

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

Розробка мехатронних систем керування рухом кранового механізму з гнучким підвісом вантажу (для наукових співробітників, аспірантів, інженерів, конструкторів, які займаються проектуванням, розробкою та випробуванням сучасної сільськогосподарської техніки)

**МІНІСТЕРСТВО АГРАРНОЇ ПОЛІТИКИ ТА ПРОДОВОЛЬСТВА УКРАЇНИ
ДЕПАРТАМЕНТ НАУКОВО-ОСВІТНЬОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АПВ
ТА РОЗВИТКУ СІЛЬСЬКИХ ТЕРИТОРІЙ
НАУКОВО-МЕТОДИЧНИЙ ЦЕНТР АГРАРНОЇ ОСВІТИ**

ПОГОДЖЕНО

**Директором Департаменту
землеробства
Міністерства аграрної політики
та продовольства України**

ЗАТВЕРДЖЕНО

**Директором Департаменту науково-
освітнього забезпечення АПВ
та розвитку сільських територій
Міністерства аграрної політики
та продовольства України**

“ 29 ” грудня 2011 р.

“ 29 ” грудня 2011 р.

**Розробка мехатронних систем керування рухом кранового
механізму з гнучким підвісом вантажу**
(для наукових співробітників, аспірантів, інженерів, конструкторів,
які займаються проектуванням, розробкою та випробуванням
сучасної сільськогосподарської техніки)

Методичні рекомендації

**Київ
“Аграрна освіта”
2011**

Рекомендовано до видання на засіданні секції технічної політики, безпеки, гігієни праці та нагляду за технічним станом машин у сільському господарстві Міністерства аграрної політики та продовольства України (протокол від 22 вересня 2011 р. № 63)

Автори: **В.С. Ловейкін**, доктор технічних наук, професор; **Д.Г. Войтюк**, кандидат технічних наук, професор; **Ю.О. Ромасевич**, кандидат технічних наук; **Ю.В. Човнюк**, кандидат технічних наук, доцент (Національний університет біоресурсів і природокористування України)

За заг. ред. **В.С. Ловейкіна**

Рецензенти: **В.І. Кравчук**, доктор технічних наук, професор (Український науково-дослідний інститут прогнозування та випробування техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва ім. Л. Погорілого); **В.Г. Мироненко**, доктор технічних наук, професор (Національний університет біоресурсів і природокористування України)

Методичні рекомендації розроблено на підставі узагальнення досліджень джерел літератури та власних теоретичних та експериментальних досліджень науковців кафедри конструювання машин Національного університету біоресурсів і природокористування України, отриманих під час виконання теми № 110/312-пр “Розробка енергоощадних засобів та методів оптимізації режимів руху вантажопідіймальних машин у сільськогосподарському виробництві” (номер держреєстрації 0109U000953).

Розглянуто і схвалено вченою радою ННТІ НУБіП України (протокол від 20 вересня 2011 р. № 1).

Для наукових співробітників, аспірантів, інженерів, конструкторів, які займаються проектуванням, розробкою та випробуванням сучасної сільськогосподарської техніки.

Відповідальні за випуск: старший науковий співробітник, кандидат сільськогосподарських наук **А.А. Подгасецький**, методист **І.О. Моргун** (Науково-методичний центр аграрної освіти)

Редактор

Л.М. Талюта

© **Науково-методичний центр аграрної освіти**

Усі права охороняються. Жодна частина цього видання не може бути відтворена в будь-якій формі без письмової згоди Науково-методичного центру аграрної освіти.

ЗМІСТ

1. Загальні положення.....	4
2. Галузь застосування.....	4
3. Теоретичні основи синтезу оптимального керування кранами.....	5
3.1. Моделювання роботи кранів.....	5
3.2. Ставлення задачі оптимального керування краном.....	7
4. Синтез оптимального керування краном із вантажем на гнучкому підвісі.....	9
4.1. Синтез оптимального керування краном варіаційним методом (програмне керування).....	9
4.2. Синтез оптимального керування краном прямим варіаційним методом (програмне керування).....	10
4.3. Синтез оптимального керування краном методом динамічного програмування (керування у вигляді зворотного зв'язку).....	12
5. Структура та алгоритми роботи мехатронної системи крана із вантажем на гнучкому підвісі.....	13
5.1. Апаратна частина мехатронної кранової системи.....	13
5.2. Реалізація програмних оптимальних керувань.....	18
5.3. Реалізація оптимальних керувань у вигляді зворотного зв'язку	22
6. Висновки і рекомендації	26
7. Список рекомендованої літератури	26

1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Методичні рекомендації регламентують методику розробки мехатронних систем, які використовуються для керування рухом кранових механізмів із гнучким підвісом вантажу. До кранових механізмів, які мають гнучкий підвіс вантажу відносять стрілові, козлові та мостові крани. Під час роботи таких кранів виникають маятникові коливання вантажу, які знижують безпеку праці, зменшують продуктивність навантажувально-розвантажувальних операцій, ускладнюють прицільне наведення вантажозахоплювального пристрою на вантаж і укладання вантажу на задане місце. “Стандартні” підходи автоматизації перевантажувальних процесів зводяться нанівець, оскільки коливальний характер руху вантажу вносить невизначеність у програму автоматизованої роботи крана. Крім того, значно зростають динамічні навантаження на привод, металоконструкцію та тягові органи крана, що призводить до зниження їх надійності. Зазначимо, що досвідчені оператори кранів досить успішно усувають коливання вантажу шляхом короточасних вмикань і вимикань приводу. Це досягається ціною значного зростання енергетичних витрат протягом циклу переміщення вантажу, збільшення ударних динамічних навантажень у елементах крана, психоемоційного виснаження оператора крана.

У методичних рекомендаціях наведено рекомендації щодо усунення коливань вантажу під час переміщення кранового механізму із одної точки в іншу із одночасною оптимізацією руху за різноманітними інтегральними та термінальними критеріями. Синтезовані оптимальні закони руху крана дозволяють зменшити енергетичні витрати, збільшити надійність елементів крана, зняти із оператора функцію керування складними рухами крана (оператор задає координати точок місця знаходження вантажу та місця, куди необхідно перемістити вантаж і контролює процес перевантаження).

Методичні рекомендації розроблено на основі підходів теорії оптимального керування технічними системами (варіаційне числення та динамічне програмування), які працюють як у детермінованих, так і у недетермінованих зовнішніх середовищах. Крім того, для експериментальних досліджень використано прикладні мехатронні розробки у області електроприводу, цифрових систем, враховано специфіку їх застосування для керування вантажопідіймальними кранами.

2. ГАЛУЗЬ ЗАСТОСУВАННЯ

Методичні рекомендації можуть бути використані у дослідно-конструкторських установах, конструкторських бюро на машинобудівних заводах, які спеціалізуються на будівництві та модернізації вантажопідіймальної техніки. Особливо ефективним буде використання методичних рекомендацій для дослідників, аспірантів і конструкторів, які

займаються дослідженням вантажопідіймальної техніки, яку використовують для переміщення небезпечних та шкідливих для людей вантажів (крани для перевантажень штучних та насипних вантажів у сільськогосподарському виробництві, козлові крани та маніпулятори для переміщення лісоматеріалу, будівельні крани тощо).

3. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СИНТЕЗУ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ КРАНАМИ

3.1. Моделювання роботи кранів

Для більшості вантажопідіймальних машин їх рух можна представити у вигляді руху матеріальної точки. У цьому випадку їм відповідає динамічна модель, зазначена на рис. 1 (а).

У випадку, коли вантаж прикріплений до крана на гнучкому підвісі, динамічну модель руху такої системи можна представити двомасовою моделлю, зазначеною на рис. 1 (б). Як правило кран складається із n елементів, рухи яких пов'язані між собою. Тому крановий механізм із вантажем можна представити n -масовою динамічною моделлю, яку зазначено на рис. 1 (в).

