

УДК 631.3:621

Є. Ріпецький¹, канд. техн. наук; Р. Ріпецький², канд. техн. наук

¹ Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

² Івано-Франківський національний технічний університет нафти та газу

ОБґРУНТУВАННЯ ПРУЖНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПОР У МОДЕЛІ ГРЕЙФЕРНОГО НАВАНТАЖУВАЧА ПРИ РОБОТІ З МАНІПУЛЯТОРОМ НА ОСНОВІ МАСИВІВ ДИСКРЕТНИХ ДАНИХ

***Резюме.** Запропоновано фізичну модель грейферного навантажувача на двох пружних опорах – домкратах. На її основі отримано масиви дискретних взаємопов'язаних даних про зусилля в домкратах та переміщення рамних шарнірів під час роботи маніпулятора з вантажем. Показано, що приведена жорсткість домкрата стає змінною, яка надає нелінійні властивості опорам рами. На шляху переходу від фізичної моделі до математичної отримано постійне значення приведеної жорсткості домкрата шляхом статистичного опрацювання дискретних масивів даних.*

***Ключові слова:** навантажувач, модель, масив, жорсткість, домкрат, маніпулятор.*

E. Ripetskyu, R. Ripetskyu

SUBSTANTIATION OF THE ELASTIC BEARING PROPERTIES IN THE GRAB LOADER MODEL RUNNING WITH MANIPULATOR BASED ON ARRAYS OF DISCRETE DATA

***The summary.** The physical grab loader model on two elastic bearings – jacks has been suggested. On its basis arrays of discrete interconnected data on efforts in jacks and movement of the frame hinges while the manipulator is running with a load have been received. Reduced stiffness of jacks is shown to lose its constant properties and become variable. Constant value of jacks reduced rigidity has been received by statistical analysis of discrete data arrays while transition from physical model to mathematical.*

***Key words:** loader, model, array, stiffness, jack, manipulator.*

Постановка проблеми. Грейферні навантажувачі, як вантажні машини періодичної дії, переносять сільськогосподарські вантажі окремими порціями за допомогою маніпулятора. Маніпулятор, у свою чергу, має можливість обернутися на кут 270°, тому під час його повороту, особливо з вантажем, відбувається перерозподіл зусиль у вузлах машини. Ці зусилля сприймаються опорними домкратами, призначення яких забезпечити стійкість навантажувача при роботі з маніпулятором. А так як в конструкцію домкрата входять пружні елементи, то вони зазнають певних деформацій. У результаті основний несучий елемент навантажувача – рама здійснює як поздовжні, так і поперечні переміщення, які впливають на динаміку машини в цілому.

Особливістю кінематичної схеми опорних домкратів є те, що їх приведена жорсткість залежить від характеру руху рами, який задається двома узагальненими координатами. При їх одночасній зміні виникають різні значення приведеної жорсткості, що пояснюється кінематичними особливостями опорних домкратів [1].

Таким чином, поворот маніпулятора супроводжується поздовжнім і поперечним рухами рами, внаслідок чого приведена жорсткість опорних домкратів втрачає властивість постійної величини і стає змінною.

Цей факт ускладнює дослідження динамічних режимів навантажувача. Якщо скористатися загальними методами дослідження динаміки машин, то можна відзначити

момент переходу від реальної фізичної моделі до математичної. Основним змістом цього перетворення є отримання лінійних характеристик жорсткостей [2].

Аналіз останніх досліджень. Розв'язок задачі з визначення лінійних характеристик пружних опор торкається як експериментальних, так і теоретичних досліджень величин реакцій в опорах машин та методів лінійних перетворювань пружних характеристик.

За першим напрямом слід відзначити роботи з оцінювання реакцій в опорах навантажувача-екскаватора ПЕА-1,0, які проводилися у 80–90 роках минулого століття [3, 4] ТПІ (м. Тернопіль), РІСГМ (м. Ростов-на-Дону) сумісно з СКБ заводу «Коломиясільмаш». Отримані результати надали значення реакцій в опорах навантажувача. Проте лінійних переміщень, які необхідні для визначення лінійних характеристик пружних елементів, отримано не було. Відсутність таких даних може бути компенсовано теоретичними рівняннями [1], які на основі кінематичних параметрів встановлюють зв'язок між деформаціями пружних елементів механізмів домкрата з переміщеннями самої рами.

