

В. М. КРАСНОКУТСЬКИЙ, Н. В. ПАВЛІЙ, О. М. АГАПОВ, А. Д. ГАЛУЦЬКИХ

## МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ РІШЕННЯ РІВНЯНЬ РУХУ ТРАКТОРНОГО ПОТЯГУ

Запропонований метод рішення рівняння руху при розрахунку коливань тракторного потягу з використанням тракторів МТЗ-102, Т-150К-09, John Deere, Challenger та причепів 2ПТС-4, напівпричепів вантажопад'ємністю 10т та 12т та алгоритм його виконання. Розглянутий розрахунок динамічних крутних моментів на ведучих колесах тракторного потягу та приведений опис тензометричної мобільної станції для проведення експерименту.

**Ключові слова:** трактор, причеп, напівпричеп, тракторний потяг, коливання, рівняння руху, тензометрична мобільна станція

Предложенный метод решения уравнения движения при расчете колебаний тракторного поезда с использованием тракторов МТЗ-102, Т-150К-09, John Deere, Challenger и прицепов 2ПТС-4, полуприцепов грузоподъемностью 10т и 12т и алгоритм его выполнения. Рассмотренный расчет динамических крутящих моментов на ведущих колесах тракторного поезда и приведенное описание тензометрической мобильной станции для проведения эксперимента.

**Ключевые слова:** трактор, причеп, полуприцеп, тракторный поезд, колебание, уравнение движения, тензометрическая мобильная станция.

Offered method of decision of equalization of motion at the calculation of vibrations of tractor train with the use of tractors of MTZ-102, T-150K-09, John Deere, Challenger and trailers of 2PТС-4, semitrailers by the carrying capacity of 10t and 12t and algorithm of his implementation. Considered calculation of dynamic twisting moments on anchorwomen wheels of tractor train and the brought description over of the mobile station for realization of experiment.

**Keywords:** tractor, trailer, semitrailer, tractor train, oscillation, equalization of motion, mobile station

**Вступ.** В продовження праці [1] розглядаються рішення рівнянь, які визначають рівняння руху двох та трьох ланкових тракторних потягів при виконанні транспортних робіт як у сільському господарстві так і на виробництві.

**Мета досліджень** – розвинути запропоновані раніш методи рішення рівнянь руху автомобільного потягу для тракторного багатоланкового потягу та визначення алгоритму їх рішення.

**Основна частина**

Рівня руху тракторного потягу, які представлені в праці [1] нелінійні. Суттєву не лінійність вносить рівняння кінематичного зв'язку [1] для визначення закручення шин потягу  $\alpha_2$ . Нелінійними є коефіцієнти жорсткості та демпфірування шин  $K_1, K_2, K_3, K_{\alpha 2}, C_1, C_2, C_{\alpha 2}$ , які пов'язані з кутовою частотою коливань шин залежності [2, 3]:

$$K_i = \frac{K_{0i}T}{1+T_i^2\omega^2}, \quad (1)$$

$$C_i = C_0 + \frac{K_{0i}T}{1+T_i^2\omega^2}, \quad (2)$$

де  $K_i, C_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) – відповідно коефіцієнт демпфірування та жорсткості шини пр. радіальному (1, 2, 3) та кільцевому ( $i=\alpha 2$ ) демпфіруванні.

$C_{0i}, K_{0i}, T_i$  – параметри, які характери-зують пружні та дисипативні сили опору демпфіруванню шин.

Нелінійні диференційні рівняння вирішуються численними методами [4], з яких найбільш розповсюджений метод Рунге-Кутта четвертого порядку. При цьому вхідний вплив шляху повинен бути заданий гармонічною функцією або числовим масивом.

В даний час накопичений великий статистичний матеріал по опису мікрорельєфу шляхів та полів спектральної щільності впливу на колеса тракторного потягу та її дисперсії. При такому опису вхідного

впливу задачі визначення параметрів коливань тракторного потягу вирішуються методами спектральної теорії підресорювання [5]. В цьому випадку диференційні рівняння руху повинні бути лінійними, при цьому можливо вирішення цим методом лінійних диференційних рівнянь (1) та (2).

У зв'язку з цим можливо прийняти наступну методику вирішення диференційних рівнянь:

Розглядаємо вертикальні та повздожньо-кутові коливання корпусів тракторного потягу без обліку впливу на них крутних моментів.