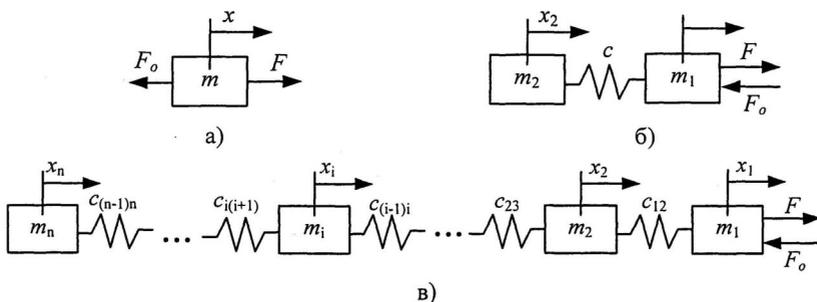


Рис. 1. Динамічні моделі, які використовуються для опису руху кранів: одномасова (а), двомасова (б), n -масова (в)

На рис. 1 введено такі позначення: m_i – приведена до поступального руху маса i -го елемента крана ($i=1, 2, 3, \dots, n$); x_i – координата центра мас i -го елемента крана; F – зовнішнє привідне зусилля створюване приводом; F_o – сила опору переміщенню маси, до якої прикладається привідне зусилля (для рис. 1 (б) F_o – сила опору переміщенню кранового механізму); $c_{i(i+1)}$ – жорсткість, яка поєднує приведені маси m_i та m_{i+1} . Для двомасової моделі (рис. 1 (б), якщо прийняти [1]:

$$c = m_2 \Omega_0^2, \quad (1)$$

де m_2 – маса вантажу; Ω_0^2 – частота власних коливань вантажу відносно нерухомої точки підвісу, то така динамічна модель описує рух кранового механізму переміщення із вантажем, який закріплений на гнучкому підвісі, до того ж амплітуда коливань вантажу не перевищує 10^0 (при цьому період коливань відрізняється від реального не більше, ніж на 0,2%). У подальшому будемо користуватися цією динамічною моделлю. Методи побудови динамічних моделей описано у працях [2-3].

Для представлених динамічних моделей існують диференціальні рівняння, які описують зміну кінематичних функцій кожної приведеної маси. Якщо динамічна модель має n мас, то необхідно скласти систему із n диференціальних рівнянь. Для того, щоб скласти систему рівнянь, яка відповідає прийнятій динамічній моделі необхідно використати один із відомих методів:

- 1) Даламбера;
- 2) віртуальних переміщень;
- 3) Гамільтона-Остроградського.

З останнього безпосередньо впливають рівняння Лагранжа II роду. Усі три способи рівноцінні і призводять до одного і того самого результату.

Як правило для n -масової динамічної системи можемо записати рівняння її руху:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_{12}(x_1 - x_2) = F - F_0 \text{sign}(\dot{x}_1); \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_{23}(x_2 - x_3) + c_{12}(x_2 - x_1) = 0; \\ \dots\dots\dots \\ m_i \ddot{x}_i + c_{i(i+1)}(x_i - x_{i+1}) + c_{i(i-1)}(x_i - x_{i-1}) = 0; \\ \dots\dots\dots \\ m_n \ddot{x}_n + c_{(n-1)n}(x_n - x_{n-1}) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Для двомасової динамічної моделі система рівнянь (2) представляється у такому вигляді:

$$\begin{cases} \ddot{x}_2 + \Omega_0^2(x_2 - x_1) = 0; \\ m_1 \ddot{x}_1 + m_2 \ddot{x}_2 = F_{np} - F_0 \text{sign}(\dot{x}_1), \end{cases} \quad (3)$$

де m_1 – приведена до поступального руху маса вантажного візка і привідного механізму; m_2 – маса вантажу із захоплювальним пристроєм; x_1, x_2 – координати центрів мас відповідно візка та вантажу; $(\Omega_0^2 = \frac{g}{l})$; g – прискорення вільного падіння; l – довжина гнучкого підвісу вантажу; F_{np} – сумарне тягове або гальмівне зусилля, що діє на візок; F_0 – сила опору переміщенню крана.

Будемо вважати, що для переміщення крана протягом розглядуваного режиму руху він не змінює напрям швидкості, тобто $sign(\dot{x}_1) = 1$. Для усунення коливань вантажу в процесі гальмування крана необхідно забезпечити такі умови:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(T) = 0; \\ x_1(T) - x_2(T) = 0; \\ \dot{x}_1(T) - \dot{x}_2(T) = 0, \end{cases} \quad (4)$$

де $x_1(T)$ і $x_2(T)$ – координати центрів мас відповідно візка і вантажу в момент часу T ; $\dot{x}_1(T)$ і $\dot{x}_2(T)$ – швидкість візка і вантажу відповідно у момент часу T ; T – момент закінчення гальмування.

Перше рівняння системи (4) встановлює зупинку крана у момент закінчення гальмування, а інші два – усунення коливань вантажу, оскільки енергія коливань буде рівною нулю.

З другого рівняння системи (3) знайдемо:

$$\dot{x}_1(T) = \dot{x}_2(T) + \Delta\dot{x}(T), \quad (5)$$

де через $\Delta\dot{x}(T)$ позначено $\Omega_0^{-2}\ddot{x}_2(T)$. Оскільки згідно з (4) $\Delta\dot{x}(T) = 0$, то умову (5) можна переписати таким чином: $\dot{x}_2(T) = 0$. Введемо позначення: $y_0 = \Omega_0^{-2}\ddot{x}_2$,

$u = \frac{F_{np} - W}{m_1}$, тоді систему рівнянь (3) можна переписати у такому вигляді:

$$\begin{cases} \dot{y}_0 = y_1; \\ \dot{y}_1 = y_2; \\ \dot{y}_2 = u - \Omega^2 y_1, \end{cases} \quad (6)$$

де $\Omega = \sqrt{\frac{(m_1 + m_2)g}{m_1 l}}$ – частота власних маятникових коливань вантажу відносно рухомої точки підвісу (відносно крана).

Представлені математичні моделі (3) та (6) у подальшому будуть використані для синтезу оптимального керування рухом крана.

3.2. Ставлення задачі оптимального керування краном

На сьогодні математична теорія оптимальних процесів є добре розробленою галуззю науки. Виділяються три основні методи, які дають змогу формалізувати та розв'язати оптимізаційну задачу. Це варіаційні методи [4], принцип максимуму Л.С. Понтрягіна [5] та динамічне програмування Р. Беллмана [6]. Зазначимо, що для задач оптимізації режимів руху кранових механізмів знайшли використання класичні варіаційні методи [3], прямі варіаційні методи [7-9] та принцип максимуму [10-12].

Оскільки режими руху механізму переміщення крана є функціональними залежностями переміщень, швидкостей, прискорень тощо ланок механізму від просторового та часового аргументів, то критерій повинен мати вигляд інтегрального функціоналу. Крім того, процедура порівняння допустимих режимів руху можлива лише тоді, коли критерій має вигляд скалярної величини і для кожного режиму набуває конкретного значення. У процесі руху крана залежності кінематичних характеристик ланок можуть мати додатні та від'ємні значення, тому у виразі критеріїв вони повинні входити в квадратичному вигляді. Усім переліченим вимогам до критеріїв руху крана відповідає структура критерію у вигляді дії [3]:

$$I = \int_0^T P(t, x_1, \dot{x}_1, \dots, x_k, \dot{x}_2, \dots, x_m) dt, \quad (7)$$

де P – підінтегральний вираз інтегрального критерію. Для оптимізації режимів руху за кількома критеріями одночасно використовується комплексний критерій, який містить окремі критерії у вигляді лінійної згортки [3]:

$$I_{\text{компл}} = \int_0^T \sum_{i=1}^q \delta_i K_i dt, \quad (8)$$

де δ_i – i -й безрозмірний ваговий коефіцієнт, який урахує частку i -го критерію;

K_i – безрозмірний критерій. Сума коефіцієнтів у формулі (8) $\sum_{i=0}^q \delta_i = 1$, а кожний з них приймають у межах від нуля до одиниці і встановлюють залежно від вимог до руху крана. Оскільки інтегральні критерії (7-8) визначають небажані показники руху крана, то вони повинні бути мінімізовані.

Для оптимізації процесу переміщення крана із усуненням коливань вантажу на гнучкому підвісі необхідно забезпечити виконання умов (4). Крім того, у деяких випадках можуть ставитися термінальні критерії оптимізації:

$$\begin{cases} x_1^b(0) \rightarrow \min, & x_1^c(T) \rightarrow \min; \\ x_2^d(0) \rightarrow \min, & x_1^e(T) \rightarrow \min, \end{cases} \quad (9)$$

де b, c, d, e – порядки похідних відповідних функцій. Мінімізація термінальних критеріїв дозволяє зменшити удари у кінематичних зачепленнях і, тим самим, подовжити їх довговічність.

Для привідного механізму необхідно поставити умову:

$$|u| \leq u_{\text{max}} = \frac{F_{\text{max}} - W}{m_1}, \quad (10)$$

де F_{max} – максимальне зусилля приводу крана, яке відповідає максимальному моменту на валу двигуна, W – сила опору переміщення крана. Задання

критерію оптимізації, крайових умов руху крана і вантажу та обмежень на функцію керування визначає ставлення задачі оптимального керування.

4. СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ КРАНОМ ІЗ ВАНТАЖЕМ НА ГНУЧКОМУ ПІДВІСІ

4.1. Синтез оптимального керування краном варіаційним методом (програмне керування)

Синтез оптимальних законів керування краном виконаємо за функціоналами:

$$\begin{cases} I_{\dot{u},t} = \int_0^T \dot{u}^2 dt \rightarrow \min; \\ \ddot{x}_1(0) \rightarrow \min, \quad \ddot{x}_1(T) \rightarrow \min. \end{cases} \quad (11)$$

Критерії (11) дають змогу синтезувати таке керування, за якого мінімізуються втрати у електроприводі крана (інтегральний функціонал) та збільшується плавність вибору зазорів у приводі крана (термінальні функціонали).

Умовою мінімуму інтегрального функціоналу (11) є рівняння Ейлера-Пуассона, яке з урахуванням системи (3) представляється диференціальним рівнянням десятого порядку [14-16]:

$$x_2 + 2\Omega^2 x_2'''' + \Omega^4 x_2'' = 0. \quad (12)$$

Аналіз термінальних критеріїв (11) показує, що їх абсолютні мінімуми досягаються у випадку, коли $\ddot{x}_1(0) = \ddot{x}_1(T) = 0$, що з врахуванням початкового положення рівноваги динамічної системи “кран – вантаж” та умов усунення коливань вантажу наприкінці розгону крана (4) дозволяє записати крайові умови:

$$\begin{cases} x_2(0) = \dot{x}_2(0) = \ddot{x}_2(0) = \ddot{\ddot{x}}_2(0) = x_2''''(0) = 0; \\ x_2(T) = \frac{vT}{2}, \quad \dot{x}_2(T) = v, \quad \ddot{x}_2(T) = \ddot{\ddot{x}}_2(T) = x_2''''(T) = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Розв’язок крайової задачі (11-12) з урахуванням умовних позначень: $c_1 = \cos(\Omega t)$, $c_2 = \cos(\Omega T)$, $c_3 = \cos(2\Omega T)$, $c_4 = \cos(\Omega(t-T))$, $c_5 = \cos(\Omega(t+T))$, $c_6 = \cos(\Omega(t-2T))$, $s_1 = \sin(\Omega t)$, $s_2 = \sin(\Omega T)$, $s_3 = \sin(2\Omega T)$, $s_4 = \sin(\Omega(t-T))$, $s_5 = \sin(\Omega(t+T))$, $s_6 = \sin(\Omega(t-2T))$ має такий вигляд:

$$u_{opt} = [6\Omega v (g^{-1}(\Omega^2 l m_1 (\Omega(2tc_4 + (T-t)(2c_1 + \Omega T s_1) - \Omega T s_2) + 2(-\Omega T - s_1 + s_4 + s_2))) + (m_1 + m_2) \times (\Omega^3 t T (T-t) + 2\Omega t c_1 + 2\Omega(T-t)c_4 + 2(s_2 - s_1 + s_4) + \Omega(-2Tc_2 + \Omega T s_4 + \Omega(t-T)(T s_1 + t s_2))))] \times m_1 [-48 - 12\Omega^2 T^2 + \Omega^4 t^4 - 12(-4 + \Omega^2 t^2)c_2 + \Omega T(48 - \Omega^2 t^2)s_2]^{-1}. \quad (13)$$

Для знайденого оптимального керування рухом крана [14] побудуємо фазовий портрет “різниця положень крана і вантажу – різниця швидкостей крана і вантажу”, а також графік оптимального керування u_{opt} (рис. 2).

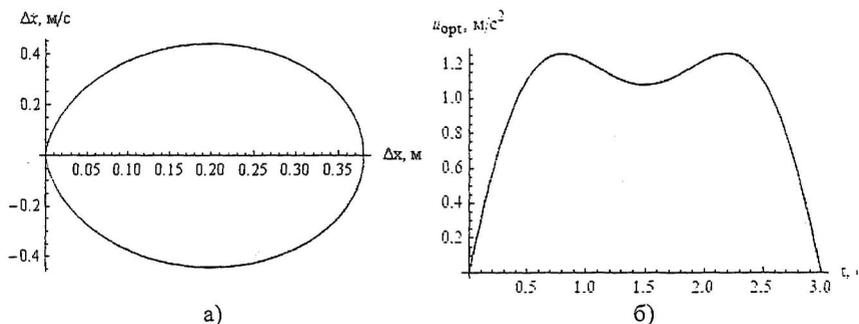


Рис. 2. Фазовий портрет руху системи та графік оптимального керування

З графіків (рис. 2) бачимо, що коливання вантажу усуваються, а оптимальне керування має плавний характер зміни, що позитивно впливає на динаміку руху крана. Зазначимо, що функція оптимального керування (13) залежить від аргументу часу, тому таке керування є програмним.

4.2. Синтез оптимального керування краном прямим варіаційним методом (програмне керування)

Використаємо для розв’язання поставленої у п. 4.1. оптимізаційної задачі прямий варіаційний метод [7]. Будемо вважати, що протягом розгону крана вантаж піднімається, що означає суміщення операцій піднімання вантажу та переміщення крана. Такий спосіб дозволяє зменшувати тривалість циклу переміщення вантажу.

Для мінімізації термінальних критеріїв (11) необхідно задати певним чином крайові умови. Оберемо вже відомі крайові умови (12), які забезпечують глобальні мінімуми термінальних критеріїв. Для мінімізації інтегрального критерію (11) оберемо “опорну функцію”, яка є розв’язком крайової задачі:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_2 = 0. \\ x_2(0) = \dot{x}_2(0) = \ddot{x}_2(0) = \overset{IV}{x}_2(0) = 0; \\ x_2\left(\frac{t_1}{2}\right) = q_1, \quad \dot{x}_2\left(\frac{t_1}{2}\right) = q_2, \quad \ddot{x}_2\left(\frac{t_1}{2}\right) = q_3, \quad \overset{IV}{x}_2\left(\frac{t_1}{2}\right) = q_4; \\ x_2(t_1) = \frac{vt_1}{2}, \quad \dot{x}_2(t_1) = v, \quad \ddot{x}_2(t_1) = \overset{IV}{x}_2(t_1) = 0. \end{array} \right. \quad (14)$$

Оскільки $I_{\dot{u}^2} = f(\dot{u})$, а $x_2 = f(\dot{u})$, то $I_{\dot{u}^2} = f(x_2) = f(T, v, q_1, q_2, q_3, q_4)$.
 Параметри T та v з технологічних міркувань змінювати небажано. Тому $T = const$ та $v = const$. Для того, щоб знайти мінімум функції $I_{\dot{u}^2}$ за аргументами q_1, q_2, q_3, q_4 необхідно розв'язати систему рівнянь:

$$\frac{\partial I_{\dot{u}^2}}{\partial q_k} = 0, \quad k=1, 2, 3, 4. \quad (14)$$

Підставляючи знайдені коефіцієнти q_1, q_2, q_3, q_4 у функцію x_2 , знайдемо оптимальну траєкторію руху вантажу. Розв'язуючи пряму задачу динаміки, отримаємо оптимальне керування, яке визначає рух вантажу і крана за оптимальними траєкторіями (не наводимо формулу оптимального керування, оскільки вона має значний об'єм). Покажемо графіки зміни керування, фазовий портрет руху динамічної системи, а також фазовий портрет руху підйомального механізму.

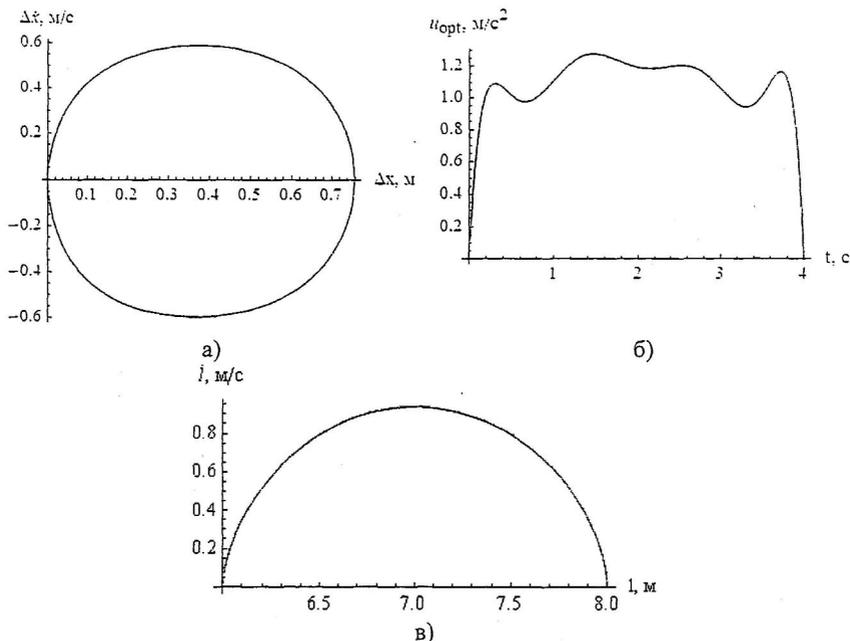


Рис. 3. Фазовий портрет руху системи (а), графік оптимального керування (б), фазовий портрет руху підйомального механізму

Оптимальне керування отримане у цьому пункті також є програмним. Такий тип керування ефективно використовувати для детермінованих зовнішніх середовищ, наприклад: у цехах, за відсутності поривів вітру, коли кранова платформа є нерухомою.

Зазначимо, що варіаційні методи використовуються також для вертикального переміщення вантажу [17].

4.3. Синтез оптимального керування краном методом динамічного програмування (керування у вигляді зворотного зв'язку)

Для синтезу оптимального керування використовується метод динамічного програмування. Основна перевага такого методу полягає у тому, що синтезоване оптимальне керування є функцією фазових координат динамічної системи, тобто це керування із зворотним зв'язком. Таке оптимальне керування ефективно використовувати за недетермінованих зовнішніх впливів на кран: у портах із сильними поривами вітру, крани на рухомих платформах (плавучі крани) тощо. Наперед непередбачуваний зовнішній вплив буде компенсований за допомогою вмикання зворотного зв'язку за фазовими координатами системи [18]. Для мінімізації інтегрального функціоналу:

$$I = \int_0^T [\delta_0 y_0^2 + \delta_1 y_1^2 + \delta_2 y_2^2 + \delta_u u^2] dt, \quad (15)$$

де $\delta_0, \delta_1, \delta_2, \delta_u$ – вагові коефіцієнти, які визначають “вагу” кожної складової критерію (15); використаємо рівняння Беллмана:

$$\min[\delta_0 y_0^2 + \delta_1 y_1^2 + \delta_2 y_2^2 + \delta_u u^2 + \frac{\partial S}{\partial y_0} y_1 + \frac{\partial S}{\partial y_1} y_2 + \frac{\partial S}{\partial y_2} (u - \Omega^2 y_1)] = 0, \quad (16)$$

де S – функція Беллмана (тут і надалі будемо використовувати позначення (6)). Використовуючи представлення функції S у вигляді квадратичної форми за фазовими координатами динамічної системи “кран – вантаж”, знайдемо функцію оптимального керування:

$$u = - \frac{A_0 y_0 + A_1 y_1 + 2A_2 y_2}{2\delta_u}, \quad (17)$$

де A_0, A_1, A_2 – невідомі коефіцієнти, які потрібно визначити. Не будемо наводити детальний опис розв'язування задачі, зазначимо лише, що визначення коефіцієнтів A_0, A_1, A_2 пов'язане із знаходженням розв'язку алгебраїчного рівняння четвертого степеня. Побудуємо графік оптимального керування та модифікований фазовий портрет руху динамічної системи (рис. 4). Точкою на графіку рис. 4 (б) показано стан спокою (коливання вантажу відсутні).

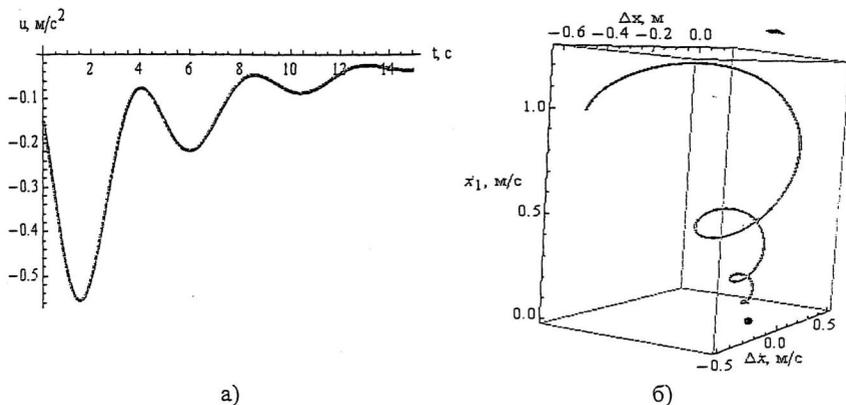


Рис. 4. Графік функції керування (а) та фазовий портрет руху системи (б)

З рис. 4. бачимо, що оптимальне керування має виражений пік. Це вимагає значної перевантажувальної здатності приводу, для того, щоб виконалось обмеження (10). Забезпечити умову (10) можна збільшивши потужність двигуна та джерела його живлення або зменшивши пік на графіку функції керування. Другий спосіб є раціональним. Реалізацію цього способу наведено у пункті 5.3.

5. СТРУКТУРА ТА АЛГОРИТМИ РОБОТИ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ КРАНА ІЗ ВАНТАЖЕМ НА ГНУЧКОМУ ПІДВІСІ

5.1. Апаратна частина мехатронної кранової системи

Мехатронна система руху крана представлена в лабораторії динаміки машин кафедри конструювання машин Технічного науково-навчального інституту Національного університету біоресурсів і природокористування України. Об'єкт керування – електроталь – рухається на полицях кран – балки. Привід здійснюється від асинхронного короткозамкненого двигуна ФТТ-0,08/4. Живлення приводу здійснюється від кабелів, підвішених на тросі. Електричну схему мехатронної системи представлено на рис. 5.

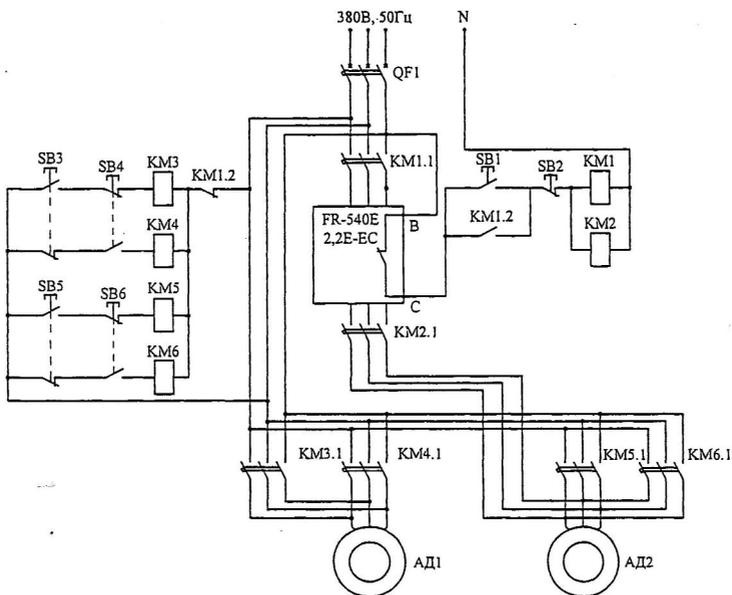


Рис. 5. Принципова електрична схема мехатронної системи керування рухом кранової електроталі

Для керування електродвигуном приводу крана використано частотний перетворювач FR-S540-E-2.2K-EC (Mitsubishi Electric), основні технічні характеристики якого наведено у табл. 1.

Для зменшення похибки завдання вихідної частоти задіяна функція компенсації ковзання (параметри частотного перетворювача P95, P96, P97), яка дозволяє за допомогою вихідного струму перетворювача обчислювати ковзання двигуна і таким чином коригувати поточну вихідну частоту, якщо це потрібно.

Цей частотний перетворювач може реалізовувати закони $\frac{U}{U_{ном}} = \frac{f}{f_{ном}}$ та

$\frac{U}{U_{ном}} = \left(\frac{f}{f_{ном}}\right)^2$. Встановлено такий закон керування зміни напруги живлення

двигуна за зміни частоти: $\frac{U}{U_{ном}} = \frac{f}{f_{ном}}$. Вибір цього закону обумовлений тим, що

штучні механічні характеристики двигуна за невеликих частот напруги живлення мають достатньо великі критичні моменти. Тому задання цієї характеристики дозволить двигуну візка краще відпрацювати задану швидкість.

Технічні характеристики частотного перетворювача

Параметр		Значення параметра
Потужність перетворювача		2,2 кВт
Номінальний вихідний струм		4,8 А
Перевантаження		150% при 60с; 200% при 0,5 с
Напруга живлення		380 В
Діапазон вихідних частот		0,5...120 Гц
Час розгону/гальмування		0; 0,1;...999 с
Тип характеристики розгону/гальмування		лінійна, S-подібна
Максимальний пусковий момент		$0,15M_{ном}$
Способи гальмування	1) генераторне гальмування	гальмівний момент $0,2M_{ном}$ час гальмування 0...10 с
	2) динамічне гальмування	напруга гальмування $0,15U_{ном}$
Керування		зовнішнє, керування з пульта, комп'ютерне
Ступінь захисту		IP 20
Охолодження		примусове повітряне

Апаратна частина мехатронної системи дозволяє реалізовувати як ручне, так і комп'ютерне керування рухом. Ручне керування здійснюється за допомогою кнопочового поста (кнопки SB3...SB6). Кнопками SB3 або SB4 вмикається двигун горизонтального переміщення візка АД1, кнопками SB5 або SB6 – двигун вертикального переміщення вантажу АД2.

