**УДК 612.372.061**

# Математична модель процесу діагностування мехатронної системи

Богдан Благітко[1], Ігор Заячук[2], Володимир Бригілевич[3], Ігор Ярмоловський[4]

[1] к. т. н., доцент, Львівський національний університет імені Івана Франка, вул. генерала Тарнавського, 107, Львів, 79017, e-mail: blagitko@electronics.wups.lviv.ua
[2] к. т. н., Центр математичного моделювання ІППММ ім. Я. С. Підстригача НАН України, вул. Дж. Дудаєва, 15, Львів, 79005, e-mail: igorzaj@litech.lviv.ua
[3] к. т. н., Львівський національний університет імені Івана Франка, вул. генерала Тарнавського, 107, Львів, 79017, e-mail: lmgo_icc@gmail.com
[4] Львівський національний університет імені Івана Франка, вул. генерала Тарнавського, 107, Львів, 79017, e-mail: yarmigor@gmail.com

*Запропоновано математичну модель для виявлення несправностей у мехатронних системах. Модель системи включає електричну, механічну підсистеми та підсистему взаємозв'язку між ними. Алгоритм діагностування, який використовують для електричних схем, розширений на мехатронні системи. Для підтвердження ефективності запропонованої моделі проведено тестування одноланкового маніпулятора (маніпуляційного модуля).*

**Ключові слова:** мехатронні системи, діагностування, системи за наявності шумів.

**Вступ.** Мехатронна система складається з електричної та механічної підсистем і є технічним комплексом із наперед заданими функціональними можливостями. У статті запропоновано методику діагностування мехатронних систем, які в науковій літературі називають мікроелектронними механічними системами (MEMS). Важливість діагностування таких систем постійно зростає [1].

Діагностування мехатронних систем має декілька напрямків:

- розвиток моделей мехатронних систем і їх комп'ютерне моделювання;
- вимірювання «номінальних» модулів під час діагностування мехатронних систем, розвиток методу виділення параметрів, які базуються на вимірюваннях і комп'ютерному моделюванні;
- виявлення помилок реальних систем із використанням комп'ютерного моделювання та вимірювання характеристик реальних систем.

Розглядаємо випадок м'яких несправностей в аналогових нелінійних мехатронних системах. Діагностування таких систем проводимо на основі алгоритму, запропонованого в [2] для електричних схем, у сукупності з блоком фільтрування виміряних даних. Для ілюстрації ефективності застосування запропонованого підходу досліджено мехатронну систему, яка складається з двигуна постійного струму з електронним управлінням і механічного одноланкового маніпулятора.

## 1. Процес діагностування мехатронної системи

Нехай мехатронна система складається з електричної, механічної підсистем і підсистеми зв'язку. Модифіковані вузлові рівняння, які описують динамічні процеси в електричній частині системи, можна записати у вигляді [4]

$$\mathbf{C}(\mathbf{P}_e)\dot{\mathbf{V}}(t,\mathbf{P}_e)+\mathbf{G}(\mathbf{P}_e)\mathbf{V}(t,\mathbf{P}_e)+\mathbf{N}(\mathbf{P}_{e,}\mathbf{V})=\mathbf{I}(t). \tag{1}$$

Тут **V** — вектор вузлових потенціалів, **G**, **C** — матриці активних і реактивних опорів, **I** — вектор збудження, **N** — вектор, який містить складники нелінійної частини, $\mathbf{P}_e$ — вектор діагностованих параметрів електричної системи, крапкою позначено операцію диференціювання за часом.

Для опису механічної підсистеми використовуємо рівняння стану

$$\mathbf{J}\dot{\mathbf{z}}(t,\mathbf{P}_m)+\mathbf{A}(\mathbf{P}_m)\mathbf{z}(t,\mathbf{P}_m)+\mathbf{B}(\mathbf{P}_m,\mathbf{z})=\mathbf{r}(t), \tag{2}$$

де **J** — матриця моментів інерції рухомих елементів системи; **A** — матриця демпфуючих коефіцієнтів; **B** — вектор нелінійних функцій, який включає силу тяжіння та тертя; **z** — вектор змінних стану (координати, швидкість); **r**(*t*) — вектор керуючих зусиль, прикладених до рухомих елементів системи; $\mathbf{P}_m$ — вектор діагностованих параметрів механічної підсистеми.

