

УДК 621. 87

В.С. Ловейкін, докт. техн. наук  
О.Г. Шевчук, студ

## ОПТИМІЗАЦІЯ ДИНАМІЧНОГО РЕЖИМУ ПУСКУ ШАРНІРНО-ЗЧЛЕНОВАНОЇ СТІЛОВОЇ СИСТЕМИ БАШТОВОГО КРАНА

**Постановка проблеми.** Баштові крани з шарнірно-зчленованою стріловою системою (рис.1) використовуються для висотного будівництва. Стріла таких кранів складається з основної та допоміжної секцій. Основна секція з'єднана з баштою шарніром і повертається відносно нього на кут  $90^\circ$ , з іншого боку до неї приєднана допоміжна секція, яка знаходиться завжди в горизонтальному положенні за рахунок приєданого чотириланкового механізму. По допоміжній секції стріли рухається вантажна каретка.

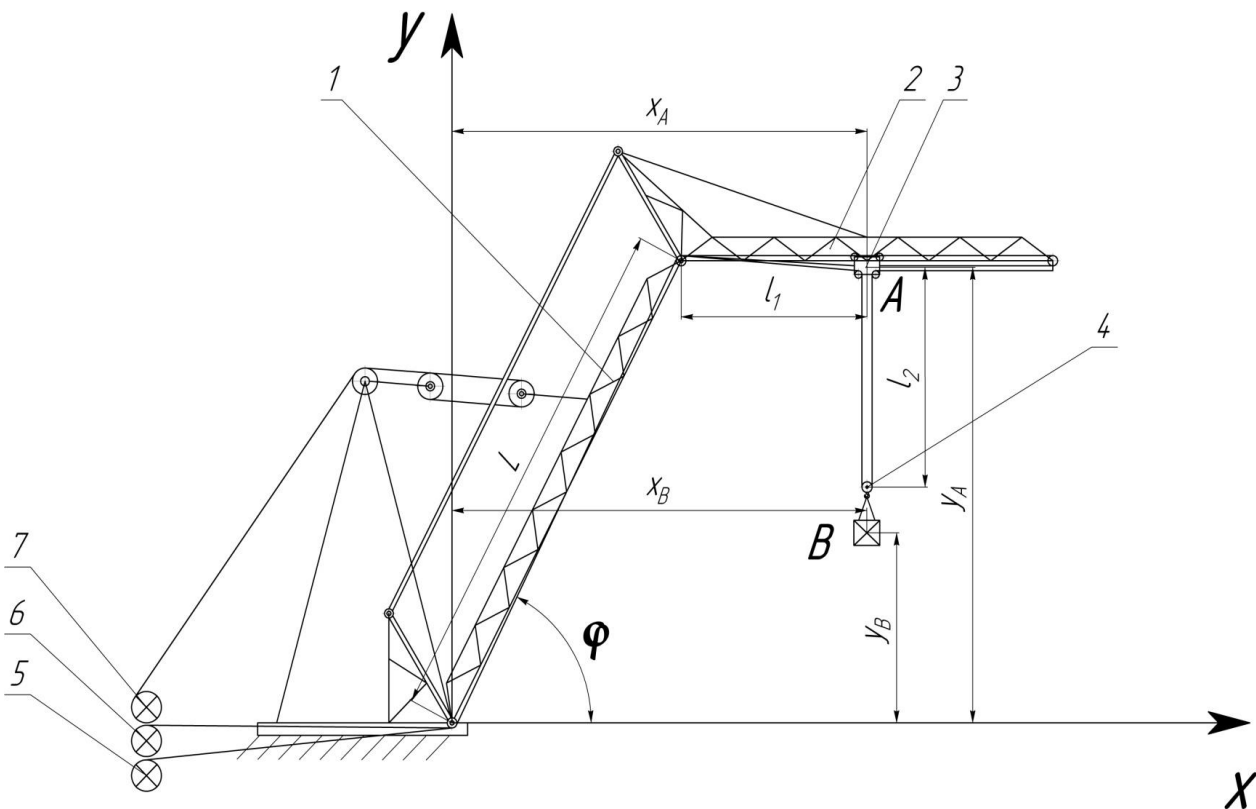


Рисунок 1. Шарнірно-зчленована стрілова система баштового крана:

1-основна секція стріли; 2-допоміжна секція стріли; 3-вантажна каретка; 4-захватний пристрій; 5-привід механізму підйому вантажу; 6-привід переміщення вантажної каретки; 7-привід механізму підйому стрілової системи.

В процесі пуску стрілової системи виникають коливання вантажу, які створюють додаткові динамічні навантаження, що передаються на стрілову систему і весь кран[1,2].. Також динамічні навантаження виникають і за рахунок відцентрових сил. Ці навантаження є досить небезпечними, бо стрілова система є досить громісткою і знаходиться на значній висоті. Зменшення цих навантажень дозволить покращити роботу баштових кранів з шарнірно-зчленованою стріловою системою, підвищити надійність, довговічність, та дасть змогу застосовувати приводи меншої потужності.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Проблемі усунення коливань вантажу в процесі зміни вильоту крана з вантажною кареткою або шарнірно-зчленованою стріловою системою присвячено значну кількість праць, серед яких можна виділити такі [3 – 8]. Однак сумісна дія переміщення вантажної каретки і зміни положення стрілової системи в процесі зміни вильоту вантажу не розглядалась. Крім того, оптимізація динамічного режиму пуску здійснювалась тільки за кінематичними критеріями [9].

**Мета роботи.** Мета даної роботи полягає у визначенні режиму пуску який забезпечує мінімальну динамічну складову потужності приводу.

**Виклад основного матеріалу.** Оптимальний режим пуску стрілової системи може бути отриманий в результаті мінімізації інтегрального функціоналу [10]:

$$I_V = \int_0^{t_1} V dt \rightarrow \min, \quad (1)$$

де  $t$  – час,  $t_1$  – тривалість пуску механізму підйому стріли,  $V$  – «енергія» прискорень стрілової системи. Цей критерій відображає динамічну складову потужності приводного механізму [11].

Для шарнірно-зчленованої стрілової системи складемо функцію «енергії» прискорень вважаючи що вантажна каретка не переміщується відносно допоміжної секції стріли

$$V = \frac{1}{2} J_0 \ddot{\varphi}^2 + \frac{1}{2} m_1 (\ddot{x}_A^2 + \ddot{y}_A^2) + \frac{1}{2} m_2 (\ddot{x}_B^2 + \ddot{y}_B^2), \quad (2)$$

де  $J_0$  – момент інерції основної секції стріли;  $\varphi$  – кутова координата переміщення основної секції стріли;  $m_1$  – зведена маса допоміжної секції стріли і вантажної каретки;  $m_2$  – маса вантажу;  $x_A, y_A$  – зведені координати центру мас допоміжної секції стріли і вантажної каретки;  $x_B, y_B$  – координати центру мас вантажу.

Виразимо координати  $x_A, y_A, x_B, y_B$  через кутову координату переміщення основної секції стріли  $\varphi$  і візьмемо першу та другу похідні за часом від цих координат, в результаті чого отримаємо:

$$\begin{aligned} x_A &= L \cos \varphi + l_1; & \dot{x}_A &= -\dot{\varphi} L \sin \varphi; & \ddot{x}_A &= -\ddot{\varphi} L \sin \varphi - \dot{\varphi}^2 L \cos \varphi; \\ y_A &= L \sin \varphi; & \dot{y}_A &= \dot{\varphi} L \cos \varphi; & \ddot{y}_A &= \ddot{\varphi} L \cos \varphi - \dot{\varphi}^2 L \sin \varphi; \\ x_B &= L \cos \varphi + l_1; & \dot{x}_B &= -\dot{\varphi} L \sin \varphi; & \ddot{x}_B &= -\ddot{\varphi} L \sin \varphi - \dot{\varphi}^2 L \cos \varphi; \\ y_B &= L \sin \varphi - l_2; & \dot{y}_B &= \dot{\varphi} L \cos \varphi; & \ddot{y}_B &= \ddot{\varphi} L \cos \varphi - \dot{\varphi}^2 L \sin \varphi; \end{aligned} \quad (3)$$

