

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА МОДЕЛЬ КРАНА-МАНІПУЛЯТОРА З ГІДРОПРИВОДОМ НА ТРАНСПОРТНОМУ ЗАСОБІ

Ловейкін В.С.,

Національний університет біоресурсів та природокористування України,

Горбатюк Є.В., Міщук Д.О.,

Київський національний університет будівництва і архітектури

В статті розглянуто методика проведення експериментального дослідження робочих процесів на вантажних кранах-маніпуляторах з гідروприводом на транспортних засобах та описано вимірювально-ресструюче обладнання, яке при цьому використовується. Методика базується на використанні комплексу апаратури, яка встановлюється на змодельовану фізичну модель крана-маніпулятора, що дає змогу всебічно оцінити низку параметрів та порівняти отримані результати з результатами теоретичних досліджень.

Ключові слова: кран-маніпулятор, фізична модель, експериментальне дослідження, датчик, критерії подібності.

Вступ. Для поліпшення умов праці робітників промислово-будівельної галузі та підвищення продуктивності виконання вантажопідйомних і транспортних робіт широкого застосування набули крани-маніпулятори з гідроприводом на транспортних засобах. Доставка з їх допомогою вантажів в контейнерах та пакетах дозволяє в 2–3 рази скоротити час простою автотранспорту та в 1,5–2 рази – кількість автотранспортних засобів; зменшити чисельність допоміжних робітників; значно скоротити на вантажних роботах використання стрілових самохідних кранів, збільшивши на 15–20% час їх зайнятості на основних роботах; підвищити чіткість та ритмічність доставки вантажів, скоротивши простої робітників на будівельно-монтажних роботах; скоротити терміни доставки вантажів [1].

Під час роботи крана-маніпулятора, в процесі зміни вильоту його стріли з вантажем, кожен елемент стрілової системи рухається за законом, який визначається її конструкцією. Це призводить до того, що під час зміни вильоту вантажу кінетична енергія системи є величиною змінною, причому максимальне значення кінетичної енергії, яке визначає одну з основних складових енергетичних витрат приводного механізму, в багатьох випадках у декілька разів перевищує її середнє значення. У результаті, приведення в рух кожного елемента такої стрілової системи призводить до виникнення в її шарнірно-зчленованих елементах значних динамічних навантажень, які погіршують роботу маніпулятора, зменшують міжремонтний цикл й ресурс стрілової системи та системи приводу [2].

У зв'язку з цим постає задача зменшення динаміки роботи стрілової системикрана-маніпулятора шляхом створення оптимальних режимів його роботи.

Актуальність дослідження. Широке розповсюдження маніпуляторів у різних галузях техніки і промисловості зумовлює потребу проводити

підвищення їх технічного рівня, якості функціонування та надійності. Отож необхідно проводити дослідження таких систем.

Розгляд проблеми зниження енергетичних витрат та підвищення надійності маніпуляторної системи вирішують як за рахунок підбору раціонально-оптимальних геометричних параметрів стрілової системи, так і шляхом зміни режимів руху її складових елементів [3, 4, 5].

Одним з етапів дослідження крана-маніпулятора є експериментальні дослідження.

При проведенні експериментальних досліджень використовуються натурні об'єкти або їх фізичні моделі [6]. При експериментальних дослідженнях на натурних об'єктах, засоби експериментального дослідження взаємодіють безпосередньо із самим об'єктом дослідження, а при модельному дослідженні – з його змодельованим прототипом.

Для проведення експериментальних досліджень крана-маніпулятора з гідроприводом на транспортному засобі на перших етапах проектування та дослідження в межах дослідницьких лабораторій задля економії часу й енергоресурсів, доцільно створити фізичну модель даного крана та провести на ній повноцінні експериментальні дослідження. При цьому фізична модель повинна відтворювати досліджуваний процес або явище [7]. Тому синтез фізичної моделі крана-маніпулятора є актуальною задачею дослідження.

Мета статті. Розглянути методику моделювання фізичної моделі крана-маніпулятора з гідроприводом, визначивши критерії її подібності та розробити комплекс вимірювальної апаратури, що дасть змогу всебічно оцінити динамічні параметри руху стрілової системи маніпулятора та порівняння їх з результатами теоретичних досліджень.

Постановка задачі. Для дослідження динаміки стрілової системи крана-маніпулятора при зміні вильоту вантажу, синтезу оптимальних режимів її роботи та вдосконалення системи приводу необхідно розробити фізичну модель маніпулятора та визначити її параметри. З метою визначення необхідних для дослідження характеристик крана-маніпулятора необхідно також розробити комплекс вимірювально-реєструючої апаратури.

Результати проведених досліджень. Розглянемо мобільний кран-маніпулятор з гідроприводом робочого обладнання, що може бути використаний на складських приміщеннях та в портах на відкритих майданчиках у якості підйомно-транспортної машини при перевантаженні різного роду вантажів [5]. На рис.1 зображено мобільний кран-маніпулятор з гідроприводом, що складається із ходової частини 1, на якій розміщена нерухома опора 2, до якої через роликівий опорно-поворотний пристрій 3 приєднано похилу стійку 4. Похила стійка 4 шарнірно з'єднана з підйомною стрілою 5, на кінці якої шарнірно закріплено поворотну рукоять 6 та висувну балку 7. До кінця висувної балки 7 шарнірно приєднано вантажо-захоплювальний пристрій 8. Зміна вильоту стріли маніпулятора в площині відбувається за рахунок руху привідних гідроциліндрів Ц1, Ц2, Ц3.

Для наведеного крана-маніпулятора з гідроприводом запишемо диференціальні рівняння, які описуватимуть динаміку його руху [6]. За

узагальнені координати наведеної динамічної моделі крана (рис.1) приймемо переміщення штоків приводних гідроциліндрів Ц1, Ц2 та Ц3 та надамо їм позначення $q_{\sigma 1}$, $q_{\sigma 2}$ та $q_{\sigma 3}$.

