



УДК 62-50

КОМПЛЕКСНИЙ СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ РУХОМ ВАНТАЖОПІДЙОМНОГО КРАНА

ШАХ О.М.

*Студент 3 курсу факультет інженерії агробіосистем, спеціальність
«процеси, машини обладнання АПК»*

*Науковий керівник РОМАСЕВИЧ Ю.О., к. т. н. ВП Національного
університету біоресурсів та природокористування України «Ніжинський
агротехнічний інститут»*

Приведено синтез оптимального керування рухом механізмів підйому вантажу та горизонтального переміщення візка вантажопідйомного крана протягом його гальмування. Рух візка здійснюється при керуванні, яке дозволяє усувати коливання вантажу. Запропоновано алгоритм роботи системи автоматичного керування рухом візка.

Оптимальні режими руху, усунення коливань вантажу, динамічне програмування, прямий варіаційний метод.

Постановка проблеми.

Робота підйомно-транспортних машин має яскраво виражений циклічний характер, при цьому перехідні режими руху їх механізмів займають значну долю від всієї тривалості робочого циклу (усталений рух може бути взагалі відсутнім). Одним з важливих резервів підвищення ефективності роботи крана є оптимізація перехідних режимів руху вантажного візка (розгін/гальмування). Варто відзначити, що продуктивність, надійність, а також зручність експлуатації кранів багато в чому залежать від коливань підвішеного на гнучкому підвісі вантажу [1,2].

Розгойдування вантажу, які виникають протягом перехідних режимів руху кранового візка, є причиною його нерівномірного руху, додаткових навантажень на елементи вантажопідйомної машини. Вони створюють незручності, які загрожують безпеці роботи, зменшують продуктивність навантажувально-розвантажувальних, транспортних та монтажних операцій. Коливання вантажу ускладнюють прицільне наведення вантажозахватного пристрою на вантаж і укладання вантажу на задане місце. Особливо це відноситься до великогабаритних і довгомірних вантажів. В значній мірі зводяться нанівець переваги автоматизації кранового механізму, оскільки коливальний характер руху вантажу вносить невизначеність у програму автоматизованої роботи крана [3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Існують три групи способів усунення коливань вантажу [4]: маневрування механізмами при ручному керуванні [5]; застосування спеціальних підвісок або направляючих [6,7]; використання систем керування приводами кранових механізмів [11-13].

Перші два способи при сучасних темпах перевантажувальних робіт не здатні забезпечити достатню якість усунення коливань вантажу: перший спосіб пов'язаний з надмірною фізичною та психологічною втомою кранівника, другий – з необхідністю зміни конструкції гнучкого підвісу, включенням до цієї



конструкції ненадійних та масивних елементів. Тому більш поширеною є третя група способів.

Усувати коливання вантажу можна керуючи його швидкістю руху, або іншим кінематичним чи динамічним параметром. Однак необґрунтований закон зміни швидкості є нераціональним. Більш доцільним є використання, наприклад, нечіткого регулювання, яке, в деякому сенсі, копіює логіку людини, її способи прийняття рішень, щодо тих чи інших впливів на рух кранових механізмів. Тому таке керування дозволяє усувати коливання вантажу навіть при зовнішніх стохастичних впливах. Це є перевагою даних методів над відомими, які приводять до програмного керування рухом механізмів крана. Однак нечіткому регулюванню властиві ті ж недоліки як і ручному: рух механізмів крана не є оптимальним.

Характер впливу на рух елементів крана повинен забезпечувати мінімізацію небажаних, або максимізацію бажаних властивостей руху системи. Така задача отримала назву варіаційної, а для її розв'язання використовують як класичні варіаційні методи [8], так і принцип максимуму Л.С. Понтрягіна [9].

Постановка мети та задач дослідження.

Результати роботи дослідників [3, 4, 10-14] мають більший чи менший ступінь загальності: деякі задачі розглядаються при ненульових фазових координатах та незмінній довжині гнучкого підвісу, іншим задачам властива така постановка – визначити оптимальне керування рухом кранового візка при умові, що на початку руху коливання вантажу відсутні і довжина гнучкого підвісу протягом розгону, або гальмування візка змінюється за певним законом.