Іншим напрямком робіт виступають методи отримання моделей з лінійними характеристиками. Одним із методів отримання пружних моделей з постійними характеристиками жорсткості є лінеаризація аналітичних залежностей прогину від функції прикладеного навантаження. Проте такі методи дозволяють використовувати отримані результати в обмеженому діапазоні. Застосування в моделях змінних жорсткостей ускладнює розрахунок і призводить до необхідності розв'язку трансцендентного рівняння [5].

Питання оцінювання вертикальних реакцій на опорні колеса ковшового навантажувача визначаються залежно від узагальнених координат лінійних та кутових переміщень. У той же час показано, що жорсткості з лінійними характеристиками достатньо точно описують поведінку ковшового навантажувача в динаміці. Автори цієї роботи досить ефективно розглянули задачі динаміки малогабаритного ковшового навантажувача з використанням програми MATLAB [6].

Метою роботи є обґрунтування лінійних характеристик жорсткостей пружних домкратів при формуванні математичної моделі, що описує процес роботи грейферного навантажувача з маніпулятором, на основі співставлення даних про вертикальні реакції в домкратах та переміщення їх шарнірів. Отримані результати пропонується формувати у масиви даних, для яких застосовуються методи статистичного опрацювання в спеціальних програмах.

Доцільно також провести порівняльний аналіз результатів розрахунків реальної фізичної моделі та математичної, де приведена жорсткість під час роботи навантажувача залишається постійною.

Постановка завдання. Рама навантажувача розташовується на пружних опорах. характеристики яких не є лінійними. Тому необхідно розв'язати задачу з лінеаризації пружних характеристик опор за умови роботи навантажувача з маніпулятором. Планується подати характеристики пружних опор у вигляді лінійного рівняння регресії, яке й дозволить встановити еквівалентне постійне значення приведеної жорсткості.

До масивів дискретних даних доцільно використати метод найменших квадратів (МНК) для визначення лінійної характеристики опори. А саму обробку даних провести в пакеті MATLAB.

Результати дослідження. Фізична модель грейферного навантажувача з поворотним маніпулятором зведена до просторової схеми з опорами в трьох точках. Опорами навантажувача є передній шаровий шарнір і два задніх домкрата – лівий та правий. Відповідно опорними точками навантажувача об поверхню будуть точки A , M_1 та M_2 .

Розглянемо задні опори навантажувача, які характеризуються пружними

властивостями. Це механізми домкратів плоского типу, які утворюють відповідно $\Delta M_1 B_1 C_1$ і $\Delta M_2 B_2 C_2$. Жорсткість цих трикутників забезпечує стійкість навантажувача під час повороту маніпулятора з вантажем. Причому ланки $C_1 M_1$ та $C_2 M_2$ у домкратах можна вважати абсолютно жорсткими, а ланки $B_1 M_1$ та $B_2 M_2$, які відображають гідроциліндр, – пружними.

Площини механізмів домкрата утворюють між собою кут 130° . Таке розміщення домкратів забезпечує стійкість рейферного навантажувача вагою G при різних положеннях рухомого маніпулятора з вантажем Q , що обертається навколо осі колони. Положення маніпулятора задається кутом горизонтального обертання φ . Під час повороту маніпулятора, внаслідок зміни положення сили Q , значення трьох реакцій R_1 , R_2 та R_3 будуть теж змінюватися.

Наявність пружних гідроциліндрів $B_1 M_1$ та $B_2 M_2$ з жорсткістю $c_{гидр}$ в механізмах домкрата призводить до їх одночасної поздовжньої деформації як в правому, так і в лівому домкратах і, як наслідок, до переміщення рамних шарнірів. Шарнір рами B_1 унаслідок одночасної деформації двох гідроциліндрів механізмів домкрата може зайняти положення B_1' .

