УДК 631.372

Аналіз динаміки транспортно-технологічних агрегатів як систем змінної маси

Є.І. Калінін

Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка (м. Харків, Україна), kalininhntusg@gmail.com

Транспорт в сільському господарстві забезпечує технологічні процеси всередині галузі, а також зв'язок сільського господарства з іншими галузями народного господарства. Через несвоєчасні поставки вантажів зриваються роботи, простоює машинно-тракторний парк, не вивозиться вчасно сільськогосподарська продукція, знижується її якість, що призводить до значних втрат. Від ступеня розвитку транспорту та ефективності його використання багато в чому залежать результати всього сільськогосподарського виробництва. Сучасний транспортно-технологічний агрегат являє собою складну динамічну систему, масові показники якої можуть бути як постійними, так і змінюватися в процесі експлуатації (навантаження, або розвантаження напівначіпної транспортно-технологічної сільськогосподарської машини).

Доведено, що транспортно-технологічний агрегат характеризується відносно малою величиною середнього гакового навантаження і максимальними коливаннями його амплітуд. Навантаження, що сприймаються трансмісією, в ряді випадків, досить суттєві, а їх амплітуди досягають більшої величини, ніж несуча здатність деталей. В той самий час, рух на низьких швидкостях супроводжується безперервними накатами транспортно-технологічної машини на трактор. Оскільки маса машини значно перевищує масу трактора, то коливання динамічної навантаженості трансмісії мають знакозмінний характер.

Саме тому практичний інтерес має питання аналізу дійсних динамічних навантажень, що сприймаються трансмісією в різноманітних умовах роботи агрегату при зміні маси останнього. Це дозволить уточнити методи розрахунку деталей трансмісії на міцність та довговічність, а також методи вибору характеристик пристроїв, які використовуються в трансмісії для зменшення коливань навантажень.

Для аналізу роботи трактора у складі транспортно-технологічного агрегату змінної маси напівначіпна машина розглядалась як система матеріальних точок з постійними масами, склад якої змінювався: частина матеріальних точок залишає систему, що розглядається (процес розвантаження технологічної машини), або приєднується до неї (процес навантаження технологічної машини). Таким чином, введено поняття матеріальної точки змінної маси як множини точок, які в деякий момент часу знаходяться в області, що обмежена деякою контрольною поверхнею. Причому, ця область простору в умовах задачі, що розглядається, може бути представлена як така, що виконує поступальний або/та обертальний рух разом з деякою геометричною точкою.

Ключові слова: *транспортно-технологічний агрегат, тіло змінної маси, рівняння руху, динаміка, прискорення, квазістатична маса.*

Актуальність задачі. Інтенсифікація сільського господарства та послідовне здійснення комплексної механізації виробництва продукції рослинництва нерозривно пов'язані з ростом об'єму транспортних робіт, значна частка яких становить невід'ємну частину технологічних процесів вирощування і збирання сільськогосподарських культур. У загальному комплексі сільськогосподарських робіт на транспортні та вантажні роботи припадає приблизно 30…35% витрат праці, 35…40% вартості механізованих робіт і до 50% витрат енергії. Об'єм перевезень сільськогосподарських вантажів складає в середньому від 20 до 60 т.км на 1 га ріллі.

Транспорт в сільському господарстві забезпечує технологічні процеси всередині галузі, а також зв'язок сільського господарства з іншими галузями народного господарства. Через несвоєчасні поставки вантажів зриваються роботи, простоює машинно-тракторний парк, не вивозиться вчасно сільськогосподарська продукція, знижується її якість, що призводить до значних втрат. Від ступеня розвитку транспорту та ефективності його використання багато в чому залежать результати всього сільськогосподарського виробництва.

