

## Гірничі та піднімально-транспортні машини

УДК 621.875

В.С. Ловеїкін, д.т.н., проф. НУБіПУ;  
Д.А. Паламарчук, І.А. Паламарчук (КНУБА, Київ)

### СТВОРЕННЯ ФІЗИЧНОЇ МОДЕЛІ ШАРНІРНО-ЗЧЛЕНОВАНОЇ СТІЛОВОЇ СИСТЕМИ КРАНА

**АНОТАЦІЯ.** Описані основні принципи створення фізичної моделі шарнірно-зчленованої стрілової системи крана, а також проведено порівняння кінематичних та інерційних характеристик натурної машини та її фізичної моделі.

**Ключові слова:** стрілова система, модель, ланка, критерій, коефіцієнт, теорема.

**АННОТАЦИЯ.** Описаны основные принципы создания физической модели шарнирно-сочлененной стреловой системы крана, а также проведено сравнение кинематических и инерционных характеристик натурной машины и ее физической модели.

**Ключевые слова:** стреловая система, модель, звено, критерий, коэффициент, теорема.

**SUMMARY.** The basic principles of the physical model of the articulated hinges-gi of the crane, and compared the kinematic and inertial characteristics of field machinery and its physical model.

**Key words:** the jib system, model, link, criterion, factor, theorem.

#### Вступ

При створенні нової машини, а також при подальшому конструктивному вдосконаленні вузлів та агрегатів машин виникає необхідність проведення натурних експериментальних досліджень. Проведення таких досліджень є обов'язковим на завершальному етапі створення нової машини [1].

У більшості випадків натурні експериментальні дослідження та випробування проводяться на реальній машині. Однак у деяких випадках проведення досліджень на реальній машині є дуже трудомістким, або неможливим із економічної чи технологічної точки зору. Тоді для проведення досліджень

створюється натурна фізична модель машини, яка в певному масштабі відтворюватиме досліджуваний процес або явище [2].

#### Постановка задачі

Для вдосконалення механізму зміни вильоту стрілової системи порталного крана [3] та здійснення частотного керування його електропривідом запропоновано створити натурну модель стрілової системи крана МАРК 40 [4]. Кінематична схема стрілової системи такого крана, а також загальний вигляд рейкового механізму зміни вильоту наведено на рис. 1 та рис. 2, відповідно.

Кран МАРК 40 має такі технічні характеристики:

##### 1. кінематичні:

- кут нахилу стріли при зміні вильоту  $\alpha = 40^\circ \dots 76^\circ$ ,  $\Delta\alpha = 36^\circ = 0,628 \text{ рад}$ ;
- виліт стрілової системи  $S_{\min} = 8 \text{ м}$ ,  $S_{\max} = 30 \text{ м}$ ,  $\Delta S = 22 \text{ м}$ ;
- середня кутова швидкість стріли  $\omega = 0,024 \text{ с}^{-1}$ ;
- середній час зміни вильоту від мінімального до максимального  $\Delta t = 22,86 \text{ с}$ ;
- довжини: стріли 1  $L = 25,76 \text{ м}$ , хобота 2  $l = 10,16 \text{ м}$ , відтяжки 3  $R = 21,33 \text{ м}$ , контрхобота  $r = 2,51 \text{ м}$ ;
- довжина підвісу вантажу  $H = 14,7 \text{ м}$ ;

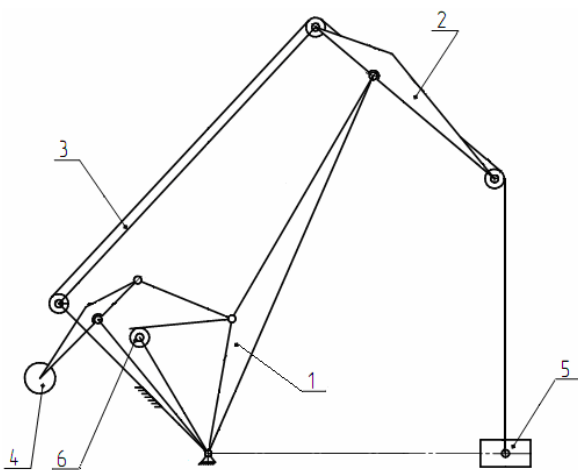


Рис.1. Кінематична схема стрілової системи крана: 1 – стріла; 2 – хобот у зборі із контрхоботом; 3 – відтяжка; 4 – противага; 5 – вантаж; 6 – рейковий механізм зміни вильоту

- передаточне число приводного механізму  $i = 212$ ;
- дільний діаметр шестерні рейкового механізму  $d_u = 0,35 м$ .

користуються не одиничні коефіцієнти подібності, а комплексні критерії подібності. Для визначення умов подібності реальної стрілової системи крана та натурної моделі

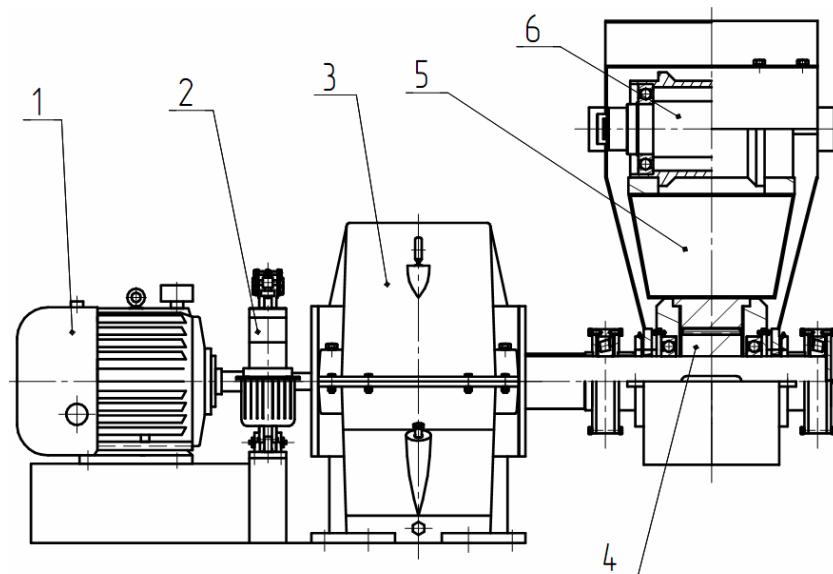


Рис.2. Механізм зміни вильоту стрілової системи крана: 1 – електродвигун; 2 – гальмо з електромагнітним приводом; 3 – редуктор; 4 – ведуча шестерня рейкового механізму; 5 – тяга із зубчатою рейкою; 6 – утримуюча рама із притискними роликами

2. інерційні:

- маси: стріли  $m_1 = 12650 кг$ , хобота (у зборі)  $m_2 = 5423 кг$ , відтяжки  $m_3 = 3114 кг$ , противаги  $m_4 = 13525 кг$ ;
- середня вантажопідйомність крана на основному гаку  $m_5 = 20000 кг$ .

користуються математичними рівняннями, що описують досліджуване явище. Тому для визначення комплексних критеріїв подібності створюваної моделі та реального крана скористаємося рівнянням руху (1) стрілової системи при зміні вильоту вантажу [6]:

$$J_\alpha \frac{d\omega}{d\alpha} + \frac{1}{2} \frac{\partial J_\alpha}{\partial \alpha} \omega = \frac{M \frac{\partial \phi_6}{\partial \alpha} - \left( m_1 g \frac{\partial y_1}{\partial \alpha} + m_2 g \frac{\partial y_2}{\partial \alpha} + m_3 g \frac{\partial y_3}{\partial \alpha} + m_4 g \frac{\partial y_4}{\partial \alpha} + m_5 g \frac{\partial y_5}{\partial \alpha} \right)}{\omega}, \quad (1)$$

**Виклад основного матеріалу**

При створенні моделі вказаної стрілової системи користуються механічною подібністю [5]. Механічна подібність належить до фізичної подібності до складу якої входять геометрична, кінематична та динамічна подібності.

