

АНАЛІЗ І МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ КІЛ ТА СИСТЕМ

УДК 612.372.061

МЕТОД ДІАГНОСТИКИ МЕХАТРОНІЧНИХ СИСТЕМ ШЛЯХОМ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ДЕКОМПОЗИЦІЇ

Б. Благітко, В. Бригілевич, І. Ярмолівський

*Львівський національний університет імені Івана Франка
вул. ген. Тарнавського, 107, 79017 Львів, Україна
blagitko@electronics.wups.lviv.ua*

Розглянуто об'єднану методологію для виявлення несправностей мехатронічних систем. Модель системи охоплює електричний, механічний блоки і блок взаємозв'язку. Алгоритм діагностики, який використовують для електричних схем, розширений на мехатронічні системи. Для підтвердження ефективності методу виконано тестування несправностей маніпулятора руки робота.

Ключові слова: мехатронічні системи, діагностика, динамічний розклад, шуми.

Нижче запропоновано метод діагностики мехатронічних систем, які в літературі отримали назву (MEMS) мікроелектронні механічні системи. Важливість діагностики таких систем постійно зростає [1].

Діагностика мехатронічних систем має декілька напрямів:

- розвиток моделей мехатронічних систем і їхнє комп'ютерне моделювання;
- вимірювання "номінальних" параметрів у разі діагностування мехатронічних систем, розвиток методу виділення параметрів, який ґрунтується на вимірюваннях і комп'ютерному моделюванні;
- виявлення помилок реальних систем з використанням комп'ютерного моделювання і вимірювання характеристик реальних систем.

Розглянемо випадок м'яких несправностей в аналогових нелінійних мехатронічних системах. Для того, щоб мати змогу застосовувати алгоритм, запропонований у [2] для електричних схем, ми для мехатронічних систем розширили метод завдяки введенню блока фільтрації вимірних даних. Як приклад особливостей застосування запропонованого підходу вибрано двигун постійного струму з електронним управлінням. За досліджуваний приклад мехатронічної системи обрано одноосьовий маніпулятор руки робота.

Опис мехатронічної системи. Для спрощення вважаємо, що система містить тільки електричну, механічну і підсистему зв'язку. Модифіковані вузлові рівняння описують динамічні процеси в електричній частині системи [4]:

$$C(P_e) \dot{V}(t, P_e) + G(P_e)V(t, P_e) + N(P_e, V) = I(t) \quad (1)$$

де \mathbf{V} – вектор вузлових потенціалів; \mathbf{G} , \mathbf{C} – матриця активних і реактивних провідностей, відповідно; \mathbf{I} – вектор збудження; $\mathbf{N}(\mathbf{P}_e)$ – вектор, який містить усю нелінійну частину; \mathbf{P}_e – вектор діагностованих параметрів електричної системи.

Для опису механічної частини використано рівняння стану:

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

де \mathbf{J} – матриця моментів інерції; \mathbf{A} – матриця демпфуювальних коефіцієнтів; \mathbf{B} – вектор нелінійних функцій, включаючи силу тяжіння і тертя; \mathbf{z} – вектор змінних стану, таких як положення, швидкості, прискорення; $\mathbf{r}(t)$ – вектор обертових моментів; \mathbf{P}_m – вектор діагностованих параметрів механічної підсистеми.

Припустимо, що зв'язок між електричною і механічною підсистемами лінійний:

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

де $\mathbf{L}_1, \mathbf{L}_2$ і $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2$ – матриця зв'язку між електричними і механічними змінними, яка залежить від параметрів зв'язку \mathbf{P}_{em} ; \mathbf{F} – нелінійна частина зв'язку.

Вектори невідомих і діагностованих параметрів обох підсистем $\mathbf{V}_m = [\mathbf{V}^T, \mathbf{z}^T]^T$, $\mathbf{P} = [\mathbf{P}_e^T, \mathbf{P}_{em}^T, \mathbf{P}_m^T]^T$. Об'єднаємо (1) – (3) і запишемо рівняння мехатронічної системи:

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

де

$$\mathbf{C}_m = \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \\ \mathbf{L}_1 & \mathbf{L}_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_m = \begin{bmatrix} \mathbf{G} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{A} \\ \mathbf{K}_1 & \mathbf{K}_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{J}_m(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{J}(t) \\ \mathbf{B}\mathbf{r}(t) \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

і $\mathbf{N}_m = [\mathbf{N}^T \mathbf{F}^T \mathbf{B}^T]^T$ – нелінійна функція вузлових потенціалів, змінних стану і діагностованих параметрів.

У разі використання рівняння (4) для діагностики мехатронічних систем стикаємося з певними труднощами:

- 1) константи часу електричних, механічних і підсистеми зв'язку суттєво відрізняються;
- 2) різні ступені точності вимірювання в різних підсистемах призводять до різних рівнів шуму;
- 3) групи неоднозначності можуть з'явитися в кожній підсистемі;
- 4) петлі зворотного зв'язку роблять задачу діагностики надзвичайно важкою.

Метод діагностики. Доступ до системи можна отримати тільки в деяких визначених точках. В електричних колах “точками” ми вважаємо вузли. Вузли електричної підсистеми поділяють на три групи: доступні – на які можна подавати сигнал збудження і вимірювати відповідь; частково доступні – на яких можна контролювати лише відповідь; недоступні – до яких неможливо ні подавати сигнал збудження, ні виконувати жодних замірів.

Так само поділяють точки механічної частини на доступні “вузли”, де подають збудження, наприклад, може бути прикладена сила, енергія і можна виміряти відповідь; частково доступні “вузли”, у яких вихідні величини, наприклад положення, швидкість, прискорення, можуть бути виміряні; і недоступні “вузли”. Кількість тестів і вимірювань,

які отримані для кожного з вузлів, повинна бути більша, ніж кількість ідентифікованих параметрів.

Ми використовуємо метод інтегральної чутливості, який добре розвинутий для електронних кіл [2]. Диференційна чутливість вразлива до помилок моделі та шуму вхідних даних і зменшує точність та стабільність процедури тестування. Інтегральна чутливість має тенденцію до зменшення шуму нуля, і цей ефект підсилюється, коли часові інтервали відібрані необхідним чином. Напівнормалізованою інтегральною чутливістю V_{mj} w.r.t P_i на часовому інтервалі $[t_a, t_b]$ вважають:

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

Вибір інтервалу $[t_a, t_b]$ впливає на ефективність зменшення впливу шуму [2]. Ми також будемо використовувати інтегровані величини $U_j[t_a, t_b]$ для невідомих $V_{mj}(t)$, що з'являються в (4):

$$U_j[t_a, t_b] = \int_{t_a}^{t_b} V_j(t) dt \quad (6)$$

Розширення методу діагностики (2) для мехатронічних систем виявили проблеми, які описані вище (1–4). Нижче ми сконцентруємося на вирішенні проблем 1 і 4.

Динамічний розклад системи. Для більшості мехатронічних систем характерна часова розрідженість, або час очікування, тобто значна частина підсистеми є бездіяльною більшу частину часу. Традиційно в мехатронічних системах, які мають різні сталі часу для різних модулів, існують численні проблеми стійкості, пов'язані з “жорсткими” системами. Традиційні ітераційні алгоритми моделювання обмежують усі змінні системи, використовуючи однаковий розмір кроку, обов'язково найменший, що потребує утримання похибки округлення у визначених рамках. Цей підхід зумовлює час і обчислювальні потужності.

Ми пропонуємо динамічний розклад рівнянь мехатронічної системи. Динамічним розкладом називаємо незалежний аналіз заданої системи на деякому інтервалі.

Для простоти будемо використовувати структуру комутаційної дошки. Кожний блок представляє підсистеми та їхні характерні часові сталі $\tau_e, \tau_{em}, \tau_m$, відповідно. На рис. 1 показана структура матриць C_m, G_m і структура діагностичних рівнянь у разі використання інтегральної чутливості.

Зазначимо, що кожна компонента динамічного розкладу опрацьована для всього часового інтервалу індивідуально в незмінній послідовності.