Постановка проблеми. Характерною особливістю транспортного режиму роботи тракторного агрегату є рух на високих транспортних швидкостях по ґрунтовим дорогам і дорогах з покриттям, а також рух на достатньо низьких швидкостях при виконанні транспортно-технологічної операції в тяжких дорожніх умовах. Доведено, що транспортний режим роботи агрегату за характером динамічної навантаженості суттєво відрізняється від просапних і орних. Він характеризується відносно малою величиною середнього гакового навантаження і максимальними коливаннями його амплітуд. Навантаження, що сприймаються трансмісією, в ряді випадків, досить суттєві, а їх амплітуди досягають більшої величини, ніж несуча здатність деталей. В той самий час, рух на низьких швидкостях супроводжується безперервними накатами транспортно-технологічної машини на трактор. Оскільки маса машини значно перевищує масу трактора, то коливання динамічної навантаженості трансмісії мають знакозмінний характер [6, 7].

Саме тому практичний інтерес має питання аналізу дійсних динамічних навантажень, що сприймаються трансмісією в різноманітних умовах роботи агрегату при зміні маси останнього. Це дозволить уточнити методи розрахунку деталей трансмісії на міцність та довговічність, а також методи вибору характеристик пристроїв, які використовуються в трансмісії для зменшення коливань навантажень.

Мета роботи. Формування теорії руху транспортно-технологічного агрегату змінної маси як абсолютно твердого тіла змінної маси з метою отримання рівнянь руху останнього.

Аналіз публікацій. Питанням динаміки та функціонування транспортних агрегатів, на базі тракторів, присвячені роботи багатьох вчених [1 – 3]. При цьому, значна увага приділена підвищенню ефективності тракторних поїздів і стабільності їх функціонування. Запропоновані різноманітні підходи як теоретичного [1, 2], так і конструктивного [4, 5] спрямування. Однак, всі існуючі теорії руху тракторного поїзда розглядали останній як тіло (або систему тіл) постійної маси. Такий підхід був обґрунтований незначними масами причіпних та напівначіпних машин, що використовувалися у минулому. Сучасні ж машини, маса яких, у завантаженому стані, досягає десятків тон, при виконанні технологічного процесу суттєво змінюють масу, що значно впливає на тягово-енергетичні показники колісного трактора (за рахунок нестабільності формування гакового навантаження).

Основна частина. Розглянемо динаміку точки змінної маси, під якою будемо розуміти змінну систему *n* матеріальних точок постійної маси, зосереджену під час руху в деякій області, розмірами яких можна знехтувати. Нехай в деякий момент часу t всі i точок системи, маси яких m_i, рухаються з певною швидкістю. Тоді, вектор кількості руху даних точок визначиться із залежності виду:

$$\bar{Q}_T^{(t)} = \sum_i m_i \bar{v}_i^{(t)}. \qquad (1)$$

Нехай в цей же момент часу j матеріальних точок мають масу Δm_j, швидкість $v_j^{(t)}$ і готові приєднатися до системи, або від'єднатися від неї. Вектор кількості руху даних точок можна визначити, як:

$$\bar{Q}_\Delta^{(t)} = \sum_j \Delta m_j \bar{v}_j^{(t)}. \qquad (2)$$

Тоді, головний вектор кількості руху системи даних точок в момент часу t:

$$\bar{Q}^{(t)} = \bar{Q}_T^{(t)} + \bar{Q}_\Delta^{(t)} = \sum_i m_i \bar{v}_i^{(t)} + \sum_j \Delta m_j \bar{v}_j^{(t)}. \qquad (3)$$

Нехай тепер в деякий момент часу $t + \Delta t$ швидкість відповідних матеріальних точок буде дорівнювати $\bar{v}_i^{(t+\Delta t)}$ і $\bar{v}_j^{(t+\Delta t)}$ відповідно. Тоді, в момент часу $t + \Delta t$, головний вектор кількості руху системи буде дорівнювати:

$$\begin{aligned} \bar{Q}^{(t+\Delta t)} &= \bar{Q}_T^{(t+\Delta t)} + \bar{Q}_\Delta^{(t+\Delta t)} = \\ &= \sum_i m_i \bar{v}_i^{(t+\Delta t)} + \sum_j \Delta m_j \bar{v}_j^{(t+\Delta t)}, \end{aligned} \qquad (4)$$