Запропонована фізична модель призначена для дослідження динаміки руху стрілової системи під час зміни вильоту вантажу, тому визначальними досліджуваними величинами є маси ланок, їхні моменти інерції, лінійні та кутові швидкості. Виходячи з цього, при визначенні масштабу моделі ви-

де  $\alpha$  – кутова координата стріли, що прийнята за узагальнену координату;

$J_\alpha$  – момент інерції стрілової системи зведений до узагальненої координати  $\alpha$ ;

$\frac{\partial J_\alpha}{\partial \alpha}$  – часткова похідна зведеного моменту інерції за координатою  $\alpha$ ;

$\omega$  – кутова швидкість стріли;

$\frac{d\omega}{d\alpha}$  – часткова похідна кутової швидкості стріли за координатою  $\alpha$ ;

$M$  – рушійний момент на валу електродвигуна приводного механізму;

$\frac{\partial y_1}{\partial \alpha}, \frac{\partial y_2}{\partial \alpha}, \frac{\partial y_3}{\partial \alpha}, \frac{\partial y_4}{\partial \alpha}, \frac{\partial y_5}{\partial \alpha}$  – передаточні

функції першого порядку, що зв'язують вертикальні координати центрів мас ланок із координатою стріли, відповідно стріли, хобота, відтяжки, противаги, вантажу;

$\frac{\partial \varphi_6}{\partial \alpha}$  – передаточна функція першого порядку, що зв'язує кутову координату ротора електродвигуна із координатою стріли.

Зведений момент інерції стрілової системи визначається

$$J_{\alpha} = J_O + m_2 \left[ \left( \frac{\partial x_2}{\partial \alpha} \right)^2 + \left( \frac{\partial y_2}{\partial \alpha} \right)^2 \right] + J_C \left( \frac{\partial \varphi_2}{\partial \alpha} \right)^2 + J_B \left( \frac{\partial \varphi_3}{\partial \alpha} \right)^2 + J_D \left( \frac{\partial \varphi_4}{\partial \alpha} \right)^2 + m_5 \left[ \left( \frac{\partial x_5}{\partial \alpha} \right)^2 + \left( \frac{\partial y_5}{\partial \alpha} \right)^2 \right] + J_P \left( \frac{\partial \varphi_6}{\partial \alpha} \right)^2, \quad (2)$$

де  $m_2, m_5$  – маси відповідно хобота та вантажу;  $J_O, J_C, J_B, J_D, J_P$  – моменти інерції ланок відносно їх вісей обертання, відповідно стріли, хобота, відтяжки, рухомої противаги, ротора електродвигуна;  $\frac{\partial \varphi_2}{\partial \alpha}, \frac{\partial \varphi_3}{\partial \alpha},$

$\frac{\partial \varphi_4}{\partial \alpha}$  – передаточна функція першого порядку, що зв'язує кутові координати відповідно хобота, відтяжки, противаги із координатою стріли;  $\frac{\partial x_2}{\partial \alpha}, \frac{\partial x_5}{\partial \alpha}$  – передаточні функції

першого порядку, що зв'язують горизонтальні координати центрів мас відповідно хобота і вантажу із координатою стріли.

Запишемо вирази (1) та (2) для натурної стрілової системи крана

$$J_{\alpha H} \frac{d\omega_H}{d\alpha_H} + \frac{1}{2} \frac{\partial J_{\alpha H}}{\partial \alpha_H} \omega_H = \frac{M_H \frac{\partial \varphi_{6H}}{\partial \alpha_H}}{\omega_H} - \frac{m_{1H} g \frac{\partial y_{1H}}{\partial \alpha_H}}{\omega_H} - \frac{m_{2H} g \frac{\partial y_{2H}}{\partial \alpha_H}}{\omega_H} - \frac{m_{3H} g \frac{\partial y_{3H}}{\partial \alpha_H}}{\omega_H} - \frac{m_{4H} g \frac{\partial y_{4H}}{\partial \alpha_H}}{\omega_H} - \frac{m_{5H} g \frac{\partial y_{5H}}{\partial \alpha_H}}{\omega_H}; \quad (3)$$

$$J_{\alpha H} = J_{OH} + m_{2H} \left[ \left( \frac{\partial x_{2H}}{\partial \alpha_H} \right)^2 + \left( \frac{\partial y_{2H}}{\partial \alpha_H} \right)^2 \right] + J_{CH} \left( \frac{\partial \varphi_{2H}}{\partial \alpha_H} \right)^2 + J_{BH} \left( \frac{\partial \varphi_{3H}}{\partial \alpha_H} \right)^2 + J_{DH} \left( \frac{\partial \varphi_{4H}}{\partial \alpha_H} \right)^2 + m_{5H} \left[ \left( \frac{\partial x_{5H}}{\partial \alpha_H} \right)^2 + \left( \frac{\partial y_{5H}}{\partial \alpha_H} \right)^2 \right] + J_{PH} \left( \frac{\partial \varphi_{6H}}{\partial \alpha_H} \right)^2, \quad (4)$$

а також для створюваної моделі крана

$$J_{\alpha M} \frac{d\omega_M}{d\alpha_M} + \frac{1}{2} \frac{\partial J_{\alpha M}}{\partial \alpha_M} \omega_M = \frac{M_M \frac{\partial \varphi_{6M}}{\partial \alpha_M}}{\omega_M} - \frac{m_{1M} g \frac{\partial y_{1M}}{\partial \alpha_M}}{\omega_M} - \frac{m_{2M} g \frac{\partial y_{2M}}{\partial \alpha_M}}{\omega_M} - \frac{m_{3M} g \frac{\partial y_{3M}}{\partial \alpha_M}}{\omega_M} - \frac{m_{4M} g \frac{\partial y_{4M}}{\partial \alpha_M}}{\omega_M} - \frac{m_{5M} g \frac{\partial y_{5M}}{\partial \alpha_M}}{\omega_M}; \quad (5)$$

$$J_{\alpha H} = J_{OM} + m_{2M} \left[ \left( \frac{\partial x_{2M}}{\partial \alpha_M} \right)^2 + \left( \frac{\partial y_{2M}}{\partial \alpha_M} \right)^2 \right] + J_{CM} \left( \frac{\partial \varphi_{2M}}{\partial \alpha_M} \right)^2 + J_{BM} \left( \frac{\partial \varphi_{3M}}{\partial \alpha_M} \right)^2 + J_{DM} \left( \frac{\partial \varphi_{4M}}{\partial \alpha_M} \right)^2 + m_{5M} \left[ \left( \frac{\partial x_{5M}}{\partial \alpha_M} \right)^2 + \left( \frac{\partial y_{5M}}{\partial \alpha_M} \right)^2 \right] + J_{PM} \left( \frac{\partial \varphi_{6M}}{\partial \alpha_M} \right)^2. \quad (6)$$

Згідно із третьою теоремою подібності, якщо два фізичні явища подібні та описуються однією системою рівнянь, то критерії подібності рівні між собою [7]. Такими критеріями подібності за оцінкою динаміки руху натурної стрілової системи та її моделі можуть бути відношення відповідних членів рівнянь (3), (4) і (5), (6). Тому поділимо складові рівняння (3) на відповідні складові рівняння (5), прирівнявши їх між собою та опустивши постійні коефіцієнти та знаки диференціювання, будемо мати

$$\frac{J_{\alpha H} \frac{\omega_H}{\alpha_H}}{J_{\alpha M} \frac{\omega_M}{\alpha_M}} = \frac{J_{\alpha H} \omega_H}{J_{\alpha M} \omega_M} = \frac{M_H \frac{\Phi_{6H}}{\alpha_H}}{M_M \frac{\Phi_{6M}}{\alpha_M}} = \frac{\omega_H}{\omega_M} = \frac{m_{1H} \frac{y_{1H}}{\alpha_H}}{m_{1M} \frac{y_{1M}}{\alpha_M}} = \frac{m_{2H} \frac{y_{2H}}{\alpha_H}}{m_{2M} \frac{y_{2M}}{\alpha_M}} = \frac{m_{3H} \frac{y_{3H}}{\alpha_H}}{m_{3M} \frac{y_{3M}}{\alpha_M}} = \frac{m_{4H} \frac{y_{4H}}{\alpha_H}}{m_{4M} \frac{y_{4M}}{\alpha_M}} = \frac{m_{5H} \frac{y_{5H}}{\alpha_H}}{m_{5M} \frac{y_{5M}}{\alpha_M}}, \quad (7)$$

і розділимо складові виразу (4) на відповідні складові виразу (6); в результаті чого отримаємо наступні співвідношення

$$\frac{J_{\alpha H}}{J_{\alpha M}} = \frac{J_{OH}}{J_{\alpha M}} = \frac{m_{2H} \left[ \left( \frac{x_{2H}}{\alpha_H} \right)^2 + \left( \frac{y_{2H}}{\alpha_H} \right)^2 \right]}{m_{2M} \left[ \left( \frac{x_{2M}}{\alpha_M} \right)^2 + \left( \frac{y_{2M}}{\alpha_M} \right)^2 \right]} = \frac{J_{CH} \left( \frac{\Phi_{2H}}{\alpha_H} \right)^2}{J_{CM} \left( \frac{\Phi_{2M}}{\alpha_M} \right)^2} = \frac{J_{BH} \left( \frac{\Phi_{3H}}{\alpha_H} \right)^2}{J_{BM} \left( \frac{\Phi_{3M}}{\alpha_M} \right)^2} = \frac{J_{DH} \left( \frac{\Phi_{4H}}{\alpha_H} \right)^2}{J_{PM} \left( \frac{\Phi_{3M}}{\alpha_M} \right)^2} = \frac{m_{5H} \left[ \left( \frac{x_{5H}}{\alpha_H} \right)^2 + \left( \frac{y_{5H}}{\alpha_H} \right)^2 \right]}{m_{5M} \left[ \left( \frac{x_{5M}}{\alpha_M} \right)^2 + \left( \frac{y_{5M}}{\alpha_M} \right)^2 \right]} = \frac{J_{PH} \left( \frac{\Phi_{6H}}{\alpha_H} \right)^2}{J_{PM} \left( \frac{\Phi_{6M}}{\alpha_M} \right)^2}. \quad (8)$$

Виразимо всі фізичні величини, які входять до складу рівнянь (3) та (4), використовуючи коефіцієнти подібності, а також залежності між відповідними фізичними величинами натурального крана та його моделі

$$\begin{aligned} J_{\alpha H} &= J_{OH} = J_{CH} = J_{BH} = \\ &= J_{DH} = J_{PH} = \lambda_J J_{\alpha M}; \\ \alpha_H &= \Phi_{2H} = \Phi_{3H} = \Phi_{4H} = \lambda_\alpha \alpha_M; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_H &= \lambda_M M_M; \quad \omega_H = \lambda_\omega \omega_M; \\ m_{1H} &= m_{2H} = m_{3H} = m_{4H} = m_{5H} = \lambda_m m_M; \\ y_{1H} &= x_{2H} = y_{2H} = y_{3H} = \\ &= y_{4H} = y_{5H} = x_{5H} = \lambda_y y_M, \end{aligned} \quad (9)$$

де  $\lambda_J$ ,  $\lambda_M$ ,  $\lambda_\omega$ ,  $\lambda_\alpha$ ,  $\lambda_m$ ,  $\lambda_y$  – коефіцієнти подібності відповідно для моменту інерції, рушійного моменту, кутової швидкості, кутової координати, маси, довжини (лінійної координати).

Підставивши співвідношення (9) у складові виразу (7) отримаємо комплекси критеріїв подібності

$$\begin{aligned} \frac{\lambda_J J_{\alpha M} \frac{\lambda_\omega \omega_M}{\lambda_\alpha \alpha_M}}{J_{\alpha M} \frac{\omega_M}{\alpha_M}} &= \lambda_J \frac{\lambda_\omega}{\lambda_\alpha}; \\ \frac{\lambda_M M_M \frac{\lambda_\alpha \alpha_M}{\lambda_\alpha \alpha_M}}{\frac{\lambda_\omega \omega_M}{M_M \frac{\Phi_{6M}}{\alpha_M}}} &= \frac{\lambda_M}{\lambda_\omega}; \\ \frac{\lambda_m m_M \frac{\lambda_y y_M}{\lambda_\alpha \alpha_M}}{\frac{\lambda_\omega \omega_M}{m_{1M} \frac{y_{1M}}{\alpha_M}}} &= \frac{\lambda_m \lambda_y}{\lambda_\alpha \lambda_\omega}. \end{aligned} \quad (10)$$

Згідно із першою теоремою подібності [5], знайдені критерії подібності прирівняємо між собою, в результаті чого будемо мати

$$\lambda_J \frac{\lambda_\omega}{\lambda_\alpha} = \frac{\lambda_M}{\lambda_\omega} = \frac{\lambda_m \lambda_y}{\lambda_\alpha \lambda_\omega}. \quad (11)$$