Перемикання режимів керування здійснюється за допомогою кнопки SB1. При цьому розмикається контакт КМ1.2 та вимикає коло живлення кнопочового поста, також замикаються контакти пускачів КМ1 та КМ2 і підключають частотний перетворювач FR-540E-2,2K-EC до клем двигуна АД1. Отже, з'являється можливість живити двигун струмом з частотою, яка буде змінюватися за певним законом. Коло перемикання режимів з'єднано через нормально замкнений контакт частотного перетворювача (клеми В, С). Це зроблено для того, щоб унеможливити виникнення аварійних станів перетворювача: якщо такі стани виникатимуть (перевантаження на струмі, перегрів, перенапруження тощо), то контакт розімкнеться та знеструмить коло керування, що в свою чергу автоматично відключить перетворювач та переведе керування крана в ручний режим. Ручне перемикання з автоматичного в ручний режим здійснюється за допомогою кнопки SB2. Вмикання схеми здійснюється за допомогою автоматичного вимикача QF1.

Все стаціонарне електрообладнання (частотний перетворювач, пускачі КМ1 та КМ2, кнопки SB1 та SB2) змонтовано в щитку (рис. 6, а).

Електрообладнання, яке здійснює ручне керування (кнопочовий пост, пускачі КМ3...КМ6) змонтовано на електроталі, до якої підходить два кабелі

живлення: для живлення струмом постійної (4 жили) та змінної частоти (3 жили) (рис. 7, б).

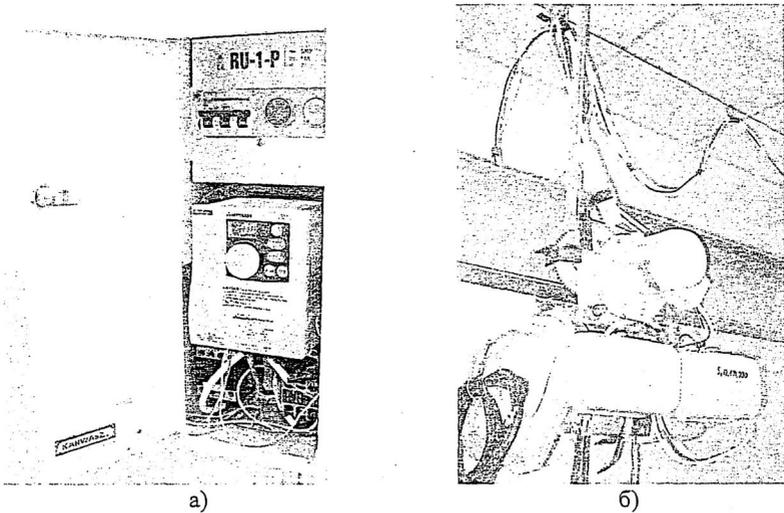


Рис. 7. Щиток з електрообладнанням схеми керування рухом елеткроталі (а) та її зовнішній вигляд (б)

Узагальнюючи будову, запропоновано наступну структурну схему мехатронної кранової системи (рис. 8).

Бортовий комп'ютер (рис. 8) отримує команду від людини-оператора (через пульт керування) або від комп'ютера вищого рівня (який, наприклад, контролює вантажні потоки на підприємстві), тобто задає мету руху системі. Мета руху полягає в переміщенні вантажу в деяку точку робочої зони з конкретними координатами. По отриманні команди в бортовому комп'ютері виконуються операції обробки інформації отриманої від датчиків та прийняття рішень про функціональні рухи. Тут доцільно розглянути ієрархію рівнів керування системою, яка полягає у тому, що нижчі рівні підпорядковуються вищим. Вищі рівні керування більш "інтелектуальніші", вони вирішують більш складні задачі керування системою.

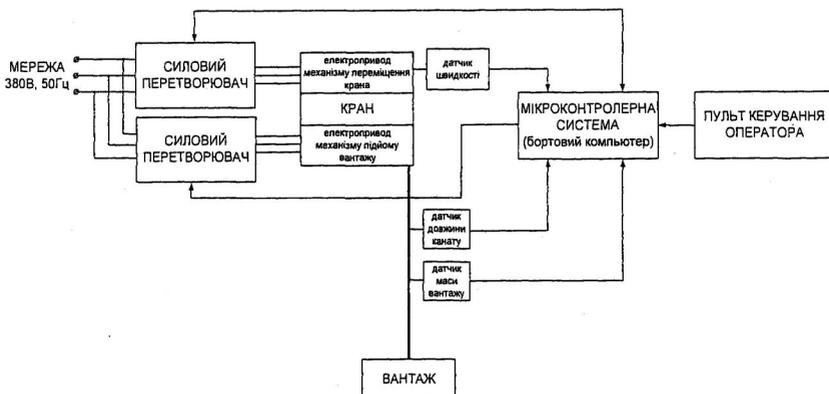


Рис. 8. Структурна схема керування рухом крана

На вищому, інтелектуальному рівні, як було вказано раніше, приймається (здається) рішення про переміщення вантажу. На нижчому, стратегічному, рівні відбувається планування руху, що означає розбиття задачі руху на послідовність узгоджених у часі елементарних дій, наприклад, таких як виведення захвата (грейфера) на задану позицію, захоплення вантажу, транспортування вантажу тощо. Тобто на цьому рівні вирішується задача геометричного планування руху робочого органу.

Головна задача наступного, тактичного рівня полягає у видачі програми керування для кожного приводу на виконавчий рівень. При цьому визначаються закони узгодженого руху всіх ланок крана з врахуванням характеристики приводів, обмежень технологічного характеру (максимальне відхилення канату з вантажем від вертикалі, максимальне прискорення візка протягом перехідних режимів руху) тощо. На цьому рівні можуть бути використані визначені оптимальні закони руху крана. Це дасть змогу побудувати простіший алгоритм роботи мехатронної системи, оскільки зникає невизначеність положення вантажу наприкінці перевантажувального циклу. На найнижчому, виконавчому рівні проходить розрахунок та видача керуючих сигналів на блок приводів (в цьому випадку на приводи горизонтального та вертикального переміщення вантажу). Призначення цього рівня керування полягає у забезпеченні заданих вимог щодо стійкості, точності руху, якості перехідних процесів. Для цього використовуються різноманітні регулятори процесу руху візка: пропорційно-інтегрально-диференціальні, адаптивні, нечіткі (fuzzy).

Керування виконавчим елементом (електродвигуном) полягає у зміні параметра керування (швидкість обертання вала або моменту на валу) за допомогою цифрових керуючих сигналів, які подаються на силовий перетворювач і згідно з якими він змінює значення параметра [19]. Для реалізації керуючої дії необхідно здійснити вибір параметра керування:

1) кінематичного (системою керування забезпечується оптимальний “жорсткий” закон зміни швидкості електроприводу, при цьому зміна моменту опору в лінії приводу крана не впливає на його швидкість);

2) динамічного (системою керування забезпечується оптимальний закон зміни моменту приводу візка, при цьому кран розганяється за оптимальним законом зміни швидкості).

Відповідно до наведеної вище класифікації для частотного керування приводом крана можна використати два параметри: частоту напруги живлення двигуна, який відповідає кінематичному параметру керування та момент на валу двигуна, який відповідає динамічному параметру керування. Вибір параметра керування в кожному конкретному випадку повинен мати техніко-економічне обґрунтування. Насамперед цей вибір повинен забезпечувати ефективне вирішення тих задач, які стоять перед цією системою.

Як датчик швидкості використовують цифровий енкодер, який знаходиться у кінематичній взаємодії з шляхом, яким рухається кран (балка або рейки). Датчик довжини канату є енкодером (з кінематичною взаємодією з ребордом канатного барабана або з висувним тросиком, один кінець якого прикріплений до канату). Датчик ваги вантажу – це S-подібний тензометр, який встановлюється в місці розриву канату.

Зв’язок між окремими елементами мехатронної системи (наприклад між датчиками, які розташовані на вантажному канаті та бортовим комп’ютером, між бортовим комп’ютером та частотним перетворювачем) здійснюється через інформаційні екрановані кабелі або через радіозв’язок.