а його зміна:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{Q} = \bar{Q}^{(t+\Delta t)} - \bar{Q}^{(t)} &= \sum_i m_i (\bar{v}_i^{(t+\Delta t)} - \bar{v}_i^{(t)}) + \\ &+ \sum_j \Delta m_j (\bar{v}_j^{(t+\Delta t)} - \bar{v}_j^{(t)}) = \\ &= \sum_i m_i \Delta \bar{v}_i + \sum_j \Delta m_j \Delta \bar{v}_j \end{aligned} \qquad (5)$$

З огляду на той факт, що, в найзагальнішому випадку, причіпна (або напівначіпна) машина здійснює складний рух, розглянемо динаміку точок системи ввівши дві системи координат: стаціонарну $Oxyz$ і рухому $O'x'y'z'$, центр якої розташований в деякій точці m_{i+l} даної системи $(i + l \le n)$ і здійснює переміщення з нею з деякою переносною швидкістю $\bar{v}_i^e$. Відносний рух точки m_i відносно рухомої системи координат визначиться відносною швидкістю $\bar{v}_i^r$. Тоді кінематика точки m_i на інтервалі Δt може бути описана рівнянням виду:

$$\frac{\Delta \bar{v}_i}{\Delta t} = \bar{a}_i^e + \bar{a}_i^r + \bar{a}_i^c, \qquad (6)$$

де $\bar{a}_i^e$ – вектор змінного прискорення – вектор прискорення системи матеріальних точок m_i; $\bar{a}_i^r$ – вектор відносного прискорення точки m_i відносно рухомої системи координат; $\bar{a}_i^c$ – вектор коріолісова прискорення.

Тоді:

$$\Delta \bar{v}_i = (\bar{a}_i^e + \bar{a}_i^r + \bar{a}_i^c) \cdot \Delta t, \qquad (7)$$

і

$$\Delta \bar{Q} = \sum_i m_i (\bar{a}_i^e + \bar{a}_i^r + \bar{a}_i^c) \cdot \Delta t + \sum_j \Delta m_j \Delta \bar{v}_j. \qquad (8)$$

Використовуючи теорему про зміну головного вектору кількості руху, отримаємо:

$$\frac{\Delta\bar{Q}}{\Delta t} = \bar{F} = \sum_i m_i(\bar{a}_i^e + \bar{a}_i^r + \bar{a}_i^c) + \sum_j \frac{\Delta m_j}{\Delta t}\Delta\bar{v}_j\,, \quad (9)$$

де $\bar{F}$ – головний вектор зовнішніх сил, що діють на систему матеріальних точок.

За визначенням:

$$\bar{a}_i^e = \frac{d\bar{v}}{dt}, \quad (10)$$

$$\bar{a}_i^c = 2(\bar{\omega} \times \bar{v}_i^r)\,. \quad (11)$$

Тоді, враховуючи, що $\sum m_i = m$, отримаємо:

$$\bar{F} = m\frac{d\bar{v}}{dt} + \sum_i m_i\,\bar{a}_i^r + \\ + \sum_i 2m_i\,(\bar{\omega} \times \bar{v}_i^r) + \sum_j \frac{\Delta m_j}{\Delta t}\Delta\bar{v}_j\,. \quad (12)$$

Величину

$$\bar{K} = -2\sum_i \bar{\omega} \times \bar{v}_i^r \quad (13)$$

визначимо, як силу Коріоліса, значення якої залежить від величини відповідного прискорення.

