



УДК 621.0 : 616.001.34

МЕХАТРОННІ СИСТЕМИ ЦИФРОВОГО УПРАВЛІННЯ АКТИВНОЮ ПІДВІСКОЮ АВТОМОБІЛЬНИХ КРАНІВ З АДАПТАЦІЄЮ ДО ЗОВНІШНЬОГО ЗБУРЕННЯ

Ловейкін В.С., д.т.н.,

Човнюк Ю.В., к.т.н.

*Національний університет біоресурсів і природокористування України
(м. Київ),*

Діктерук М.Г., к.т.н.,

Почка К.І., к.т.н.

Київський національний університет будівництва і архітектури (м. Київ)

Тел.: 527-87-34; e-mail: nditt@mail.ru

Анотація – запропонований алгоритм цифрового управління активною підвіскою автомобільних кранів, яка адаптована до зовнішніх збурень. Отримані матричні рівняння стану та спостереження з використанням моделі твердого тіла щодо корпусу автокрана.

Ключові слова – мехатронні системи, цифрове управління, активна підвіска, автомобільні крани, адаптація, зовнішнє збурення.

Постановка проблеми. Ефективний розв'язок задачі гасіння вертикальних коливань підресореної маси транспортного засобу (автомобільного крану, зокрема) на частотах $0 \dots 10$ Гц, викликаних рухом по мікропрофілю дороги, а також задачі компенсації крену (наприклад, при повороті) можливий лише із застосуванням активної (керованої) підвіски. При цьому до складу підвіски входять, крім звичайних пасивних елементів (ресори, гідравлічні демпфери), виконавчі органи (як правило, гідроциліндри) й мехатронна система управління, котра здійснює зміну динамічних властивостей підвіски у залежності від зовнішніх впливів, отримуючи інформацію відповідних вимірювальних елементів (акселерометрів та датчиків відносного положення підресорених та непідресорених мас). Розвиток засобів обчислювальної техніки і, зокрема, мікропроцесорів, дозволяє шукати підходи до створення адаптивних систем (мехатронного типу) управління за допомо-

гою бортової цифрової обчислювальної машини (ЦОМ). У даній роботі викладена спроба створення алгоритму цифрового управління активною підвіскою з адаптацією до зовнішнього збурення.

Аналіз останніх досліджень. Використання принципів сучасної теорії автоматичного управління [1, 4, 6, 9] передбачає наявність динамічної моделі транспортного засобу (автокрана [8, 11]) з активною підвіскою у вигляді рівнянь стану і спостереження. Авторами були отримані матричні рівняння стану і спостереження з використанням моделі твердого тіла щодо корпусу автокрана [2].

Формулювання цілей статті. Створення алгоритму цифрового управління (мехатронного типу) активною підвіскою автокрана, що адаптована до зовнішнього впливу. Для досягнення вказаної мети роботи отримані матричні рівняння стану і спостереження, які дають змогу реалізувати принципи сучасної теорії автоматичного управління.

Основна частина. 1. Неперервна система: симетрична та косиметрична моделі. Внаслідок наявності у досліджуваній механічній системі площини симетрії окремо розглядались дві моделі.

Симетрична модель (система 23-го порядку):

$$X_c = A_c \cdot X_c + B_c \cdot U_c + W_{1c}; \quad Y_c = C_c \cdot X_c; \quad (1)$$

косиметрична модель (система 19-го порядку):

$$X_k = A_k \cdot X_k + B_k \cdot U_k + W_{1k}; \quad Y_k = C_k \cdot X_k. \quad (2)$$

До рівнянь (1) та (2) слід додати два додаткових рівняння, які враховують попередню обробку сигналів з датчиків прискорення мехатронної системи:

$$Y_c = \begin{vmatrix} A_1 \\ 1/2 \cdot (A_2 + A_3) \end{vmatrix}; \quad (3)$$

$$Y_k = \frac{(A_2 - A_3)}{2 \cdot l}, \quad (4)$$

де l – довжина рами.

Тут A_1 – сигнал прискорення, який вимірюється у центрі рами над переднім мостом автокрана; A_2 та A_3 – сигнали прискорень, які вимірюються у кінцевих точках рами над заднім мостом. Рівняння (1)-(4) у сукупності описують повну динамічну модель двовісного транспортного засобу (автокрана) і є основою побудови дискретної (цифрової) мехатронної системи управління підвіскою. Вважаємо, що вхідне збурення представляє собою стаціонарний випадковий процес. У матричних рівняннях (1) та (2) коефіцієнти, що характеризують вхідні

збурення $C_1, C_0, d_3, d_2, d_1, d_0$ та α , постійні і рівняння (1) та (2) мають постійні матриці A, B, C .