Процес вимірювання дискретних сигналів породжує необхідність додаткових математичних операцій. Виникає потреба отримати значення в моменти часу, які потрапляють у середину інтервалу вимірювання. Щоб усунути цю проблему, треба провести інтерполяцію. Для спрощення можна обрати найпростішу кусково-лінійну інтерполяцію. Для систем, які не потребують значної точності, це цілком достатньо.

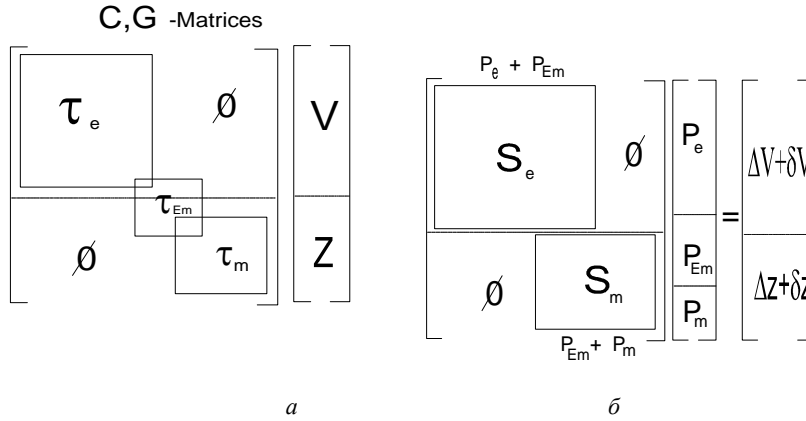


Рис. 1. Структура матриць C_m, G_m (а) та діагностичних рівнянь (один момент часу і один тест) (б)

Це забезпечує змогу вибору різних часових кроків для кожної підсистеми тесту, для повільної підсистеми зробити більший крок незалежно від швидкозмінних підсистем. Тому кожна підсистема повинна бути готова для аналізу в різні моменти часу, унаслідок чого необхідна синхронізація. Для синхронізації мехатронічної системи ми дискретизуємо час з'єднання T_1, T_2 електричного і механічного модуля з дискретизацією часу тестування обладнання T_0 :

$$T_1 = k_1 T_0, T_2 = k_2 T_0, \text{ де } k_1, k_2 = f(\tau_e, \tau_{em}, \tau_m).$$

Формулювання і розв'язання рівняння діагностики. Уважатимемо інтегральну чутливість $S(t_k)$ мехатронічної системи в момент t_k :

$$S(t_k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial V(t_k)}{\partial P_e} & \frac{\partial V(t_k)}{\partial P_{em}} & \frac{\partial V(t_k)}{\partial P_m} \\ \frac{\partial Z(t_k)}{\partial P_e} & \frac{\partial Z(t_k)}{\partial P_{em}} & \frac{\partial Z(t_k)}{\partial P_m} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Оскільки систему діагностують з відкритою петлею зворотного зв'язку, то $\partial V(t_k)/\partial P_m = \varepsilon(0), \partial Z(t_k)/\partial P_e = \varepsilon(0)$ мають порядок похибки обчислення. Ми також можемо записати

$$S_e = \begin{bmatrix} \frac{\partial V(t_k)}{\partial P_e} & \frac{\partial V(t_k)}{\partial P_{em}} \end{bmatrix}, S_m = \begin{bmatrix} \frac{\partial Z(t_k)}{\partial P_{em}} & \frac{\partial Z(t_k)}{\partial P_m} \end{bmatrix}. \quad (7.1)$$

Ширше описана структура діагностичних рівнянь у часовому інтервалі в момент t_k і для одного тесту вона показана на рис. 1, б.

Рівняння діагностики отримані з використанням інтегральної чутливості (5), і заміною нескінченно малих приростів скінченними:

$$\mathbf{W} [t_{k-N}, t_k] \delta \mathbf{P} = \Delta \mathbf{U} [t_{k-N}, t_k], \quad (8)$$

Змінна $\delta P_i = \Delta P_i / P_i$, δP є відносним відхиленням параметрів вектора \mathbf{P} ; $\Delta \mathbf{U}$ – різниця U_j , обчисленого за значеннями змінних $V_{mj}(t)$, отриманих для діагностованих і модельованих номінальної системи.

Рівняння діагностики зазвичай визначають за початковими точками перехідного процесу, наприклад, запуску двигуна. Ми використовуємо цю особливість, щоб забезпечити стабільність і хорошу норму конвергенції процедури розв'язування. Техніка регуляризації [3] розроблена для того, щоб розв'язати рівняння із зашумленими даними. Функціонал Тихонова визначений як

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

де $\alpha \geq 0$ коефіцієнт регуляризації. Перший крок – стандартний, виходячи із процедури найменших квадратів (МНК), другий крок додано, щоб поліпшити стабільність і конвергенції процедури, яка повторюється [5]. Якщо $\alpha=0$, то $\delta\mathbf{P}$ вирішує проблему МНК. Розв'язок діагностичного рівняння отримуємо, мінімізуючи функціонал:

$$\min_{\delta\mathbf{P}} \mathbf{M}[\delta\mathbf{P}(\alpha)] \quad (10)$$

w.r.t. $\delta\mathbf{P}$

Для поліпшення точності рівняння (10) розв'язуємо декілька разів. Спочатку моделюємо несправність вільної системи й обчислюємо необхідні дані для номінального набору параметрів $\mathbf{P}^{(1)} = \mathbf{P}^n$. Наступне наближення обчислюють як $\mathbf{P}^{(q+1)} = \mathbf{P}^{(q)}(1 + \delta\mathbf{P}^{(q)})$, отже, всі модельовані матриці оновлюються. Процедура верифікації елементів матриці \mathbf{P} припиняється, коли $|\delta P_i^{(q)}| \leq \text{TOL}_i < \varepsilon$, де TOL_i – прийятна точність \mathbf{P} , ε – рівень шумових особливостей системи вимірювання. Рішення про те, чи є діагностований параметр P_i дефектним, приймають на підставі величини $(P_i^{(n)} - P_i^{(q)})/P_i^{(n)}$ щодо TOL_i . Числова ефективність розв'язку (10) залежить від величини α [3].

Обговорений алгоритм стосується лінійних систем, проте його можна розширити на нелінійні системи, використовуючи підхід, подібний до [2].

Величини $\delta V \sim 10^{-5}$, $\delta Z \sim 10^{-3}$ характеризують точність вимірювання параметрів динамічних процесів електричних і механічних частин. Різні ступені точності вимірювання параметрів електричних і механічних частин потребують застосування спеціального підходу для обчислення коефіцієнта регуляризації. Цю проблему показано на рис. 2. Після виконання n діагностичних операцій на часових інтервалах [2] структура матриці \mathbf{W} і вектора $\Delta\mathbf{U}$ показана на рис. 2, а.

Вектор $\Delta\mathbf{U}$ охоплює значення з різним рівнем шуму $\Delta U_v = \Delta U + \delta V$ і $\Delta U_z = \Delta U + \delta Z$. Якщо процедуру (10) регуляризації застосовують до розв'язування рівнянь діагностики зі структурою, показаною на рис. 2, а, коефіцієнт регуляризації повинен бути розрахований як функція $\alpha = f_0(\delta V, \delta Z)$.

Оскільки величини $\delta V \sim 10^{-5}$, $\delta Z \sim 10^{-3}$ належать до різних діапазонів то процедура регуляризації має великі проблеми з граткою конвергенції.

Ми використовуємо алгоритм сортування для перетворення матриці \mathbf{W} і вектора $\Delta\mathbf{U}$. Робота алгоритму сортування закінчується структурою, показаною на рис. 2, б. Можна обчислити два коефіцієнти регуляризації $\alpha_1 = f_1(\delta V)$, $\alpha_2 = f_2(\delta Z)$ і формування двох функціоналів (9) $\mathbf{M}_1[\delta\mathbf{P}(\alpha_1)]$, $\mathbf{M}_2[\delta\mathbf{P}(\alpha_2)]$ для $\mathbf{W}_e, \Delta\mathbf{U}$ і $\mathbf{W}_m, \Delta\mathbf{U}_m$ підчастин діагностичних рівнянь (8):

Розв'язок діагностичних рівнянь (8) для мехатронічної системи отримано шляхом мінімізування функціоналів

$$\min M_1[\delta\mathbf{P}(\alpha_1)] \cdot M_2[\delta\mathbf{P}(\alpha_2)] \quad (11)$$

w.r.t. $\delta\mathbf{P}$

У процесі розв'язування задачі мінімізації (11) під час кожної ітерації розв'язують систему рівнянь

$$\delta P(\alpha_1, \alpha_2) = \left((W)^* W + \text{diag}(\alpha_1, \alpha_2) \right)^{-1} (W)^* \Delta U \quad (12)$$

де $(W)^*$ матриця, $\text{diag}(\alpha_1, \alpha_2)$ – діагональна матриця з регуляризаційними коефіцієнтами.