Враховуючи останні рівності, складемо систему рівнянь для визначення коефіцієнтів подібності

$$\begin{cases} \lambda_J \frac{\lambda_\omega}{\lambda_\alpha} = \frac{\lambda_M}{\lambda_\omega}; \\ \lambda_J \frac{\lambda_\omega}{\lambda_\alpha} = \frac{\lambda_m \lambda_y}{\lambda_\alpha \lambda_\omega}; \\ \frac{\lambda_M}{\lambda_\omega} = \frac{\lambda_m \lambda_y}{\lambda_\alpha \lambda_\omega}. \end{cases} \quad (12)$$

Вказана система рівнянь складається із трьох комплексних критеріїв подібності, до складу яких входить шість коефіцієнтів подібності. Враховуючи кількість рівнянь, не один із коефіцієнтів не може бути знайдений із системи. Тому деякі коефіцієнти подібності потрібно задати конструктивно.

Підставивши співвідношення (9) у рівність (8) та провівши деякі спрощення, отримуємо вираз для визначення коефіцієнта подібності для моменту інерції реальної стрілової системи та її моделі

$$\lambda_J = \lambda_m \frac{\lambda_y^2}{\lambda_\alpha^2}. \quad (13)$$

Знайдемо коефіцієнт подібності для маси, враховуючи п'яте співвідношення (9)

$$\lambda_m = \frac{m_H}{m_M} = \frac{12650}{10,540} = 1200, \quad (14)$$

де  $m_H = 12650 \text{ кг}$  – маса стріли реальної стрілової системи крана;

$m_M = 12,65 \text{ кг}$  – маса стріли моделі стрілової системи.

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

При створенні моделі шарнірно-зчленованої стрілової системи є важливим визначення коефіцієнту подібності довжини ланок, тому що саме від співвідношення довжини стріли, хобота, відтяжки і контрхобота залежить наскільки траєкторія переміщення вантажу буде близькою до прямої руху кінця хобота

$$\lambda_y = \frac{L_H}{L_M} = \frac{25760}{1610} = 16, \quad (15)$$

де  $L_H = 25760 \text{ мм}$  – довжина стріли реальної стрілової системи;

$L_M = 1610 \text{ мм}$  – довжина стріли моделі.

Підставимо результати (14) і (15) у вираз (13), в результаті отримуємо числове значення коефіцієнта подібності для моменту інерції:

$$\lambda_J = 1200 \frac{16^2}{1^2} = 307200. \quad (16)$$

Із другого рівняння системи (12) знайдемо вираз для знаходження коефіцієнта подібності кутової швидкості стріли

$$\lambda_\omega = \sqrt{\frac{\lambda_m \lambda_I}{\lambda_J}}. \quad (17)$$

Підставивши в залежність (17) значення знайдених коефіцієнтів, отримуємо числове значення коефіцієнта подібності для кутової швидкості стріли

$$\lambda_\omega = \sqrt{\frac{1200 \cdot 16}{307200}} = 0,25. \quad (18)$$

За допомогою визначених значень коефіцієнтів подібності (14-16), (18) визначимо деякі технічні характеристики моделі стрілової системи:

– кутова швидкість стріли

$$\omega_M = \frac{\omega_H}{\lambda_\omega} = \frac{0,024}{0,25} = 0,096 \text{ с}^{-1}; \quad (19)$$

– довжина зміни вильоту

$$\Delta S_M = \frac{\Delta S_H}{\lambda_y} = \frac{22}{16} = 1,4 \text{ м}; \quad (20)$$

– середній час зміни вильоту від мінімального до максимального

$$\Delta t = \frac{\Delta \alpha_M}{\omega_M} = \frac{0,628}{0,096} = 7 \text{ с}; \quad (21)$$

– кут нахилу стріли при зміні вильоту

$$\alpha = 40^\circ \dots 76^\circ,$$

– довжина хобота

$$l_M = \frac{l_H}{\lambda_y} = \frac{10,16}{16} = 0,635 \text{ м}; \quad (22)$$

– довжина контрхобота

$$r_M = \frac{r_H}{\lambda_y} = \frac{2,51}{16} = 0,157 \text{ м}; \quad (23)$$

– довжина відтяжки

$$R_M = \frac{R_H}{\lambda_y} = \frac{21,33}{16} = 1,333 \text{ м}; \quad (24)$$

– довжина підвісу вантажу

$$H_M = \frac{H_H}{\lambda_y} = \frac{14,7}{16} = 0,919 \text{ м}; \quad (25)$$

– маса хобота у зборі із контрхоботом

$$m_{2M} = \frac{m_{2H}}{\lambda_M} = \frac{5423}{1200} = 4,52 \text{ кг}; \quad (26)$$