Величина (з урахуванням переходу до нескінченно малих)

$$\bar{I} = \sum_j \frac{dm_j}{dt}\Delta\bar{v}_j \quad (14)$$

визначає рух додаткової маси – сила імпульсу.

Величина

$$\bar{\Phi} = \sum_i m_i\,a_i^r \quad (15)$$

визначає відносне переміщення матеріальних точок всередині системи – сила відносного переміщення.

Таким чином, рівняння (12) набуде вигляду:

$$\bar{F} = m\frac{d\bar{v}}{dt} + \bar{\Phi} - \bar{K} - \bar{I}\,, \quad (16)$$

або

$$m\frac{d\bar{v}}{dt} = \bar{F} - \bar{\Phi} + \bar{K} + \bar{I} \quad (17)$$

Отримана залежність описує динаміку матеріальної точки змінної маси. Розглянемо, як змінюються величини, що входять в дану залежність.

Якщо прийняти, що система координат $O'x'y'z'$ пов'язана безпосередньо з матеріальною точкою змінної маси, то сила Коріоліса $\bar{K} \neq 0$ при обертальному русі системи (наприклад, поворот агрегату). При прямолінійному русі $\bar{K} = 0$.

Величина сили імпульсу $\bar{I}$ визначається потоком маси, яка приєднується або від'єднується від матеріальної точки і, в найзагальнішому випадку, являє собою секундну витрату кількості руху додаткової маси, яка визначається через звичайну витрату або подачу речовини.

Величина сили відносного переміщення $\bar{\Phi}$ визначається переміщенням матеріальних точок всередині системи за допомогою додаткових механізмів, або гравітаційним методом (наприклад, переміщення транспортером речовини до задньої стінки розкидачі добрив).

Отримаємо рівняння руху центру мас системи матеріальних точок змінних мас. Для цього визначимо закон зміни головного вектору кількості руху системи. Для більшої універсальності розглянемо систему з p точок змінних мас, таких, що їх рух описується рівнянням (17). Тоді, для деякої k -ї точки змінної маси матимемо:

$$m_k\frac{d\bar{v}_k}{dt} = \bar{F}_k^e + \bar{F}_k^i - \bar{\Phi}_k + \bar{K}_k + \bar{I}_k\,, \quad (18)$$

де $\bar{F}_k^e$ – рівнодіюча всіх зовнішніх сил, що діють на точку; $\bar{F}_k^i$ – рівнодіюча всіх внутрішніх сил, що діють на точку системи.

Внесемо масу m_k під знак диференціала. Тоді, враховуючи, що $m_k\bar{v}_k = \bar{Q}_k$ – вектор кількості руху k -ї точки, отримаємо:

$$\frac{\partial}{\partial t}\bar{Q}_k = \bar{F}_k^e + \bar{F}_k^i - \bar{\Phi}_k + \bar{K}_k + \bar{I}_k\,. \quad (19)$$

В даній залежності використовується частинний диференціал, оскільки її ліва частина (кількість руху $\bar{Q}_k$) є функцією не тільки часу, а й маси. Тому, в останніх міркуваннях використовуємо частинну похідну за умови, що $m_k \approx \mathrm{const}$.

Матеріальну точку, для якої використовується така частинна похідна за умови $m_k \approx \mathrm{const}$ в момент часу t, будемо називати точкою квазістатичної маси.

Підсумовуючи за k рівняння (19) і з огляду на зрівноважування внутрішніх сил системи, отримаємо ($\bar{F} = \bar{F}_k^e$):

$$\frac{\partial}{\partial t}\bar{Q} = \bar{F} - \bar{\Phi} + \bar{K} + \bar{I}\,, \quad (20)$$

або:

$$\partial\bar{Q} = (\bar{F} - \bar{\Phi} + \bar{K} + \bar{I})\partial t. \quad (21)$$

Тобто, можна сформулювати теорему.

Теорема 1 Елементарна зміна головного вектору кількості руху системи матеріальних точок квазістатичної маси дорівнює геометричній сумі імпульсів головних векторів сил, що діють на точку.