Нехай зв'язок між електричною та механічною підсистемами має лінійний характер

$$[\mathbf{L}_1,\mathbf{L}_2]\begin{bmatrix}\dot{\mathbf{V}}\\ \dot{\mathbf{z}}\end{bmatrix}+[\mathbf{K}_1,\mathbf{K}_2]\begin{bmatrix}\mathbf{V}\\ \mathbf{z}\end{bmatrix}+\mathbf{F}(\mathbf{P}_{em},\mathbf{V},\mathbf{z})=\mathbf{g}(t), \tag{3}$$

де $\mathbf{L}_1$, $\mathbf{L}_2$ та $\mathbf{K}_1$, $\mathbf{K}_2$ — матриці зв'язку між електричними та механічними змінними, які залежать від параметрів зв'язку $\mathbf{P}_{em}$; **F** — нелінійна частина зв'язку, $\mathbf{V}_m=\left[\mathbf{V}^T,\mathbf{z}^T\right]^T$, $\mathbf{P}=\left[\mathbf{P}_e^T,\mathbf{P}_{em}^T,\mathbf{P}_m^T\right]^T$ — вектори невідомих і діагностованих параметрів обох підсистем; символом «*T*» позначено операцію транспонування.

Об'єднавши співвідношення (1), (2) і (3), рівняння мехатронної системи можна подати у вигляді

$$\mathbf{C}_m\dot{\mathbf{V}}_m(t)+\mathbf{G}_m\mathbf{V}_m(t)+\mathbf{N}_m(\mathbf{P},\mathbf{V}_m)=\mathbf{E}_m(t), \tag{4}$$

де $\mathbf{C}_m=\begin{bmatrix}\mathbf{C} & 0\\ \mathbf{L}_1 & \mathbf{L}_2\\ 0 & \mathbf{J}\end{bmatrix}$, $\mathbf{G}_m=\begin{bmatrix}\mathbf{G} & 0\\ \mathbf{K}_1 & \mathbf{K}_2\\ 0 & \mathbf{A}\end{bmatrix}$, $\mathbf{E}_m(t)=\begin{bmatrix}\mathbf{I}(t)\\ \mathbf{g}(t)\\ \mathbf{r}(t)\end{bmatrix}$, а $\mathbf{N}_m=\left[\mathbf{N}^T,\mathbf{F}^T,\mathbf{B}^T\right]^T$ — нелінійна функція вузлових потенціалів, змінних стану та діагностованих параметрів.

У разі використання рівняння (4) для процесу діагностування мехатронних систем виникають деякі труднощі, а саме:

- параметри електричної та механічної підсистеми, а також підсистеми зв'язку суттєво відрізняються за величиною;

- точність вимірювання параметрів в електричній і механічній підсистемах відрізняється, що приводить до різних рівнів шуму;
- групи неоднозначності виміряних параметрів можуть виникнути й в окремо взятій підсистемі;
- петлі зворотного зв'язку суттєво ускладнюють задачу діагностування.

На вирішенні цих проблем зосереджено дослідження, проведені в цій роботі.

## 2. Математична модель процесу діагностування мехатронної системи

Доступ до системи можна отримати тільки у визначених місцях, зокрема, в електричних колах у вузлах з'єднання елементів. Вузли електричної підсистеми поділяються на три групи: доступні — на які можна подавати сигнал збудження й отримувати відповідь; частково доступні — на яких можна контролювати лише відповідь; недоступні — до яких неможливо подавати сигнал збудження та здійснювати в них заміри.