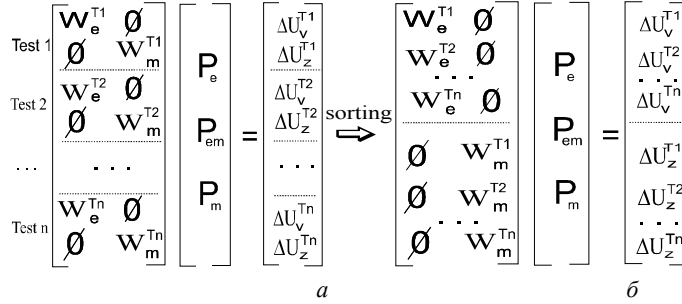


Рис. 2. Структура діагностичних рівнянь до (а) і після (б) сортування

Тестовий приклад. Як тестовий приклад, розглянемо модель одноосевого маніпулятора руки робота. Функціонально його можна розділити на три частини: контролер, двигун постійного струму, ротор якого зв'язаний з механічним маніпулятором (рис. 3).

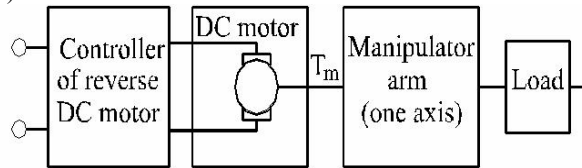


Рис. 3. Блок схема одноосевого маніпулятора руки робота

Частина 1. Котролер двигуна постійного струму з силовим каскадом MOSFET - моста (рис. 4). Модель простого MOSFET транзистора така: $J(V_{zi}) = \beta_s (V_{zi} - V_T)^2$, де β_s – коефіцієнт нелінійного джерела струму; V_z – напруга на резисторі R_z , V_T – порогова напруга [6]. Модифіковані вузлові рівняння для електронної частини описані в [1].

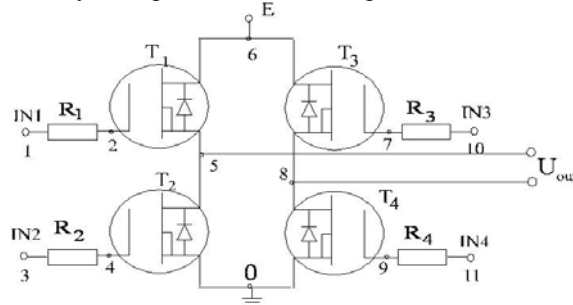


Рис. 4. Силовий каскад контролера

Електрично входи IN_1 і IN_4 об'єднані так, як IN_2 і IN_3 . Різні комбінації вхідних сигналів спричиняють прямий хід, зворотний, і зупинку для двигуна постійного струму. Вектор збудження $I = [I_{INg01} \ 0 \ I_{mg02} \ 0 \ 0 \ E_{g0} \ 0 \ 0 \ 0 \ I_{INg03} \ I_{INg04}]^T$.

Вектор діагностованих параметрів $P_e=[C_{z1}C_{z2}C_{z3}C_{z4}G_{si1}G_{si2}G_{si3}G_{si4}]$, де C_z – демпфувальна ємність; G_{si} – MOSFET провідність.

Частина 2. У двигуна постійного струму DC номінальна напруга збудження 50В і номінальний струм 5А. Параметри двигуна: швидкість обертання $\omega=75$ rad/s; момент інерції $J_e=5.0 \times 10^{-4}$ kgm²; опір та індукція ротора $R=0,465$ Ом і $L=15,4$ мГн, відповідно. Сила тертя – $D_m\omega$, рух ротора обмежено пружиною з постійним K_s . Двигун розвиває постійний обертовий момент $F_s=K_s\phi$. Електричний обертовий момент $F_e=K_e i$, а електрорушійна сила в котушці, – $K_m\omega$. Два керовані джерела з'єднують електричну і механічні частини.