5.2. Реалізація програмних оптимальних керувань

Для реалізації програмного керування рухом крана використовується комп’ютерне керування частотним перетворювачем. Таке керування дає змогу розганяти та гальмувати кран за певними законами з врахуванням усіх змінних: довжини переміщення крана, довжини гнучкого підвісу, маси транспортованого вантажу, номінальної швидкості крана, допустимого прискорення крана та часу перехідних процесів руху. Суть комп’ютерного керування полягає в наступному: з бортового комп’ютера на частотний перетворювач надходять дискретні значення вихідної частоти напруги живлення двигуна крана. Відповідно до цих сигналів частотний перетворювач змінює вихідну частоту і електродвигун крана змінює швидкість обертання вала, що, в результаті, розганяє або гальмує кран за певними законами руху. Протягом усталеного руху частотний перетворювач підтримує постійну частоту, яка відповідає номінальній швидкості руху.

Опишемо докладніше процеси формування даних та їх передачу на перетворювач. Для унаочнення роботи алгоритму представимо його функціональну блок-схему (рис. 9) [20, 21].

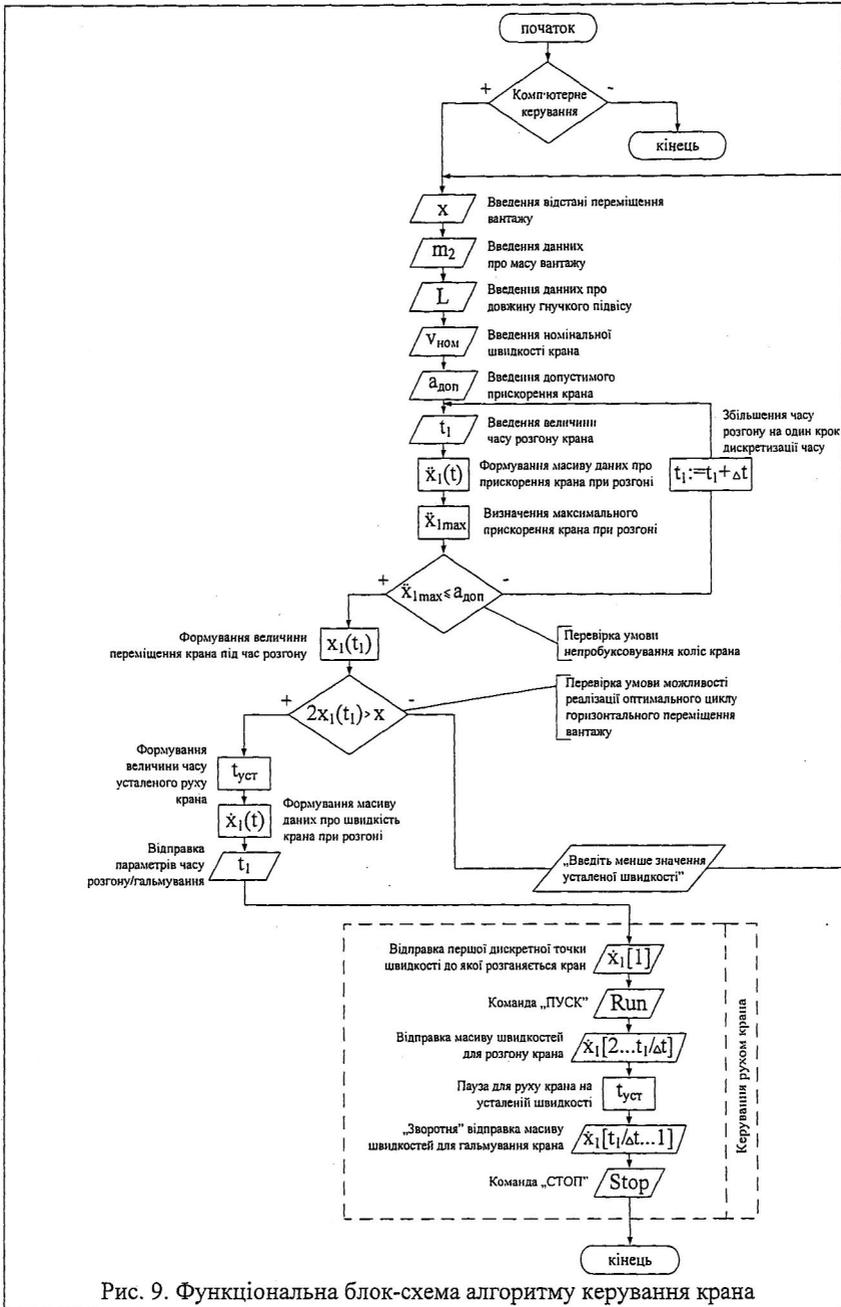


Рис. 9. Функціональна блок-схема алгоритму керування крана

Алгоритм працює таким чином: оператор крана задає координати точки позиціонування вантажу. Надалі відбувається опитування датчиків маси вантажу та довжини гнучкого підвісу. Отримані із датчиків дані записуються у внутрішні реєстри бортового комп'ютера. Якщо є необхідність змінити номінальну швидкість руху крана або значення його допустимого прискорення протягом пуску та гальмування оператор корегує ці дані, введенням нових значень у бортовий комп'ютер (якщо кран виконує однотипні вантажні операції, то необхідності зміни номінальної швидкості та допустимого прискорення крана немає). Наступний крок – задання часу розгону крана ($t_1=1c$). Для заданого часу розгону визначається довжина масиву прискорень. За часу дискретизації $\Delta t=0,1c$ і введеному початковому часі розгону довжина масиву становитиме 10 елементів.

Далі відбувається заповнення масиву даними: конкретними значеннями прискорення, які визначаються за відомого оптимального програмного керування. До того ж кожен наступний елемент масиву визначається при часі на $0,1c$ більше ніж попередній. Після закінчення формування масиву прискорень визначається максимальне значення прискорення. Це робиться порівнянням всіх елементів масиву між собою. Визначене максимальне значення прискорення порівнюється з допустимим, і якщо допустиме прискорення буде менше ніж максимальне, то програма збільшує час розгону на $0,1c$ і повторює цикл. Цикли повторюються доки не виконається умова $\ddot{x}_{\max} \leq a_{\text{дон}}$ (максимальне прискорення крана не більше допустимого). Якщо умова виконується, то надалі визначається довжина переміщення крана протягом перехідних режимів руху та порівняння цього значення із величиною заданої відстані переміщення. У разі невиконання умови $2x_1(t_1) \leq x$ (задана відстань переміщення повинна бути не меншою ніж відстані, які кран проїде за розгону та гальмування) програма, побудована на основі алгоритму видає повідомлення “ВВЕДІТЬ МЕНШЕ ЗНАЧЕННЯ УСТАЛЕНОЇ ШВИДКОСТІ” та виходить з циклу. Щоб продовжити виконання алгоритму оператор зменшує номінальну швидкість та запускає програму знову. У випадку виконання умови $2x_1(t_1) \leq x$ відбувається формування часу усталеного руху крана:

$$t_{\text{уст}} = \frac{x - 2x_1(t_1)}{\dot{x}_{\max}}, \quad (18)$$

де \dot{x}_{\max} – номінальна швидкість руху крана; $x_1(t_1)$ – переміщення крана наприкінці розгону; x – величина переміщення вантажу з краном наприкінці перевантажувальної операції. Довжина масиву прискорень дорівнює довжині масиву для дискретних значень швидкості. Таким чином, маючи кількість дискретних точок швидкості крана, програма обчислює їх (це відбувається аналогічно обчисленню дискретних прискорень) та записує в масив.

Для здійснення підготовки частотного перетворювача до роботи необхідно задати час розгону та гальмування (параметри P7, P8 задано $0,1c$). Завдання здійснюється програмно – відправкою на частотний перетворювач

цифрових кодованих значень цих параметрів. Необхідно також установити параметр лінійної характеристики розгону/гальмування (параметр P29 встановлюється в 0). Вибір таких параметрів розгону/гальмування обумовлений тим, що за такого керування швидкість руху крана буде представляти собою ламану криву, лінійні ділянки якої сполучатимуться в точках швидкостей, які визначені раніше. Зі збільшенням часу розгону/гальмування збільшується кількість точок, тому реальна крива буде наближатися до ідеальної краще, але при цьому затягуються перехідні процеси руху крана.