За таким же ж принципом поділяємо точки механічної частини. На доступні елементи у вузли їх з'єднання подаємо збудження у вигляді прикладеної сили та вимірюємо реакцію на ці величини. Частково доступні є вузли, в яких вихідні величини, наприклад, координати, швидкість, прискорення, можуть бути виміряні. Решта вузлів є недоступні. Кількість тестів і вимірювань, які отримані для кожного з вузлів, повинна бути більша, ніж кількість ідентифікованих параметрів.

Для визначення реакції досліджуваної системи на збудження у її вузлах доцільно використати метод інтегральної чутливості, який ефективно застосовується для вивчення електричних кіл [2]. Відомо, що диференційна чутливість вразлива до помилок моделі та шуму вхідних даних, що погіршує точність і стабільність процедури тестування. Інтегральна чутливість має тенденцію до зменшення «шуму нуля». Цей ефект підсилюється, коли не вдало вибрані часові інтервали. Напівнормалізованою інтегральною чутливістю $W_{ji}$ системи щодо діагностованого параметру $P_i$ на часовому інтервалі $[t_a, t_b]$ є величина [2]

$$W_{ji}\left[t_a, t_b\right] = \int_{t_a}^{t_b} S_{ji}(t) P_i dt \,, \tag{5}$$

де $S_{ji}(t)$ — значення чутливості щодо діагностованого параметру $P_i$.

Від вибору інтервалу залежить інтенсивність впливу шуму [2]. Також доцільно використовувати інтегровані величини для невідомих, які є складниками системи (4), тобто

$$U_j\left[t_a, t_b\right] = \int_{t_a}^{t_b} V_j(t)\, dt \,. \tag{6}$$

Методику для діагностування систем, що описуються рівнянням (2), можна узагальнити на мехатронні системи з урахуванням наведених вище застережень. Також потрібно враховувати те, що для підсистем мехатронних систем із різними константами часу існує низка проблем, пов'язаних зі стійкістю. Окрім того, ітераційні алгоритми з постійним кроком і заданою точністю обчислень, які використ-

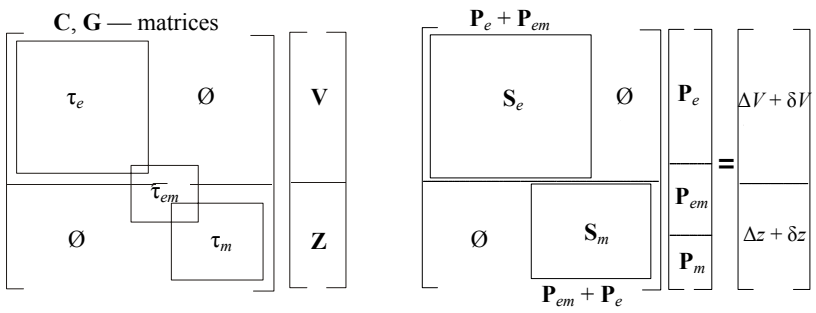


Рис. 1.

товують для розрахунку мехатронних систем, сповільнюють процес розв'язування задачі.

Пропонуємо динамічний розклад рівнянь мехатронної системи, що полягає у незалежному аналізі часового інтервалу кожної з підсистем заданої системи.

Для простоти скористаємося структурою комутаційної дошки [4], в якій блоки відповідають підсистемам, постійні часу яких дорівнюють $\tau_e, \tau_{em}, \tau_m$. Структуру матриць $\mathbf{C}_m$, $\mathbf{G}_m$ і діагностичних рівнянь подано на рис. 1 у графічному вигляді.

Важливо, що кожна компонента динамічного розкладу опрацьовується для всього часового інтервалу індивідуально у незмінній послідовності.

Слід зазначити, що процес вимірювання дискретних сигналів потребує проведення додаткових математичних операцій. Це зумовлено необхідністю визначити величину сигналу в моменти часу, які попадають усередину інтервалу вимірювання. Для вирішення цього проведемо інтерполяцію (кусково-лінійну), що цілком достатньо для систем, які не вимагають високої точності розрахунку.