Поставимо комплексну задачу оптимального керування рухом крана. Ця задача полягає у тому, що необхідно знайти оптимальне керування рухом кранового візка при усуненні коливань вантажу до моменту зупинки візка. Така постановка задачі дає змогу розганяти крановий візок за будь яким законом, при цьому коливання вантажу зберігаються протягом усталеного руху. Однак, як відомо, усталений рух кранового візка складає невелику частину від загальної тривалості його переміщення – він може бути навіть відсутнім. Тому доцільно поставити задачу усунення коливань вантажу саме протягом гальмування візка. Таким чином, прийемо, що вантаж на початку загальмовування коливається (ненульові початкові фазові координати системи). Необхідно зазначити, що така постановка задачі не зменшує її загальності, оскільки введенням нових фазових координат можна поставити задачу оптимального розгону крана до усталеної швидкості. Нові фазові координати системи будуть визначатись з таких залежностей:

$$\tilde{x}^{(i)} = q^{(i)} - x^{(i)}, i = 0, 1, \dots, n \quad (1)$$

де $x^{(i)}$ - фазова координата системи i -го порядку; $q^{(i)}$ - значення фазової координати $x^{(i)}$ у кінці розгону крана; n - кількість фазових координат системи. Зазначимо, що векторна функція $\tilde{x}^{(i)}$ відображає похибку досягнення певної



точки на фазовому просторі. Після закінчення перехідного процесу вона перетворюється у нуль.

Досвідчені кранівники можуть виконувати операції підйому/опускання вантажу та переміщення візка одночасно. Звичайно, це збільшує продуктивність їх роботи.

Кран, як правило, працює у недетермінованому зовнішньому середовищі, тому важливим є забезпечення оптимальності процесу при впливі стохастичних зовнішніх збурень. Для цього необхідно отримати інформацію про поточний стан системи, тобто необхідно використовувати зворотні зв'язки за різними параметрами руху. Цим вимогам відповідає метод, який отримав назву динамічного програмування [15] і який ми використаємо у дослідженнях. Крім того, оскільки електроприводи механізмів переміщення візка та вантажу мають обмежені силові характеристики, то на керування накладаються обмеження, які представляються у вигляді нерівностей.

Для досягнення поставленої мети необхідно дослідити синтез оптимального керування рухом кранового візка при його гальмуванні та з усуненням коливань вантажу закріпленого на гнучкому підвісі та з врахуванням обмежень, які накладаються на величину керування;

Виклад основного матеріалу.

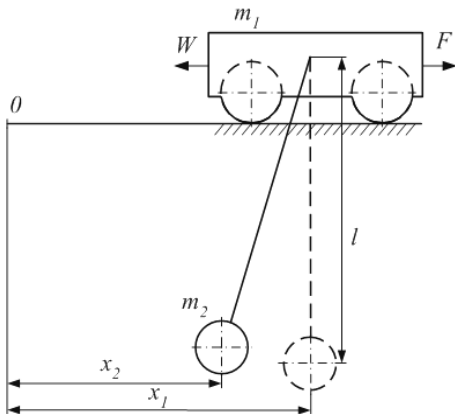


Рис. 1. Розрахункова модель системи „візок-вантаж”

Рівняння оптимального керування:

$$u = \frac{y_1[k_2\omega^2 - \sqrt{(k_2(k_1 + k_2\omega^4))}] - \sqrt{2}y_2\sqrt{k_2[\sqrt{(k_2(k_1 + k_2\omega^4))} - k_2\omega^2]}}{k_2} \quad (2)$$

де $\omega = \sqrt{\frac{(m_1 + m_2)g}{m_1l}}$ – частота власних маятникових коливань вантажу

відносно рухомої точки підвісу (відносно візка), m_1 – приведена маса приводного механізму і вантажного візка; m_2 – маса вантажу, g – прискорення вільного падіння; l – довжина гнучкого підвісу, k_1 та k_2 - коефіцієнти, які стоять при одиничних критеріях.

Розв'язок задачі Коші має такий вигляд:

$$x = \frac{e^{\frac{-Bt}{2}} [\Delta x \sqrt{B^2 - 4C} \cosh(\frac{t}{2} \sqrt{B^2 - 4C}) + (2\Delta \dot{x} + B\Delta x) \sinh(\frac{t}{2} \sqrt{B^2 - 4C})]}{\sqrt{B^2 - 4C}}$$



(3)

Приведемо графічні залежності отриманих результатів при різних значеннях вагового коефіцієнту k_1 . На рис. 2. і рис. 3. зображено графічні залежності динамічних зусиль, які діють на систему „візок-вантаж”, а також фазові портрети, які відповідають цим зусиллям. Приведені графічні залежності побудовані при таких параметрах: $m_1 = 1000$ кг, $m_2 = 2000$ кг, $l = 8$ м, $\Delta x = 0,5$ м, $\Delta \dot{x} = -0,7$ м/с, де Δx та $\Delta \dot{x}$ - відповідно різниця положень та швидкостей візка і вантажу на початку гальмування