Для керування за допомогою бортової ЦОМ необхідно перейти від неперервної системи (1)-(4) до дискретної [1] як для симетричної моделі, так і для кососиметричної.

Для зручності надамо змінним та коефіцієнтам рівнянь для неперервних систем індекс “ n ” і для дискретних – “ d ”. Зазначимо також, що для впливу на виконавчий орган (гідроциліндр), у розглядуваному випадку використовується неперервний сигнал U , що виробляється у цифро-аналоговому перетворювачі (ЦАП), який знаходиться між керуючим виходом бортової універсальної цифрової обчислювальної машини (УЦОМ) і виконавчим органом.

Припустимо, що у якості ЦАП застосовується найпростіший тип, що називається екстраполятором (фіксатором) нульового порядку [3], який підтримує рівень сигналу на виході постійним у інтервалі $t_i \leq t \leq t_{i+1}$, де $(t_{i+1} - t_i)$ – період квантування.

2. Перехід від неперервної системи до дискретної.

Отже, слід перейти від системи

$$X_n = A_n \cdot X_n + B_n \cdot U + W_n; \quad Y_n = C_n \cdot X_n$$

до дискретної системи:

$$X(i+1) = A_d \cdot X(i) + B_d \cdot U(i) + W_{d1}(i), \quad (5)$$

де $A_d = e^{A_n \cdot \Delta}$; $B_d = B_n \cdot \int_0^{\Delta} e^{A_n \cdot \tau} d\tau$; $W_{d1}(i) = \left(\int_0^{\Delta} e^{A_n \cdot \tau} d\tau \right) \cdot W_{n1}$; e^{Δ} – матричний експоненціал; $\Delta = (t_{i+1} - t_i)$ – інтервал квантування, для розглядуваного випадку $\Delta = const$.

$$e^{A_n} = I + A_n + \frac{1}{2!} \cdot A_n^2 + \frac{1}{3!} \cdot A_n^3, \quad (6)$$

де I – одинична квадратна матриця того ж порядку, що й A_n .

Для переходу від неперервної системи рівнянь спостереження до дискретної зазначимо, що:

- 1) моменти часу, у які змінюється величина вхідної змінної U , позначаються t_i ($i = 0, 1, 2$);
- 2) момент спостереження t'_i завжди передуює моменту управління t_{i+1} ;
- 3) різниця $t_{i+1} - t'_i$ зветься запізненням при обробці даних; за цей відрізок часу у системі управління необхідно визначити вхідну змінну $U(t_{i+1})$ на основі результатів процесу спостереження $Y(t'_i)$; $t'_i - t_i = \Delta'$.

Координата $X_{n+1}(i) = W(i-k)$ ввійде у перші n рівнянь системи (5). Таким чином, простір станів буде мати порядок $(n+k)$ (завдяки доповненню системи рівнянь (5) системою (9)).

Остаточно маємо:

$$X(i+1) = A \cdot X(i) + B(i) + W_1(i) \tag{10}$$

та

$$Y(i) = C \cdot X(i) + E \cdot U(i) \cdot W_2(i). \tag{11}$$

У цих рівняннях враховується розширення простору станів, оскільки:

$$B^T = \begin{bmatrix} B_\Delta & 0 \\ (1 \times n) & (1 \times k) \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} C_\delta & 0 \\ (2 \times n) & (2 \times k) \end{bmatrix}; \quad E^T = \begin{bmatrix} E_\delta & 0 \\ (1 \times n) & (1 \times k) \end{bmatrix}^T.$$

Тут 0 – нульова матриця; T – символ транспонування.

4. Дискретний спостерігач у формі фільтра Калмана.