Такий підхід дає можливість довільним чином вибрати часові кроки залежно від підсистеми. Наприклад, для повільної підсистеми доцільно вибрати більший крок порівняно із кроком швидкозмінних підсистем. Для цього потрібно провести синхронізацію підсистем у процесі розрахунку. Для синхронізації мехатронної системи необхідно узгодити час з'єднання $T_1$, $T_{21}$ електричної та механічної підсистеми з дискретизацією часу тестування обладнання $T_0$, $T_{01}$, тобто

$$T_1 = k_1 T_0, \quad T_{21} = k_{21} T_{01}, \qquad \text{якщо } k_1, k_{21} = f(\tau_e, \tau_{em}, \tau_m).$$

### 3. Методика розв'язування рівнянь діагностування

Нехай інтегральна чутливість $\mathbf{S}(t_k)$ мехатронної системи в момент $t_k$ є такою

$$\mathbf{S}(t_k) = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial V(t_k)}{\partial P_e} & \dfrac{\partial V(t_k)}{\partial P_{em}} & \dfrac{\partial V(t_k)}{\partial P_m} \\ \dfrac{\partial z(t_k)}{\partial P_e} & \dfrac{\partial z(t_k)}{\partial P_{em}} & \dfrac{\partial z(t_k)}{\partial P_m} \end{bmatrix}. \tag{7}$$

Оскільки система діагностується з відкритою петлею зворотного зв'язку, то значення $\partial V(t_k)/\partial P_m = \varepsilon(0)$, $\partial z(t_k)/\partial P_e = \varepsilon(0)$ співвимірні з порядком похибки обчислення. Тоді можна записати

$$\mathbf{S}_e = \left[\frac{\partial V(t_k)}{\partial P_e} \quad \frac{\partial V(t_k)}{\partial P_{em}}\right], \qquad \mathbf{S}_m = \left[\frac{\partial z(t_k)}{\partial P_{em}} \quad \frac{\partial z(t_k)}{\partial P_m}\right].$$

Структуру діагностичних рівнянь у часовій області в момент часу $t_k$ подано на рис. 1.

Замінивши нескінченно малі прирости скінченими та використавши інтегральну чутливість (5), отримаємо рівняння діагностування

$$\mathbf{W}\left[t_{k-N}, t_k\right]\delta\mathbf{P} = \Delta\mathbf{U}\left[t_{k-N}, t_k\right], \tag{8}$$

де $\delta P_i = \Delta P_i / P_i$, $\delta\mathbf{P}$ — вектор відносних відхилень параметрів вектора $\mathbf{P}$; $\Delta\mathbf{U}$ — вектор, елементами якого є різниця між значеннями $U_j$, обчисленими за змінними $V_{mj}(t)$, отриманими для діагностованої та модельованої номінальної системи.

На забезпечення стабільності та задовільної норми конвергенції процедури розв'язування рівнянь діагностування позитивно впливає те, що вони формуються з використанням значень початкових наближень для перехідного процесу, наприклад, запуску двигуна.

Для розв'язування рівнянь із зашумленими даними доцільно використати методику [3], побудовану на базі функціонала Тихонова

$$\mathbf{M}\left[\delta\mathbf{P}(\alpha)\right] = \left\|\mathbf{W}\delta\mathbf{P}(\alpha) - \Delta\mathbf{U}\right\|^2 + \alpha\left\|\delta\mathbf{P}(\alpha)\right\|^2, \tag{9}$$

тут $\alpha \geq 0$ — коефіцієнт регуляризації.

Методика складається з двох етапів. На першому використовуємо метод найменших квадратів. Другий етап додано для покращення стабільності та конвергенції процедури, яка повторюється.

Розв'язування діагностичного рівняння здійснюємо шляхом мінімізації функціонала, тобто

$$\min_{\delta\mathbf{P}} \mathbf{M}\left[\delta\mathbf{P}(\alpha)\right] . \tag{10}$$

Для досягнення необхідної точності під час розв'язування рівняння (10) за вхідні дані для обчислення значень у першому наближенні можна вибрати номінальний набір параметрів $\mathbf{P}^{(l)} = \mathbf{P}^{(n)}$, що характеризує несправність у моделі вільної системи. Наступне наближення обчислюємо, як $\mathbf{P}^{(q+l)} = \mathbf{P}^{(q)}(1 + \delta\mathbf{P}^{(q)})$.