Керування швидкістю обертання вала двигуна здійснюється шляхом відправки на частотний перетворювач цифрових сигналів, що вказують, яку вихідну частоту необхідно “відпрацювати”. Процес відправлення масиву швидкостей для всього циклу переміщення крана здійснюється таким чином: спочатку відправляється початкове значення частоти (початкової швидкості руху крана), до якої візок розженеться через 0,1 с, а потім дається команда на пуск. При цьому частотний перетворювач видає початкову частоту і кран починає рух. Через 0,1 с, коли початкова швидкість буде досягнута, з бортового комп’ютера на частотний перетворювач відправляється наступне кодоване значення частоти. Електродвигун переміщення крана, відповідно до збільшення вихідної частоти живлення, збільшує кількість обертів і через 0,1 с візок досягає наступного значення дискретної швидкості. Процес повторюється до досягнення краном номінальної швидкості. Далі кран рухається на усталеній швидкості, яка являє собою останню дискретну швидкість з масиву. Під час усталеного руху програма “спить” протягом часу, який визначено раніше ($t_{\text{сп}}$). Далі програма відправляє на частотний перетворювач кодовані сигнали з масиву швидкостей аналогічно до процесу розгону, але в зворотному порядку. Так здійснюється процес гальмування крана. Коли значення останньої точки масиву швидкостей (для розгону це перша точка) буде відпрацьовано, тоді із бортового комп’ютера на частотний перетворювач надійде команда на гальмування і кран зупиниться.

Аналогічна процедура керування реалізується для підйомального механізму. У випадку, коли підймання вантажу та переміщення крана є суміщеними операціями, необхідно для розрахунку масиву швидкостей крана використовувати середнє значення довжини підвісу знайдене за формулою:

$$l_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T l(t) dt, \quad (19)$$

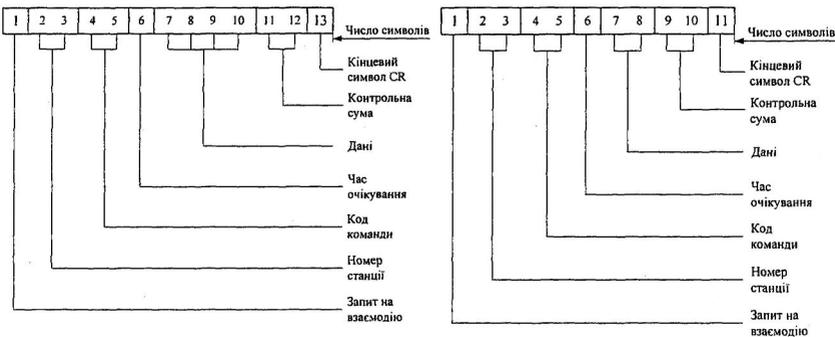
де $l(t)$ – функція зміни довжини гнучкого підвісу у часі.

Технічна реалізація зв’язку частотного перетворювача та бортового комп’ютера крана здійснюється за допомогою промислових інтерфейсів зв’язку (RS485, Ethernet, USB тощо). Пакети даних для різних типів команд (запис параметра, установка вихідної частоти, команда “пуск” та “стоп”) представляються у вигляді послідовностей символів у кодуванні ASCII.

Специфікація параметрів зв'язку між бортовим комп'ютером та частотним перетворювачем

Елемент	Параметр зв'язку перетворювача	Значення
Метод взаємодії	-	Напівдуплекс
Протокол	-	Асинхронний
Швидкість обміну	n2	192 (19200 біт/с)
Кодування символів – ASCII	n3	0 (8 біт)
Кількість стопових бітів	n3	0 (1 стоповий біт)
Контроль парності	n4	0 (відсутній)
Контрольна сума	-	завжди присутня

Для різних типів команд використовуються різні формати: для запису параметра та для установки вихідної частоти (рис 10, а); для команд “пуск” та “стоп” (рис. 10, б).



а)

б)

Рис. 10. Формати даних для команд запису параметра та установки вихідної частоти (а), для команд пуск та стоп (б)

5.3. Реалізація оптимальних керувань у вигляді зворотного зв'язку

З рис. 4. бачимо, що основний недолік оптимального керування у вигляді зворотного зв'язку є значна тривалість і яскраво виражений максимум функції керування. Це ставить під питання виконання умови (10). Для того, щоб ця нерівність виконувалася за $t \in [0, T]$, необхідно до виходу системи оптимального керування підключити нелінійний елемент типу насичення (рис. 11). У результаті з виходу нелінійного елемента отримаємо

квазіоптимальне керування u_{opt}^* , яке буде представлятись кусочною функцією, складеною із ділянок оптимального керування u_{opt} та ділянок $|u| = u_{max}$. Іншими словами нелінійний елемент типу насичення ніби “обрізає” куски функції u_{opt} , для яких не виконується нерівність (10).

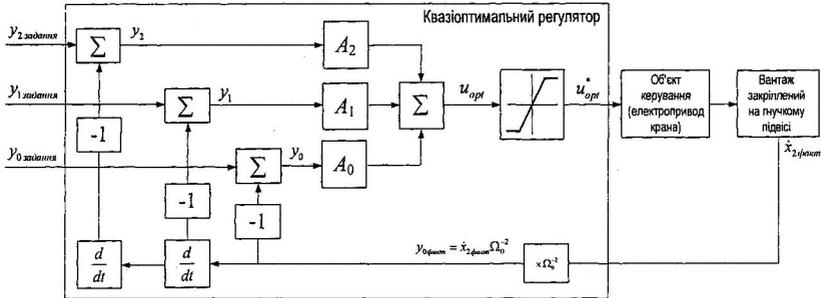


Рис. 11. Структура квазіоптимального регулятора руху крана

Такий регулятор руху крана названо квазіоптимальним, оскільки він виробляє сигнал оптимального керування лише для деяких проміжків часу $t \in [0, T]$. Для інших проміжків часу сигнал регулятора (рис. 11) є неоптимальним. Характерною особливістю квазіоптимального регулятора є його простота реалізації засобами мікроконтролерної техніки, яка є невід’ємною складовою мехатронної системи крана.

Поставимо більш складну задачу: синтезувати оптимальну функцію керування за дотримання умови (10) на всьому проміжку $t \in [0, T]$. Для того, щоб здійснити такий синтез необхідно проаналізувати вираз (17). Очевидно, що значення оптимального керування залежить від заданого та фактичного значень усіх трьох фазових координат динамічної системи “кран – вантаж” та від величин коефіцієнтів A_0, A_1, A_2 , які залежать від вагового коефіцієнта δ_u . Варіювання вагового коефіцієнта δ_u який входить у структуру оптимізаційного критерію (15), за алгоритмом наведеним на рис. 12 дає змогу розв’язати таку задачу.

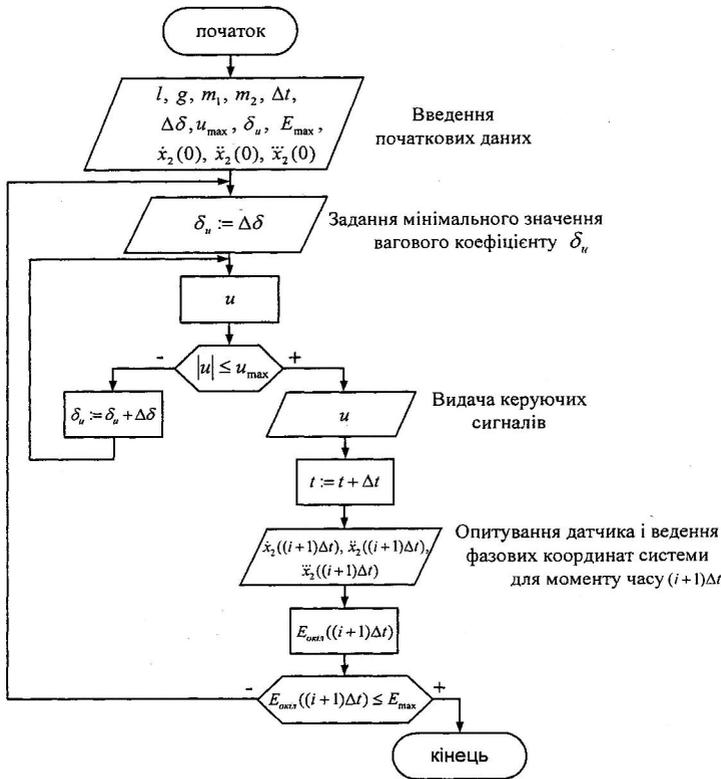


Рис. 12. Алгоритм роботи адаптивного оптимального регулятора руху динамічної системи “кран – вантаж”

На рис. 12 введено такі позначення: Δt – величина приросту дискретного часу; $\Delta \delta_u$ – величина приросту вагового коефіцієнта δ_u ; $E_{опт}$ – енергія динамічної системи “кран – вантаж” (сума потенціальної та кінетичної енергій коливань вантажу та кінетичної енергії руху крана); $E_{опт}$ – максимально допустиме значення енергії руху динамічної системи “кран – вантаж” за умовами можливості виконання подальших технологічних операцій (визначається за максимально допустимою за технологією амплітудою залишкових коливань вантажу).