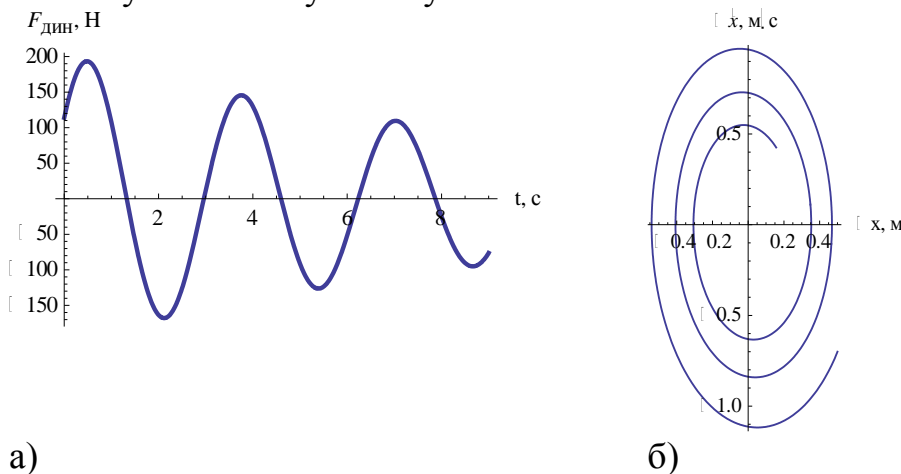


Рис. 2. Графіки динамічного зусилля (а) та фазовий портрет руху системи (б) при $k_1 = 0,1$

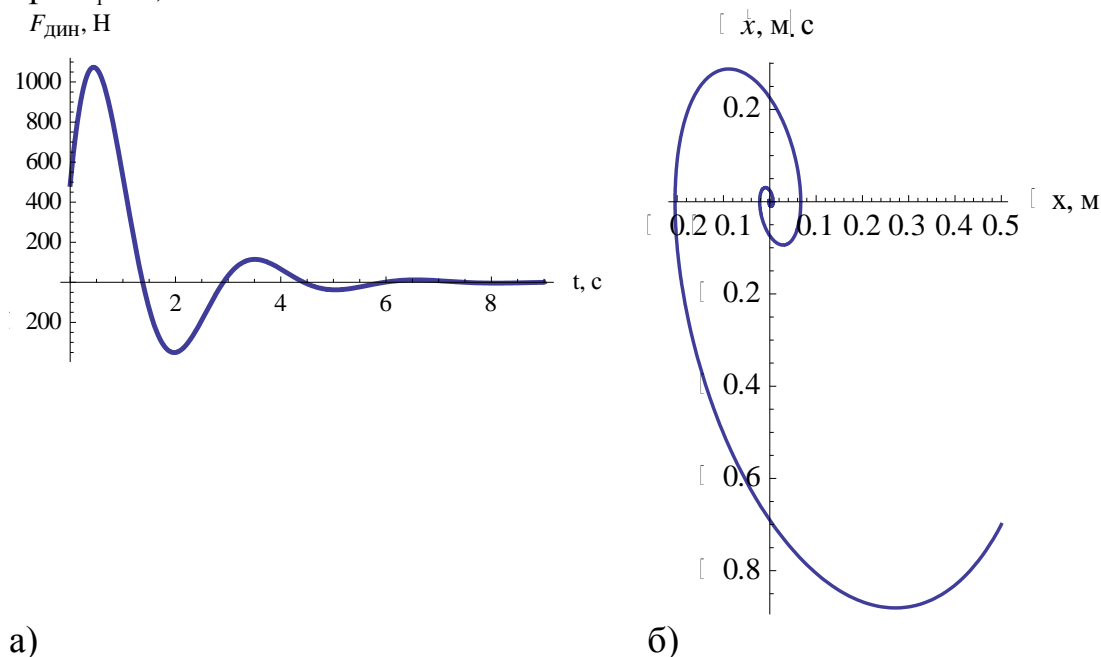


Рис. 3. Графіки динамічного зусилля (а) та фазовий портрет руху системи (б) при $k_1 = 0,9$

Аналіз приведених залежностей показує, що зі збільшенням вагового коефіцієнту k_1 затухання коливаний вантажу проходить інтенсивніше, однак це



пов'язано зі збільшенням величини динамічного зусилля. Необхідно знаходити певний компроміс між максимальною величиною динамічного приводного зусилля та швидкістю затухання коливань.

На рис. 5 показано результати розрахунків при таких параметрах: $m_1 = 1000 \text{ кг}$, $m_2 = 2000 \text{ кг}$, $l = 5 \text{ м}$, $\Delta x = 1 \text{ м}$, $\Delta \dot{x} = -1 \text{ м/с}$, $\Delta x_{\text{max}} = 0,01 \text{ м}$, $u_{\text{max}} = 0,21 \text{ м/с}^2$, що відповідає максимальному приводному зусиллю двигуна $F_{\text{max}} = 250 \text{ Н}$ (динамічна складова максимального приводного зусилля $F_{\text{max, din}} = 210 \text{ Н}$), $\Delta k_1 = 0,02$, $\Delta t = 0,01 \text{ с}$.