Згідно роботам [1, 5], використаємо для створення системи оптимального управління дискретний фільтр Колмана та дискретне оптимальне управління за вектором оцінок координат стану. Припускаючи, що $Y(i)$ з рівняння (11) є останнім доступним спостереженням для відновлення $X(i+1)$, до даної системи, що описується рівняннями (10) та (11), можна приєднати спостерігача виду:

$$X(i+1) = A \cdot X(i) + B(i) \cdot U(i) + K \cdot [Y(i) - E \cdot U(i) - C \cdot X(i)], \tag{12}$$

а управління за зворотними зв'язками здійснювати за вектором оцінок стану:

$$U(i) = -F \cdot X(i). \tag{13}$$

У рівняннях (10) та (11) K і F – невідомі постійні матриці коефіцієнтів підсилення; K – матриця порядку $(23+k) \times 2$ для симетричної моделі та $(19+k) \times 1$ для кососиметричної; F – матриця порядку $1 \times (23+k)$ для симетричної моделі та $1 \times (19+k)$ – для кососиметричної.

Структура мехатронної системи для автокрану зі спостерігачем дискретного типу (у формі фільтра Калмана) подана на рис. 1.

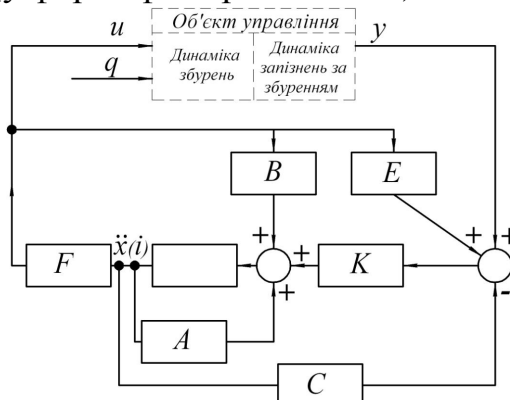


Рис. 1. Система цифрового управління автокрана.

Для визначення матриці K зробимо припущення, що рівняння спостережень дійсно відповідають рівнянням (8) та (11), і припустимо, що векторні процеси $W_1(i)$ та $W_2(i)$ некорельовані, а дисперсія породжуючого скалярного процесу $W(i)$ (породженого процесом $W(t)$), дорівнює одиниці. Оскільки цей процес є породжуючим усіх складових вектору $W_1(i)$, тоді можна визначити взаємні кореляції між окремими складовими вектора та побудувати всю постійну матрицю дисперсій V_1 процесу W_1 . Що стосується процесу $W_2(i)$, то для початку доволно приймаємо матрицю дисперсій рівною

$$V_2 = \begin{vmatrix} v_{21} & 0 \\ 0 & v_{22} \end{vmatrix} \tag{14}$$

для симетричної моделі та $V_2 = v_2$ для кососиметричної, тобто

$$V_2 = \begin{vmatrix} v_2 & 0 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}. \tag{15}$$

Матриця K визначається через допоміжну квадратну матрицю Q порядку $(n+k)$:

$$K = A \cdot Q \cdot C^T \cdot [V_2 + C \cdot Q \cdot C^T]^{-1}, \tag{16}$$

а матриця Q визначається з алгебраїчного дискретного матричного рівняння Ріккати оптимального спостереження [7]:

$$Q = A \cdot Q \cdot A^T - A \cdot Q \cdot C^T \cdot [C \cdot Q \cdot C^T + V_2]^{-1} \cdot Q \cdot A^T + V_1. \tag{17}$$

Для визначення матриці F запишемо вираз, який мінімізується оптимальним законом управління:

$$J = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \cdot M \cdot \left\{ \sum_{i=i_0}^{i_0+N-1} [Z^T \cdot R_3 \cdot Z + U^T \cdot R_2 \cdot U] \right\}, \tag{18}$$

де M – математичне очікування; R_2 та R_3 – матриці вагових коефіцієнтів; Z – вектор керованих змінних; $R_3 = \begin{vmatrix} r_{31} & 0 & 0 \\ 0 & r_{32} & 0 \\ 0 & 0 & r_{33} \end{vmatrix}$; $Z = D \cdot X$; $R_2 = r_2$ –

скалярний ваговий коефіцієнт.

Для симетричної моделі

$$D = 3 \times (23+k) \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & C_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \tag{19}$$

де C_2 – другий порядок матриці C для симетричної моделі.

Подібний вибір мінімізуючого виразу для симетричної моделі дозволяє мінімізувати середньоквадратичну величину прискорення на рамі автокрану за мінімального значення середньоквадратичного відносного переміщення підресореної та непідресореної мас задньої підвіски і мінімальної середньоквадратичної деформації шин задніх коліс, а також середньоквадратичне значення дискретної вхідної змінної U_{cd} .