Матриці з'єднання мають вигляд

$$[L_1 L_2] = \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & J_m & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, [K_1 K_2] = \begin{bmatrix} r_0 + R & K_m & 0 \\ -K_e & D_m & K_s \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, [V \ z]^T = [i \ \omega \ \phi]^T$$

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

Діагностовані параметри двигуна DC – $P_{em}=[R \ L \ D_m \ K_s \ J_m]$. Коефіцієнти K_e , K_m , що з'єднують електричні і механічні частини, вважають сталими.

Частина 3. Змінні стану для механічної частини (одноосьовий маніпулятор) – кутова швидкість θ і кут обертання ψ , відповідно. Матриці та вектори рівняння (2) мають такий вигляд:

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

де J_a, D_a, K_a – момент інерції, демпфувальне тертя і пружна константа руки маніпулятора; k_p – (постійний) коефіцієнт передавання. Діагностовані параметри маніпулятора $P_m=[J_a \ D_a \ K_a]$.

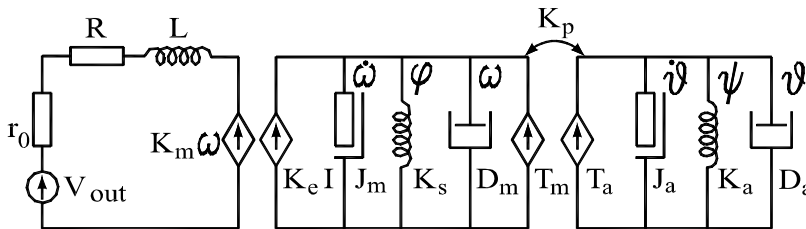


Рис. 5. Еквівалентна модель кола двигуна DC і руки маніпулятора

Матриці чутливості S і вектор ΔU мають таку структуру: $S = \text{size } [16 \times 16]$, де кількість стовпців відповідного розміру вектора $P=P_e+P_{em}+P_m$, кількість рядків є розміром ΔU . Вектор ΔU містить $\Delta U_e=[\Delta V_1, \dots, \Delta V_{11}, \Delta i]$, $\Delta U_m=[\Delta \omega, \Delta \phi, \Delta \theta, \Delta \psi]$.

Змодельовано шум змінної як похибку величини квантування і випадковий шум найменшого біта (LSB). Результатом моделювання величини вимірювання шуму для електромеханічних частин $\delta V=4.6 \cdot 10^{-5}$ і $\delta Z=7 \cdot 10^{-3}$, відповідно.

Розв'язуючи задачу мінімізації (11) багаторазово, ми повинні обчислити

$$\delta P'(\alpha_1) = (W_e^* W_e + \alpha_1 I)^{-1} (W_e^*) \Delta U_v$$

$$\delta P''(\alpha_2) = (W_m^* W_m + \alpha_2 I)^{-1} (W_m^*) \Delta U_z,$$

де $(We)^*$, $(Wm)^*$ – матриця конвергенції, вектори $\delta P^{(a_1)} = [\delta P_e, \delta P_{em}^*, 0]$, $\delta P^{(a_2)} = [0, \delta P_{em}^*, \delta P_m]$.

Для наступного кроку моделювання побудовано вектор $P^{(q+1)} = P^{(q)}(1 + \delta P^{(q)})$, де $\delta P^{(q)} = [\delta P_e, \delta P_{em}, \delta P_m]$ побудований з двох векторів $\delta P^f, \delta P^d$. Застосуємо емпіричний метод підбору величин δP_{em} . Внесемо зміни електронних параметрів $\delta L, \delta R$ від δP_{em}^* і зміни механічних параметрів $\delta D_m, \delta K_s, \delta J_m$ від δP_{em}^* для того, щоб скерувати ΔU_z до ΔU_v .