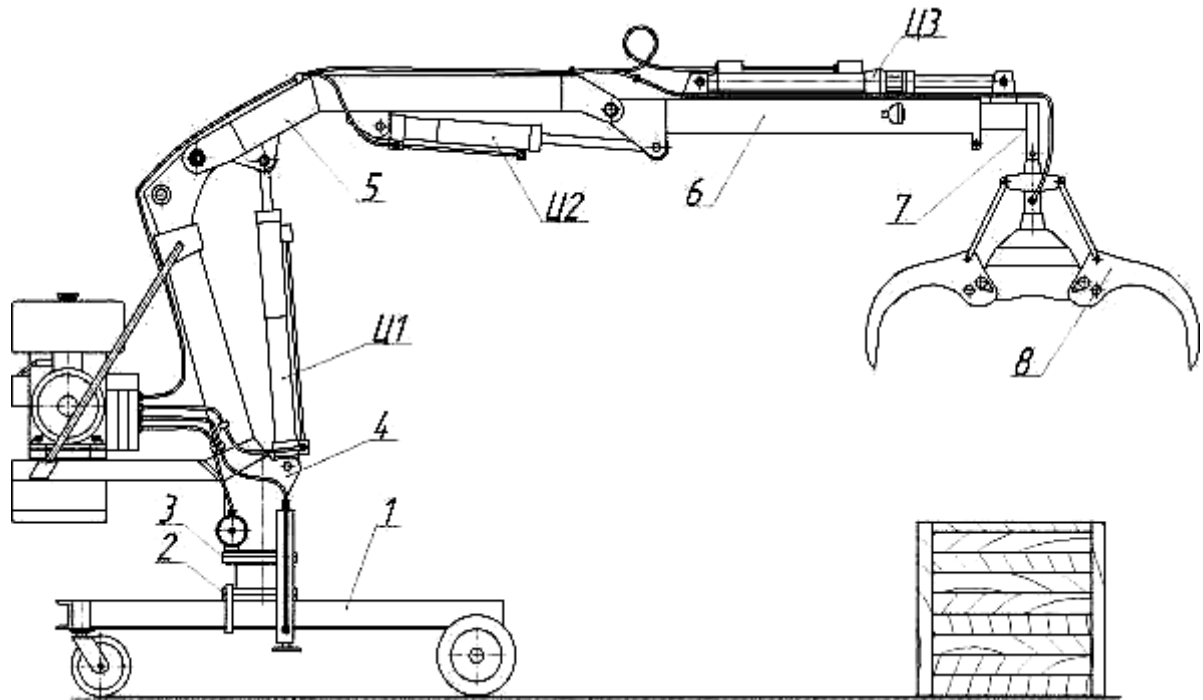


Рисунок 1 – Загальний вигляд мобільного вантажного крана-маніпулятора

Рух запропонованої моделі крана-маніпулятора в площині зміни вильоту визначатиметься системою наступних диференціальних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} J_5 \ddot{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial q_{\sigma 1}} + m_6 \ddot{x}_6 \frac{\partial x_6}{\partial q_{\sigma 1}} + m_6 \ddot{y}_6 \frac{\partial y_6}{\partial q_{\sigma 1}} + (J_{s6} + J_{s7}) \ddot{\gamma} \frac{\partial \gamma}{\partial q_{\sigma 1}} + m_7 \ddot{x}_7 \frac{\partial x_7}{\partial q_{\sigma 1}} + m_7 \ddot{y}_7 \frac{\partial y_7}{\partial q_{\sigma 1}} + \\ + m_8 \ddot{x}_8 \frac{\partial x_8}{\partial q_{\sigma 1}} + m_8 \ddot{y}_8 \frac{\partial y_8}{\partial q_{\sigma 1}} = F_{\sigma 1} - m_5 g \frac{\partial y_5}{\partial q_{\sigma 1}} - m_6 g \frac{\partial y_6}{\partial q_{\sigma 1}} - m_7 g \frac{\partial y_7}{\partial q_{\sigma 1}} - m_8 g \frac{\partial y_8}{\partial q_{\sigma 1}}; \\ J_5 \ddot{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial q_{\sigma 2}} + m_6 \ddot{x}_6 \frac{\partial x_6}{\partial q_{\sigma 2}} + m_6 \ddot{y}_6 \frac{\partial y_6}{\partial q_{\sigma 2}} + (J_{s6} + J_{s7}) \ddot{\gamma} \frac{\partial \gamma}{\partial q_{\sigma 2}} + m_7 \ddot{x}_7 \frac{\partial x_7}{\partial q_{\sigma 2}} + m_7 \ddot{y}_7 \frac{\partial y_7}{\partial q_{\sigma 2}} + \\ + m_8 \ddot{x}_8 \frac{\partial x_8}{\partial q_{\sigma 2}} + m_8 \ddot{y}_8 \frac{\partial y_8}{\partial q_{\sigma 2}} = F_{\sigma 2} - m_5 g \frac{\partial y_5}{\partial q_{\sigma 2}} - m_6 g \frac{\partial y_6}{\partial q_{\sigma 2}} - m_7 g \frac{\partial y_7}{\partial q_{\sigma 2}} - m_8 g \frac{\partial y_8}{\partial q_{\sigma 2}}; \\ J_5 \ddot{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial q_{\sigma 3}} + m_6 \ddot{x}_6 \frac{\partial x_6}{\partial q_{\sigma 3}} + m_6 \ddot{y}_6 \frac{\partial y_6}{\partial q_{\sigma 3}} + (J_{s6} + J_{s7}) \ddot{\gamma} \frac{\partial \gamma}{\partial q_{\sigma 3}} + m_7 \ddot{x}_7 \frac{\partial x_7}{\partial q_{\sigma 3}} + m_7 \ddot{y}_7 \frac{\partial y_7}{\partial q_{\sigma 3}} + \\ + m_8 \ddot{x}_8 \frac{\partial x_8}{\partial q_{\sigma 3}} + m_8 \ddot{y}_8 \frac{\partial y_8}{\partial q_{\sigma 3}} = F_{\sigma 3} - m_5 g \frac{\partial y_5}{\partial q_{\sigma 3}} - m_6 g \frac{\partial y_6}{\partial q_{\sigma 3}} - m_7 g \frac{\partial y_7}{\partial q_{\sigma 3}} - m_8 g \frac{\partial y_8}{\partial q_{\sigma 3}}, \end{array} \right. \quad (1)$$