Для кососиметричної моделі

$$D = 5 \times (19 + k) \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & C & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -l & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -l & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad (20)$$

де C – матриця спостережень для симетричної моделі, $1 \times (19 + k)$.

Подібний вибір мінімізуючого виразу для кососиметричної моделі дозволяє мінімізувати середньоквадратичне значення прискорення $\ddot{\theta}$, відносні переміщення у передній та задній підвісках і мінімальні середньоквадратичні деформації шин переднього та заднього коліс, а також середньоквадратичне значення дискретної вихідної змінної U_{kd} .

Матриця R_1 визначається через R_3 та D : $R_1 = D^T \cdot R_3 \cdot D$. Коефіцієнт підсилення F визначається через допоміжну матрицю P наступним чином [7]:

$$F = \left[R_2 + B^T \cdot (R_1 + P) \cdot B \right]^{-1} \cdot B^T \cdot (R_1 + P) \cdot A. \quad (21)$$

Допоміжна матриця P визначається з розв'язку дискретного алгебраїчного матричного рівняння Ріккаті для задачі оптимального управління:

$$P = R_1 + A^T \cdot \left[P^{-1} + B \cdot R_2^{-1} \cdot B^T \right]^{-1} \cdot A. \quad (22)$$

Схема обробки сигналів прискорень A_1 , A_2 і A_3 автокрану, необхідної для виділення симетричної та кососиметричної моделей і об'єднання їх у єдину модель за оптимального управління активною підвіскою автокрану, наведена на рис. 2.

На рис. 2 введені позначення: ЦАП – цифровий аналоговий перетворювач; ОУ – об'єкт управління; ФКСС – фільтр Калмана слідкуючої системи; АЦП – аналоговий цифровий перетворювач; ЛЦ – ліва цифра; ПЦ – права цифра (канал).

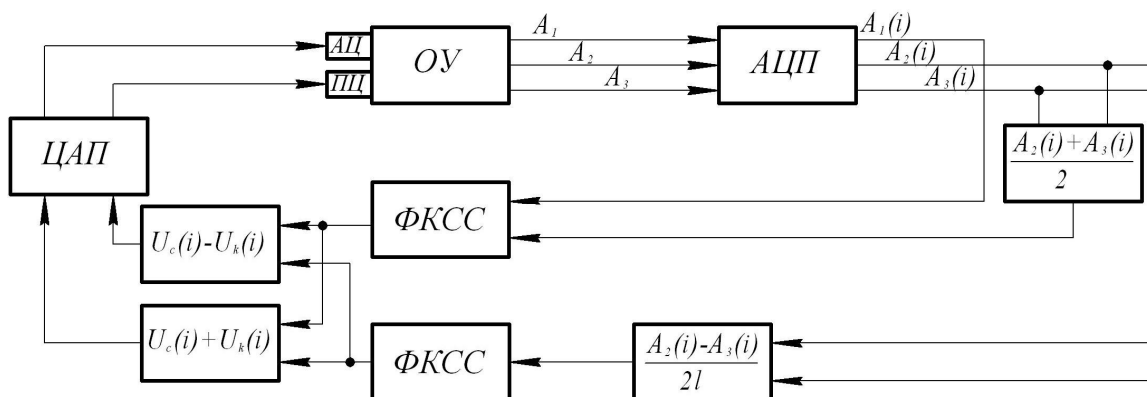


Рис. 2. Схема обробки сигналів прискорень (з акселерометрів A_1 , A_2 та A_3) автокрану.

Пояснимо за допомогою схеми на рис. 3 дію системи управління у реальному масштабі часу. З моменту t_i у системі діє постійний сигнал управління $u(i)$. У рівнянні (12) до моменту часу t'_i розраховуються складові правої частини, що використовують оцінки $x(i)$ та управління $u(i)$. У момент t' надходить інформація з датчиків $y(i)$, обробляється і в момент t'' розраховується оцінка $x(i+1)$, а у момент часу t_{i+1} визначається $u(i+1)$, й управління $u(i)$ змінюється, стаючи рівним $u(i+1)$.