З приведених рисунків видно, що коливання усуваються оскільки різниця переміщень та швидкостей візка і вантажу близькі до нуля. Максимальне зусилля не перевищує встановлених меж, а його характер зміни не має розривів. Тому динамічні навантаження у елементах крана та його приводі зменшуються. Крім того, можна навмисно збільшувати плавність зміни гальмівного зусилля для зменшення динамічних навантажень, свідомо відхиляючись від оптимальної траєкторії руху. Однак це виправдане відхилення, оскільки воно дозволяє перевести роботу крана у менш напружений режим. Що стосується умов усунення коливань вантажу при такому „пом'якшенні” режиму руху, то вони будуть виконані, оскільки керування отримане за допомогою динамічного програмування дозволяє досягати мети керування при зовнішніх впливах на систему, а таку свідому зміну керування можна розглядати як зовнішній стохастичний вплив.

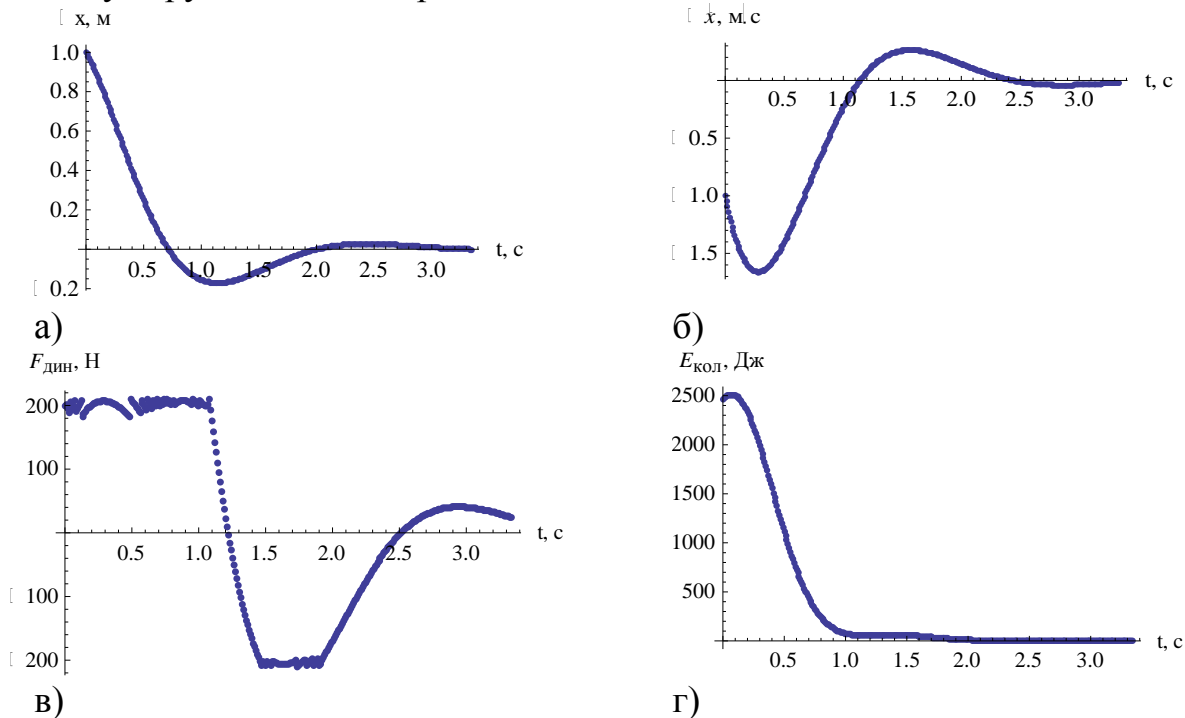


Рис. 5. Графіки функцій різниці переміщень (а) та різниці швидкостей (б) візка і вантажу, динамічного зусилля (в), енергії коливань вантажу (г)

Недоліком отриманого оптимального керування є те, що довжина гнучкого підвісу залишається незмінною у часі – це не дозволяє поєднувати дві



операції: переміщення візка та піднімання/опускання вантажу, що у свою чергу збільшує тривалість переміщення вантажу з одного положення у інше.

Висновок.

На основі проведених досліджень можна зробити певні висновки.

1. Використання методу динамічного програмування та прямого варіаційного методу дає змогу здійснити оптимізацію режиму гальмування візка крана зі змінною довжиною гнучкого підвісу, причому характер оптимального керування рухом візка у горизонтальному напрямку є плавним, а абсолютне значення керування не перевищує встановлені межі. Це зменшує динамічні навантаження у механізмі переміщення візка.
2. Недоліком оптимального керування рухом системи „візок-вантаж” є слабе керування у кінці гальмування, коли енергія коливань є невеликою.