де α та γ – кутові координати ланок стрілової системи крана-маніпулятора; x_6 , y_6 , x_7 , y_7 , x_8 , y_8 – координати центрів ваги відповідно поворотної рукояті, висувної балки маніпулятора та вантажозахоплювального пристрою разом з вантажем; $q_{\sigma 1}$, $q_{\sigma 2}$ та $q_{\sigma 3}$ – переміщення штоків приводних

гідроциліндрів; $\frac{\partial \alpha}{\partial q_1}, \frac{\partial x}{\partial q_1}, \dots, \frac{\partial y_8}{\partial q_3}$ – передаточні функції відповідних ланок маніпулятора [8]; J_5, J_{s6}, J_{s7} – моменти інерції підйомної стріли, поворотної рукояті та висувної балки відносно точок їх обертання; m_5, m_6, m_7, m_8 – маси рухомих ланок стрілової системи маніпулятора та вантажу; $F_{\delta 1}, F_{\delta 2}$ та $F_{\delta 3}$ – привідні сили на виконавчих гідроциліндрах Ц1, Ц2, Ц3.

Рівняння руху (1) будуть подібними для натурної установки та її фізичної моделі [6–7].

Виразимо параметри натурної установи через відповідні параметри її фізичної моделі та коефіцієнти подібності:

$$\begin{aligned} J_{5H} &= \lambda_J \cdot J_{5M}; J_{s6H} = \lambda_J \cdot J_{s6M}; J_{s7H} = \lambda_J \cdot J_{s7M}; m_{5H} = \lambda_m \cdot m_{5M}; \\ m_{6H} &= \lambda_m \cdot m_{6M}; m_{7H} = \lambda_m \cdot m_{7M}; m_{8H} = \lambda_m \cdot m_{8M}; x_{6H} = \lambda_l \cdot x_{6M}; \\ x_{7H} &= \lambda_l \cdot x_{7M}; x_{8H} = \lambda_l \cdot x_{8M}; y_{6H} = \lambda_l \cdot y_{6M}; y_{7H} = \lambda_l \cdot y_{7M}; \\ y_{8H} &= \lambda_l \cdot y_{8M}; q_{\delta 1H} = \lambda_l \cdot q_{\delta 1M}; q_{\delta 2H} = \lambda_l \cdot q_{\delta 2M}; q_{\delta 3H} = \lambda_l \cdot q_{\delta 3M}; \\ F_{\delta 1H} &= \lambda_F \cdot F_{\delta 1M}; F_{\delta 2H} = \lambda_F \cdot F_{\delta 2M}; F_{\delta 3H} = \lambda_F \cdot F_{\delta 3M}; t_H = \lambda_t \cdot t_M, \end{aligned} \quad (2)$$

де $J_{5H}, J_{6H}, J_{7H}, m_{5H}, m_{6H}, m_{7H}, m_{8H}, x_{6H}, x_{7H}, x_{8H}, y_{6H}, y_{7H}, y_{8H}, q_{\delta 1H}, q_{\delta 2H}, q_{\delta 3H}, F_{\delta 1H}, F_{\delta 2H}, F_{\delta 3H}, t_H$ – параметри натурної установи; $J_{5M}, J_{6M}, J_{7M}, m_{5M}, m_{6M}, m_{7M}, m_{8M}, x_{6M}, x_{7M}, x_{8M}, y_{6M}, y_{7M}, y_{8M}, q_{\delta 1M}, q_{\delta 2M}, q_{\delta 3M}, F_{\delta 1M}, F_{\delta 2M}, F_{\delta 3M}, t_M$ – параметри моделі; $\lambda_J, \lambda_m, \lambda_l, \lambda_F, \lambda_t$ – коефіцієнти подібності моделі до натурної установи.

Оскільки кутові координати не підлягають масштабуванню, тобто $\alpha_H = \alpha_M = \alpha, \gamma_i = \gamma_i = \gamma$, тому коефіцієнт подібності кута $\lambda_\alpha = \lambda_\gamma = 1$.

Застосовуючи принцип теорії подібності, виходячи зі співвідношення між коефіцієнтами подібності параметрів натурної установи та моделі, розрахуємо параметри фізичної моделі крана-маніпулятора.