Диференційні рівняння, які спрощенні з урахування цих допущень, вирішуємо методом спектральної теорії підресорювання на ЕОМ. (Обчислюємо дисперсії, спектральні щільності та фазово-частотні характеристики прогинів шин, апроксимуємо зміни прогинів шин).

Методом Рунге-Кутта вирішуємо рівняння коливань коліс трансмісії, двигуна та повздожніх коливань тракторного потягу згідно динамічної моделі, яка приведена в праці [1].

Рівняння руху перетворені таким чином, що координати кутів часу коліс приведені до осі коліс, а кутів обертання колінчатого валу двигуна - до осі колінчатого валу. Початком відліку кутів обертання коліс і колінчатого валу двигуна вважають їх значення в даний момент часу, які вони прийняли б при рівномірному обертанні, інакше при інтеграції кута обертання швидко прагнутимуть до машинної нескінченності; початком відліку зроблених кутів обертання коліс і колінчатого вала вважають їх початкові кутові швидкості; початком відліку подовжніх переміщень трактора вважається положення трактора в даний момент часу у разі рівномірного руху, і, нарешті, початком відліку похідної подовжніх переміщень вважається початкова швидкість руху трактора. Таким чином, розрахунком

на ЕОМ визначаються динамічні складання переміщень і швидкостей згаданих вище елементів, нижче приведені перетворені таким чином рівняння динаміки і рівняння кінематичного і силового зв'язку.

Рівняння руху двигуна Д-240 з регулятором прийняті

$$M_g = 61 - 0,303(\omega_{g0} + \phi_g) + 0,013(\omega_{g0} + \phi_g)^2 + [82,612 - 0,0005517(\omega_{g0} + \phi_g)^2] h_p h - [14,132 - 0,00419(\omega_{g0} + \phi_g)^2] h_p h$$

$$m_n \ddot{z} + V \dot{z} + E = A \omega_p^2$$

де  $M_g$  - рушійний момент на колінчатому валу двигуна в кг·м;

$h_p = (3,55 - Z)$  мм - координати, що визначає положення муфти регулятора;

$E$  - відновлююча сила регулятора, кг·м;

$A$  - інерційний коефіцієнт вантажів кг·с<sup>2</sup>;

$V$  - коефіцієнт в'язкого тертя в регуляторі, кг/мм;

Оскільки розглядається рух трактора з напівприцепом або з причепами робота двигуна здійснюється на регуляторній гілці і відновлююча сила визначається

$$E = 3,877 - 0,117X_p + 0,6235Z - 0,01848X_p Z - 0,004967X_p^2 + 0,001567X_p^2 Z$$

$$A = 0,0000805 + 0,00000617Z$$

де  $X_p$  - координата, що визначає натягнення пружини регулятора.

Рівняння подовжніх коливань тракторного потягу а також крутильних коливань трансмісії і коліс трактора мають вид:

$$\ddot{X} = \left\{ \frac{K_{\alpha 2} \alpha_2 + C_{\alpha 2} \dot{\alpha}_2}{r_g} - f \begin{bmatrix} C_1(Z_1 - h_1) + \\ C_2(Z_2 - h_2) + \\ C_3(Z_3 - h_3) + \\ K_1(Z_1 - h_1) + \\ K_2(Z_2 - h_2) + \\ K_3(Z_3 - h_3) \end{bmatrix} \right\} 2/(m_r + m_n);$$

$$\ddot{\varphi}_2 = \frac{[iK_T(\varphi_g - i\varphi_k) - 2K_{\alpha 2}\alpha_2 + iC_T(\varphi_g - i\varphi_k) - 2C_{\alpha 2}\dot{\alpha}_2]}{I_2};$$

$$\ddot{\varphi}_g = [-K_T(\varphi_g - i\varphi_2) - C_T(\varphi_g - i\varphi_2) + \Delta M_g]/I_g$$

Рівняння кінематичного зв'язку з отриманим фоном

$$\alpha_2 = \frac{w_0}{i} - V_0/[r_k(1 - \delta_2)]$$

де  $\delta_2$  - буксування ведучого колеса трактора, визначуваного по формулі

$$\delta_2 = 1/B[1 - 0,43429 \ln(D - \frac{P_2}{Q})]$$

де  $P_2$  і  $Q_2$  - відповідно поточні значення крутного моменту і вертикального навантаження, що діє на ведуче е колесо трактора.