– маса відтяжки

$$m_{3M} = \frac{m_{3H}}{\lambda_M} = \frac{3114}{1200} = 2,59 \text{ кг}; \quad (27)$$

– маса противаги

$$m_{4M} = \frac{m_{4H}}{\lambda_M} = \frac{13525}{1200} = 11,27 \text{ кг}; \quad (28)$$

– середня маса вантажу

$$m_{5M} = \frac{m_{5H}}{\lambda_M} = \frac{20000}{1200} = 16,67 \text{ кг}. \quad (29)$$

У розрахунках (19-29) було знайдено основні кінематичні та інерційні характеристики створюваної моделі стрілової системи крана. За отриманими результатами побудована діюча фізична модель натурної



Рис.3. Загальний вигляд фізичної моделі стрілової системи крана

стрілової системи крана МАРК 40 (рис.3).

Маючи довжину зміни вильоту (20) та середній час зміни вильоту (21) отримуємо середню швидкість горизонтального переміщення вантажу

$$v_M = \frac{\Delta S_M}{\Delta t} = \frac{1,4}{7} = 0,2 \frac{\text{м}}{\text{с}}. \quad (30)$$

Лінійна швидкість руху тяги механізму зміни вильоту

$$v_p = \omega_M b = 0,096 \cdot 0,37 = 0,036 \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad (31)$$

де  $b = 0,37 \text{ м}$  – тягове плече стріли.

Кутова швидкість шестерні рейкового механізму

$$\omega_{III} = \frac{2v_p}{d_{III}} = \frac{2 \cdot 0,036}{0,09} = 0,811 \text{ с}^{-1}, \quad (32)$$

де  $d_{III} = 0,09 \text{ м}$  – ділительний діаметр шестерні.

Кутова швидкість ротора електродвигуна механізму зміни вильоту

$$\omega_{ов} = \frac{\pi n}{30} = \frac{\pi \cdot 1380}{30} = 144,4 \text{ с}^{-1}, \quad (33)$$

де  $n = 1380 \text{ об}^{-1}$  – частота обертання ротора електродвигуна.

Загальне передаточне число механізму зміни вильоту

$$i = \frac{\omega_{ов}}{\omega_{III}} = \frac{144,4}{0,811} = 178,1 \text{ с}^{-1}. \quad (34)$$

Всі кінематичні та інерційні характеристики створюваної моделі зведено у табл.1. Також, для порівняння, в табл. 1 приведені основні технічні характеристики натурної стрілової системи крана МАРК 40.

Основними виконавчими механізмами створеної моделі є рейковий механізм зміни вильоту та механізм підйому вантажу.

Оскільки створена фізична модель призначена для дослідження динаміки руху стрілової системи, то основна увага приділяється забезпеченню відповідності між механізмом зміни вильоту натурального крана та його моделі.

Загальний вигляд механізму зміни вильоту моделі стрілової системи приведений на рис. 4, а його основні кінематичні характеристики визначені у виразах (30-34).

Таблиця порівняння характеристик натурної стрілової системи та її моделі

Характеристики	Параметри натурної стрілової системи	Параметри моделі стрілової системи
Кут нахилу стріли $\alpha$ , °	40...76	40...76
Виліт стрілової системи $\Delta S$ , м	22	1,4
Середня кутова швидкість стріли $\omega$ , $c^{-1}$	0,024	0,096
Середній час зміни вильоту $\Delta t$ , с	22,86	7,0
Довжина, м: – стріли $L$ – хобота $l$ – контрхобота $r$ – відтяжки $R$ – підвісу вантажу $H$	25,76 10,16 2,51 21,33 14,7	1,61 0,635 0,157 1,333 0,919
Середня швидкість горизонтального переміщення вантажу $v$ , м/с	1,05	0,2
Ділильний діаметр шестерні рейкового механізму $d_{ш}$ , м	0,35	0,09
Загальне передаточне число механізму зміни вильоту $i$	212	178,1
Середня кутова швидкість шестерні рейкового механізму $\omega_{ш}$ , $c^{-1}$	0,482	0,811
Потужність електродвигуна механізму зміни вильоту $N$ , кВт	20	0,18
Номінальна кутова швидкість ротора електродвигуна $\omega_H$ , $c^{-1}$	102,1	144,4
Маса ланок, кг: – стріли $m_1$ – хобота у зборі з контрхоботом $m_2$ – відтяжки $m_3$ – противаги $m_4$	12650 5423 3114 13525	12,65 4,52 2,59 11,27
Середня вантажопідйомність $m_5$ , кг	20000	16,67