Запишемо рівняння руху натурної установи та рівняння руху створюваної моделі, які будуть подібними до системи рівнянь (1). Для зменшення нагромадження математичних записів запишемо лише перше рівняння системи (1), а інші будуть ідентичними:

$$\begin{aligned} J_{5H} \frac{d^2 \alpha}{dt_H^2} \frac{\partial \alpha}{\partial q_{\delta 1H}} + m_{6H} \frac{d^2 x_{6H}}{dt_H^2} \frac{\partial x_{6H}}{\partial q_{\delta 1H}} + m_{6H} \frac{d^2 y_{6H}}{dt_H^2} \frac{\partial y_{6H}}{\partial q_{\delta 1H}} + (J_{s6H} + J_{s7H}) \frac{d^2 \gamma}{dt_H^2} \frac{\partial \gamma}{\partial q_{\delta 1H}} + \\ + m_{7H} \frac{d^2 x_{7H}}{dt_H^2} \frac{\partial x_{7H}}{\partial q_{\delta 1H}} + m_{7H} \frac{d^2 y_{7H}}{dt_H^2} \frac{\partial y_{7H}}{\partial q_{\delta 1H}} + m_{8H} \frac{d^2 x_{8H}}{dt_H^2} \frac{\partial x_{8H}}{\partial q_{\delta 1H}} + m_{8H} \frac{d^2 y_{8H}}{dt_H^2} \frac{\partial y_{8H}}{\partial q_{\delta 1H}} = \\ = F_{\delta 1H} - m_{5H} g \frac{\partial y_{5H}}{\partial q_{\delta 1H}} - m_{6H} g \frac{\partial y_{6H}}{\partial q_{\delta 1H}} - m_{7H} g \frac{\partial y_{7H}}{\partial q_{\delta 1H}} - m_{8H} g \frac{\partial y_{8H}}{\partial q_{\delta 1H}}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 & J_{5M} \frac{d^2 \alpha}{dt_M^2} \frac{\partial \alpha}{\partial q_{\delta 1M}} + m_{6M} \frac{d^2 x_{6M}}{dt_M^2} \frac{\partial x_{6M}}{\partial q_{\delta 1M}} + m_{6M} \frac{d^2 y_{6M}}{dt_M^2} \frac{\partial y_{6M}}{\partial q_{\delta 1M}} + (J_{s6M} + J_{s7M}) \frac{d^2 \gamma}{dt_M^2} \frac{\partial \gamma}{\partial q_{\delta 1M}} + \\
 & + m_{7M} \frac{d^2 x_{7M}}{dt_M^2} \frac{\partial x_{7M}}{\partial q_{\delta 1M}} + m_{7M} \frac{d^2 y_{7M}}{dt_M^2} \frac{\partial y_{7M}}{\partial q_{\delta 1M}} + m_{8M} \frac{d^2 x_{8M}}{dt_M^2} \frac{\partial x_{8M}}{\partial q_{\delta 1M}} + m_{8M} \frac{d^2 y_{8M}}{dt_M^2} \frac{\partial y_{8M}}{\partial q_{\delta 1M}} = \\
 & = F_{\delta 1M} - m_{5M} g \frac{\partial y_{5M}}{\partial q_{\delta 1M}} - m_{6M} g \frac{\partial y_{6M}}{\partial q_{\delta 1M}} - m_{7M} g \frac{\partial y_{7M}}{\partial q_{\delta 1M}} - m_{8M} g \frac{\partial y_{8M}}{\partial q_{\delta 1M}};
 \end{aligned} \tag{4}$$

Згідно із третьою теоремою подібності, якщо два фізичні явища подібні та описуються однією системою рівнянь, то критерії подібності рівні між собою [6]. Такими критеріями подібності за оцінкою динаміки руху натурної стрілової системи крана-маніпулятора та її моделі є відношення відповідних членів рівнянь (3) і (4). Отож поділимо складові рівняння (3) на відповідні складові рівняння (4), приврівнявши їх між собою:

$$\begin{aligned}
 & \frac{J_{5H} \frac{d^2 \alpha}{dt_H^2} \frac{\partial \alpha}{\partial q_{\delta 1H}}}{J_{5M} \frac{d^2 \alpha}{dt_M^2} \frac{\partial \alpha}{\partial q_{\delta 1M}}} = \frac{m_{6H} \frac{d^2 x_{6H}}{dt_H^2} \frac{\partial x_{6H}}{\partial q_{\delta 1H}}}{m_{6M} \frac{d^2 x_{6M}}{dt_M^2} \frac{\partial x_{6M}}{\partial q_{\delta 1M}}} = \\
 & = \frac{J_{s6H} \frac{d^2 \gamma}{dt_H^2} \frac{\partial \gamma}{\partial q_{\delta 1H}}}{J_{s6M} \frac{d^2 \gamma}{dt_M^2} \frac{\partial \gamma}{\partial q_{\delta 1M}}} = \frac{J_{s7H} \frac{d^2 \gamma}{dt_H^2} \frac{\partial \gamma}{\partial q_{\delta 1H}}}{J_{s7M} \frac{d^2 \gamma}{dt_M^2} \frac{\partial \gamma}{\partial q_{\delta 1M}}} = \\
 & = \frac{m_{6H} \frac{d^2 y_{6H}}{dt_H^2} \frac{\partial y_{6H}}{\partial q_{\delta 1H}}}{m_{6M} \frac{d^2 y_{6M}}{dt_M^2} \frac{\partial y_{6M}}{\partial q_{\delta 1M}}} = \frac{m_{7H} \frac{d^2 x_{7H}}{dt_H^2} \frac{\partial x_{7H}}{\partial q_{\delta 1H}}}{m_{7M} \frac{d^2 x_{7M}}{dt_M^2} \frac{\partial x_{7M}}{\partial q_{\delta 1M}}} = \\
 & = \frac{m_{7H} \frac{d^2 y_{7H}}{dt_H^2} \frac{\partial y_{7H}}{\partial q_{\delta 1H}}}{m_{7M} \frac{d^2 y_{7M}}{dt_M^2} \frac{\partial y_{7M}}{\partial q_{\delta 1M}}} = \frac{m_{8H} \frac{d^2 x_{8H}}{dt_H^2} \frac{\partial x_{8H}}{\partial q_{\delta 1H}}}{m_{8M} \frac{d^2 x_{8M}}{dt_M^2} \frac{\partial x_{8M}}{\partial q_{\delta 1M}}} = \\
 & = \frac{m_{8H} \frac{d^2 y_{8H}}{dt_H^2} \frac{\partial y_{8H}}{\partial q_{\delta 1H}}}{m_{8M} \frac{d^2 y_{8M}}{dt_M^2} \frac{\partial y_{8M}}{\partial q_{\delta 1M}}} = \frac{F_{\delta 1H}}{F_{\delta 1M}} = \frac{m_{5H} g \frac{\partial y_{5H}}{\partial q_{\delta 1H}}}{m_{5M} g \frac{\partial y_{5M}}{\partial q_{\delta 1M}}} = \\
 & = \frac{m_{6H} g \frac{\partial y_{6H}}{\partial q_{\delta 1H}}}{m_{6M} g \frac{\partial y_{6M}}{\partial q_{\delta 1M}}} = \frac{m_{7H} g \frac{\partial y_{7H}}{\partial q_{\delta 1H}}}{m_{7M} g \frac{\partial y_{7M}}{\partial q_{\delta 1M}}} = \frac{m_{8H} g \frac{\partial y_{8H}}{\partial q_{\delta 1H}}}{m_{8M} g \frac{\partial y_{8M}}{\partial q_{\delta 1M}}}.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Використовуючи залежності (2) для отриманих співвідношень (5), отримаємо:

$$\begin{aligned}
 & \frac{J_{5M} \lambda_J \frac{d^2 \alpha}{d(t_M \cdot \lambda_t)^2} \frac{\partial \alpha}{\partial (q_{\delta 1M} \cdot \lambda_l)}}{J_{5M} \frac{d^2 \alpha}{dt_M^2} \frac{\partial \alpha}{\partial q_{\delta 1M}}} = \frac{m_{6M} \lambda_m \frac{d^2 (x_{6M} \cdot \lambda_l)}{d(t \cdot \lambda_t)^2} \frac{\partial (x_{6M} \cdot \lambda_l)}{\partial (q_{\delta 1M} \cdot \lambda_l)}}{m_{6M} \frac{d^2 x_{6M}}{dt_M^2} \frac{\partial x_{6M}}{\partial q_{\delta 1M}}} = \\
 & = \frac{J_{S6M} \lambda_J \frac{d^2 \gamma}{d(t_M \cdot \lambda_t)^2} \frac{\partial \gamma}{\partial (q_{\delta 1M} \cdot \lambda_l)}}{J_{S6M} \frac{d^2 \gamma}{dt_M^2} \frac{\partial \gamma}{\partial q_{\delta 1M}}} = \frac{J_{S7M} \lambda_J \frac{d^2 \gamma}{d(t_M \cdot \lambda_t)^2} \frac{\partial \gamma}{\partial (q_{\delta 1M} \cdot \lambda_l)}}{J_{S7M} \frac{d^2 \gamma}{dt_M^2} \frac{\partial \gamma}{\partial q_{\delta 1M}}} = \\
 & = \frac{m_{6M} \lambda_m \frac{d^2 (y_{6M} \cdot \lambda_l)}{d(t \cdot \lambda_t)^2} \frac{\partial (y_{6M} \cdot \lambda_l)}{\partial (q_{\delta 1M} \cdot \lambda_l)}}{m_{6M} \frac{d^2 y_{6M}}{dt_M^2} \frac{\partial y_{6M}}{\partial q_{\delta 1M}}} = \frac{m_{7M} \lambda_m \frac{d^2 (x_{7M} \cdot \lambda_l)}{d(t \cdot \lambda_t)^2} \frac{\partial (x_{7M} \cdot \lambda_l)}{\partial (q_{\delta 1M} \cdot \lambda_l)}}{m_{7M} \frac{d^2 x_{7M}}{dt_M^2} \frac{\partial x_{7M}}{\partial q_{\delta 1M}}} = \\
 & = \frac{m_{7M} \lambda_m \frac{d^2 (y_{7M} \cdot \lambda_l)}{d(t \cdot \lambda_t)^2} \frac{\partial (y_{7M} \cdot \lambda_l)}{\partial (q_{\delta 1M} \cdot \lambda_l)}}{m_{7M} \frac{d^2 y_{7M}}{dt_M^2} \frac{\partial y_{7M}}{\partial q_{\delta 1M}}} = \frac{m_{8M} \lambda_m \frac{d^2 (x_{8M} \cdot \lambda_l)}{d(t \cdot \lambda_t)^2} \frac{\partial (x_{8M} \cdot \lambda_l)}{\partial (q_{\delta 1M} \cdot \lambda_l)}}{m_{8M} \frac{d^2 x_{8M}}{dt_M^2} \frac{\partial x_{8M}}{\partial q_{\delta 1M}}} = \\
 & = \frac{m_{8M} \lambda_m \frac{d^2 (y_{8M} \cdot \lambda_l)}{d(t \cdot \lambda_t)^2} \frac{\partial (y_{8M} \cdot \lambda_l)}{\partial (q_{\delta 1M} \cdot \lambda_l)}}{m_{8M} \frac{d^2 y_{8M}}{dt_M^2} \frac{\partial y_{8M}}{\partial q_{\delta 1M}}} = \frac{F_{\delta 1M} \cdot \lambda_F}{F_{\delta 1M}} = \frac{m_{5M} \lambda_m g \frac{\partial (y_{5M} \cdot \lambda_l)}{\partial (q_{\delta 1M} \cdot \lambda_l)}}{m_{5M} g \frac{dy_{5M}}{dq_{\delta 1M}}} = \\
 & = \frac{m_{6M} \lambda_m g \frac{\partial (y_{6M} \cdot \lambda_l)}{\partial (q_{\delta 1M} \cdot \lambda_l)}}{m_{6M} g \frac{\partial y_{6M}}{\partial q_{\delta 1M}}} = \frac{m_{7M} \lambda_m g \frac{\partial (y_{7M} \cdot \lambda_l)}{\partial (q_{\delta 1M} \cdot \lambda_l)}}{m_{7M} g \frac{\partial y_{7M}}{\partial q_{\delta 1M}}} = \frac{m_{8M} \lambda_m g \frac{\partial (y_{8M} \cdot \lambda_l)}{\partial (q_{\delta 1M} \cdot \lambda_l)}}{m_{8M} g \frac{\partial y_{8M}}{\partial q_{\delta 1M}}}.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Опустивши постійні коефіцієнти та знаки диференціювання та спростивши наведені залежності, отримаємо наступні співвідношення:

$$\lambda_J \cdot \frac{1}{\lambda_t^2 \cdot \lambda_l \cdot \lambda_F} = 1; \quad \lambda_m \cdot \frac{\lambda_l}{\lambda_t^2 \cdot \lambda_F} = 1, \quad \frac{\lambda_m}{\lambda_F} = 1. \tag{7}$$