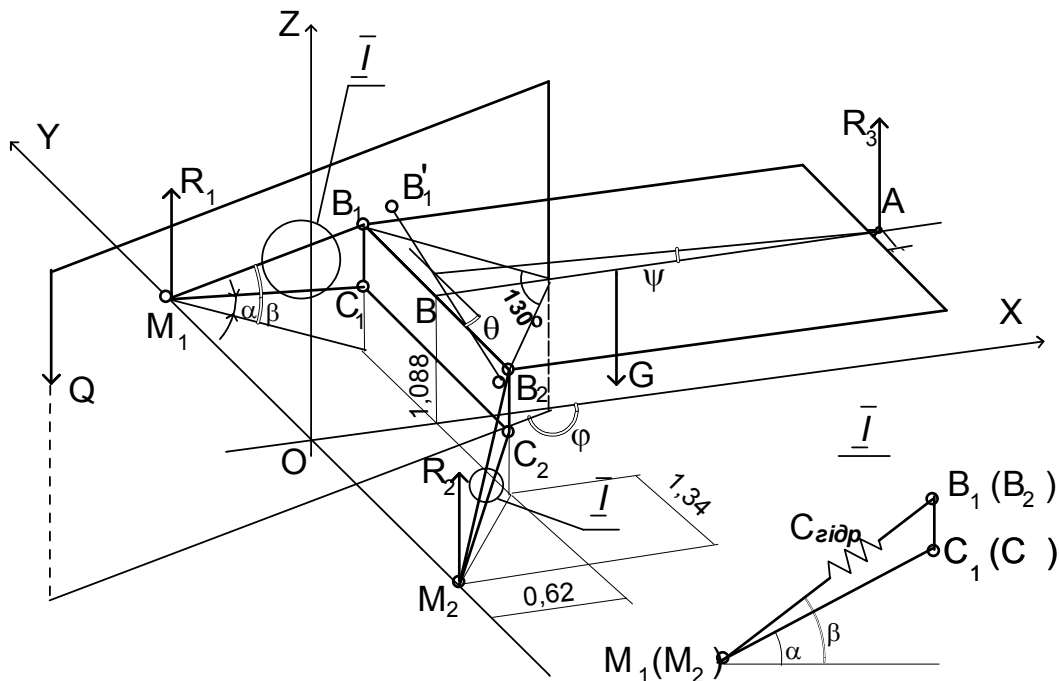


Рисунок 1. Фізична просторова модель роботи опорних домкратів рейферного навантажувача при взаємодії маніпулятора з вантажем

Для визначення приведеної жорсткості механізму домкрата необхідно встановити зв'язок між двома параметрами величиною реакції в опорі домкрата R_1 (або R_2 для лівого домкрата) та вертикальним переміщенням Δz_1 (Δz_2) рамного шарніра B_1 (B_2).

Розглянута система є статично визначеною, тому за допомогою рівнянь статки визначено реакції опор домкратів та встановлено їх перерозподіл під час повороту маніпулятора (рис. 2а).

Як вже відзначалося, внаслідок одночасної деформації гідроциліндрів механізмів домкрата відбувається і переміщення рами. Процес протікає наступним чином. При зміні тиску в гідроциліндрах

$$\Delta P_1 = \Delta R_1 \frac{\cos \alpha}{\sin(\beta - \alpha)}, \quad \Delta P_2 = \Delta R_2 \frac{\cos \alpha}{\sin(\beta - \alpha)} \quad (1)$$

вони, як пружні ланки механізму домкрата, зазнають деформації:

$$\Delta l_1 = c_{зідр} \Delta P_1, \quad \Delta l_2 = c_{зідр} \Delta P_2,$$

де $\Delta l_1, \Delta l_2$ – деформація відповідно гідроциліндрів ланками B_1M_1 та B_2M_2 .

Зв'язок між деформацією пружної ланки та вертикальним переміщенням шарнірів рами залежить від характеру руху рами, яке задаємо кутом поздовжнього переміщення ψ та кутом поперечного переміщення θ .