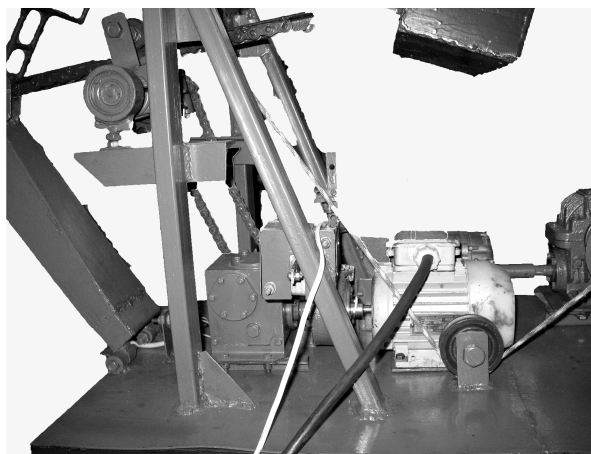


Рис.4. Загальний вигляд механізму зміни вильоту стрілової системи моделі

### Висновки

Розглянуто основні принципи створення фізичної моделі стрілової системи порталного крана, при створенні якої користуються механічною подібністю. Виходячи з цього основним рівнянням для визначення критеріїв подібності натурної стрілової системи та її моделі є рівняння руху стрілової системи під час зміни вильоту.

При визначенні критеріїв та коефіцієнтів подібності було виявлено, що коефіцієнти 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. Так, порівнюючи характеристики моделі та натурної стрілової системи (табл. 1), виявлено, що модель має менші геометричні розміри, однак кінематичні характеристики мають більші значення.

Зокрема суттєво збільшилися швидкість переміщення вантажу та кутові швидкості електродвигуна та стріли. Це пов'язано з тим, що при дослідженні динаміки руху повинна забезпечуватись відповідність динамічних явищ, які проходять у моделі та натурній стріловій системі.

### Література

1. Орлов П.И. Основы конструирования. Справочно-методическое пособие: в 2 кн. [Кн. 1] / П.И.Орлов. – М. : Машиностроение, 1988. – 560 с.
2. 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.
3. Ланг А.Г. Портальные краны / А.Г.Ланг, И.С.Мазовер, В.С.Майзель. – Москва, Ленинград : Машгиз, 1962. – 284с.
4. Святославский А. Украинские «Марки» для украинских портов / А.Святославский // Транспорт. – 2004. – №22. – С. 11–15.
5. Ловейкин В.С. Теория технических систем : [навч. посібник] / В.С.Ловейкін, І.І.Назаренко, О.Г.Онищенко.– Київ, Полтава:ІЗМН–ПДТУ, 1998. – 176 с.
6. 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.
7. Хубка В. Теория технических систем / В.Хубка. ; пер. с нем. – М. : Мир, 1987. – 208 с.
8. Персов Б.З. Расчет и проектирование экспериментальных установок / Б.З.Персов. – Москва, Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2006. – 348 с.
9. Серлин Л.Г. Оптимизация крановых конструкций и их автоматическое проектирование : [учеб. пособие] / Л.Г.Серлин, А.Н.Орлов. – Л. ; 1985. – 85 с.
10. Ловейкин В.С. Кінематичний синтез шарнірно-зчленованих стрілових систем кранів з горизонтальним переміщенням вантажу / В.С.Ловейкін, Д.А.Паламарчук // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2005. – №66. С. 28–33.
11. Александров М.П. Подъемно-транспортные машины : [учеб. для машиностроит. спец. вузов] / М.П. Александров. – М. : Высшая школа, 1985. – 520 с.

Рецензент: М.Г. Діктерук, к.т.н., доцент (КНУБА, Київ)

Отримано: 17.02.2010 р.