Таким чином, усі модельовані матриці оновлюються. Процедура верифікації елементів матриці $\mathbf{P}$ зупиняється, якщо $|\delta P_i^{(q)}| \leq TOL_i \wedge _\Delta\mathbf{U}_ \leq \varepsilon$, де $TOL_i$ — задана точність розрахунку параметра $P_i$, $\varepsilon$ — рівень шумових особливостей системи вимірювання.

Співмірність величин $\left(P_i^n - P_i^q\right)\Big/P_i^n$ і $TOL_i$ дає можливість визначити степінь дефектності діагностованого параметра $P_i$. Ефективність розв'язування рівняння (10) числовими методами залежить від величини $\alpha$, що докладно обґрунтовано у праці [3].

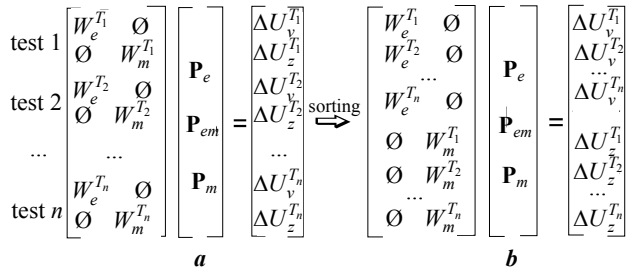

Рис. 2. Структура діагностичних рівнянь до (*a*) та після (*b*) сортування

Описаний алгоритм стосується лінійних систем. Із використанням підходу, запропонованого у дослідженні [2], цей алгоритм можна розширити на нелінійні системи.

Значення величин, які характеризують точність вимірювання параметрів динамічних процесів електричних і механічних частин системи, мають різні порядки точності, наприклад, $\delta V \approx 10^{-5}$, $\delta z \approx 10^{-3}$ відповідно. Це ускладнює процес розв'язування сформульованої задачі та вимагає застосування спеціального підходу шляхом введення коефіцієнта регуляризації.

Відомо [2], що після проведення $n$ діагностичних операцій у часових інтервалах структура матриці $\mathbf{W}$ та вектора $\Delta\mathbf{U}$ має вигляд, як на рис. 2(*a*).

Вектор $\Delta\mathbf{U}$ містить значення величин із різним рівнем шуму як для електричної, так і механічної системи, тобто $\Delta U_v = \Delta U + \delta V$ та $\Delta U_z = \Delta U + \delta z$. Якщо процедуру (10) застосовуємо в процесі розв'язування рівнянь діагностування зі структурою, показаною на рис. 2(*a*), то коефіцієнт регуляризації подаємо у вигляді функції $\alpha_0 = f_0(\delta V, \delta z)$.

Зважаючи на те, що величини $\delta V \approx 10^{-5}$, $\delta z \approx 10^{-3}$ належать до різних діапазонів, необхідно врахувати, що під час реалізації процедури регуляризації виникають проблеми з решіткою конвергенції. Ці проблеми долають шляхом перетворення $\mathbf{W}$ та вектора $\Delta\mathbf{U}$ з допомогою алгоритму сортування елементів до структури, зображеної на рис. 2(*b*). Таке подання матриці спрощує процедуру розрахунку коефіцієнтів регуляризації $\alpha_1 = f_1(\delta V)$, $\alpha_2 = f_2(\delta z)$ і процес формування функціоналів (9) $\mathbf{M}_1[\delta\mathbf{P}(\alpha_1)]$, $\mathbf{M}_2[\delta\mathbf{P}(\alpha_2)]$ для розрахунку складників $\mathbf{W}_e\Delta\mathbf{U}_e$ та $\mathbf{W}_m\Delta\mathbf{U}_m$ діагностичних рівнянь (8).