Аналогічні залежності також отримаємо й для інших рівнянь системи (1).

Визначені співвідношення коефіцієнтів подібності використовуються при постановці експерименту моделювання динаміки руху крана-

маніпулятора на його фізичній моделі та слугують вихідними параметрами для створення експериментальної установки [7, 9].

Для крана-маніпулятора на рис.1 визначено його основні параметри: маси підйомної та поворотної стріли і висувної рукояті відповідно $m_5 = 92$ кг, $m_6 = 76$ кг, $m_7 = 48$ кг; геометричні розміри підйомної та поворотної стріли і висувної рукояті відповідно $l_5 = 1800$ мм, $l_6 = 1620$ мм, $l_7 = 1800$ мм.

Виходячи із співвідношень (2), знайдемо маси складових елементів стріли експериментальної установки, якщо задамо коефіцієнт подібності по масі $\lambda_m = 12$: маса підйомної стріли – $m_{5i} = \frac{m_{5f}}{\lambda_m} = \frac{92}{12} \approx 7,6$ кг; маса поворотної стріли – $m_{6i} = \frac{m_{6f}}{\lambda_m} = \frac{76}{12} \approx 6,3$ кг; маса висувної рукояті – $m_{7M} = \frac{m_{7H}}{\lambda_m} = \frac{48}{12} \approx 4$ кг.

Задамося коефіцієнтом геометричної подібності $\lambda_l = 1,8$ та визначимо розміри ланок стріли моделі: довжина підйомної стріли – $l_{5M} = \frac{l_{5H}}{\lambda_m} = \frac{1800}{1,8} = 1000$ мм; довжина поворотної стріли – $l_{6i} = \frac{l_{6f}}{\lambda_m} = \frac{1620}{1,8} = 900$ мм; довжина висувної рукояті – $l_{7i} = \frac{l_{7f}}{\lambda_m} = \frac{1800}{1,8} = 1000$ мм.

Із співвідношень (7) для заданих критеріїв по масі та довжині віднайдемо невідомі коефіцієнти подібності по зусиллю, часу та моменту інерції. Відповідно будемо мати: $\lambda_F = 12$, $\lambda_t = 1,34$, $\lambda_j = 38,88$.

Критерії подібності по швидкості та прискоренню визначатимуться залежностями та матимуть наступні значення:

$$\lambda_v = \frac{\lambda_t}{\lambda_l} = \frac{1,8}{1,34} = 1,34, \quad \lambda_a = \frac{\lambda_t}{\lambda_l^2} = \frac{1,8}{1,34^2} = 1,002. \quad (8)$$

Для визначення параметрів привідних гідроциліндрів скористаємося вже знайденим коефіцієнтом $\lambda_F = 12$.

Враховуючи отримані коефіцієнти подібності, було розроблено експериментальну установку крана-маніпулятора (рис.2), яка дозволяє проводити повноцінні експериментальні дослідження з врахуванням всіх чинних факторів, які впливають на динаміку руху стріли маніпулятора разом з вантажем.

Для визначення силових, кінематичних та експлуатаційних характеристик стрілової системи крана-маніпулятора в розробленій експериментальній установці передбачено встановлення вимірювально-реєструючого обладнання. Схема розташування датчиків зображена на рис. 3.



Рисунок 2 – Експериментальна установка крана-маніпулятора

У процесі роботи маніпулятора проводяться вимірювання значення тиску робочої рідини у напірній та зливній порожнинах привідного гідроциліндра підйому стріли, як найбільш навантаженого, та в напірній порожнині гідроциліндра приводу висувної рукояті. Для зняття показів тиску у гідросистемі експериментальної установки встановлені датчики ДМП-100.

Вимірювання кінематичних характеристик різних режимів руху стріли маніпулятора у даній експериментальній установці пропонується за допомогою датчиків прискорення ВС110, які встановлені на штоках відповідних привідних гідроциліндрів.

Визначення навантаження в металоконструкції стріли маніпулятора виконується тензорезисторами, які складають тензометричний міст, що розміщений в найбільш напруженому місці стрілової системи.

В розглядуваній експериментальній установці також передбачено датчик кута відхилення вантажу MRB/C.