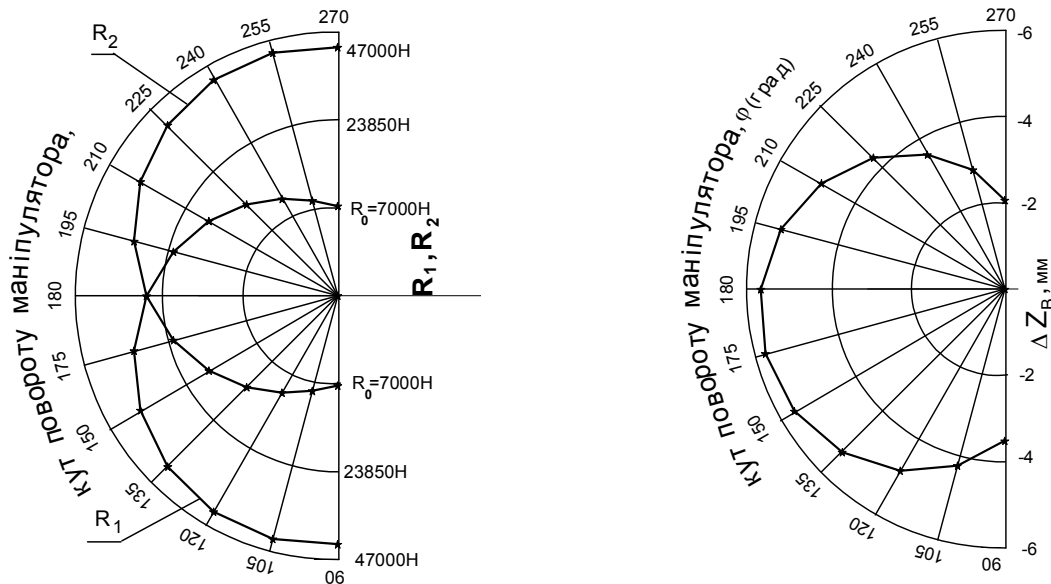


Рисунок 2. Дискретні масиви вхідних та вихідних значень:
а) розподілу реакцій між опорами навантажувача (вхідний масив);
б) вертикальні переміщення шарніра рами B_1 (вихідний масив)

На основі роботи [1] можна встановити зв'язок між лінійними та кутовими переміщеннями як при поздовжніх переміщеннях рами ($\Delta l_1 = \Delta l_2 = \Delta l_{1,2}$)

$$\Delta l_1 = \Delta l_2 = LK_1 \Delta \psi,$$

так і при її поперечних переміщеннях, при яких має місце зв'язок між деформаціями ($\Delta l_1 = -\Delta l_2$) відповідно для лівого та правого домкратів

$$\Delta l_1 = fK_2 \Delta \theta, \quad \Delta l_2 = -fK_2 \Delta \theta,$$

де K_1, K_2 – коефіцієнти кінематичного приведення при поздовжніх та поперечних коливаннях рами навантажувача:

$$K_1 = -\cos \beta \cdot \frac{\sin \alpha \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma \cos 65^\circ}{\cos \alpha \cos \gamma} + \sin \beta,$$

$$K_2 = -\cos \beta \cdot \frac{\sin \alpha \cos \gamma_1 - \cos \alpha \sin \gamma_1 \sin 65^\circ}{\cos \alpha \cos \gamma_1} + \sin \beta,$$

$$L = AB, f = BB_1 = BB_2 \text{ (див. рис.1).}$$

При одночасній зміні кутів ψ та θ встановити залежність між лінійними та кутовими переміщеннями дозволяють співвідношення

$$\begin{aligned} \Delta l_1 &= LK_1 \Delta \psi + fK_2 \Delta \theta \\ \Delta l_2 &= LK_1 \Delta \psi - fK_2 \Delta \theta \end{aligned} \quad (2)$$

Таким чином, на деформацію гідроциліндрів, як пружного елемента механізму домкрата, спостерігається одночасний вплив переміщення рами навантажувача, в якій присутні рухи поперечного θ та поздовжнього ψ переміщення.

З другого боку, зв'язок між лінійними переміщеннями шарнірів рами пов'язано з

кутовими координатами на основі геометричних співвідношень

$$\begin{aligned}\Delta z_1 &= L\Delta\psi + f\Delta\theta \\ \Delta z_2 &= L\Delta\psi - f\Delta\theta\end{aligned}\quad (3)$$