Рівняння, які описують мехатронну систему, розв'язуємо шляхом мінімізації відповідних функціоналів, тобто

$$\min \mathbf{M}_1\left[\delta\mathbf{P}\left(\alpha_1\right)\right],\ \min \mathbf{M}_2\left[\delta\mathbf{P}\left(\alpha_2\right)\right]. \tag{11}$$

## 4. Діагностування електромеханічного одноланкового маніпулятора

Проілюструємо запропоновану вище методику процесу діагностування до одноланкового маніпулятора (маніпуляційного модуля), який керується двигуном постійного струму. Функціональна схема системи зображена на рис. 3.

Проаналізуємо функціонування електричної та механічної частини системи з оптимальними робочими значеннями параметрів.

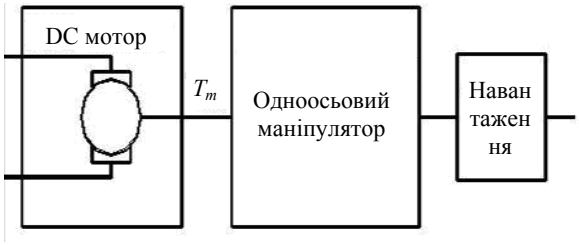


Рис. 3. Схема одноосьового маніпулятора

Для електричної частини системи скористаємося двигуном постійного струму DC з номінальною напругою збудження $V = 50B$ і номінальним струмом $J = 5$A, швидкістю обертання ротора $\omega = 75$ рад/с, моментом інерції ротора $J_e = 5{,}0 \cdot 10^{-4}$ кг·м$^2$, опором та індукцією ротора $R = 0{,}465$ Ом і $L = 15{,}4$ мГн.

Сила тертя $D_m\omega$ та рух ротора обмежено пружиною з постійним коефіцієнтом пружності $K_s$. Двигун розвиває обертовий момент $F_s = K_s\varphi$, електричний обертовий момент $F_e = K_e i$ та напруження в котушці $K_m\omega$. Два керовані джерела з'єднують електричну та механічну частини.

Матриці з'єднання можна подати у вигляді

$$[\mathbf{L}_1, \mathbf{L}_2] = \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & J_m & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad [\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2] = \begin{bmatrix} r_0 + R & K_m & 0 \\ -K_e & D_m & K_s \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \mathbf{V} \\ \mathbf{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i \\ \omega \\ \varphi \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{g}(t) = [V_{out}, T_m, 0].$$

Коефіцієнти $K_e$, $K_m$ вважаємо постійними. Вектор $\mathbf{P}_{em} = [R, L, D_m, J_m]$ містить діагностовані параметри двигуна.

Для механічної частини системи за змінні стану вибрано $\vartheta$, $\psi$ — кутову швидкість і кут обертання стріли маніпулятора. Матриці та вектори у рівнянні (2) мають вигляд

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} J_a & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} D_a & K_a \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{z} = \begin{bmatrix} \vartheta \\ \psi \end{bmatrix}, \quad \mathbf{r}(t) = \begin{bmatrix} k_p T_m \\ 0 \end{bmatrix},$$

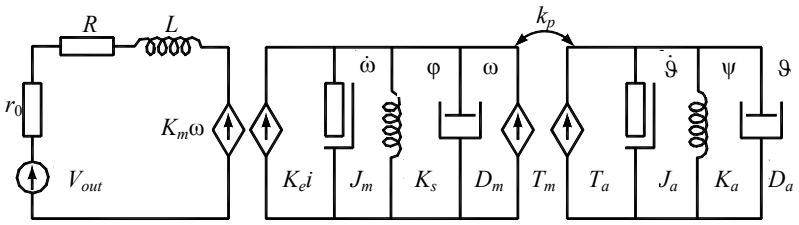


Рис. 4. Еквівалентна схема електромеханічного одноланкового маніпулятора

де $J_a$, $D_a$, $K_a$ — момент інерції, демпфуюче тертя та пружна константа маніпуляційного модуля; $k_p$ — коефіцієнт передачі (постійний). Діагностовані параметри маніпулятора $\mathbf{P}_m = [J_a, D_a, K_a]$.