Отримаємо рівняння руху центру мас системи матеріальних точок змінних мас.

За визначенням, радіус-вектор центру мас системи визначиться із залежності виду:

$$m\bar{r}_c = \sum_i m_i\bar{r}_i, \quad (22)$$

де загальна маса системи:

$$m = \sum_i m_i. \tag{23}$$

Після диференціювання залежності (22) отримаємо:

$$m\frac{\partial \bar{r}_c}{\partial t} = \sum_i m_i \frac{\partial \bar{r}_i}{\partial t} = \sum_i \bar{Q}_i = \bar{Q}\,. \tag{24}$$

Після другого диференціювання отримаємо:

$$m\frac{\partial^2 \bar{r}_c}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial t}Q = \bar{F} - \bar{\Phi} + \bar{K} + \bar{I}\,. \tag{25}$$

Дане рівняння є векторним записом рівняння руху центру мас системи, що складається з матеріальних точок змінної маси.

Визначимо фізичний зміст другої похідної, що входить в рівняння (25).

З рівняння (22) радіус-вектор центру мас системи дорівнює:

$$\bar{r}_c = \frac{\sum_i m_i \bar{r}_i}{m}. \tag{26}$$

Візьмемо похідну з урахуванням того, що $m, m_i, \bar{r}_i = f(t)$:

$$\dot{\bar{r}}_c = \frac{1}{m}\sum_i \dot{m}_i \bar{r}_i + \frac{1}{m}\sum_i m_i \dot{\bar{r}}_i - \frac{1}{m^2}\dot{m}\sum_i m_i \bar{r}_i\,. \tag{27}$$

Оскільки $\dot{\bar{r}}_i = v_c$, то, приймаючи квазістатичність маси ($\sum_i m_i = m$), отримаємо:

$$\frac{1}{m}\sum_i m_i \dot{\bar{r}}_i = \frac{1}{m}\sum_i m_i \frac{\partial \bar{r}_i}{\partial t} = \frac{\partial \bar{r}_c}{\partial t}, \tag{28}$$

і тоді:

$$-\frac{1}{m^2}\dot{m}\sum_i m_i \bar{r}_i = -\frac{1}{m}\sum_i \dot{m}_i \bar{r}_c\,. \tag{29}$$

Остаточно:

$$\bar{v}_c = \frac{\partial \bar{r}_c}{\partial t} + \frac{1}{m}\sum_i \dot{m}_i(\bar{r}_i - \bar{r}_c)\,. \tag{30}$$

Величина $\partial \bar{r}_c/\partial t$ являє собою швидкість руху центру мас системи матеріальних точок квазістатичної маси.

Продиференціюємо рівняння (30) з урахуванням рівняння (28):

$$\begin{aligned} \bar{a}_c = \dot{\bar{v}}_c = \frac{1}{m}\sum_i \dot{m}_i \ddot{\bar{r}}_i + \frac{1}{m}\sum_i \dot{m}_i \dot{\bar{r}}_i - \\ -\frac{1}{m^2}\dot{m}\sum_i m_i \dot{\bar{r}}_i + \frac{1}{m}\sum_i \ddot{m}_i(\bar{r}_i - \bar{r}_c) + \\ +\frac{1}{m}\sum_i \dot{m}_i(\dot{\bar{r}}_i - \dot{\bar{r}}_c) - \frac{1}{m^2}\dot{m}\sum_i \dot{m}_i(\bar{r}_i - \bar{r}_c)\,. \end{aligned} \tag{31}$$

Після перетворення, отримаємо:

$$\begin{aligned} \bar{a}_c = \frac{\partial^2 \bar{r}_c}{\partial t^2} + \frac{1}{m}\sum_i \ddot{m}_i(\bar{r}_i - \bar{r}_c) + \\ +\frac{2}{m}\sum_i \dot{m}_i(\bar{v}_i - \bar{v}_c)\,. \end{aligned} \tag{32}$$

З отриманої залежності можна зробити висновок, що другий частинний диференціал від радіус-вектору центру мас системи, на відміну від загальних законів механіки, являє собою прискорення центру мас не системи, яка розглядається, а її аналога з квазістатичною масою.

З огляду на можливість обертального руху, отримаємо закон зміни моменту імпульсу системи матеріальних точок змінних мас. Для цього обидві частини рівняння (18) векторно помножимо на радіус-вектор відповідної матеріальної точки $\bar{r}_k$ відносно початку нерухомої системи координат. Отримаємо:

$$\begin{aligned} m_k\left(\frac{d\bar{v}_k}{dt} \times \bar{r}_k\right) = \\ = \left(\bar{F}_k^e + \bar{F}_k^i - \bar{\Phi}_k + \bar{K}_k + \bar{I}_k\right) \times \bar{r}_k\,. \end{aligned} \tag{33}$$

Просумуємо дане рівняння для всіх точок системи, враховуючи взаємне врівноваження внутрішніх сил:

$$\sum_k m_k\left(\frac{d\bar{v}_k}{dt} \times \bar{r}_k\right) = \bar{M} - \bar{M}^{\Phi} + \bar{M}^{K} + \bar{M}^{I}, \tag{34}$$

де $\bar{M} = \sum_k F_k^e \times \bar{r}_k$ – головний момент зовнішніх сил, що діють на систему; $\bar{M}^{\Phi} = \sum_k \bar{\Phi}_k \times \bar{r}_k$, $\bar{M}^{K} = \sum_k \bar{K}_k \times \bar{r}_k$, $\bar{M}^{I} = \sum_k \bar{I}_k \times \bar{r}_k$ – відповідно, головні моменти сил відносного переміщення точок системи, сил Коріоліса і сил імпульсу. Внесемо масу m_k і радіус-вектор $\bar{r}_k$ матеріальної точки під знак похідної, замінюючи диференціал на частинний (з урахуванням квазістатичної маси точки). Тоді:

$$\frac{\partial}{\partial t}\sum_k m_k \bar{v}_k \times \bar{r}_k = \bar{M} - \bar{M}^{\Phi} + \bar{M}^{K} + \bar{M}^{I}. \tag{35}$$

Оскільки $\sum_k m_k \bar{v}_k \times \bar{r}_k = l$ – момент імпульсу системи матеріальних точок змінних мас, обчислений відносно нерухомої точки системи, то можна записати:

$$\frac{\partial \bar{l}}{\partial t} = \bar{M} - \bar{M}^{\Phi} + \bar{M}^{K} + \bar{M}^{I}. \tag{36}$$

Сформулюємо теорему.

Теорема 2. Похідна по часу від моменту імпульсу системи матеріальних точок квазістатичних мас дорівнює геометричній сумі головних моментів всіх сил, прикладених до системи, відносно нерухомої точки.

Висновки. Таким чином, можна казати, що динаміка матеріальної точки змінної маси, як і системи таких матеріальних точок, має спільні риси з загальновідомою динамікою матеріальної точки та абсолютно твердого тіла. Однак, на відміну від останньої, суттєво важливими є питання формування додаткових сил, що виникають в результаті зміни маси системи. Такими додатковими силами є сили коріолісова прискорення (величинами яких можна знехтувати під час прямолінійного руху агрегату) та сили, які викликані переміщенням матеріальних точок як всередині системи, так і за її межами.

На підставі запропонованої моделі квазістатичної маси та тіла змінної маси отримані основні рівняння руху (поступального та обертального) тіла змінної маси в просторі, які дозволяють визначити переміщення центру мас останнього і сформувати його єдину динамічну модель.

Література

1. Тракторы. Проектирование, конструирование и расчет / И.П. Ксеневич, В.В. Гуськов, Н.Ф. Бочаров и др.; Под общ. ред. И.П. Ксеневича. – М.: Машиностроение. – 1991. – 544 с.

2. Красовский Н.П. Теория управления движением / Н.П. Красовский. – М.: Наука, 1968. – 438 с.

3. Тракторы: Теория / В.В. Гуськов, Н.Н. Велев, Ю.Е. Атаманов и др.; Под общ. ред. В.В. Гуськова. – М.: Машиностроение, 1988. – 376 с.

4. Шалягин В.Н. Транспортные и транспортно-технологические средства повышенной проходимости / В.Н. Шалягин. – М.: Агропромиздат, 1986. – 254 с.

5. Ясенецький В.В. Тракторні причепи і напівпричепи: огляд конструкцій / В.В. Ясенецький, Д.А. Деревянко, В.К. Черношкур і др. // Техніка і технологія АПК. – 2014. – №7. – С. 19-26

6. Калінін Є.І. Формування умови стійкості лінійної системи при випадкових збуреннях її параметрів / Є.І. Калінін, В.М. Романченко, Г.П. Юр'єва // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – 2017. – № 7. – С. 100-108.

7. Калінін Є.І. Вплив нестаціонарності гакового навантаження на буксування рушіїв колісного трактора / Є.І. Калінін, М.Л. Шуляк, В.П. Мальцев // Системи обробки інформації – 2017. – № 5. – С. 27-30.

Reference

1. Ksenevich I.P., Guskov V.V., Bocharov N.F., Atamanov U.E. (1991). *Tractori. Proectirovanie, konstruirovanie I raschet*. Moscow: Mashinostroenie, p. 544.

2. Krasovskij N.P. (1968). *Teorija upravlenija dvigeniem.* Moscow: Nauka, p. 438.

3. Guskov V.V., Velev N.N., Atamanov U.E., Bocharov I.P. (1988) *Tractori: Teorija.* Moscow: Mashinostroenie, p. 376.

4. Shaljagin V.N. (1986) *Transportnyie i transportno-tehnologicheskie sredstva povyishennoy prohodimosti*. Moscow: Agropromizdat, p. 254.

5. Yasenetskiy V.V., Derevyanko D.A., Chernoshkur V.K. (2014) Tractorni prychepy I napivprychepy: oglyad construkcij. *Tehnica I tehnologiya APK*, 7, pp. 19-26

6. Kalinin E.I. Romanchenko V.M., Yurjeve G.P. (2017) Formuvannya umovy stijcosti linijnoi systemy pry vypadkovyh zburennyah. *Tehnichnyj servis agropromyslovogo, lisovogo ta transportnogo kompleksiv*, 7, pp. 100-108.

7. Kalinin E.I., Shuljak M.L., Malcev V.P. (2017) Vplyv nestacionarnogo gakovogo navantagennya na buksuvannya rushiiv kolisnogo traktora. *Systemy obrobky informacii*, 5, pp. 27-30

Анотація

Анализ динамики транспортно-технологических агрегатов как систем переменной массы

Е.И. Калинин

Транспорт в сельском хозяйстве обеспечивает технологические процессы внутри отрасли, а также связь сельского хозяйства с другими отраслями народного хозяйства. Из-за несвоевременных поставок грузов срываются работы, простаивает машинно-тракторный парк, не вывозится вовремя сельскохозяйственная продукция, снижается ее качество, что приводит к значительным потерям. От степени развития транспорта и эффективности его использования во многом зависят результаты всего сельскохозяйственного производства. Современный транспортно-технологический агрегат представляет собой сложную динамическую систему, массовые показатели которой могут быть как постоянными, так и изменяться в процессе эксплуатации (загрузка, или разгрузка полунавесной транспортно-технологической сельскохозяйственной машины).