Номинальні значення діагностованих параметрів зібрані у векторі P^n (див. таблицю). Значення K_e, K_m дорівнюють 1.23, і $k_p = 5$. Результати діагностики наведені в таблиці: P^f, P^d пошкоджених і діагностованих параметрів, відповідно. Як бачимо з третього стовпця, значення пошкоджених параметрів P^f відрізняються на 5–30 % від їхніх номінальних значень P^n . Процедура діагностики, яка починалася з номінальних значень, була завершена після 43 ітерацій. Якість ідентифікації (п'ятий стовпець) була гірша, ніж 5 %.

Таблиця

Величина номінальних, пошкоджених і діагностованих параметрів

	P^n	P^f	$\frac{P^f - P^n}{P^n}$	P^d	$\frac{P^f - P^d}{P^f}$
C_{z1}	3,18e-7	3,81e-7	24%	3,96e-7	-3,8%
C_{z2}	4,22e-7	3,46e-7	-18%	3,39e-7	2,1%
C_{z3}	4,50e-7	4,50e-7	0%	4,50e-7	0%
C_{z4}	3,67e-7	4,11e-7	12%	3,94e-7	-4%
G_{si1}	2,33e+4	2,56e+4	10%	2,65e+4	-3,4%
G_{si2}	3,21e+4	3,21e+4	0%	3,21e+4	0%
G_{si3}	2,41e+4	2,26e+4	6%	2,16e+4	4,5%
G_{si4}	3,03e+4	3,03e+4	0%	3,03e+4	0%
R	4,65e-1	5,34e-1	15%	5,54e-1	-3,6%
L	1,54e-2	1,54e-2	0%	1,54e-2	0%
J_m	5,00e-4	3,60e-4	-28%	3,75e-4	-4,2%
D_m	4,93e-5	5,27e-5	7%	5,11e-5	3,1%
K_s	3,34e+0	3,34e+0	0%	3,34e+0	0%
J_a	2,60e-5	2,86e-5	10%	2,99e-5	4,5%
D_a	5,50e-4	5,50e-4	0%	5,50e-4	0%
K_a	6,21e+0	5,46e+0	-12%	5,59e+0	-2,4%

Отже, описано методику виявлення несправностей у динамічних мехатронічних (лінійних) системах. Зазначено про відмінність діагностики електронних кіл і мехатронічних систем. Проблема різних шумових рівнів розв'язано за допомогою інтегральної чутливості і техніки регуляризації з різними коефіцієнтами регуляризації. М'які відхилення зафіксовано в моделі маніпулятора руки робота з використанням запропонованого методу та задовільною точністю.

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

DIAGNOSTICS MECHATRONIC SYSTEMS USING FUNCTIONAL DECOMPOSITION.

B. Blagitko, V. Brigilevich, I. Yarmolovskyj

*Ivan Franko National University of L'viv,
Tarnavsky Str. 107, UA-79017 Lviv, Ukraine.
blagitko@electronics.wups.lviv.ua*

The paper proposes a unified methodology for fault diagnosis of mechatronical systems. System models including electronic, mechanical and coupling subparts are developed. A diagnosis algorithm, originally introduced for electronic circuits, is extended to mechatronical systems. Differences of the application are also pointed out: large spread in time constants, different levels of measurement noise in different subparts. Tests with robot arm to confirm effectiveness of the method.

Key words: mechatronical systems, diagnosis, dynamic decomposition, noises.

МЕТОД ДИАГНОСТИКИ МЕХАТРОНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПУТЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ

Б. Блажитко, В. Бригилевич, И. Ярмоловский

*Львовский национальный университет имени Ивана Франка
ул. ген. Тарнавского, 107, 79017 Львов, Украина
blagitko@electronics.wups.lviv.ua*

Рассмотрена объединенная методология неисправностей мехатронических систем. Модель системы охватывает электрический, механический блоки и блок взаимосвязи. Алгоритм диагностики, который применяют для электрических схем, расширен на мехатронические системы. Для подтверждения эффективности метода проведено тестирование неисправностей манипулятора руки робота.

Ключевые слова: мехатронические системы, диагностика, динамическое разложение, шумы.

Стаття надійшла до редколегії 29.12.2008

Прийнята до друку 30.06.2009