де  $L$  – довжина основної секції стріли;  $l_1$  – горизонтальна координата центра мас каретки відносно осі шарніра з'єднання основної та допоміжної секції стріли;  $l_2$  – довжина підвісу вантажу.

Підставимо другі похідні від цих координат у вираз (2) і проведемо необхідні перетворення. Після чого будемо мати:

$$V = \frac{1}{2} J_0 \ddot{\varphi}^2 + \frac{1}{2} (m_1 + m_2) L^2 (\ddot{\varphi}^2 + \dot{\varphi}^4). \quad (4)$$

Критерій представляє собою інтегральний функціонал, умовою мінімуму якого є рівняння Пуассона [12]

$$\frac{\partial V}{\partial \varphi} - \frac{d}{dt} \frac{\partial V}{\partial \dot{\varphi}} + \frac{d^2}{dt^2} \frac{\partial V}{\partial \ddot{\varphi}} = 0. \quad (5)$$

Після підстановки функції  $V$  в рівняння Пуассона отримаємо нелінійне диференціальне рівняння четвертого порядку:

$$\varphi^{IV} - 6 \frac{(m_1 + m_2) L^2}{J_0 + (m_1 + m_2) L^2} \dot{\varphi}^2 \ddot{\varphi} = 0. \quad (6)$$

Розв'яжемо це рівняння чисельним методом за таких вихідних даних:



$J_0 = 2812 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$  – момент інерції основної секції стріли,  $m_1 = 300 \text{ кг}$  – зведена маса допоміжної секції стріли і вантажної каретки,  $m_2 = 10000 \text{ кг}$  – маса вантажу,  $L = 15 \text{ м}$  – довжина основної секції стріли;

при таких краєвих умовах:

$$t = 0: \varphi(t) = \varphi_0, \dot{\varphi}(t) = 0;$$

$$t = t_p: \dot{\varphi}(t_p) = \omega, \ddot{\varphi}(t_p) = 0,$$

де  $\varphi_0 = 0$  – початкове значення кута переміщення основної секції стріли,  $t_p = 3 \text{ с}$  – час розгону системи,  $\omega = 0,04 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$  – кутова швидкість при усталеному режимі руху. В результаті розв'язку (6) отримуємо результати які зведемо в таблицю.

Таблиця 1.  
Розв'язок рівняння (6)

| t    | $\varphi$ | $\dot{\varphi}$ | $\ddot{\varphi}$ |
|------|-----------|-----------------|------------------|
| 0    | 0         | 0,00076         | 0                |
| 0,05 | 0,0000446 | 0,0012          | 0,0165           |
| 0,1  | 0,0001298 | 0,0022          | 0,0324           |
| 0,15 | 0,000287  | 0,0039          | 0,0275           |
| 0,2  | 0,000513  | 0,0052          | 0,0226           |
| 0,25 | 0,000798  | 0,0063          | 0,0234           |
| 0,3  | 0,00114   | 0,0075          | 0,0243           |
| 0,35 | 0,00154   | 0,0086          | 0,0234           |
| 0,4  | 0,00201   | 0,0098          | 0,0226           |
| 0,5  | 0,0031    | 0,012           | 0,0219           |
| 1    | 0,012     | 0,022           | 0,0175           |
| 1,5  | 0,025     | 0,029           | 0,0131           |
| 2    | 0,041     | 0,035           | 0,0087           |
| 2,5  | 0,059     | 0,038           | 0,0043           |
| 3    | 0,079     | 0,039           | 0                |