У структурі матриці чутливості **S** (розміром 8×8) кількість стовпців відповідає розміру вектора $\mathbf{P} = \mathbf{P}_e + \mathbf{P}_{em} + \mathbf{P}_m$, а кількість рядків — розміру вектора $\Delta\mathbf{U}$. Вектор $\Delta\mathbf{U}$ складається з $\Delta\mathbf{U}_e = [\Delta V_1, ..., \Delta V_{11}, \Delta i]$ та $\Delta\mathbf{U}_m = [\Delta\omega, \Delta\varphi, \Delta\vartheta, \Delta\psi]$.

Шум змінної моделюємо як похибку величини квантування в сумі з випадковим шумом найменшого біта (LSB). За результатами моделювання встановлено, що $\delta V = 4{,}6\cdot10^{-5}$, а $\delta z = 7\cdot10^{-3}$.

Розв'язавши оптимізаційну задачу (11), отримаємо

$$\delta\mathbf{P}'(\alpha_1) = \left[(\mathbf{W}_e)^* \mathbf{W}_e + \alpha_1\mathbf{I}\right]^{-1} (\mathbf{W}_e)^* \Delta\mathbf{U}_v,$$

$$\delta\mathbf{P}''(\alpha_2) = \left[(\mathbf{W}_m)^* \mathbf{W}_m + \alpha_2\mathbf{I}\right]^{-1} (\mathbf{W}_m)^* \Delta\mathbf{U}_z,$$

де $(\mathbf{W}_e)^*$, $(\mathbf{W}_m)^*$ — матриці конвергенції, а $\delta\mathbf{P}'(\alpha_1) = [\delta P_e, \delta P'_{em}, 0]$, $\delta\mathbf{P}''(\alpha_2) = [0, \delta P''_{em}, \delta P_m]$ — вектори.

На наступному кроці формуємо вектор $\mathbf{P}^{(q+1)} = \mathbf{P}^{(q)}(1 + \delta\mathbf{P}^{(q)})$, складники якого $\delta\mathbf{P}^{(q)} = [\delta P_e, \delta P_{em}, \delta P_m]$ містять два вектори $\delta\mathbf{P}'$, $\delta\mathbf{P}''$. Величини $\delta P_{em}$ підбирають емпірично шляхом зміни електричних $\delta L$, $\delta R$ і механічних параметрів $\delta D_m$, $\delta K_s\delta J_m$. Номінальні значення діагностованих параметрів є складниками вектора $\mathbf{P}''$. Значення $K_e$, $K_m$ дорівнюють 1,23, а $k_p$ дорівнює 5.

У результаті діагностування отримано вектори параметрів $\mathbf{P}^f$, $\mathbf{P}^d$ пошкоджених і діагностованих елементів. Значення параметрів пошкоджених елементів, які є складниками вектора $\mathbf{P}^f$, відрізняються на 5%-30% (третій стовпець таблиці) від номінальних значень, які є складниками вектора $\mathbf{P}^n$. Процедура діагностування, яка починалася з номінальних значень, була завершена після виконання 43 ітерацій. Якість ідентифікації (п'ятий стовпець) вища, ніж 5%.

*Таблиця*

| | $\mathbf{P}^n$ | $\mathbf{P}^f$ | $\left\lvert\frac{\mathbf{P}^f - \mathbf{P}^d}{\mathbf{P}^f}\right\rvert$ | $\mathbf{P}^d$ | $\left\lvert\frac{\mathbf{P}^f - \mathbf{P}^d}{\mathbf{P}^f}\right\rvert$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $R$ | $4{,}65\cdot10^{-1}$ | $5{,}34\cdot10^{-1}$ | 15 % | $5{,}54\cdot10^{-1}$ | 3,6 % |
| $L$ | $1{,}54\cdot10^{-2}$ | $1{,}54\cdot10^{-2}$ | 0 % | $1{,}54\cdot10^{-2}$ | 0 % |
| $J_m$ | $5{,}00\cdot10^{-4}$ | $3{,}60\cdot10^{-4}$ | 28 % | $3{,}75\cdot10^{-4}$ | 4,2 % |
| $D_m$ | $4{,}93\cdot10^{-5}$ | $5{,}27\cdot10^{-5}$ | 7 % | $5{,}11\cdot10^{-5}$ | 3,1 % |
| $K_s$ | $3{,}34\cdot10^{+0}$ | $3{,}34\cdot10^{+0}$ | 0 % | $3{,}34\cdot10^{+0}$ | 0 % |
| $J_a$ | $2{,}60\cdot10^{-5}$ | $2{,}86\cdot10^{-5}$ | 10 % | $2{,}99\cdot10^{-5}$ | 4,5 % |
| $D_a$ | $5{,}50\cdot10^{-4}$ | $5{,}50\cdot10^{-4}$ | 0 % | $5{,}50\cdot10^{-4}$ | 0 % |
| $K_a$ | $6{,}21\cdot10^{+0}$ | $5{,}46\cdot10^{+0}$ | 12 % | $5{,}59\cdot10^{+0}$ | 2,4 % |

**Висновки.** У статті запропоновано методику виявлення несправностей у лінійних мехатронних системах. Вказано на відмінність діагностування електронних кіл і мехатронних систем. Проблема різних шумових рівнів розв'язана з допомогою інтегральної чутливості та техніки регуляризації з різними коефіцієнтами регуляризації. М'які відхилення були зафіксовані в моделі одноланкового електромеханічного маніпулятора з задовільною точністю.

**Література**

[1] *Rosing R., Richardson A., Dorey A.&Peyton A.*, Test Support Strategies for MEMS, IEEE Int. Mixed Signal Test Workshop, Whistler, Canada, June 1999.
[2] *Brygilewicz V., Wojciechowski J.*, Time-domain fault diagnosis of analogue circuits in the presence of noise, IEE Proc. Circuit Devices and Systems, 1998, Vol. 145, pp.125-131.
[3] *Hachtel G., Sangiovanni-Vincentelli A.*, A survay of Third-Generation Simuliation Technicue, Proc. of IEEE, 1981, Vol. 69, № 10, pp. 1264-1280.
[4] *Tikhonov A., Arsenin V.*, Methods for solving incorrect tasks, Moscow: Nauka, 1979.
[5] *Brygilewicz V., Wojciechowski J., Starzyk J.*, Diagnosis of analog dynamic system based on integral sensitivity, Proc. EECTD 99, Stressa, 1999, pp. 1043-1046.
[6] *Ljung L.,* Identification of linear Multivariable system operating under Linear Feedback Control, IEEE Trans Automatic control, 1974, Vol. 19, № 6, pp. 836-840.

## Mathematical model for diagnosis of the mechanotronic system

Bohdan Blagitko, Igor Zayachuk, Volodymyr Brigilevich, Igor Yarmolovskyj

*The paper proposes a unified methodology for fault diagnosis in mechanotronic systems. System models including electronic, mechanical and coupling subparts are developed. A diagnosis algorithm introduced for electronic circuits, is extended to mechanotronic systems. Tests of a single-cell system (manipulation module) to confirm the effectiveness of the method were carried out.*

## Математическая модель процесса диагностики мехатронной системы

Богдан Благитко, Игорь Заячук, Владимир Бригелевич, Игорь Ярмоловский

*Предложена математическая модель для обнаружения неисправностей мехатронных систем. Модель системы включает электрическую, механическую подсистемы и подсистему взаимодействия между ними. Алгоритм диагностики, используемой для электронных схем, распространен на мехатронные системы. Для подтверждения эффективности предложенной модели проведено тестирование однозвеньевого манипулятора (манипуляционного модуля).*

Отримано 25.03.08