

Таким чином наведено основні постулати створення загальної математичної моделі руху колісного трактора з цистерною в умовах врахування хлюпання рідини в цистерні та динамічних процесів в трансмісії.

**Результати моделювання процесу розгону трактора ХТЗ-240К з напівпричіпної цистерною МЖТ-10.** Моделювання процесу розгону колісного трактора з напівпричіпної цистерною в ході виконання транспортної роботи відбувається при наступних умовах: агрофон – ґрунтова дорога; обрано 1 передачу транспортного ряду; тиск в шинах трактора – 140 кПа; тиск в шинах цистерни – 400 кПа; час моделювання – 20 сек. Процес моделювання відбувається в системі MatLab/SimuLink з використанням чисельного методу Dormand-Prince зі змінним кроком.

На рис. 2, 3 показані пов'язані результати зміни деяких динамічних показників колісного трактора та напівпричіпної цистерни при її наповненості на 88% в процесі розгону. Окреслений рівень наповненості сільськогосподарської цистерни є найбільш несприятливим, адже вона сприяє небезпеці утворення дорожньо-транспортних пригод або створення несприятливих умов для роботи водія [15]. Відмітити, що на рис. 2 показана зміна вертикального переміщення 1 шару рідини, яка характеризує підняття рідини відносно його центру ваги.

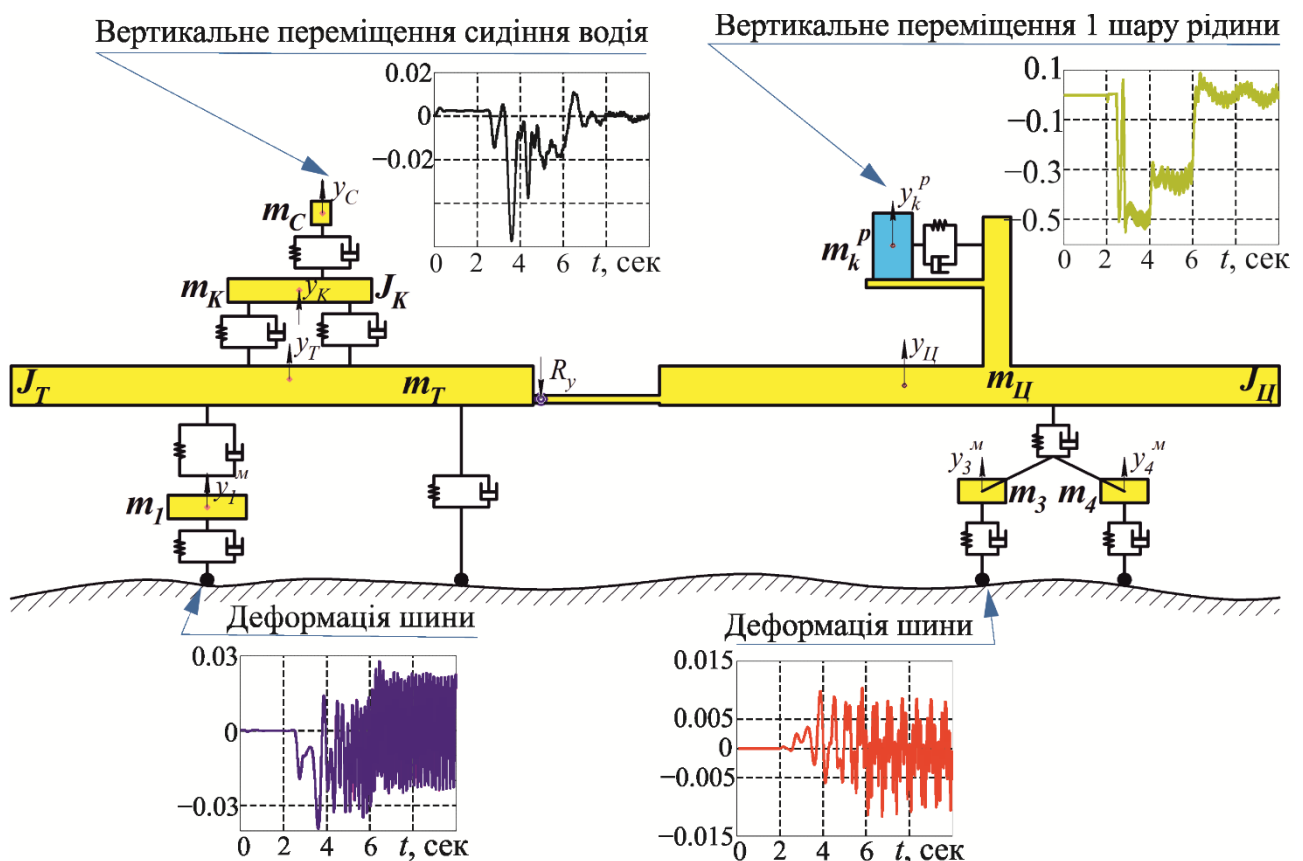


Рис. 2 – Деякі результати моделювання у вертикальній площині руху

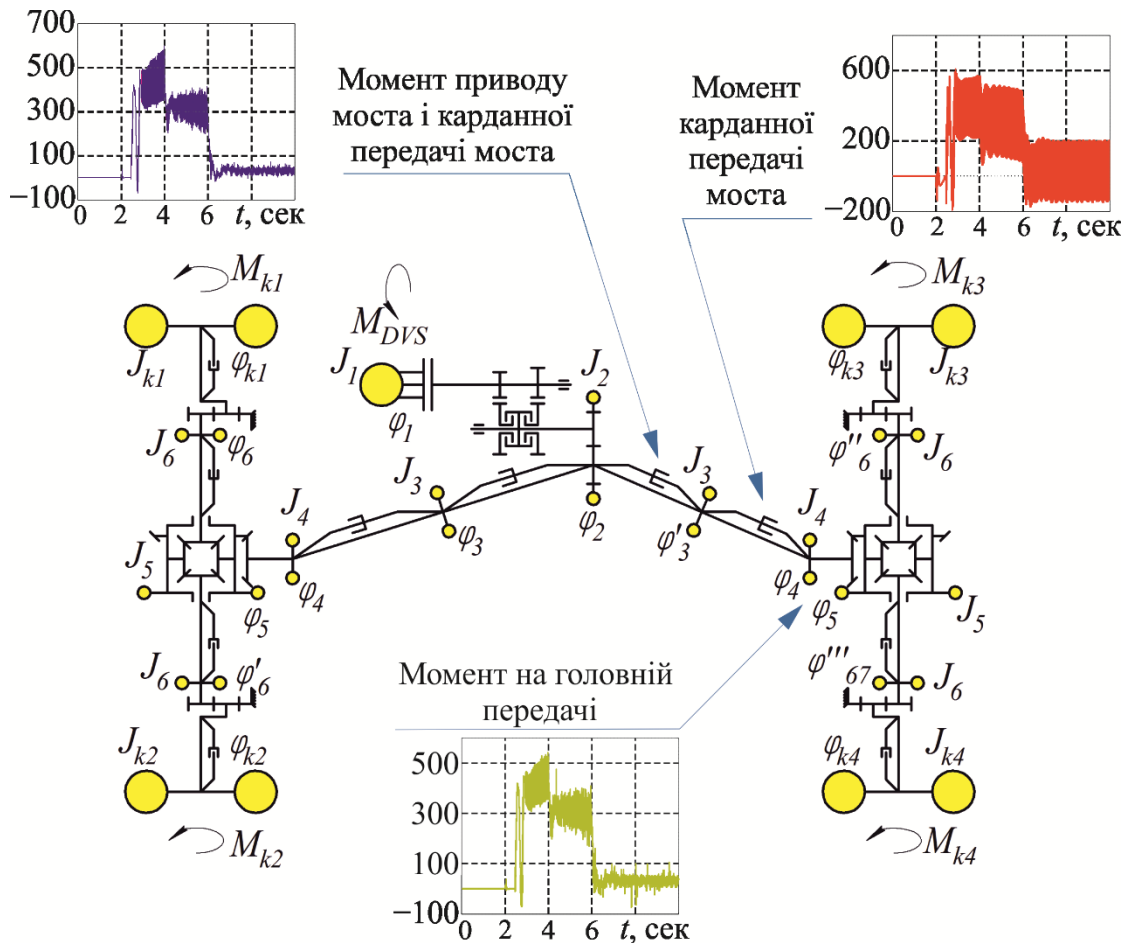


Рис. 3 – Деякі результати моделювання у горизонтальній площині руху

На рис. 4 представлено результати моделювання процесу розгону трактора на транспортному діапазоні руху, помітно що при перемиканні передач спостерігається не суттєве підвищення швидкості, що свідчить про наявність інерційних складових руху.

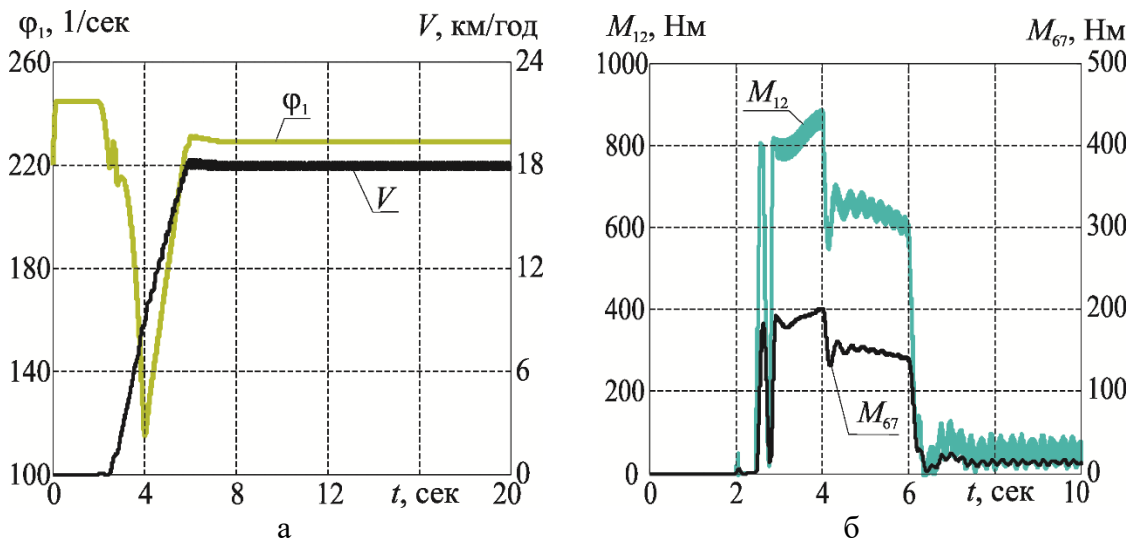


Рис. 4 – Зміна показників при розгоні трактора на транспортному діапазоні:  
 а – кутова швидкість колінчастого валу та швидкість руху; б – крутний момент первинного валу КПП ( $M_{12}$ ) та крутний момент на колесах ( $M_{67}$ )

На рис. 5 показана зміна показника динамічної навантаженості на первинному валу КПП

при розгоні трактора з показниками, що наведені на рис. 4. З рис. 5 помітно, що показник динамічної навантаженості при початку роботи муфти зчеплення досягає максимального значення ( $\delta_{12} = 5,8$ ). На рис. 5 показано вплив врахування хлюпання рідини в цистерні на показник динамічної навантаженості. Як показано показник збільшується майже в 3 рази на початковому етапі після виходу на транспортну швидкість.

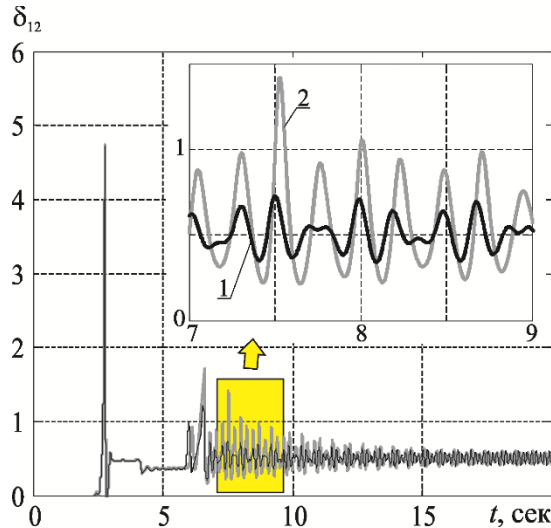


Рис. 5 – Зміна показника динамічної навантаженості на первинному валу КПП при розгоні трактора з:  
1 – порожньою цистерною; 2 – повністю заповненою цистерною

На рис. 6 показано нарощування моменту опору руху колісного трактора при транспортуванні порожньої та заповненої напівпричіпної цистерни, яке подекуди складає більше ніж в 2 рази.

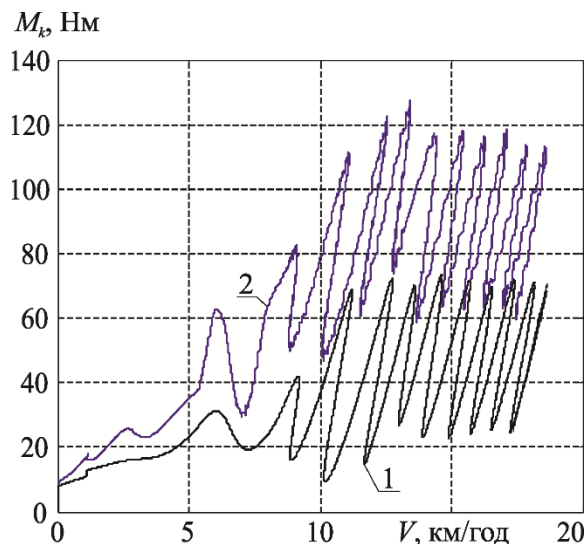


Рис. 6 – Зміна моменту опору руху колісного трактора при транспортуванні:  
1 – порожньою цистерни; 2 – повністю заповненою цистерни

Таким чином, показано вплив руху вільної поверхні рідини в цистерні МЖТ-10 на елементи трансмісії колісного трактора ХТЗ-240К в процесі розгону.

**Висновки.** В роботі виконано дослідження зміни навантажувальних характеристик механічної трансмісії колісного трактора при транспортуванні напівпричіпної сільськогосподарської цистерни в умовах виходу на транспортну швидкість. Наведено основні постулати формування загальної математичної моделі динаміки руху системи «колісний трактор – цистерна», яка враховує горизонтальні та вертикальні чинники руху. За показником

динамічної навантаженості встановлено, що на ланці первинного валу КПП, рух вільної поверхні рідини призводить до збільшення показника майже в 3 рази на початковому етапі виходу на транспортну швидкість, потім цей показник зменшується.

#### Список літератури

1. Yang, X., Liu, X., Tong, J., Wang, Y., & Wang, X. Research on load spectrum construction of bench test based on automotive proving ground. *Journal of Testing and Evaluation*. 2017. Vol. 46(1), P. 244 – 251. <https://doi.org/10.1520/jte20170201>.
2. Yin, Y., Fu, N., Liao, P., & Song, Z. Calculation method of load sample size for tractor drive shafts based on dynamic time warping distance. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2020. Vol. 36(12), P. 54 – 60. <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2020.12.007>
3. Heuler, P., Klatschke, H. Generation and use of standardised load spectra and loadtime histories. *International Journal of Fatigue*. 2005. Vol. 27(8), P. 974 – 990. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2004.09.012>
4. Lu, Y., Bi, W., Zhang, X., Zeng, J., Chen, T., Wu, P. Calculation method of dynamic loads spectrum and effects on fatigue damage of a full-scale carbody for high-speed trains. *Vehicle System Dynamics*. 2020. Vol. 58(7), P. 1037 – 1056. <https://doi.org/10.1080/00423114.2019.1605080>
5. Paraforos, D., Griepentrog, H., Vougioukas, S. Methodology for designing accelerated structural durability tests on agricultural machinery. *Biosystems Engineering*. 2016. Vol. 149, P. 24 – 37. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.06.004>
6. Shao, Y., Liu, J., Mechefske, C. Drive axle housing failure analysis of a mining dump truck based on the load spectrum. *Engineering Failure Analysis*. 2011. Vol. 18(3), P. 1049 – 1057. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2010.12.023>
7. Shao, X., Song, Zh., Yin, Y., Xie, B., Liao, P. Statistical distribution modelling and parameter identification of the dynamic stress spectrum of a tractor front driven axle. *Biosystems Engineering*. 2021. Vol. 205, P. 152 – 163. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.03.003>.
8. Kim, Y.J., Chung, S.O., Choi, C.H. Effects of gear selection of an agricultural tractor on transmission and PTO load during rotary tillage. *Soil Tillage Res.* 2013. Vol. 134, P. 90 – 96. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.07.013>.
9. Bauer, F., Portes, P., Polcar, A., Cupera, J., Fajman, M. Differences in the wheel loads and contact pressure of the in-furrow and on-land rear tractor tyres with mounted and semi-mounted ploughs. *Soil Tillage Res.* 2022. Vol. 215. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105190>.
10. Choi, C., Ahn, H., Yu, J., Park, Y.J., Lee, J., Park, J., Kim, Chul, S. Dynamic behavior of an agricultural power take-off driveline for rattle noise reduction: part 2. Experimental analysis of rattle noise effect according to spline tolerance level. *J. Terramech.* 2022. Vol. 101, P. 33 – 42. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2022.03.002>.
11. Shao, X., Yang, Z., Mowafy, S., Zheng, B., Song, Zh., Luo, Zh., Guo, W. Load characteristics analysis of tractor drivetrain under field plowing operation considering tire-soil interaction. *Soil and Tillage Research*. 2023. Vol. 227, P. 105620. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105620>.
12. Кожушко А.П., Трембач О.С., Болтенко С.І. Математична модель процесу розгону колісного трактора з урахуванням паливоподачі та роботи гідروпідтискової муфти. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. Сер.: *Автомобіле- та тракторобудування*. 2021. – № 2. – С. 61 – 72. <https://doi.org/10.20998/2078-6840.2021.2.07>
13. Кальченко Б.І., Чернявський І.С., Кожушко А.П. Підхід до визначення завантаженості трансмісії колісного трактора при впливі нерівностей поверхні. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2017. № 8. С. 49–54.
14. Мамонтов А.Г., Кожушко А.П., Ребров О.Ю. Формування математичної моделі динамічної навантаженості ходової системи колісного трактора з напіввпрічпним агрегатом. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. Сер.: *Нові рішення в сучасних технологіях*. 2019. – № 1. – С. 29 – 41. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2019.01.04>.
15. Кожушко А.П. Теорія коливань трактора при транспортуванні цистерн сільськогосподарського призначення: монографія. *Харків : Мірошніченко О. А.* 2021. 239 с.
16. Кожушко А.П., Григор'єв О.Л. Моделювання пов'язаних коливань колісного трактора та цистерни з рідиною на прямому шляху зі складним рельєфом. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. Сер.: *Математичне моделювання в техніці та технологіях*. 2018. № 27 (1303). С. 34 – 61.

#### References (transliterated)

1. Yang, X., Liu, X., Tong, J., Wang, Y., & Wang, X. Research on load spectrum construction of bench test based on automotive proving ground. *Journal of Testing and Evaluation*. 2017. Vol. 46(1), P. 244 – 251. <https://doi.org/10.1520/jte20170201>.
2. Yin, Y., Fu, N., Liao, P., & Song, Z. Calculation method of load sample size for tractor drive shafts based on dynamic time warping distance. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 2020. Vol. 36(12), P. 54 – 60. <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2020.12.007>



3. Heuler, P., Klatschke, H. Generation and use of standardised load spectra and loadtime histories. *International Journal of Fatigue*. 2005. Vol. 27(8), P. 974 – 990. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2004.09.012>
4. Lu, Y., Bi, W., Zhang, X., Zeng, J., Chen, T., Wu, P. Calculation method of dynamic loads spectrum and effects on fatigue damage of a full-scale carbody for high-speed trains. *Vehicle System Dynamics*. 2020. Vol. 58(7), P. 1037 – 1056. <https://doi.org/10.1080/00423114.2019.1605080>
5. Paraforos, D., Griepentrog, H., Vougioukas, S. Methodology for designing accelerated structural durability tests on agricultural machinery. *Biosystems Engineering*. 2016. Vol. 149, P. 24 – 37. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.06.004>
6. Shao, Y., Liu, J., Mechefske, C. Drive axle housing failure analysis of a mining dump truck based on the load spectrum. *Engineering Failure Analysis*. 2011. Vol. 18(3), P. 1049 – 1057. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2010.12.023>
7. Shao, X., Song, Zh., Yin, Y., Xie, B., Liao, P. Statistical distribution modelling and parameter identification of the dynamic stress spectrum of a tractor front driven axle. *Biosystems Engineering*. 2021. Vol. 205, P. 152 – 163. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.03.003>
8. Kim, Y.J., Chung, S.O., Choi, C.H. Effects of gear selection of an agricultural tractor on transmission and PTO load during rotary tillage. *Soil Tillage Res.* 2013. Vol. 134, P. 90 – 96. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.07.013>
9. Bauer, F., Portes, P., Polcar, A., Cupera, J., Fajman, M. Differences in the wheel loads and contact pressure of the in-furrow and on-land rear tractor tyres with mounted and semi-mounted ploughs. *Soil Tillage Res.* 2022. Vol. 215. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105190>
10. Choi, C., Ahn, H., Yu, J., Park, Y.J., Lee, J., Park, J., Kim, Chul, S. Dynamic behavior of an agricultural power take-off driveline for rattle noise reduction: part 2. Experimental analysis of rattle noise effect according to spline tolerance level. *J. Terramech.* 2022. Vol. 101, P. 33 – 42. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2022.03.002>
11. Shao, X., Yang, Z., Mowafy, S., Zheng, B., Song, Zh., Luo, Zh., Guo, W. Load characteristics analysis of tractor drivetrain under field plowing operation considering tire-soil interaction. *Soil and Tillage Research*. 2023. Vol. 227, P. 105620. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105620>
12. Kozhushko A.P., Trembach O.S., Boltenko S.I. Matematychna model protsesu rozghonu kolisnoho traktora z urakhuvanniam palyvopodachi ta roboty hidropidtyusknoi mufty [Mathematical model of the acceleration process of a wheeled tractor with considering the fuel supply and the operation of the hydro-clamping clutch]. *Visnyk NTU "KhPI". Ser. : Avtomobile- ta traktorobuduvannia [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser.: Automobile and tractor building]. Kharkiv, NTU "KhPI". 2021. no 2. pp. 61 – 72.*
13. Kalchenko B.I., Chernyavskiy I.Sh., Kozhushko A.P. Pidkhyd do vyznachennia zavantazhenosti transmisii kolisnoho traktora pry vplyvi nerivnosti poverkhni [Approach to determining the load on the transmission of a wheeled tractor under the influence of surface irregularities]. *Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksu [Technical service of agro-industrial, forest and transport complex]. 2017. no 8. pp. 49–54.*
14. Mamontov A.G., Kozhushko A.P., Rebrov O.Yu. Formuvannya matematychnoyi modeli dynamichnoyi navantazhenosti khodovoyi systemy kolisnoho traktora z napivprychipnym ahrehatom [Formation of a mathematical model of the dynamic load of the running system of a wheeled tractor with a semi-trailer unit]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KHPI». Ser: Novi rishennya v suchasnykh tekhnolohiyakh [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Sir: New solutions in modern technologies]. Kharkiv, NTU "KhPI". 2019. no 1. pp. 29 – 41. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2019.01.04>.*
15. Kozhushko A.P. Teoriia kolyvan traktora pry transportuvanni tsystem silskohospodarskoho pryznachennia: monohrafiia [Theory of tractor vibrations during transportation of agricultural tanks: monograph]. – Kharkiv: Miroshnychenko O.A., 2021. 239 p.
16. Kozhushko A. P., Grigiriev A. L. Modelyuvannya pov'yazanykh kolyvan' kolisnoho traktora ta tsystemy z ridynoyu na pryamomu shlyakhu zi skladnym rel'yefom [Modeling of coupled oscillations of wheeled tractors and tanks with liquid on a straight road with difficult terrain]. *Visnyk NTU «KhPI». Seriya : Matematichne modelyuvannya v tekhnstsi ta tekhnologiyakh [Bulletin of the NTU "KhPI". Series: Mathematical modeling in engineering and technology]. 2018, vol. 27 (1303), pp. 34 – 61.*

*Надійшла (received): 15.05.2023 р.*

#### Відомості про авторів / About the Authors

**Кожушко Андрій Павлович (Andrii Kozhushko)** – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри автомобіле- та тракторобудування, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4725-5911>; e-mail: [Andreykozhushko7@gmail.com](mailto:Andreykozhushko7@gmail.com)

**Трембач Олексій Сергійович (Oleksiy Trembach)** – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри автомобіле- та тракторобудування, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0679-3016>; e-mail: [alexcey904@gmail.com](mailto:alexcey904@gmail.com)