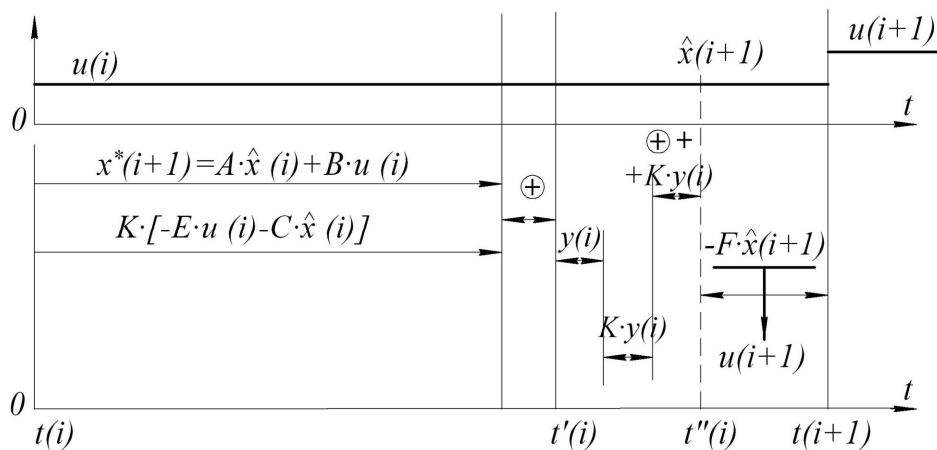


Рис. 3. Часова діаграма дії системи управління автокраном (мехатронного типу).

5. Адаптація до зовнішніх збурень.

На наступному етапі побудови оптимального управління знімемо припущення про стаціонарність вхідних впливів. Зазначимо, що питання про досконалість методів синтезу підвіски автокрану, яке засноване на припущенні про стаціонарність вхідних впливів, часто постає у дискусійному плані [7, 8]. Хоча методи синтезу підвісок автокранів,

засновані на припущенні про стаціонарність вхідних випадкових впливів, розроблені ще недостатньо для практичних застосувань, питання врахування нестаціонарності заслуговує уваги. Для автокранів нестаціонарність впливів пов'язана зі змінною у часі швидкістю руху, із залежністю реакції водія на виникаючу дорожню ситуацію, з рухом вповодж доріг з різним мікропрофілем.

Розвиток засобів керуючої обчислювальної техніки, зокрема міні-ЦОМ та мікропроцесорів, мехатроніки у цілому, дають можливість створювати алгоритми управління з адаптацією до зовнішніх збурень [9].

Розглянемо один із можливих підходів до розв'язку цієї задачі. У якості основного припущення вважатимемо, що структура спектральної щільності вхідного впливу S_{qq} не змінюється, а коефіцієнти C_1 , C_0 , d_3 , d_2 , d_1 , d_0 , а також v_{21} та v_{22} для симетричної моделі і V_2 – для косиметричної змінні.

Побудуємо діючий у реальному масштабі часу додатковий фільтр Калмана, котрий назвемо ФК2 на відміну від фільтру Калмана, працюючого у контурі управління (ФК1).

Структуру ФК2 подамо у вигляді:

$$\begin{cases} \tilde{X}(i+1) = \tilde{A} \cdot \tilde{X}(i) + \tilde{K} \cdot [Y(i) - C \cdot X(i)]; \\ Y(i) = \tilde{C} \cdot \tilde{X}(i) + W_2(i). \end{cases} \quad (23)$$

Тут

$$\tilde{X}(i) = \begin{bmatrix} X(i) \\ X(i) \end{bmatrix}; \quad \tilde{A} = \begin{bmatrix} A & -B \cdot F \\ K \cdot C & (A - K \cdot C - B \cdot F) \end{bmatrix}; \quad \tilde{C} = [C; 0], \quad (24)$$

де \tilde{C} – матриця, яка має вдвічі більше стовпчиків і ту ж кількість рядків, що й матриця C .

Таким чином ФК2 є спостерігачем для повної дискретної системи – об'єкт та ФК1, але при цьому він не використовується для керування у реальному часі, а тільки для виробітку оцінок координат стану. Розрахунок матриці \tilde{K} та допоміжної матриці \tilde{Q} здійснюється за рівняннями (16) та (17). Структура ФК2 подана на рис. 4.

Розглянемо далі алгоритм адаптації. Спочатку подамо дію алгоритму у часі (рис. 5). Зазначимо, що процес адаптації періодично повторюється. Припустимо, що до початку процесу ми маємо у ФК1 та ФК2 всі коефіцієнти: A , B , C , E , F , K та \tilde{K} . Далі послідовність обробки буде наступною:

а) заповнюються значення реалізацій процесу $y(i)$ у часі для N дискретних точок;

- б) підраховується середньоквадратичне значення різниці $Y(i) - \tilde{K} \cdot [\tilde{E} \cdot U(i) - \tilde{C} \cdot \tilde{X}(i)]$ та $M \{Y(i) - \tilde{K} \cdot [\tilde{E} \cdot U(i) - \tilde{C} \cdot \tilde{X}(i)]\}^2$;
- в) у ФК2 задаються нові значення $C_1, C_0, d_3, d_2, d_1, d_0, v_{21}, v_{22}$ та V_2 ;
- г) визначаються нові значення $\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}, \tilde{E}$ та \tilde{K} через рівняння (16) та (17) та встановлюються на ФК2;
- д) у процесі виконання пункту “г” запам’ятовуються N' нових значень $Y(i)$;
- е) повторюється розрахунок по пункту “б”;
- є) повторюється розрахунок по пунктах “в” та “г”;
- ж) для кососиметричної моделі знаходимо мінімальне значення M , а для симетричної обираємо точку з множини Парето [10]. Цей етап остаточно визначає нові значення A, B, C, E для ФК1 та ФК2.

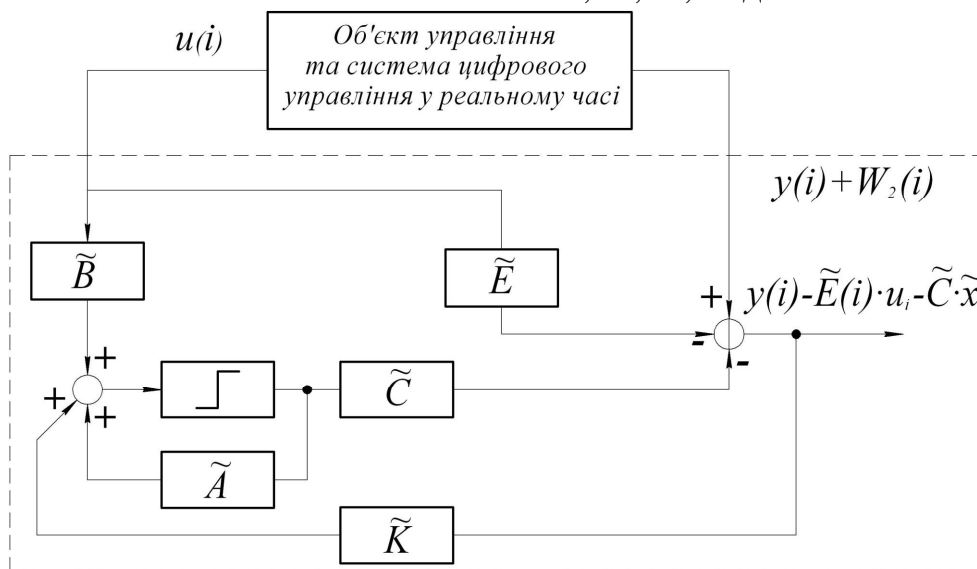


Рис. 4. Структура дискретного фільтра Калмана ФК2.

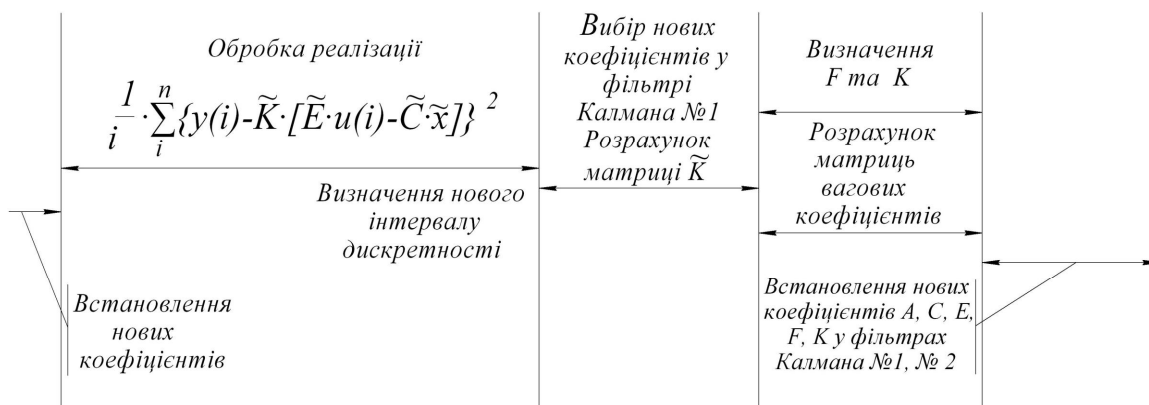


Рис. 5. Часова діаграма дії алгоритму адаптації.