Доказано, что транспортно-технологический агрегат характеризуется относительно малой величиной средней крюковой нагрузки и максимальными колебаниями ее амплитуд. Нагрузки, которые воспринимаются трансмиссией, в ряде случаев, достаточно существенные, а их амплитуды достигают большей величины, чем несущая способность деталей. В то же время, движение на низких скоростях сопровождается непрерывными накатами транспортно-технологической машины на трактор. Поскольку масса машины значительно превышает массу трактора, то колебания динамической нагруженности трансмиссии имеют знакопеременный характер.

Именно поэтому практический интерес представляет вопрос анализа действительных динамических нагрузок, воспринимаемых трансмиссией в различных условиях работы агрегата при изменении массы последнего. Это позволит уточнить методы расчета деталей трансмиссии на прочность и долговечность, а также методы выбора характеристик устройств, используемых в трансмиссии для уменьшения колебаний нагрузок.

Для анализа работы трактора в составе транспортно-технологического агрегата переменной массы полунавесная машина рассматривалась как система материальных точек с постоянными массами, состав которой менялся: часть материальных точек покидает систему, (рассматривается процесс разгрузки технологической машины), или присоединяется к ней (процесс загрузки технологической машины). Таким образом, введено понятие материальной точки переменной массы как множества точек, которые в некоторый момент времени находятся в области, ограниченной некоторой контрольной поверхностью. Причем, эта область пространства в условиях задачи, которая рассматривается, может быть представлена как такая, которая выполняет поступательное и/или вращательное движение вместе с некоторой геометрической точкой.

Ключевые слова: *транспортно-технологический агрегат, тело переменной массы, уравнения движения, динамика, ускорение, квазистатическая масса.*

Abstract

Analysis of the dynamics of transport and technological aggregates as variable mass systems

E.I. Kalinin

Transport in agriculture provides technological processes within the industry, as well as the connection of agriculture with other sectors of the national economy. Due to the late delivery of goods, work is disrupted, the machine and tractor fleet is idle, agricultural products are not exported on time, its quality is reduced, which leads to significant losses. The degree of development of transport and the efficiency of its use largely determine the results of the entire agricultural production. A modern transport and technological unit is a complex dynamic system, the mass indicators of which can be either constant or change during operation (loading or unloading of a semi-mounted transport and technological agricultural machine).

It is proved that the transport and technological unit is characterized by a relatively small average hook load and maximum fluctuations of its amplitudes. The loads that are perceived by the transmission, in some cases, are quite significant, and their amplitudes reach a greater value than the carrying capacity of the parts. At the same time, driving at low speeds is accompanied by continuous rolls of the transport and technological machine onto the tractor. Since the mass of the machine significantly exceeds the mass of the tractor, the vibrations of the dynamic loading of the transmission have an alternating character.

That is why of practical interest is the question of analyzing the actual dynamic loads perceived by the transmission in various conditions of the unit operation when the mass of the latter changes. This will clarify the methods for calculating transmission parts for strength and durability, as well as methods for selecting characteristics of devices used in transmissions to reduce load fluctuations.

To analyze the operation of a tractor as part of a transport and technological unit of variable mass, a semi-mounted machine was considered as a system of material points with constant masses, the composition of which changed: some of the material points left the system (the process of unloading the technological machine is considered). Thus, the concept of a material point of a variable mass is introduced as a set of points that at a certain moment of time are in the region bounded by a certain control surface. Moreover, this area of space in the conditions of the problem, which is considered, can be represented as one that performs translational and/or rotational movement together with a certain geometric point.

Keywords: *transport and technological unit, the body of variable mass, equations of motion, dynamics, acceleration, quasistatic mass.*

Бібліографічне посилання / Bibliography link:
Kalinin E.I. Analysis of the dynamics of transport and technological aggregates as variable mass systems // Engineering of nature management, 2019, #2(12), p. 38 - 43.

Подано до редакції / *Received: 04.03.2019*