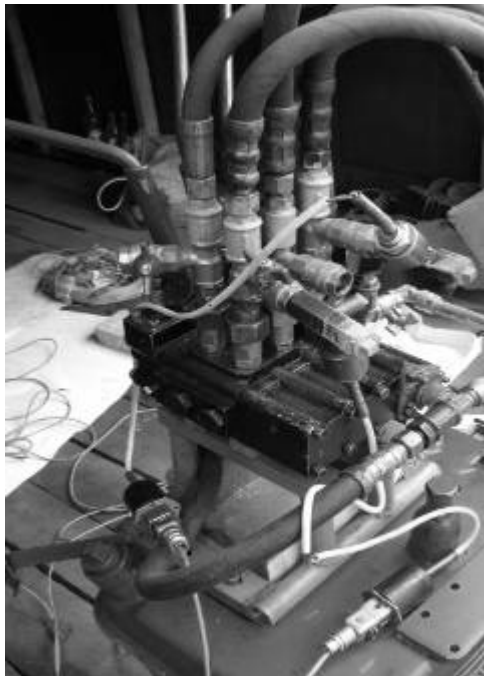
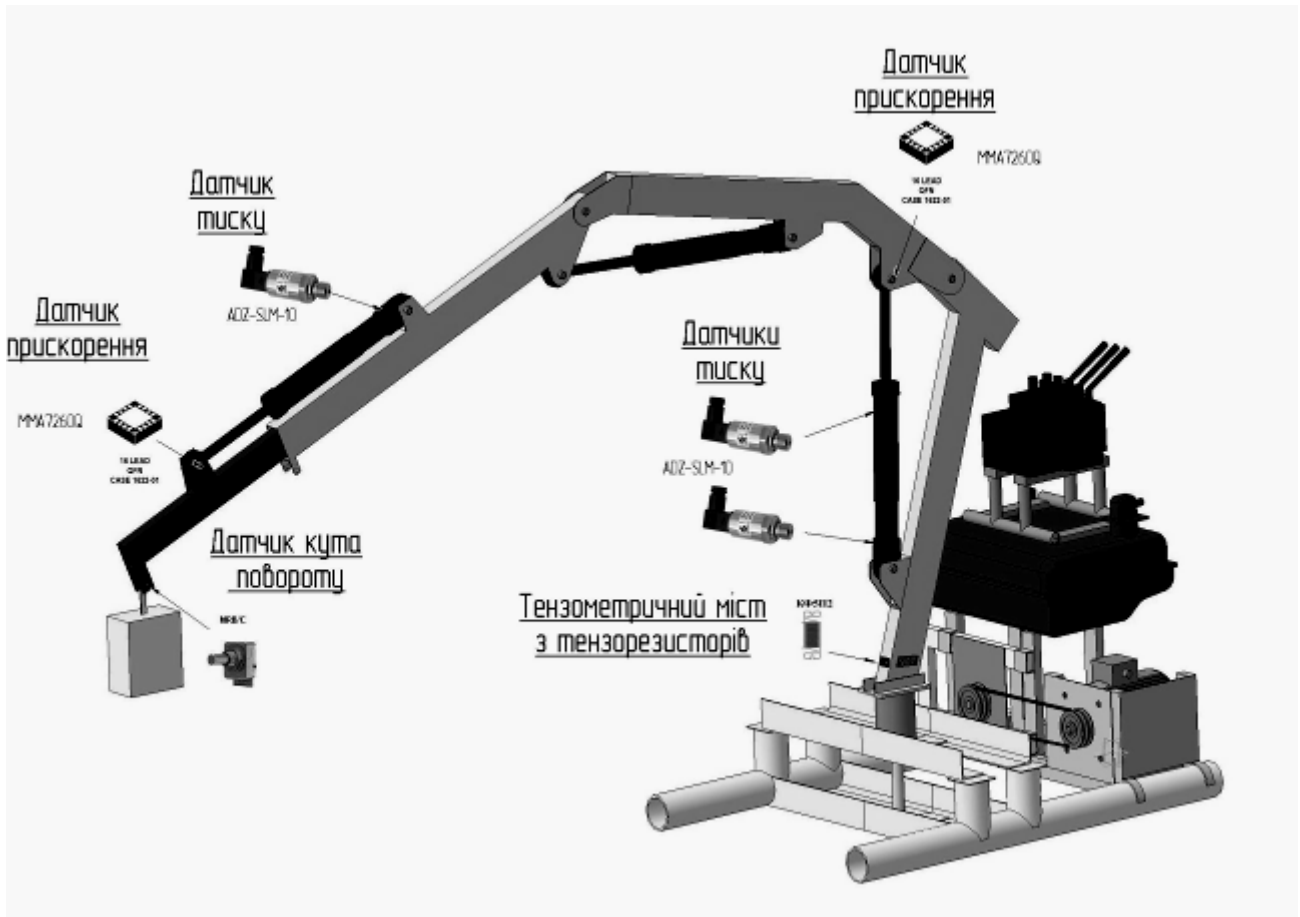


Рисунок 3 – Схема розміщення датчиків на фізичній моделі крана-маніпулятора (а) та місця встановлення датчиків тиску (б) і датчиків прискорення (в)

Для зчитування сигналів із встановлених датчиків, застосовується підсилювач-перетворювач SPIDER 8-FO5254 та персональний комп'ютер HP6100 з програмним продуктом Catman Express 4.5, що дозволяє передати отримані числові дані в пакети програми MS Excel для їхньої подальшої обробки.

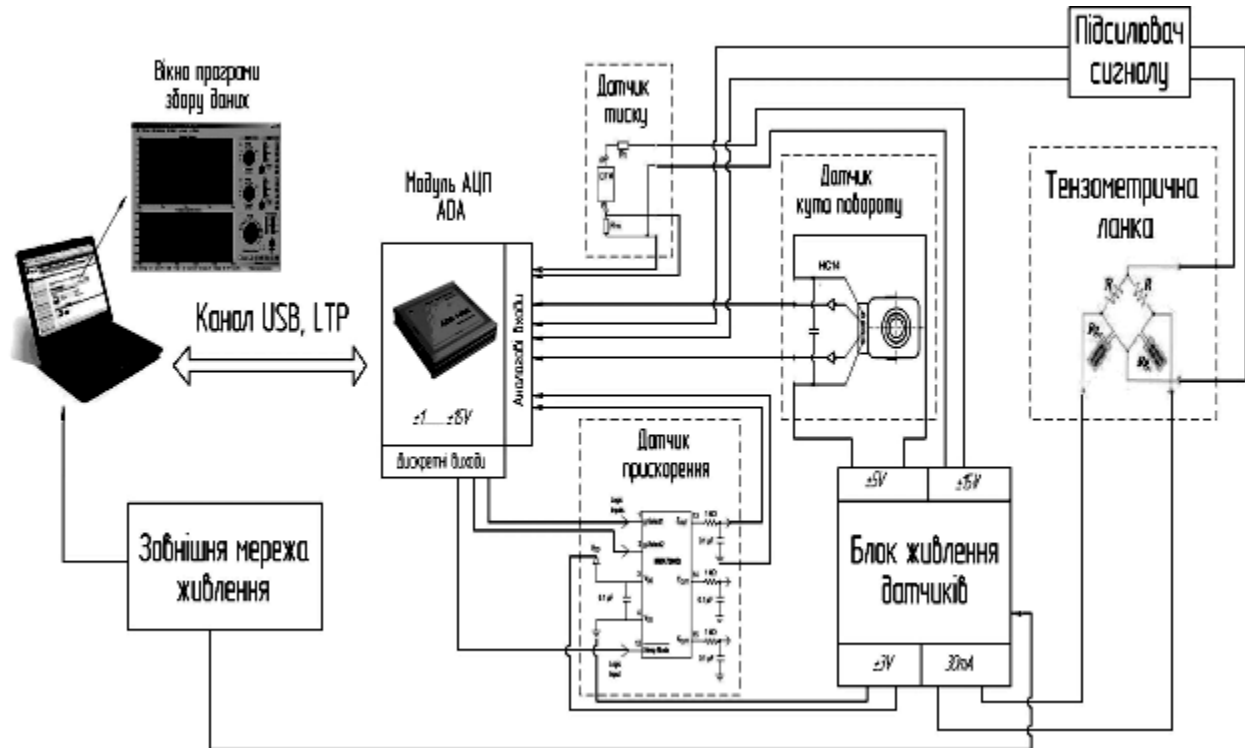


Рисунок 4 – Принципова схема підключення датчиків до системи збору даних

Висновки. В статті розглянуто основні принципи синтезу фізичної моделі стрілової системи крана-маніпулятора, при створенні якої використано механічну подібність. Основним рівнянням для визначення критеріїв подібності натурної стрілової системи та її моделі є рівняння руху стрілової системи під час зміни вильоту.

При визначенні коефіцієнтів подібності було виявлено, що вони набувають різних значень. Враховуючи це, одна характеристика моделі може бути меншою, ніж у натурному крані, а інша характеристика – більшою. Це свідчить про те, що при фізичному моделюванні об'єктів та явищ відсутня пряма пропорційність.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Раннев А. В. Строительные машины : справочное издание / А. В. Раннев, В. Ф. Корелин, А. В. Жаворонков [Под общ. ред. Кузина Э. Н.]. – М. : Машиностроение, 1991. – 495 с.
2. Ловейкін В. С. Математична модель динаміки зміни вильоту маніпулятора з жорсткими ланками / В. С. Ловейкін, Д. О. Міщук // Техніка будівництва – 2006. – № 19. – С. 26-29.

3. Ловейкин В. С. Динамический анализ стреловых систем кранов с горизонтальным перемещением груза при изменении вылета: дис. кандидата тех. наук : 05.05.05 / Ловейкин Вячеслав Сергеевич. – К., 1982. – 268 с.
4. Надежность технических систем : справочник / Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин и др. ; [Под ред. И. А. Ушакова]. – М. : Радио и связь, 1985. – 608 с.
5. Лаврівський М. З. Проблеми розвитку маніпуляторів, як шарнірно-зчленованих механічних систем / М. З. Лаврівський, Р. В. Зінько, І. С. Лозовий // Пожежна безпека : зб. наук. праць. – Львів : Вид-во ЛДУБЖД, – 2008. – Вип. 13. – С. 58-64.
6. Ловейкин В. С. Теория технических систем : [навч. посібник] / В. С. Ловейкин, І. І. Назаренко, О. Г. Онищенко. – Київ, Полтава : ІЗМН–ПДТУ, 1998. – 176 с.
7. Хубка В. Теория технических систем; пер. с нем. – М. : Мир, 1987. – 208 с.
8. Григоров О. В. Оптимальне керування рухом механізмів вантажопідйомних машин. / О. В. Григоров, В. С. Ловейкин. – К., 1997. – 297 с.
9. Персов Б. З. Расчет и проектирование экспериментальных установок / Б. З. Персов. – Москва, Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2006. – 348 с.

Ловейкин В.С., Горбатюк Е.В., Мищук Д.А. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ КРАНА-МАНИПУЛЯТОРА С ГИДРОПРИВОДОМ НА ТРАНСПОРТНОМ СРЕДСТВЕ.

В статье рассмотрена методика проведения экспериментального исследования рабочих процессов на грузовых кранах-манипуляторах с гидроприводом на транспортных средствах и описано измерительно-регистрающее оборудование, которое при этом используется. Методика базируется на использовании комплекса аппаратуры, которая устанавливается на смоделированную физическую модель крана-манипулятора, что дает возможность всесторонне оценить ряд параметров и сравнить полученные результаты с результатами теоретических исследований.

Ключевые слова: кран-манипулятор, физическая модель, экспериментальное исследование, датчик, критерии подобия.

Loveykin V.S., Horbatiuk Y.V., Mishchuk D.O. EXPERIMENTAL MODEL OF CRANE-MANIPULATOR WITH HYDRODRAULIC ACTUATOR ON A TRANSPORT DEVICE

In this article the methodology of the pilot study work processes for cargo crane with hydraulic drive on the vehicles described and the measuring-recording equipment that is used. The method is based on the use of complex equipment which is installed on a physical model simulated the crane, which enables a comprehensive assessment of a number parameters and compare the results with theoretical studies.

Key words: crane-manipulator, physical model, experimental research, the sensor, the criteria for similarity.