Подамо модель, яка описує деформацію опор рами навантажувача (2–3) при різних положеннях маніпулятора від дії силових факторів – реакцій R_1 та R_2 (1) у вигляді системи рівнянь

$$\begin{cases} \Delta l_1 = LK_1\Delta\psi + fK_2\Delta\theta \\ \Delta l_2 = LK_1\Delta\psi - fK_2\Delta\theta \\ \Delta z_1 = L\Delta\psi + f\Delta\theta \\ \Delta z_2 = L\Delta\psi - f\Delta\theta \\ \Delta l_1 = \frac{(R_1 - R_0)}{c_{зідр}} \cdot \frac{\cos\alpha}{\sin(\beta - \alpha)} \\ \Delta l_2 = \frac{(R_2 - R_0)}{c_{зідр}} \cdot \frac{\cos\alpha}{\sin(\beta - \alpha)} \end{cases}\quad (4)$$

Отримана система лінійних рівнянь із шістьма невідомими (4) дозволяє за заданими значеннями реакцій опор R_1 та R_2 знайти всі види переміщень: кути поперечної θ та поздовжнього ψ переміщення рами, деформації гідроциліндрів Δl_1 та Δl_2 вертикальні переміщення шарнірів кріплення домкратів Δz_1 та Δz_2 .

Розв’язок системи (4) записано у матричному вигляді

$$\begin{pmatrix} \Delta\psi \\ \Delta\theta \\ \Delta l_1 \\ \Delta l_2 \\ \Delta z_1 \\ \Delta z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -4,5637 \cdot 10^{-8} \\ -2,3930 \cdot 10^{-7} \\ -9,5622 \cdot 10^{-8} \\ 0 \\ -3,3282 \cdot 10^{-7} \\ -9,3521 \cdot 10^{-8} \end{pmatrix} \times R_1 + \begin{pmatrix} -4,5637 \cdot 10^{-8} \\ 2,3930 \cdot 10^{-7} \\ 0 \\ -9,5622 \cdot 10^{-8} \\ -9,3521 \cdot 10^{-8} \\ -3,3282 \cdot 10^{-7} \end{pmatrix} \times R_2\quad (5)$$

при фіксованих значеннях $L = 4,47\text{ м}$, $l = 0,5\text{ м}$, $c_{зідр} = 52 \cdot 10^6\text{ Н/м}$, $K_1 = 0,2242$; $K_2 = 0,399$, що зумовлені конструктивними параметрами навантажувача.

За результатами розв’язку системи (5) можна записати вертикальні переміщення лівого B_1 та правого B_2 шарнірів рами у вигляді функцій

$$\Delta z_1 = aR_1 + bR_2 \quad \Delta z_2 = bR_1 + aR_2\quad (6)$$

з постійними коефіцієнтами ($a = -3,3282 \cdot 10^{-7}\text{ м/Н}$, $b = -9,3521 \cdot 10^{-8}\text{ м/Н}$).

Тобто, згідно з отриманими функціями (6) на вертикальне переміщення одного з шарнірів рами впливають одночасно реакції як лівої опори, так і правої. Величина впливу кожної з реакцій на переміщення шарніру B_1 визначається знайденими коефіцієнтами a та b .

Якщо розглянути приведену жорсткість до шарніра B_1 , згідно з законом Гука, як відношення зміни прикладеного зусилля до вертикального переміщення

$$c_{np} = \frac{\Delta R_1}{\Delta z_1} = \frac{\Delta R_1}{aR_1 + bR_2},\quad (7)$$

то бачимо, що приведена жорсткість у процесі повороту маніпулятора стає змінною, що надає нелінійні властивості опорним домкратам.

Таким чином, у механізмах домкрата складні кінематичні взаємопов’язані рухи ланок призводять до нелінійних залежностей між деформаціями рамних опор та прикладеними силовими факторами.

Отримання лінійних характеристик деформації опор пов’язано з пошуком сталого значення приведеної жорсткості, яке здійснено на основі інформації про роботу

навантажувача під час повороту маніпулятора. В якості інструментарію опрацювання числових даних обрано програму MATLAB, яка надає широкий інструментарій опрацювання та аналізу числових даних і придатні для використання в інженерних розрахунках [7].

Пакет MATLAB має вбудовану мову програмування високого рівня і дозволяє отримувати результати як у числовому вигляді, так і в графічному. Наявність модуля статистичного опрацювання даних надає можливість використовувати метод найменших квадратів (МНК) для побудови на графіках лінії тренду до дискретних числових значень.

Таким чином, у теоретичних дослідження використано можливості пакета MATLAB для знаходження лінійних характеристик опорних домкратів грейферного навантажувача.

