

УДК 612.372.061

Б.Я. Благітко, канд. техн. наук, В.І. Бригілевич, канд. техн. наук, В.Г. Рабик, канд. техн. наук

Метод діагностики мехатронних систем

Робота представляє об'єднану методику виявлення несправностей мехатронних систем. Моделі системи включають електричний, механічний блоки і блок взаємодія. Алгоритм діагностики, який використовувався для електронних схем, розширено на мехатронні системи. Осуществлено тестування манипулятора руки роботи для підтвердження ефективності методу.

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

Вступ

В статті пропонується метод діагностики мехатронних систем, які в літературі [1] отримали назву MEMS. Важливість діагностики таких систем постійно зростає [1]. Розглядається випадок м'яких несправностей в аналогових лінійних мехатронних системах. Алгоритм, запропонований в [2] для електричних схем, можна застосувати для мехатронних систем за рахунок вводу блоку фільтрації вимірюваних даних. Для ілюстрації особливостей застосування запропонованого підходу вибрано двигун постійного струму з електронним управлінням.

1. Процес діагностування мехатронної системи

Для спрощення вважається, що система містить тільки електричну, механічну системи і підсистему зв'язку. Модифіковані вузлові рівняння, які описують динамічні процеси в електричній частині системи згідно з [4] можна записати наступним чином:

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

де \mathbf{V} – вектор вузлових потенціалів, \mathbf{G} , \mathbf{C} – матриця активних і реактивних опорів, відповідно, \mathbf{I} – вектор збудження, $\mathbf{N}(\mathbf{P}_e)$ вектор, який містить

складові нелінійної частини, \mathbf{P}_e вектор діагностованих параметрів електричної системи.

Для опису механічної частини використовується рівняння стану, а саме:

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

де \mathbf{J} – матриця моментів інерції; \mathbf{A} – матриця демпфуючих 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 має лінійний характер:

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

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, $\mathbf{P} = [\mathbf{P}_e^T, \mathbf{P}_{em}^T, \mathbf{P}_m^T]^T$, $\mathbf{P} = [\mathbf{P}_e^T, \mathbf{P}_{em}^T, \mathbf{P}_m^T]^T$ вектори невідомих і діагностованих параметрів обох підсистем.

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

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

де

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

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

При використанні рівняння (4) для діагностики мехатронних систем виникають деякі труднощі, а саме: константи часу електричних, механічних і підсистеми зв'язку суттєво відрізняються; різні ступені точності вимірювання в різних підсистемах приводять до різних рівнів шуму; групи неоднозначності можуть появитися в кожній підсистемі; петлі зворотнього зв'язку роблять задачу діагностики надзвичайно важкою.

На вирішенні цих проблем зосереджено дослідження, які проведено в даній роботі.

2. Методика діагностування

Доступ до системи можна отримати тільки у деяких визначених точках. В електричних колах такими «точками» ми вважаємо вузли. Вузли електричної підсистеми поділяються на три групи: доступні частково доступні та недоступні. За таким же принципом діляться точки механічної частини. На доступні «вузли» подається збудження у вигляді прикладеної сили, енергії і вимірюється в них реакція на ці величини. Частково доступні «вузли», в 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.

Для дослідження доцільно використати метод інтегральної чутливості, який добре розвинутий для електричних кіл [2]. Інтегральна чутливість має тенденцію до зменшення шуму нуля і цей ефект підсилюється, коли часові інтервали підібрані необхідним чином. Напівнормалізованою інтегральною чутливістю V_{mj} на часовому інтервалі $[t_a, t_b]$ вважається наступна:

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

Від вибору інтервалу залежить інтенсивність впливу шуму [2]. Доцільно також використовувати інтегровані величини для невідомих, що з'являються в (4), тобто:

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

3. Методика розв'язування рівнянь мехатронної системи

Для мехатронних систем характерною ознакою є їх часова розрідженість або час очікування. Тоді значна частина підсистеми є бездіяльною протягом суттєвого проміжку часу. Пропонується динамічний розклад рівнянь мехатронної системи. Під динамічним розкладом розуміємо незалежний аналіз часового інтервалу кожної із підсистем заданої системи.

Кожен блок представляє підсистеми та їхні характерні часові сталі $\tau_e, \tau_{em}, \tau_m$, відповідно. Структура матриць C_m, G_m та структура рівнянь діагностики при використанні інтегральної чутливості представлена на рис.1.

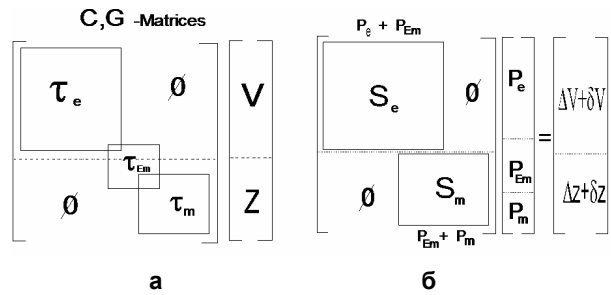


Рис. 1. Структура матриць C_m, G_m (а). Структура рівнянь діагностики (один момент часу і один тест) (б)

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

Слід зазначити, що процес вимірювання дискретних сигналів потребує проведення додаткових математичних операцій. Це зумовлено необхідністю отримання значення в моменті часу, які попадають всередину інтервалу вимірювання. Для вирішення проблеми необхідно провести інтерполяцію. Можна обрати найпростішу кусково-лінійну, що цілком достатньо для систем, які не вимагають високої точності розрахунку.

Такий підхід дає можливість вибрати довільно часові кроки в залежності від підсистеми тесту. Наприклад, для повільної підсистеми вибрати більший крок незалежно від швидкозмінних підсистем. Тому кожна підсистема повинна бути готова для аналізу в різні моменти часу, тобто виникає необхідність синхронізації. Для синхронізації мехатронної системи необхідно узгодити час з'єднання T_1, T_2 електричного і механічного модуля з дискретизацією часу тестування обладнання T_0 , тобто:

$$T_1 = k_1 T_0, T_2 = k_2 T_0,$$

при $k_1, k_2 = f(\tau_e, \tau_{em}, \tau_m)$.

4. Формування і методика розв'язування рівнянь діагностики

Нехай інтегральна чутливість $S(t_k)$ мехатронної системи в момент t_k : визначається у вигляді:

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

Оскільки система діагностується з відкритою петлею зворотнього зв'язку, то значення U_j співмірні з порядком похибки обчислення. Тоді можна записати:

$$S_e = \left[\frac{\partial V(t_k)}{\partial P_e} \quad \frac{\partial V(t_k)}{\partial P_{em}} \right], S_m = \left[\frac{\partial Z(t_k)}{\partial P_{em}} \quad \frac{\partial Z(t_k)}{\partial P_m} \right].$$

Розширений опис структури діагностичних рівнянь в часовій області в момент t_k представлено на Рис. 1(b).

Замінивши нескінченно малі прирости скінченими і використавши інтегральну чутливість (5) отримаємо рівняння діагностики:

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

де змінні $\delta P_i = \Delta P_i / P_i$ $\delta \mathbf{P}$ представляють відносні відхилення параметрів вектора \mathbf{P} ; $\Delta \mathbf{U}$ - різниця U_j , обчисленого за величиною змінних $V_{mj}(t)$, отриманих для діагностованої і модельованої номінальної системи.

На забезпечення стабільності і задовільної норми конвергенції процедури розв'язку рівнянь діагностики позитивно впливає те, що вони формуються за значеннями початкових точок перехідного процесу.

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

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

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

Методика складається з двох етапів. На першому етапі використовується метод найменших квадратів (МНК). Другий етап додано для покращення стабільності і конвергенції процедури, яка повторюється.

Розв'язування рівняння діагностики здійснюється шляхом мінімізації функціоналу, тобто:

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

Для досягнення необхідної точності при розв'язуванні рівняння (10) вхідними даними для обчислення значень в першому наближенні можна вибрати номінальний набір параметрів $\mathbf{P}^{(1)} = \mathbf{P}^n$, що характеризує несправність в моделі вільної системи. Наступне наближення обчислюється, як: $\mathbf{P}^{(q+1)} = \mathbf{P}^{(q)}(1 + \delta \mathbf{P}^{(q)})$.

Таким чином всі модельовані матриці оновлюються. Процедура верифікації елементів матриці \mathbf{P} зупиняється при

$$|\delta P_i^{(q)}| \leq TOL_i \wedge \|\Delta \mathbf{U}\| \leq \varepsilon,$$

де TOL_i - задана точність розрахунку P , ε -

рівень шумових особливостей системи вимірювання.

Співвідношення між величинами $(P_i^n - P_i^{(q)})/P_i^n$ і TOL_i дає можливість визначити ступінь дефектності діагностованого параметру P_i . Ефективність розв'язку (10) чисельними методами залежить від величини α , що детально обгрунтовано в роботі [3].

Значення величин, що характеризують точність вимірювання параметрів динамічних процесів електричних і механічних частин системи мають різні ступені точності, наприклад, $\delta V \approx 10^{-5}$, $\delta Z \approx 10^{-3}$, відповідно. