

МОДЕЛЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЇ ҐРУНТОВОЇ ПОВЕРХНІ ПІД ЧАС ЗМІННИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ПНЕВМАТИЧНЕ КОЛЕСО

Запропоновано узагальнену розрахункову та математичну модель взаємодії ведучого пневматичного колеса з ґрунтовою опорною поверхнею для визначення динамічних навантажень та деформації ґрунту з врахуванням дії змінних навантажень на ведуче колесо і в'язко-пружних властивостей ґрунту.

Ключові слова: деформація ґрунту, взаємодія колеса з ґрунтом, моделювання.

Assist. A.L. SHCHUPAK – USUFWT

Modelling of deformation of the soil ground surface during the variable loading on the pneumatic wheel

Offered generalized computation and mathematical model of interaction of the driving pneumatic wheel with the soil for determination of the dynamic loading and deformation of soil taking into account variable loading on the driving wheel and viscid-resilient properties of soil.

Keywords: deformation of soil, interaction of wheel with soil, modelling.

Характер взаємодії ведучих коліс лісотранспортного засобу з ґрунтовою поверхнею істотно впливає як на його тягові та зчіпні властивості, так і на руйнування цієї поверхні. Теоретичне дослідження цієї взаємодії дає змогу знайти шляхи подальшого вдосконалення колісного рушія лісової машини і підвищення її прохідності та продуктивності у складних умовах експлуатації.

Необхідно зазначити, що сьогодні нема єдиного підходу щодо моделювання динамічних процесів, які виникають під час кочення пневматичного колеса по опорній поверхні, що деформується. Проведені дослідження, переважно, ґрунтуються на використанні плоских розрахункових моделей рушія та опорної поверхні, побудованих у вертикальній площині. Ці моделі, залежно від задач дослідження, використовуються або для оцінки динамічних навантажень в елементах рушія та плавності ходу машин [4-6], або для оцінки процесів деформування ґрунтової поверхні [1-4]. Вони містять кінцеву кількість дискретних мас з безінерційними лінійними та нелінійними пружними і дисипативними зв'язками.

Характерним для наявних моделей взаємодії ведучих коліс машини з ґрунтом є роздільне врахування вертикальних і дотичних динамічних навантажень на ґрунт з боку колеса та впливу на деформацію ґрунту динамічних коливань його мас. Як відомо, дотичні навантаження на ґрунт з боку ведучих коліс формуються за рахунок крутного моменту двигуна та крутильних коливань у трансмісії. Однак, у відомих нам моделях, змінний характер цих навантажень не береться до уваги. Також у більшості розрахункових моделей для дослідження плавності ходу чи деформації ґрунту, не береться до уваги коливання ґрунтових мас, які виникають під час змінних навантажень. Ці коливання у вертикальному, а можливо й у дотичному напрямках, можуть мати вагомий вплив на процес буксування і зчіпні властивості колісної машини.

Трельовальний колісний трактор є складною багатомасовою динамічною системою. Однак, якщо коефіцієнт підресорних мас перебуває в межах

$\varepsilon = 0,7 - 1,4$, то зв'язок між коливаннями окремих осей машини проявляється незначно [7], тому, у більшості випадків, вертикальні коливання та динамічні навантаження на колеса однієї осі машини можна розглядати незалежно від коливань інших осей, що дає змогу спростити розрахункову модель.

У дослідженнях взаємодії колісного рушія з ґрунтовою поверхнею використовуються моделі, що враховують в'язко-пружні властивості колеса та ґрунту. До таких досліджень належать праці Д.І. Золотаревської, І.І. Водяника, В.П. Бойкова, М.А. Левіна і деякі інші [1-5]. Математичні моделі, що використані у цих роботах, являють собою системи диференціальних або інтегральних рівнянь, які описують поведінку тіл, що є комбінацією найпростіших моделей Гука (пружна модель), Ньютона, (в'язка модель) і Сен-Венана (модель із сухим тертям). Зокрема, Д.І. Золотаревська, використавши модель Максвелла (поєднання моделі Ньютона і Гука), в роботі [2] вирішує задачу про щільність ґрунту на різній глибині після першого і наступних проходів колеса по тому самому сліду. Під час розрахунків враховується статичне навантаження на колесо, геометричні розміри й показники деформованості шини, фізико-механічні властивості ґрунтів і швидкість руху трактора.

І.І. Водяник [3] описує деформованість пневматичних шин і ґрунту відповідно три- та двоелементною реологічною моделлю. Модель ґрунту подана у вигляді паралельно з'єднаних моделей Гука й Ньютона і враховує такі особливості деформації ґрунту, як нелінійний характер її залежності від навантаження і зменшення зі зменшенням тривалості його прикладання.

В.П. Бойков і М.А. Левін [4] розглядають пневматичне колесо, що котиться ґрунтовою поверхнею, з протектором, який деформується як у радіальному, так і в дотичному напрямках. Ґрунт задається комбінацією інерційних і пружно-в'язких та нелінійних дисипативних елементів.

У роботі [6] використана математична модель вертикальних коливань колісної машини, яка відображає як податливість і дисипативні властивості колеса та ґрунту, так і його інерційні властивості. Однак, у вказаній моделі не відображено дотичних деформацій ґрунту під дією ведучого колеса.

На підставі аналізу переваг і недоліків наявних моделей, кожна з яких тільки частково відображує процес взаємодії колеса з ґрунтом, ми розробили узагальнену розрахункову модель, що враховує спільну дію вертикальних і дотичних як статичних, так і динамічних навантажень і відповідні коливання мас колеса та ґрунту (рис. 1).

У розробленій динамічній моделі частина підресорної маси машини, що припадає на одне колесо, моделюється дискретною масою m , а маса ділянки шини, яка бере участь у взаємодії з ґрунтовою поверхнею – m_{ux} [3]. Як і більшість авторів, що досліджують вертикальні коливання транспортних засобів, умовно приймаємо, що в пневматичних шинах має місце в'язке тертя і дисипативні властивості шини задаємо коефіцієнтом в'язкого опору k_u , а пружні властивості – коефіцієнтами радіальної та тангенціальної жорсткості відповідно c_{uu} і c_{ux} .

З певним наближенням вертикальні коливання ґрунту можна змодельовувати коливальною ланкою, в яку входить уявна дискретна маса ґрунту m_{zz} та безмасовий пружний елемент з коефіцієнтом лінійної жорсткості c_{zz} , що

моделює незначні пружні властивості ґрунту. Сили непружного опору, що виникають в ґрунті внаслідок його деформації і утворення колії h_{ep} , моделюються елементом в'язкого тертя з коефіцієнтом в'язкого опору k_{ez} , та елементом нелінійного опору, сила тертя якого дорівнює T_z . Частка маси ґрунту m_{zx} , безмасовий пружний та дисипативний елемент (з відповідними коефіцієнтами жорсткості c_{zx} і в'язкого опору k_{zx}) моделюють дотичну деформацію ґрунту в тангенціальному напрямку під дією тягової сили P_k .

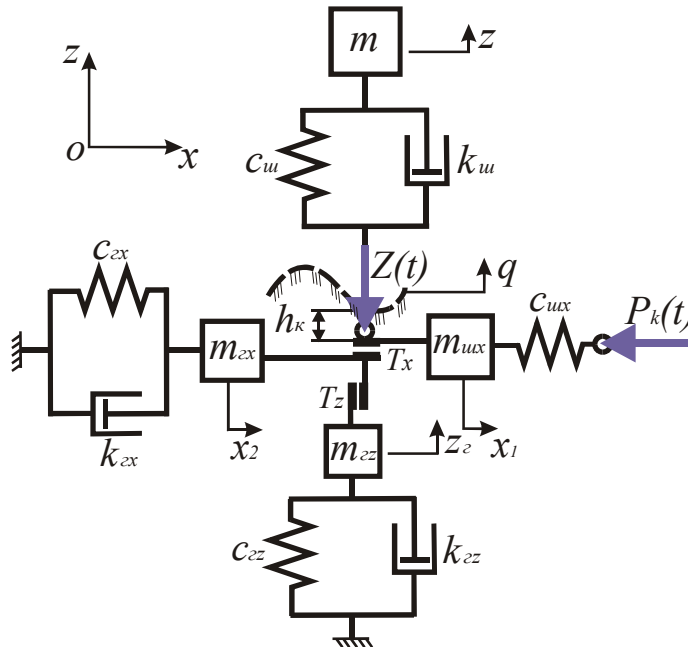


Рис. 1. Схема розрахункової моделі процесу взаємодії пневматичного ведучого колеса з ґрунтовою поверхнею

Кожна з інерційних мас динамічної моделі здійснює переміщення в системі координат xOz , які беремо за узагальнені координати (z, z_z – вертикальні коливання маси m і зведеної маси ґрунту m_{zz} стосовно стану їх статичної рівноваги; x_1 та x_2 – горизонтальні переміщення відповідно мас m_{ux} та m_{zx}).

Вертикальні коливання мас системи під час руху збуджуються нерівностями шляху, що задаються функцією мікропрофілю опорної поверхні $q(t)$. Математичні вирази, якими задають поодинокі нерівності різного профілю (синусоїдальні, прямокутні, трикутні та одиничний імпульс), широко описані в літературі.

Використавши загальновідому методику складання рівнянь запишемо систему рівнянь, які описують динамічні процеси, що виникають під час взаємодії колеса з ґрунтом:

$$m_{ux} \cdot x_1'' = P_{mux} - c_{ux} \cdot x_1 - P_k(t); \quad m_{zx} \cdot x_2'' = c_{zx} \cdot x_2 + k_{zx} \cdot x_2' - P_{mux};$$

$$m \cdot z'' = c_{uh} \cdot [(q - h_{ep}) - z] + k_{uh} (q' - z'); \quad h_k = \sqrt{\frac{\mu Z(t)}{C \cdot S_k}} + (1 - \delta) \cdot x_2;$$

$$m_{zz} \cdot z_z'' = c_{zz} \cdot z_z + k_{zz} \cdot z_z' - (Z_{cm} - Z(t));$$

$$\text{де } P_{mux} = \begin{cases} m_{ux} \cdot x_1'', & \text{якщо } P_{mux} \leq T_x; \\ T_x, & \text{якщо } P_{mux} > T_x \end{cases}; \quad Z(t) = \begin{cases} m_{zz} (z_z'' + g) & \text{якщо } m_{zz} (z_z'' + g) \leq T_z; \\ T_z, & \text{якщо } m_{zz} (z_z'' + g) > T_z, \end{cases}$$

де $Z(t)$ – рівнодійна статичної $m_{zz} \cdot g$ та динамічної $m_{zz} \cdot z''_z$ складових вертикальних навантажень.

Деформацію ґрунту h_{zp} під дією рівнодійного вертикального навантаження $Z(t)$ під час вертикальних коливань можна визначити, використовуючи одну з відомих емпіричних залежностей, наприклад $\sigma = C \cdot h_{zp}^\mu$ (гіпотеза Бернштейна-Летошева).

Тоді

$$h_{zp} = \sqrt[\mu]{\frac{Z(t)}{C \cdot S_k}},$$

де: μ і C – коефіцієнти, які залежать від вологості та фізико-механічних властивостей ґрунту; S_k – площа контакту шини з опорною ґрунтовою поверхнею, коли нормальне навантаження відповідає стримульній здатності ґрунту σ_s .

Одночасно з вертикальною деформацією ґрунту h_{zp} в процесі кочення колеса відбувається частковий або повний його поздовжній зсув еквівалентний x_2 , що призводить до додаткового збільшення колії. Додаткова глибина колії за рахунок зрізання ґрунту може визначатися за функцією коефіцієнта буксування δ [8]: $x_2 = h_{zp.x} \frac{1}{1-\delta}$, звідки $h_{zp.x} = (1-\delta)x_2$, а глибина утвореної колії $h_k = h_{zp} + (1-\delta) \cdot x_2$.

Як бачимо, деформація в нормальному h_{zp} та дотичному x_2 напрямках може бути визначена шляхом розв'язку розробленої математичної моделі у вигляді системи вказаних вище рівнянь. Запропонована ж розрахункова модель взаємодії рушія з ґрунтовою поверхнею дає можливість подальшого дослідження умов реалізації тягових і зчіпних можливостей колісної машини в складних дорожніх умовах, а тим самим дасть змогу обґрунтувати параметри колісного рушія з позиції прохідності машини та зниження негативної дії його на ґрунт.

Література

1. Полетаев Р.А. Основы теории сопротивления качению и тяги жесткого колеса по деформированному основанию. – М.: Машиностроение, 1971. – 72 с.
2. Золотаревская Д.И. Закономерности деформирования почв и их математическое описание// Почвоведение. – 1998, № 1. – С. 34-38.
3. Водяник И.И. Воздействие ходовых систем на почву (научные основы). – М.: Агропромиздат, 1990. – 172 с.
4. Бойков В.П., Левин М.А. Определение некоторых показателей взаимодействия колесного двигателя трактора с почвогрунтом// Тракторы и сельхозмашины. – 1986, № 6. – С. 6-10.
5. Білик Б.В., Шевченко Н.В., Медвідь С.Й. Проблеми оптимізації ходових систем самохідних критеріїв// Праці НТШ. – 1998, том II. – С. 67-73.
6. Яценко Н.Н. Поглощающая и сглаживающая способность шин. – М.: Машиностроение, 1978. – 132 с.
7. Шупляков С.М. Колебания и нагруженность трансмиссии автомобиля. – М.: Транспорт, 1974. – 328 с.
8. Брянский Ю.А., Саломатин П.А. Проходимость транспортных машин// Труды ВИНТИ, 1991. – С. 123-138.