Алгоритм отримання приведеної жорсткості з лінійною характеристиками включає шість пунктів:

1. Формування масиву вхідних даних реакції опор при різних положеннях маніпулятора $R_1[i]$, $R_2[i]$ з кроком у $\varphi = 15^\circ$.

2. Знаходження матричної форми розв'язку системи рівнянь (4), на основі якої (5) обчислюється масив вертикальних переміщень шарнірів рами кріплень домкратів $dz_1[i]$ та $dz_2[i]$ (вихідний масив).

3. Побудова залежності $R_1[i] = f(dz_1[i])$ та $R_2[i] = f(dz_2[i])$ у вигляді точкової діаграми шляхом об'єднання даних вхідного і вихідного масивів.

4. Отримання на базі дискретних даних лінійного рівняння регресії виду $\Delta z_1 = a + bR_1$ за методом найменших квадратів.

5. Знаходження величини жорсткості як значення лінійного коефіцієнта у рівнянні регресії

$$c_{np} = \frac{dR}{dz}. \quad (8)$$

6. Перевірка отриманих результатів.

Вказаний алгоритм реалізовано в пакеті MATLAB 7. Вхідною інформацією програми був масив значень про розподіл реакцій на задні опори. Значення вертикальних реакцій в опорах навантажувача ПЕА-1,0А отримані на основі рівнянь статики залежно від повороту стріли $R_1 = f(\varphi)$ і $R_2 = f(\varphi)$ за допомогою графічного модуля, результати показано у вигляді полярних координат (рис.2а). За графіком можна аналізувати перерозподіл реакцій в різних положеннях маніпулятора, яке задається кутом φ .

Вертикальні переміщення шарнірів – вихідний масив даних показано за розрахунками моделі (5) $\Delta z_1 = f(\varphi)$ на рис. 2б в аналогічних координатах. Спеціальним символом на рисунку позначені дискретні значення реакцій та переміщень.

Для отримання середнього постійного значення приведеної жорсткості за умовою (8) на основі встановлених у числовому вигляді закономірностей $R_1 = f(\varphi)$ та $z_1 = f(\varphi)$ побудовано нову дискретну числову залежність $z_1 = f(R_1)$ шляхом виключення кута φ , яку наведено на рис.3.

На тому ж рисунку отримано лінію тренду для 13 значень, що відповідають положенню маніпулятора в робочій зоні в інтервалі $\varphi = 90^\circ - 270^\circ$. Рівняння лінії тренду встановлюється на основі МНК

$$\Delta z_1 = -0,0002428R_1 + 2,1621 \text{ (мм)}.$$

Величина приведеної жорсткості чисельно дорівнює лінійному коефіцієнту перед аргументом, тобто

$$C_{екв} = \left| \frac{1}{a} \right| = 4119410 \text{ Н / м}$$

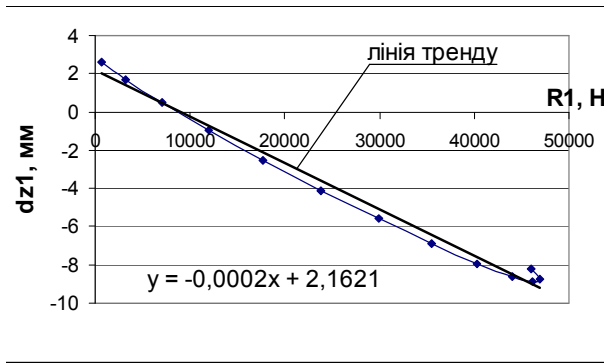


Рисунок 3. Застосування МНК для отримання лінійних характеристик жорсткостей

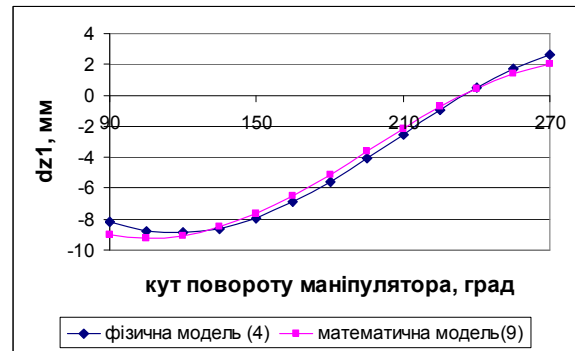


Рисунок 4. Результати порівнянь переміщення при введенні еквівалентної жорсткості