На рис. 13 наведено структуру адаптивного оптимального регулятора, який реалізує алгоритм (рис. 12). Адаптивним цей регулятор названий тому, що величина вагового коефіцієнта змінюється залежно від умов руху крана із вантажем, тобто увесь час адаптується для забезпечення умови (10).

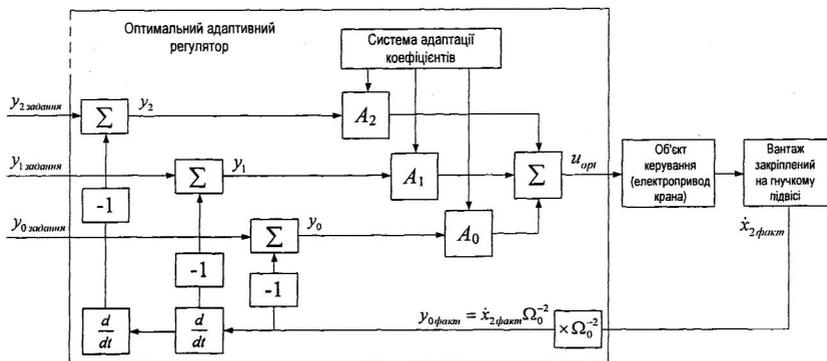


Рис. 13. Структура оптимального адаптивного регулятора руху крана

У результаті роботи алгоритму отримуємо масив значень оптимального керування (рис. 14) [22].

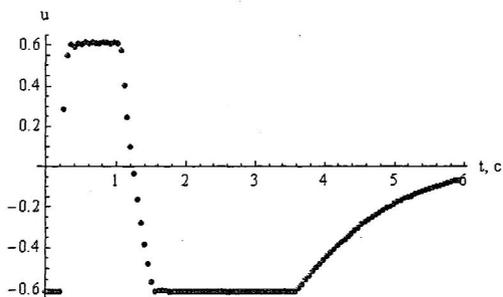


Рис. 14. Масив значень оптимального у вигляді зворотного зв'язку керування динамічною системою за обмеження (10), де $u_{\max} = 0,6$

З рис. 14 виходить, що керування не перевищує встановлених обмежень і до того ж увесь час забезпечується мінімум критерію (15), тобто керування завжди для $t \in [0, T]$ оптимальне.

6. ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. У методичній розробці викладено методику розробки мехатронних систем керування рухом кранового механізму із гнучким підвісом вантажу. Методика ґрунтується на синтезі оптимального керування краном та реалізації керування за допомогою відповідних апаратних та програмних засобів.

2. Для ефективного використання цієї методики необхідно створювати мехатронну систему крана, яку оснащено: бортовим комп'ютером (мікроконтролером), сенсорами, приймачами та передавачами сигналів, керованим привідним механізмом (частотний перетворювач) та інтерфейсом зв'язку із оператором крана.

3. Отримані результати можуть бути використані для конструювання нових та модернізації існуючих систем керування кранів, у тому числі сільськогосподарського призначення. Це дозволить підвищити їх продуктивність, надійність та енергоефективність.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Лобов Н. А. Динамика грузоподъемных кранов / Н. А. Лобов. – М. : Машиностроение, 1987. – 160 с.
2. Ловейкін В. С. Теорія технічних систем / Ловейкін В. С., Назаренко І. І., Онищенко О. Г. – К. : ІЗМН-ПДТУ, 1998. – 175 с.
3. Ловейкин В. С. Расчеты оптимальных режимов движения механизмов строительных машин / В. С. Ловейкин. – К. : УМК ВО, 1990. – 168 с.
4. Петров Ю. П. Вариационные методы теории оптимального управления / Ю. П. Петров. – Л. : Энергия, 1977. – 280 с.
5. Математическая теория оптимальных процессов / [Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф.]. – М. : Физматгиз, 1961. – 392 с.
6. Беллман Р. Динамическое программирование ; под. ред. Н. Н. Воробьева. – М. : Изд-во ин. лит-ры, 1960. – 400 с.
7. Ловейкін В. С. Оптимізація перехідних режимів руху механічних систем прямим варіаційним методом / В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич. – К. : Видавель ПП Лисенко М. М., 2010. – 184 с.
8. Ловейкін В. С. Синтез оптимальних режимів руху механізмів і машин прямим варіаційними методами / В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – 2010. – Ч. 3. – Вип. 144. – С. 32–42.
9. Пат. 27443 Україна, МПК (2006) В66С 13/18. Пристрій для керування гальмуванням візка крана / Ловейкін В. С., Ярошенко В. Ф., Ромасевич Ю. О.; заявник та власник Національний аграрний університет. – № u 2007 08474; заявл. 23.07.2007; опубл. 25.10.2007, Бюл. № 17.

- 10.Смехов А. А. Оптимальное управление подъемно-транспортными машинами / А. А. Смехов, Н. И. Ерофеев. – М. : Машиностроение, 1975. – 239 с.
- 11.Герасимьяк Р. П. Анализ и синтез крановых электромеханических систем / Р. П. Герасимьяк, В. А. Лещёв. – Одесса : СМІЛ, 2008. – 192 с.
- 12.Григоров О. В. Вантажопідйомні машини : навч. посіб. / О. В. Григоров, Н. О. Петренко. – Харків : НТУ “ХПІ”, 2006. – 304 с.
- 13.Ловейкін В. С. Оптимізація режимів руху кранових механізмів / В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич. – К. : Видавець ПП Лисенко М. М., 2011. – 307 с.
- 14.Пат. 92617 Україна, МПК (2009) В66С 13/00, В66С 13/22. Спосіб керування вантажним візком з вантажем на гнучкому підвісі / В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич; заявник та власник Національний аграрний університет. – № а 200806036; заявл. 8.05.2008; опубл. 25.11.2010, Бюл. № 22.
- 15.Ловейкін В. С. Застосування методів варіаційного числення в задачах оптимального управління вантажопідйомними машинами сільськогосподарського призначення / Ловейкін В. С., Човнюк Ю. В., Ромасевич Ю. О. // Підйомно-транспортна техніка. – 2010. – № 2. – С. 3–15.
- 16.Ловейкін В. С. Оптимізація управління механізмами пересування кранів та перевантажувачів / Ловейкін В. С., Човнюк Ю. В., Ромасевич Ю. О. // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – 2009 – Вип. 76. – С. 362–368.
- 17.Пат. 31547 Україна, МПК (2006) В66С 13/22. Пристрій для керування електроприводом механізму підйому прогінного крана / Ловейкін В. С., Ярошенко В. Ф., Ромасевич Ю. О.; заявник та власник Національний аграрний університет. – № у 2007 14347; заявл. 19.12.2007; опубл. 10.04.2008, Бюл. № 7.
- 18.Ловейкін В. С. Синтез С- та П-керування рухом механічних систем / В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич [Електронний ресурс]. – Режим доступу : URL : http://www.nbuu.gov.ua/portal/chem_biol/nvnu/2010_144_4/10gyo.pdf.
- 19.Ловейкін В. С. Реалізація оптимального керування рухом кранового візка за допомогою автоматизованої системи / В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич // Підйомно-транспортна техніка. – 2009. – № 2. – С. 3–20.
- 20.Пат. 91263 Україна, МПК (2009) В66С 13/04, В66С 13/22. Спосіб керування крановим візком з вантажем на гнучкому підвісі / В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич; заявник та власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. – № а 200811031; заявл. 9.09.2008; опубл. 12.07.2010, Бюл. № 13.
- 21.Пат. 50540 Україна, МПК (2009) В66С 13/00. Пристрій для керування приводом механізму переміщення візка крана / В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич; заявник та власник Національний університет біоресурсів і природокористування України. – № у 200913854; заявл. 29.12.2009; опубл. 10.06.2010, Бюл. № 11.
- 22.Ловейкін В. С. Дискретний метод синтезу оптимальних керувань технічними системами / В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – 2011. – Т. 2. – Вип. 107. – С. 119–125.



Підписано до друку 04.01.2012 Папір тип №1.,
Фіз. друк. аркушів 1.1 умов. друк. аркуш 1.2 Тираж 37 прим.,
Замовлення № 1

© Науково-методичний центр аграрної освіти
Міністерства аграрної політики України
03151, Київ - 151, вул. Смілянська, 11
тел.: 242-35-68, 242-35-66, 242-35-65

© Видавнича дільниця Наукметодцентру
всі права захищені, не підлягає копіюванню
03151, Київ - 151, вул. Смілянська, 11