Потім за рівняннями (16) та (17) розраховується нове значення K , варіюється значення R_3 та R_2 і з рівнянь (21) та (22) визначається F , причому обирається найбільш “вдале” значення F , виходячи з оцінок середньоквадратичних значень прискорень та відносних переміщень у симетричній та кососиметричній моделях за даними оптимальної реалізації $Y(i)$. Цей етап вимагає більш ретельної розробки. Далі описаний вище процес повторюється.

Висновки.

1. Створений алгоритм цифрового управління активною підвіскою автокрану із використанням мехатронних систем, який адаптований до зовнішнього збурення.

2. Наведені система цифрового управління, схема обробки сигналів прискорень з акселерометрів, часова діаграма дії системи управління, структура дискретних фільтрів Калмана та часова діаграма дії алгоритму адаптації.

3. Запропоновані у роботі підходи можуть бути у подальшому використані для вдосконалення існуючих мехатронних систем управління рухом автомобільних кранів.

Література

1. *Квакернаак Х.* Линейные оптимальные системы управления. / *Х. Квакернаак, Р. Сиван.* – М.: Мир, 1977. – 650 с.
2. *Ротенберг Р.В.* Подвеска автомобиля. / *Р.В. Ротенберг.* – М.: Машиностроение, 1972. – 382 с.
3. *Бесекерский В.А.* Цифровые автоматические системы. / *В.А. Бесекерский.* – М.: Наука, 1976. – 576 с.
4. *Спиди К.* Теория управления. / *Спиди К., Браун Р., Гудвин Дж.* – М.: Мир, 1973. – 248 с.
5. *Браммер К.* Фильтр Калмана-Бьюси. / *К. Браммер, Г. Зиффлинг.* – М.: Наука, 1982. – 200 с.
6. *Сейдж Э.П.* Оптимальное управление системами. / *Э.П. Сейдж, Ч.С.Ш. Уайт.* – М.: Радио и связь, 1982. – 392 с.
7. *Гришкевич А.И.* Применение ЭВМ при конструировании и расчёте автомобиля. / *А.И. Гришкевич.* – Минск: Высш. школа, 1978. – 263 с.
8. *Останин А.Н.* Принципы, теоретические и прикладные основы управления колебаниями многоопорных машин. / *А.Н. Останин.* – Автореферат дис. ... д-ра техн. наук. – Минск: БПИ, 1982. – 24 с.
9. *Саридис Дж.* Самоорганизующиеся стохастические системы управления. / *Дж. Саридис.* – М.: Наука, 1980. – 310 с.

10. *Соболь И.М.* Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. / *И.М. Соболь, Р.Б. Статников.* – М.: Наука, 1981. – 110 с.
11. *Пенчук В.А.* Основы механизации малообъёмных и рассредоточенных строительных и коммунальных работ. / *Пенчук В.А., Даценко В.М., Пенчук В.В.* – Донецк: изд-во “Ноулидж” (Донецкое отделение), 2011. – 257 с.

МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНОЙ ПОДВЕСКОЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ КРАНОВ С АДАПТАЦИЕЙ К ВНЕШНЕМУ ВОЗМУЩЕНИЮ

Ловейкин В.С., Човнюк Ю.В., Диктерук М.Г., Почка К.И.

Аннотация – предложен алгоритм цифрового управления активной подвеской автомобильных кранов, которая адаптирована ко внешним возмущениям. Получены матричные уравнения состояния и наблюдения с использованием модели твёрдого тела относительно корпуса автокрана.

DIGITAL CONTROL MECHATRONIC SYSTEMS OVER AUTOMOBILE CRANES' ACTIVE SUSPENSION WITH ADAPTATION TO EXTERNAL DISTURBANCE

V. Loveykin, Y. Chovnyuk, M. Dykteruk, K. Pochka

Summary

The algorithm on digital control over active suspension of the automobile cranes which is adapted to external disturbances has been proposed. Matrix equations of state and supervision with the solid body model usage as to the automobile crane's body have been obtained.