На основі даних таблиці побудовано графіки зміни кутової координати зміни кутової координати, швидкості та прискорення основної секцій стріли (рис. 2), які забезпечують оптимальний динамічний режим пуску стрілової системи з урахуванням відцентрових сил, що діють на стрілову систему. Крім того, аналітично розв'язано рівняння (6) без врахування відцентрових сил, яке дає розв'язок у наступному вигляді:

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= \varphi_0 + \omega \cdot \left(1 - \frac{t}{3 \cdot t_p}\right) \cdot \frac{t^2}{t_p}; \\ \dot{\varphi}(t) &= \omega \cdot \left(2 - \frac{t}{t_p}\right) \cdot \frac{t}{t_p}; \\ \ddot{\varphi}(t) &= 2\omega \cdot \left(1 - \frac{t}{t_p}\right) \cdot \frac{1}{t_p}. \end{aligned} \quad (7)$$

На основі залежностей (7) для тієї ж стрілової системи побудовані графіки зміни цих характеристик, які наведені на рис. 2 і показані пунктирною лінією. З отриманих графіків видно, що вплив відцентрових сил є незначним і проявляє себе лише в початковій стадії пуску в межах до 0,4с. Більш повно цю стадію пуску показано на рис. 3.

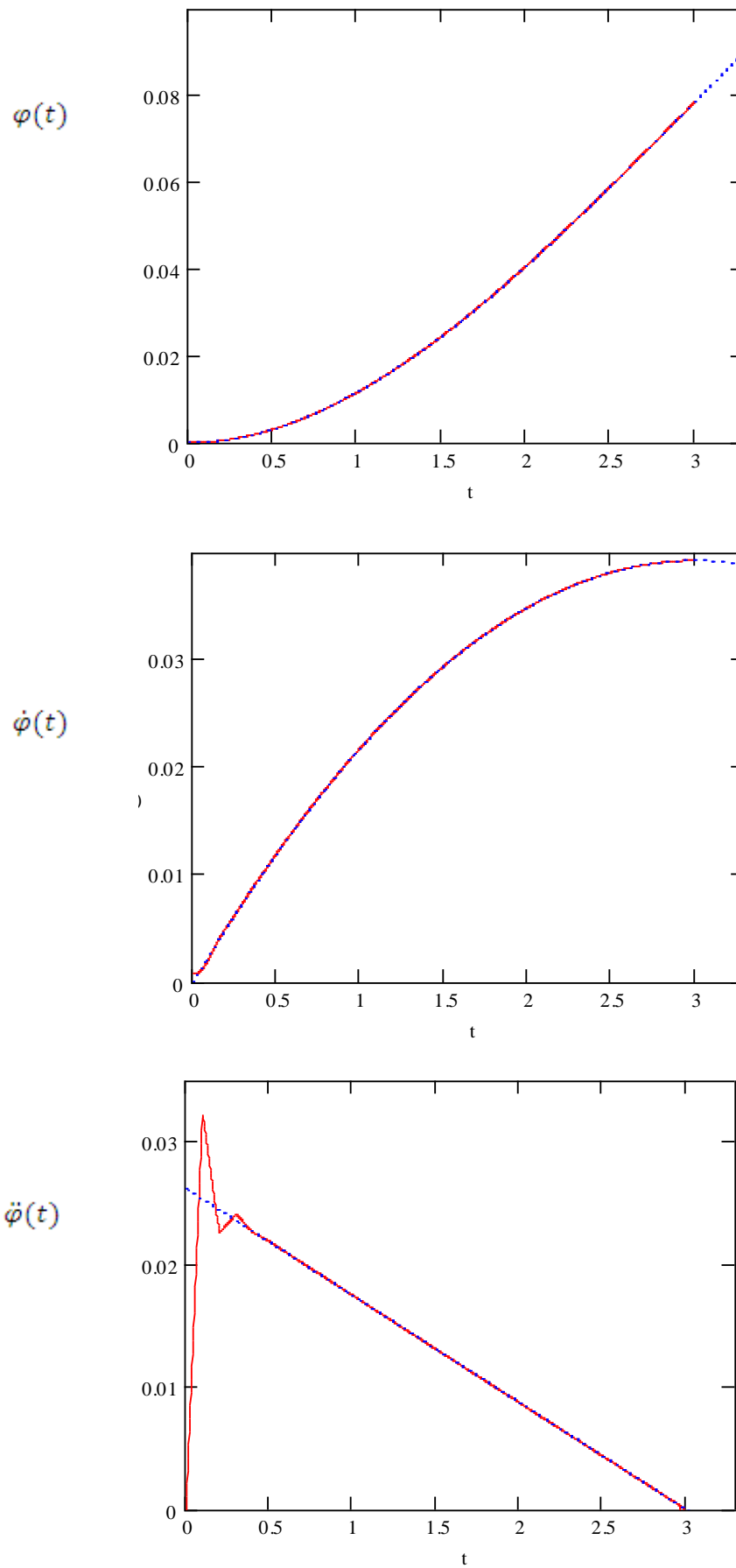


Рисунок 2. Графіки зміни кутової координати, швидкості та прискорення основної секції стріли.

