

ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫЕ МАШИНЫ

УДК 621.0:616-001.34-752

МЕХАТРОННІ СИСТЕМИ ЦИФРОВОГО УПРАВЛІННЯ АКТИВНОЮ ПІДВІСКОЮ ВАНТАЖОПІДЙОМНИХ МАШИН З АДАПТАЦІЄЮ ДО ЗОВНІШНЬОГО ЗБУРЕННЯ

Ю.В. Човнюк, доц., к.т.н., Національний університет біоресурсів і природо-користування України, М.Г. Діктерук, доц., к.т.н., С.Ю. Комоцька, асист., Київський національний університет будівництва і архітектури

Анотація. Запропоновано алгоритм цифрового управління активною підвіскою вантажопідійомних машин з адаптацією до зовнішнього збурення.

Ключові слова: мехатроніка, система, цифрове управління, активна підвіска, вантажопідійомна машина, адаптація, зовнішнє збурення.

МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНОЙ ПОДВЕСКОЙ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МАШИН С АДАПТАЦИЕЙ К ВНЕШНЕМУ ВОЗМУЩЕНИЮ

Ю.В. Човнюк, доц., к.т.н., Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, М.Г. Диктерук, доц., к.т.н., С.Ю. Комоцкая, ассист., Киевский национальный университет строительства и архитектуры

Аннотация. Предложен алгоритм цифрового управления активной подвеской грузоподъемных машин с адаптацией к внешнему возмущению.

Ключевые слова: мехатроника, система, цифровое управление, активная подвеска, грузоподъемная машина, адаптация, внешнее возмущение.

MECHATRONIC SYSTEM OF DIGITAL CONTROL FOR ACTIVE PENDANT OF HOISTING MACHINES WITH ADAPTATION TO EXTERNAL PERTURBATION

Yu. Chovnyuk, Assoc. Prof., Cand. Sc. (Eng.) National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, M. Dykteruk, Assoc. Prof., Cand. Sc. (Eng.), S. Komotskaya, T. Asst., Kyiv's National University of Construction and Architecture

Abstract. The algorithm of digital control is offered by the active pendant of hoisting machines with adaptation to external perturbation.

Key words: mechatronics, system, digital control, active pendant, hoisting machine, adaptation, external indignation.

Вступ

Ефективне вирішення задачі суттєвого зниження вертикальних коливань підресореної маси транспортного засобу (на частотах

0–10 Гц), викликаних рухом, наприклад, автомобільного крана вдовж мікропрофілю дороги (чи рейкового шляху – для, скажімо, мостових кранів), а також задачі компенсації нахилу (наприклад, при повороті) можливе

лише із застосуванням активної (керованої) підвіски. При цьому до складу підвіски входять, окрім звичайних пасивних елементів (ресори, гідравлічні демпфери), виконавчі органи (як правило, гідроциліндри) і система управління (мехатронна), яка здійснює зміну динамічних властивостей підвіски залежно від зовнішніх впливів, отримуючи інформацію від відповідних вимірювальних елементів (акселерометрів і датчиків відносно положення підресорених та непідресорених мас). Розвиток засобів обчислювальної техніки і, зокрема, мікропроцесорів, дозволяє шукати підходи до створення адаптивних систем управління (мехатронного типу) за допомогою бортової ПЕОМ.

Аналіз публікацій

Використання принципів сучасної теорії автоматичного управління [1] передбачає наявність динамічної моделі транспортного засобу/вантажопідйомної машини (автомобільний кран або мостовий кран та ін.) з активною підвіскою у вигляді рівнянь стану і спостереження.

Автори [2] отримали матричні рівняння стану і спостереження з використанням уявлення про корпус вантажопідйомної машини (наприклад, автомобіля) як про тверде тіло [3]. Результати цитованих вище робіт будуть використані у цьому дослідженні. Для автомобільних кранів (як, до речі, й мостових) за цією темою відсутні будь-які дослідження. Для моделювання функціонування цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) використано його найпростіший тип – екстраполятор (фіксатор) нульового порядку, а запізнення у збуреннях [5] і дискретний спостерігач (у формі фільтра Калмана) [1, 6] використано для створення системи оптимального управління (дискретний фільтр Калмана + дискретне оптимальне управління за вектором оцінок координат стану).

Мета і постановка завдання

Мета роботи полягає в обґрунтуванні алгоритму цифрового управління активною підвіскою вантажопідйомних машин з адаптацією до зовнішнього збурення (мехатронного типу), які застосовуються в управлінні рухом/маневрами, зокрема автомобільних та мостових кранів.

Обґрунтування алгоритму цифрового управління

Автори [2] отримали матричні рівняння стану і спостереження досліджуваної механічної системи (транспортний засіб, автомобільний/мостовий кран та ін.), яка внаслідок наявності площини симетрії має дві математичні моделі: 1) симетричну модель (система 23-го порядку); 2) кососиметричну модель (система 19-го порядку). Перша з них описується системою матричних рівнянь типу

$$\dot{X}_C = A_C \cdot X_C + B_C \cdot U_C + W_{1C}, Y_C = C_C \cdot X_C. \quad (1)$$

Друга має такий вигляд:

$$\dot{X}_K = A_K \cdot X_K + B_K \cdot U_K + W_{1K}, Y_K = C_K \cdot X_K. \quad (2)$$

До рівнянь (1) і (2) слід додати два додаткових рівняння, які врахують попередню обробку сигналів з датчиків прискорення

$$Y_C = \left| \begin{array}{c} A_1 \\ \frac{1}{2} \cdot (A_2 + A_3) \end{array} \right|, \quad (3)$$

$$Y_K = (A_2 - A_3) / 2l. \quad (4)$$

Тут і надалі індекс «С» відповідає терміну «симетричний», а «К» – терміну «кососиметричний».

У (3), (4) A_1 – сигнал прискорення, який вимірюється у центрі рами над переднім мостом; A_2 й A_3 – сигнали прискорень, що вимірюються у кінцевих точках рами над заднім мостом; l – довжина рами. Рівняння (1) – (4) у сукупності описують повну динамічну модель дво-вісного транспортного засобу (крана) і є основою побудови дискретної (цифрової) системи управління підвіскою. Вважаємо, що вхідне збурення являє собою стаціонарний випадковий процес. У матричних рівняннях (1) і (2) коефіцієнти, які характеризують вхідні збурення $C_1, C_0, d_3, d_2, d_1, d_0$ й α , постійні, і рівняння (1), (2) мають постійні матриці A, B, C .

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

Дискретний спостерігач у формі фільтра Калмана

Використовуючи роботи [1, 6], застосуємо для створення системи оптимального керування дискретний фільтр Калмана й дискретне оптимальне керування за вектором оцінок координат стану. Припускаючи, що $Y(i)$ з рівняння (9) є останнім доступним спостереженням для відновлення $X(i+1)$, до системи, яка описується рівняннями (8) та (9), можна додати спостерігач вигляду

$$\hat{X}(i+1) = A \cdot \hat{X}(i) + B(i) \cdot U(i) + K[Y(i) - E \cdot U(i) - C \cdot \hat{X}(i)], \quad (10)$$

а керування за зворотними зв'язками здійснювати за вектором оцінок стану

$$U(i) = -F \cdot \hat{X}(i). \quad (11)$$

У рівняннях (10) та (11) K й F – невідомі постійні матриці коефіцієнтів підсилення; K – матриця порядку $[(23+k) \times 2]$ для симетричної моделі й $[(19+k) \times 1]$ для кососиметричної; F – матриця порядку $[1 \times (23+k)]$ для симетричної моделі й $[1 \times (19+k)]$ – для кососиметричної. Структуру системи подано на рис. 1.

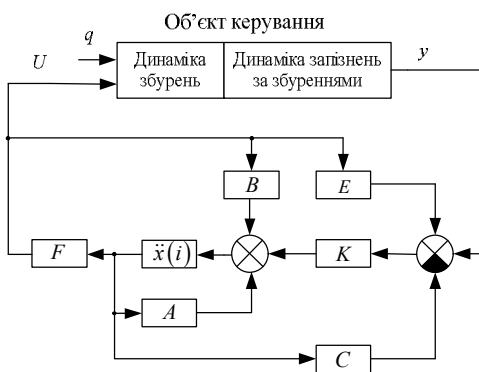


Рис. 1. Система цифрового керування

Для визначення матриці K зробимо припущення, що рівняння спостережень дійсно відповідають рівнянням (6) та (9), й допустимо, що векторні процеси $W_1(i)$ та $W_2(i)$ не корельовані, а дисперсія породжуваного скалярного процесу $W(i)$ (породжується процесом $W(t)$) дорівнює одиниці. Оскільки цей процес є породжуваним для усіх складових

вектора $W_1(i)$, тоді можна визначити взаємні кореляції між окремими складовими вектора й побудувати всю постійну матрицю дисперсій V_1 процесу W_1 . Що стосується процесу $W_2(i)$, то для початку довільно візьмемо матрицю дисперсій рівною

$$V_2 = \begin{bmatrix} v_{21} & 0 \\ 0 & v_{22} \end{bmatrix} \quad (12)$$

для симетричної моделі й $V_2 = v_2 -$ (13) для кососиметричної.

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

$$K = A \cdot Q \cdot C^T \cdot [V_2 + C \cdot Q \cdot C^T]^{-1}, \quad (14)$$

а матриця Q – з алгебраїчного дискретного матричного рівняння Рікатті оптимального спостереження [8]

$$Q = A \cdot Q \cdot A^T - A \cdot Q \cdot C^T \times [C \cdot Q \cdot C^T + V_2]^{-1} \cdot Q \cdot A^T + V_1 \quad (15)$$

Для визначення матриці F запишемо вираз, що мінімізується оптимальним законом управління

$$J = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \cdot M \left\{ \sum_{i=i_0}^{i_0+N-1} [Z^T R_3 Z + U^T R_2 U] \right\}, \quad (16)$$

де M – математичне очікування; R_2 й R_3 – матриці вагових коефіцієнтів; Z – вектор керованих змінних.

$$R_3 = \begin{bmatrix} \tau_{31} & 0 & 0 \\ 0 & \tau_{32} & 0 \\ 0 & 0 & \tau_{33} \end{bmatrix}; \quad Z = DX;$$

– скалярний ваговий коефіцієнт.

Для симетричної моделі

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & C_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad \dim D = [3 \times (23+k)], \quad (17)$$

де C_2 – другий рядок матриці C симетричної моделі.

Подібний вибір мінімізуючого виразу для симетричної моделі дозволяє мінімізувати середньоквадратичну величину прискорення на рамі транспортного засобу (вантажопідйомної машини) за мінімального значення середньоквадратичного відносного переміщення підресореної й непідресореної мас задньої підвіски й мінімальної середньоквадратичної деформації шин задніх коліс (для автомобільного крана), а також середньоквадратичне значення дискретної вхідної змінної $U_{сд}$.

Для кососиметричної моделі

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & C & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -I & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -I & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & \dots & 0 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$\dim D = [5 \times (19 + k)],$$

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

Подібний вибір мінімізуючого виразу для кососиметричної моделі дозволяє мінімізувати середньоквадратичне значення прискорення $\ddot{\theta}$, відносні переміщення у передній та задній підвісках і мінімальні середньоквад-

ратичні деформації шин переднього й заднього коліс (автомобільного крана), а також середньоквадратичне значення дискретної вихідної змінної $U_{кд}$. Матриця R_1 визначається через R_3 й D : $R_1 = D^T \cdot R_3 \cdot D$.

Коефіцієнт підсилення F визначається за допомогою допоміжної матриці P таким чином [8]

$$F = [R_2 + B^T (R_1 + P) \cdot B]^{-1} \cdot B^T (R_1 + P) \cdot A. \quad (19)$$

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

$$P = R_1 + A^T [P^{-1} + B \cdot R_2^{-1} \cdot B^T]^{-1} \cdot A \quad (20)$$

Схема обробки сигналів прискорень A_1 , A_2 й A_3 , необхідна для виділення симетричної й кососиметричної моделей та об'єднання їх в єдину модель при оптимальному управлінні активною підвіскою, наведена на рис. 2.

З'ясуємо за допомогою схеми на рис. 3 дію системи управління у реальному масштабі часу.

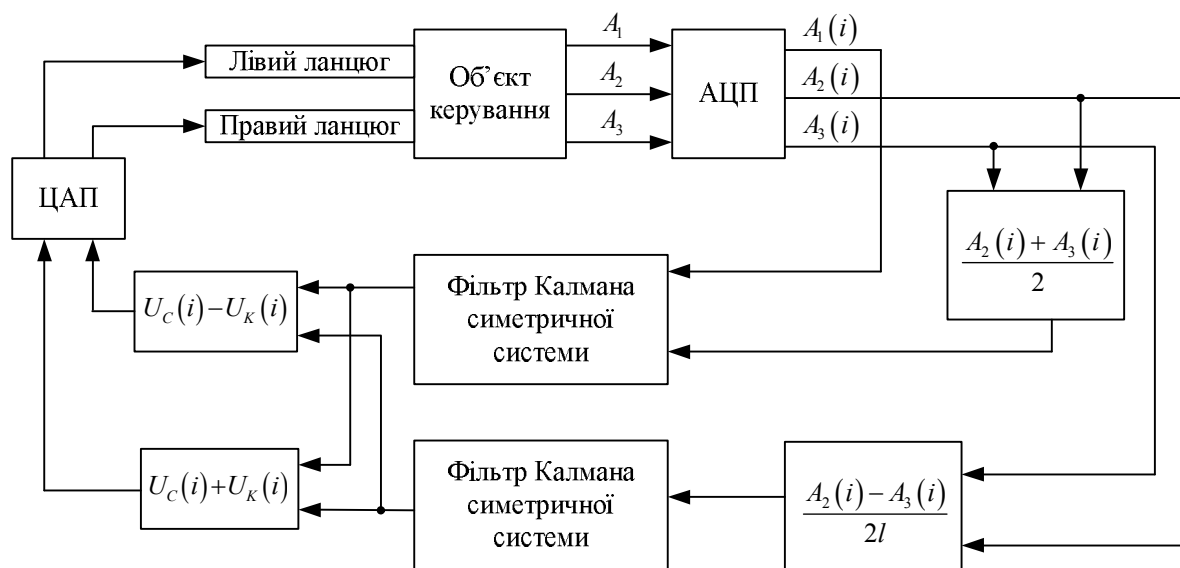


Рис. 2. Схема обробки сигналів прискорень (з акселерометрів A_1 , A_2 , A_3)

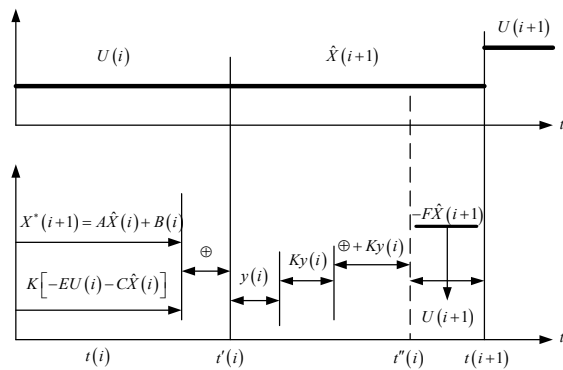


Рис. 3. Часова діаграма дії системи управління

З моменту t_i у системі діє постійний сигнал керування $u(i)$. У рівнянні (12) до моменту часу t'_i розраховуються складові правої частини, які використовують оцінки $\hat{X}(i)$ й управління $u(i)$. До моменту t' у систему надходить інформація з датчиків $y(i)$, обробляється й до моменту t'' розраховується оцінка $\hat{X}(i+1)$, а до моменту часу t_{i+1} визначається $u(i+1)$, й управління $u(i)$ змінюється, стаючи рівним $u(i+1)$.

Адаптація до зовнішніх збурень

На наступному етапі побудови оптимального керування знімаємо припущення щодо стаціонарності вхідних впливів. Зазначимо, що питання про досконалість методів синтезу підвіски, основаних на припущенні про стаціонарність вхідних впливів, досить часто постає у дискусійному плані [8, 9].

І хоча методи синтезу підвісок, основані на припущенні про стаціонарність вхідних випадкових впливів, розроблені ще недостатньо для практичних цілей, питання врахування нестационарності заслуговує на увагу.

Для вантажопідійомних машин нестационарність впливів пов'язана зі змінністю швидкості руху, із залежністю реакції оператора (водія, кранівника) від виникаючої поточної (дорожньої/рейкової) ситуації, від руху впо-довж шляхів/рейок з різним мікропрофілем.

Розвиток мехатронних засобів керування рухом сучасних вантажопідійомних машин, а саме: 1) засобів керуючої обчислюваної техніки; 2) мікропроцесорів; 3) міні- та мікро-ЕОМ – дає можливість створювати алгорит-

ми управління з адаптацією до зовнішніх впливів [10].

Розглянемо один з можливих підходів до розв'язку цієї задачі. Як основне припущення візьмемо, 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} й v_{22} для симетричної моделі й V_2 – для косо-симетричної, є змінними.

Побудуємо діючий у реальному масштабі часу додатковий фільтр Калмана, який назвемо ФК2, на відміну від фільтра Калмана, що працює у контурі управління (ФК1). Структуру ФК2 подамо у вигляді

$$\begin{aligned} \tilde{X}(i+1) &= \tilde{A} \cdot \tilde{X}(i) + \tilde{K} \cdot [Y(i) - CX(i)]; \\ Y(i) &= \tilde{C} \cdot \tilde{X}(i) + W_2(i). \end{aligned} \quad (21)$$

Тут у (23)

$$\begin{aligned} \tilde{X}(i) &= \begin{bmatrix} X(i) \\ \tilde{X}(i) \end{bmatrix}; \tilde{A} = \begin{bmatrix} A & -B \cdot F \\ K \cdot C & A - KC - BF \end{bmatrix}; \\ \tilde{C} &= [C; 0], \end{aligned} \quad (22)$$

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 управління +ФК1», але при цьому він не використовується для управління у реальному часі, а тільки для вироблення оцінок координат стану. Розрахунок матриці \tilde{K} й допоміжної матриці \tilde{Q} здійснюється за рівняннями (16) і (17). Структура ФК2 подана на рис. 4.

Розглянемо алгоритм адаптації. Спочатку подамо дію алгоритму в часі (рис. 5). Зазначимо, що процес адаптації періодично повторюється. Припустимо, що до початку процесу ми маємо у ФК1 й ФК2 усі коефіцієнти: A, B, C, E, F, K й \tilde{K} .

Далі послідовність обробки буде такою:
а) заповнюємо значення реалізацій процесу $y(i)$ у часі для N дискретних точок;
б) підраховуємо середньоквадратичне значення різниці

$$Y(i) - \tilde{K} [\tilde{E} \cdot U(i) - \tilde{C} \cdot \tilde{X}(i)]$$

та $M \{Y(i) - \tilde{K} [\tilde{E} \cdot U(i) - \tilde{C} \cdot \tilde{X}(i)]\}^2$; (23)

в) у ФК2 задаються нові значення $C_1, C_0, d_3, d_2, d_1, d_0, V_{21}, V_{22}, V_2$;

г) визначаються нові значення A, B, C, E, K за допомогою рівнянь (16) та (17) та встановлюються на ФК2;

д) у процесі виконання п. «г» запам'ятовуються N' нових значень $Y(i)$;

е) повторюємо розрахунок за п. «б»;

ж) повторюємо розрахунок за п. «в» і «г»;

и) для кососиметричної моделі визначаємо мінімальне значення M , а для симетричної обираємо точку з множини Парето [11]. Цей етап остаточно визначає нові значення A, B, C, E для ФК1 та ФК2.

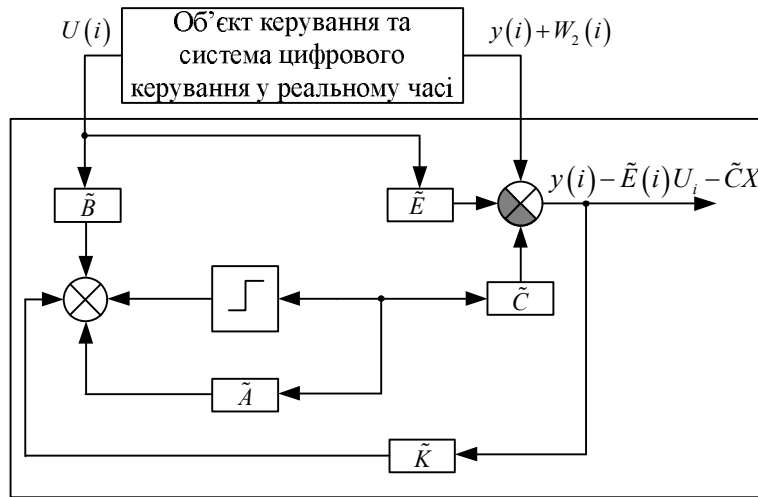


Рис. 4. Структура дискретного фільтра Калмана ФК2

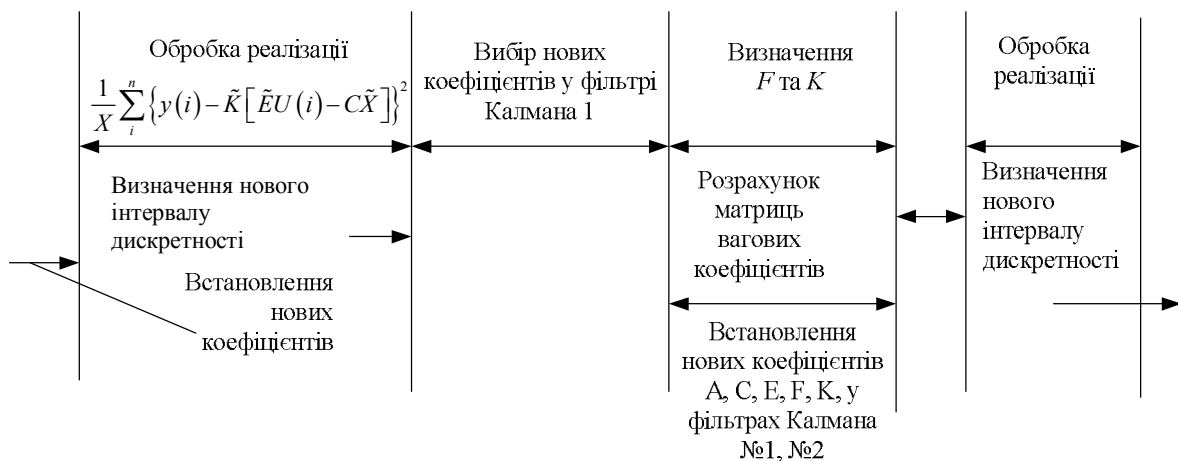


Рис. 5. Часова діаграма дії алгоритму адаптації

Потім за рівняннями (16) та (17) розраховується нове значення K , варіюються значення R_2 та R_3 і з рівнянь (21) та (22) визначається F , причому обирається найбільш прийнятне значення F , виходячи з оцінок середньоквадратичних значень прискорень та відносних переміщень у симетричній та кососиметричній моделях за даними опти-

мальної реалізації $Y(i)$. Цей етап вимагає більш ретельного опрацювання. Далі описаний вище процес повторюється.

Висновки

Обґрунтовано алгоритм цифрового управління активною підвіскою з адаптацією до зовнішнього збурення у мехатронних систе-

мах керування рухом вантажопідійомних машин. При цьому здійснено перехід від неперервної системи до дискретної, враховано запізнення у збуреннях, а дискретний спостерігач обрано у формі фільтра Калмана. Отримані у роботі результати можуть надалі слугувати для вдосконалення існуючих машин – як на стадіях їх проектування / конструювання, так і у режимах реальної експлуатації.

Література

1. Квакернаак Х. Линейные оптимальные системы управления / Х. Квакернаак, Р. Сиван. – М.: Мир, 1977. – 650 с.
2. Синев А.В. Цифровое управление активной подвеской с адаптацией к внешнему возмущению / А.В. Синев, В.С. Соловьев // Колебания и виброакустическая активность машин и конструкций. – 1986. – С.60–68.
3. Ротенберг Р.В. Подвеска автомобиля / Р.В. Ротенберг. – М.: Машиностроение, 1972. – 382 с.
4. Бесекерский В.А. Цифровые автоматические системы / В.А. Бесекерский. – М.: Наука, 1976. – 576 с.
5. Спици К. Теория управления / К. Спици, Р. Браун, Дж. Гудвин. – М.: Мир, 1973 – 248 с.
6. Браммер К. Фильтр Калмана-Бьюси / К. Браммер, Г. Зиффлинг. – М.: Наука, 1982. – 200 с.
7. Сейдж Э.П. Оптимальное управление системами / Э.П. Сейдж, Ч.С.Ш. Уайт. – М.: Радио и связь, 1982. – 392 с.
8. Гришкевич А.И. Применение ЭВМ при конструировании и расчете автомобиля / А.И. Гришкевич. – Минск: Высшая школа, 1978. – 263 с.
9. Останин А.Н. Принципы, теоретические и прикладные основы управления колебаниями многоопорных машин: автореф. дисс. на соискание уч. степ. доктора техн. наук / А.Н. Останин. – Минск: БПИ, 1982. – 24 с.
10. Саридис Дж. Самоорганизующиеся стохастические системы управления / Дж. Саридис. – М.: Наука, 1980. – 310 с.
11. Соболев И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И.М. Соболев, Р.Б. Статников. – М.: Наука, 1981. – 110 с.

Рецензент: О.В. Полярус, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Стаття надійшла до редакції 6 квітня 2016 р.