Спрощену математичну модель відносно фізичної моделі (4) отримано з урахуванням знайдених лінійних характеристик опорних домкратів і зведено до системи чотирьох рівнянь

$$\begin{cases} R_1 - R_{mp} = c_{np} (L\Delta\psi + a\Delta\theta) \\ R_2 - R_{mp} = c_{np} (L\Delta\psi - a\Delta\theta) \\ \Delta z_1 = L\Delta\psi + a\Delta\theta \\ \Delta z_2 = L\Delta\psi - a\Delta\theta \end{cases} \quad (9)$$

Таким чином, отримана система рівнянь (9) є математичною моделлю, що описує переміщення рамних шарнірів при повороті маніпулятора з постійною приведеною жорсткістю опор.

З метою перевірки можливості використання моделі (9) з постійною приведеною жорсткістю виконано її порівняння з фізичною моделлю (4). Порівнювалися результати розрахунків переміщення рамних шарнірів у різних положеннях маніпулятора в робочій зоні, яке задавалося кутом повороту $\varphi = 90^\circ - 270^\circ$. Графічні дані (рис.4) свідчать про точність еквівалентної заміни. Похибка при переході від фізичної до математичної моделі становить 6–11%.

Висновки. Показано змінний характер приведеної жорсткості рамних опор домкратів на основі дискретних масивів даних, отриманих на базі фізичної моделі, що відображає роботу грейферного навантажувача з маніпулятором. Здійснено статистичне опрацювання масивів даних у пакеті MATLAB. На основі МНК із застосуванням ліній тренду до дискретних даних отримано лінійну залежність між реакцією опори та переміщенням рамного шарніра, на основі якої обґрунтовано постійне значення величини приведеної жорсткості домкратів. Адекватність заміни доведено на порівняльному аналізі.

Література

1. Ріпецький, С. Визначення жорсткості опорних домкратів на основі їх кінематичної подібності для грейферних навантажувачів [Текст] / С. Ріпецький // Вісник Тернопільського національного технічного університету. 2011. – Т16, №2. – С.77–83.
2. Динамічний розрахунок машин [Текст] / Ю.М. Андреев, А.В. Бойко, О.І. Литвинов, М.К. Березовський // Вісник СевНТУ. Механіка, енергетика, екологія. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2010. – Вип. 110. – С.61–69. – Режим доступу: <http://sevntu.com.ua/jspui/bitstream/123456789/2445/1/110-10.pdf>.
3. Шабанов, Б.М. К оценке эксплуатационной нагруженности сельскохозяйственных погрузчиков [Текст] / Б.М. Шабанов, В.М. Синякевич, В.В. Федоров // Динамика и прочность сельскохозяйственных машин. – Ростов-на-Дону: РИСХМ, 1982. – С. 156–164.
4. Рибак, Т.І. Створення основних несучих і функціональних органів машин, оптимізованих за матеріаломісткістю з прогнозованим ресурсом роботи [Текст] / Т.І. Рибак, С.Г. Семчишин, М. І. Підгурський та ін. – Тернопіль, 1993. – 158 с.– Деп. в ДНТБ України №0193U03935.

5. Рибак, Т.І. Моделювання підвісних систем змінної жорсткості сільськогосподарських причепів [Текст] / Т.І. Рибак, С. Целюк, П.В. Попович // Вісник Харківського національного університету сільськогосподарства ім. Василенка. Проблеми технічної експлуатації машини. Системотехніка і технології лісового комплексу. – Харків, 2010. – Вип. 94. – С.176–182.
6. Назаров, Л.В. Динамическая устойчивость коротко базового погрузчика с бортовой системой поворота [Текст] / Л.В. Назаров, Л.В. Разарёнов // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, 2009. – Вип. 55 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.nbu.gov.ua/portal/natural/Nvb/2009_55/nazarov.pdf.
7. Кетков, Ю.Л. MATLAB 7: Программирование, численные методы [Текст] / Ю.Л. Кетков – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 752 с.

Отримано 01.07.2011