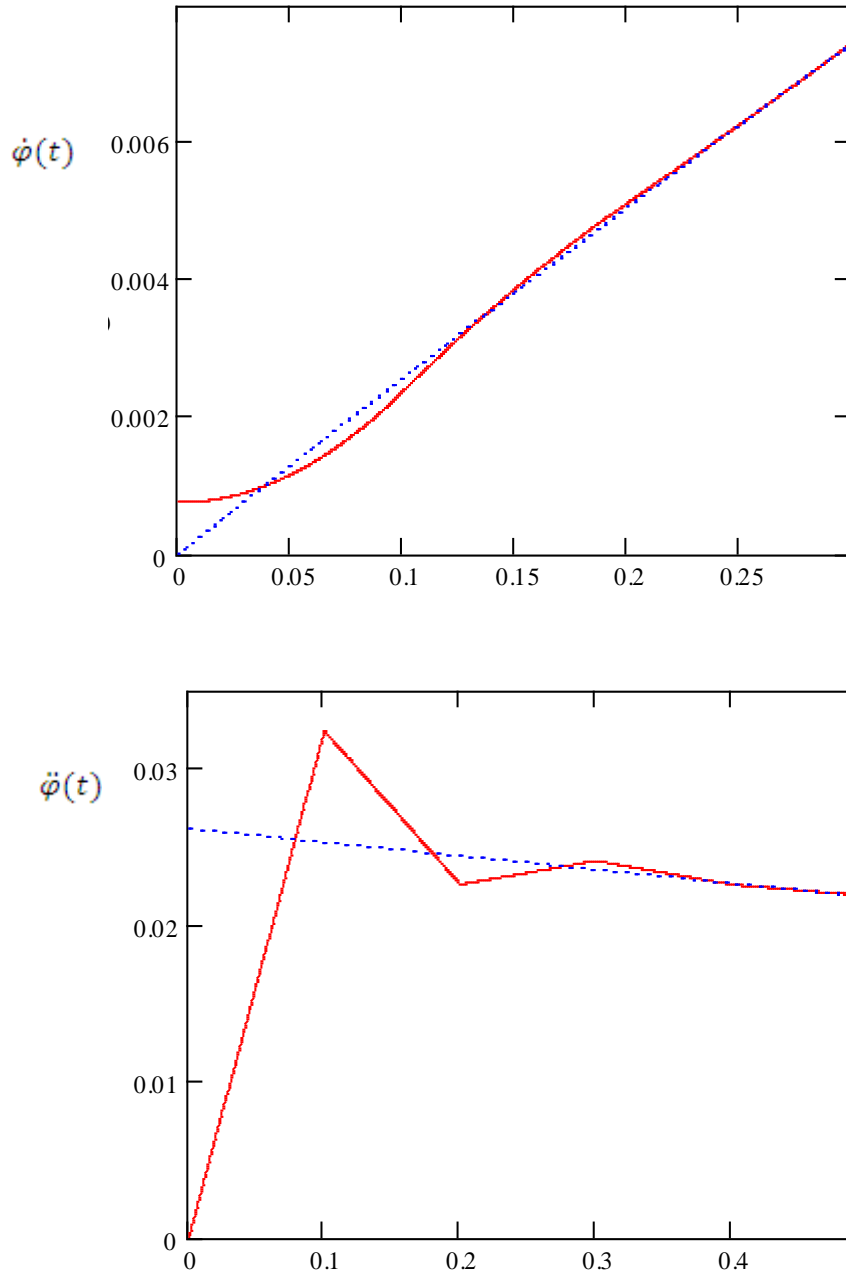


Рисунок 3. Графіки зміни кутової швидкості та прискорення основної секції стріли в межах до 0,4с.

**Висновки.** Аналіз проведених досліджень динаміки пуску шарнірно-зчленованої стрілової системи показав що вплив, відцентрових сил, які діють на стрілову систему, є незначним. В процесі оптимального пуску за динамічним критерієм з урахуванням відцентрових сил виявлено, що для забезпечення цього режиму необхідна деяка незначна початкова швидкість стрілової системи, що не відповідає початковим умовам руху із стану спокою. В початковий момент пуску до 0,4 с спостерігається незначне коливання прискорення, що може викликати додаткові динамічні навантаження коливального характеру. Разом з тим початкове прискорення при цьому режимі дорівнює нулю, що

сприяє плавному пуску. Для оптимального динамічного режиму пуску може бути використано модель стрілової системи без врахування відцентрових сил.

### *Література*

1. Аксенов Л.Б. Синтез системы для гашения колебаний груза // *Подъемно-транспортные машины*. – Тула, 1981.- Вып.10. – с.66-69.
2. Перельмутер М.М. , Пляков Л.Н. Устранение колебаний груза, подвешенного к крановой тележке, воздействием на него электроприводом // *Изв.вузов. Электромеханика*. – 1971. - № 7. – с.769-774