$$Q_2 = Q_{02} - K_2(Z_2 - h_2) - C_2(Z_2 - h_2);$$

$$P_2 = K_{\alpha 2}\alpha_2 + C_{\alpha 2}\dot{\alpha}_2 + M_{02};$$

$$M_{02} = (Q_{01} + Q_{02} + Q_{03})fr_g;$$

$$r_g = r_2 - (Z_2 - h_2)$$

Таким чином рівняння не є звичайним диференціальним рівнянням, оскільки воно нерозв'язне відносно  $\alpha_2$ . Це не дозволяє застосувати для вирішення системи рівнянь методи спектральної теорії підресорювання, ні стандартні програми чисельної інтеграції диференціальних рівнянь.

Для проведення експериментальних досліджень та реєстрування необхідних параметрів створена мобільна тензометрична станція на базі тракторного потягу МТЗ-102+2ПТС-4+2ПТС-4.

Тензометрична мобільна станція складається з двох паралельно працюючих восьми каналних АЦП та ноутбук, з відповідним програмним забезпеченням. Це дозволить одночасно перетворювати сигнали, які поступають з аналогових датчиків та записувати їх у вигляді цифрових табличних даних у пам'ять комп'ютера.

В схему тензометричної установки входить тахогенератор, акселерометр вертикальних коливань, акселерометр продовжніх коливань, акселерометр поперечних коливань, тензометрична полувісь, фіксуючий прибор частоти обертань колеса, динамометричні ланки, акумуляторні батареї, з'єднувальні проводи.

В ході проведення експериментальних досліджень будуть визначатися та реєструватися наступні змінні стану тракторного потягу:

- Величина тягового зусилля на кроку трактора;
- Швидкість руху тракторного потягу;
- Подовжні, поперечні та вертикальні складові прискорення;
- Гальмівний момент на ведучих полувісях;
- Частота обертання ведучих полувісей;
- Час рушання та розгону;
- Маса перевози мого вантажу;
- Номер передачі коробки передач.

Для виміру тягового зусилля використано кільцева тягова динамометрична ланка.

Для реєстрування подовжніх, поперечних та вертикальних складових прискорення використані три акселерометра АВЕ-213. Робочу швидкість транспортного потягу виміряємо з допомогою тахогенератора 4ТІ-3,2, який обертається від переднього колеса трактора.

Гальмівний момент на ведучих колесах трактора виміряємо за допомогою тензорезисторів, які наклеєні на полувісь.

В якості вантажу використовуються бетонні блоки масою 500кг та баласті з піском, масою по 100кг.

**Висновок.** Для експериментальної перевірки методики розрахунку коливань тракторного потягу планується натурний експеримент з використанням тракторів МТЗ-102, Т-150К-09, John Deere, Challenger та причепів 2ПТС-4, напівпричепів Обухівського заводу «Обухівсьільмаш», вантажопід'ємністю 10т та 12т, які знаходяться у фермерському господарстві «Альфа» Золочівського району Харківської області.

Список літератури

1. Агапов О.М., Краснокутський В.М, Павлій Н.В., Галуцьких А.Д. Методика розрахунку динамічних навантажень, які діють на колеса тракторного потягу, рівняння руху тракторного потягу. Вісник НТУ «ХПІ». Серія транспортне машинобудування. С.4-9, Харків–2017.
2. В.Б. Самородов, А.Ю. Ребров. Развитие классических методов тягового расчета трактора с учетом основных технико-экономических показателей МТА. Журнал Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Автомобіле-та тракторобудування». Номер 58.
3. Ребров О.Ю. Математическая модель дизельного двигателя в безразмерных величинах с учетом его загрузки и подачи топлива. Журнал Вісник національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: зб. наук. праць. Тематичний випуск: Транспортне машинобудування. Номер 19.
4. Г.Корн, Т. Корн. Справочник по математике. Перевод с американского. М. «Наука», 1974, с.695-709.
5. Силаев А. А. Спектральная теория поддресоривания транспортных машин. М., «Машиностроение», 1972, с.192.