3. Черноусько Ф.Л. , Акуленко Л.Д. , Соколов Б.Н. Управление колебаниями. – М. : Наука, 1980. – 384с.
4. Жилин В.А. , Кибрик Л.И. , Колодный И.Д. Оптимальное управление грузом на гибком подвесе // *Приборостроение*. – Пермь, 1976. – с. 60-68.
5. Рунов М.Н. Гашение колебаний груза при торможении крановой тележки ступенчатым тормозным моментом // *Изв.вузов Машиностроение*. – 1970. - № 12. – с. 121-125.
6. Кустовой В.Н. Влияние систем гашения колебаний груза на производительность крана // *Экон.орг. и управление на мор.транспорте*. – М. , 1985. – с. 125-127.
7. Смехов А.А. , Ерофеев Н.И. Оптимальное управление подъемно-транспортными механизмами. – М. : Машиностроение, 1975. – 239 с.
8. Ловейкін В.С. Синтез оптимальних режимів руху механізмів вантажопідйомних машин: Автореф.дис. . . д-ра тех.наук. – Харків: ХІПІ, 1994. – 32 с.
9. В.С. Ловейкин Расчеты оптимальных режимов движения механизмов строительных машин. – Киев: УМК ВО, 1990. – 168с.
10. Ловейкин В.С. Расчеты оптимальных режимов движения механизмов строительных машин. – Киев: УМК ВО, 1990. – 168с.
11. Лобов Н.А. Динамика грузоподъемных кранов. М. : Машиностроение, 1987. – 160с.
12. Цлаф Л.Я. Вариационное исчисление и интегральные уравнения. – М.: Наука, 1970
13. Григоров О.В., Ловейкін В.С. Оптимальне керування рухом механізмів вантажопідйомних машин: Навч.посібник. – К. : ІЗМН, 1997. -264с.