References (transliterated)

1. Ahapov O. M., Krasnokutskiy V. M., Paul N., Halutskiyh A. D. Methodology of calculation of the dynamic loading, that operate on the wheels of tractor train, equalization of motion of tractor train. Announcer NTU "KPI". Series: transport engineer. p.4-9.
2. V. B. Samorodov, Y. Rebrov. Development of the classical methods of hauling the tractor of calculation taking into account the basic technical and economic indicators of the AIT. Magazine Announcer NTU "KhPI". Series of: «of Avtomobile-ta of tractorobuduvannya. No 58
3. Rebrov O. Yu. The mathematical model of a diesel engine in dimensionless quantities, taking into account its loading and fuel supply. Journal of the National Technical University "Kharkiv Polytechnical Institute": Sciences. Prac. Subject: The transport is machine-driven, no 19.
4. G. Corn, T. Korn. Handbook of Mathematics. Translation from the American. Moscow: "Science", 1974, p.695-709.
5. Silaev A. A. Spectral theory of suspension of transport vehicles. Moscow: "Mechanical Engineering", 1972, p.192.

Надійшла (received): 13.03.2017

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Методи та алгоритми рішення рівнянь руху тракторного потягу / В. М. Краснокутський, Н. В. Павлій, О. М. Агапов, А. Д. Галуцьких // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Транспортне машинобудування. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 14 (1236). – С. 28–30. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0066.**

**Методы и алгоритмы решения уравнений движения тракторного поезда / В. Краснокутский, Н. В. Павлов А. Н. Агапов, А. Д. Галуцьких // Вестник НТУ «ХПИ». Серія: Транспортное машиностроение. - Х.: НТУ «ХПИ», 2017. - № 14 (1236). - С. 28-30. - Библиогр. : 5 назв. - ISSN 2079 0066.**

**The methods and algorithms for solving the equations of motion of the tractor train / V. M. Krasnokutskiy, Paul N., A. Agapov, A. D. Halutskiyh // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Transport machine building. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 14 (1236). – P. 28–30. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-0066.**

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Агапов Олег Миколайович** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Автомобіле-і тракторобудування»; тел.: (057) 70-76-4-64; e-mail: agarovoleg@gmail.com.

**Агапов Олег Николаевич** - кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры «Автомобиле-и тракторостроения»; тел.: (057) 70-76-4-64; e-mail: agarovoleg@gmail.com.

**Agarov Oleg Nikolaevich** - candidate of technical sciences, National Technical University 'Kharkov Polytechnic Institute "Associate Professor" Automotive and tractor "; tel. : (057) 70-76-4-64; e mail: agarovoleg@gmail.com.

**Краснокутський Володимир Миколайович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Автомобіле-і тракторобудування»; тел.: (057) 70-76-4-64; e-mail: penza55kvn62kvn@ukr.net.

**Краснокутский Владимир Николаевич** - кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры «Автомобиле-и тракторостроения»; тел.: (057) 70-76-4-64; e-mail: penza55kvn62kvn@ukr.net.

**Krasnokutskiy Vladimir Nikolaevich** - candidate of technical sciences, Associate Professor, National Technical University 'Kharkov Polytechnic Institute "Associate Professor" Automotive and tractor "; tel. : (057) 70-76-4-64; e mail: penza55kvn62kvn@ukr.net.

**Павлій Ніна Володимирівна** – доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Автомобіле-і тракторобудування»; тел.: (057) 70-76-4-64; e-mail: nina\_pavliy@meta.ua.

**Павлий Нина Владимировна** - доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры «Автомобиле-и тракторостроения»; тел.: (057) 70-76-4-64; e-mail: nina\_pavliy@meta.ua.

**Pavliy Nina Vladimirovna** - Associate Professor, National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", an assistant professor of "Automobile and Tractor"; tel. : (057) 70-76-4-64; e-mail: nina\_pavliy@meta.ua.

**Галуцьких Анатолій Данилович** – завідувач лабораторії, «Харківський політехнічний інститут», асистент кафедри «Автомобіле-і тракторобудування»; тел.: (057) 70-76-4-64.

**Галуцких Анатолий Данилович** - заведующий лабораторией, «Харьковский политехнический институт», ассистент кафедры «Автомобиле-и тракторостроения»; тел.: (057) 70-76-4-64.

**Halutskiyh Anatoly Danilovich** - head of the laboratory, "Kharkov Polytechnic Institute", the assistant of "Automotive and tractor"; tel. : (057) 70-76-4-64.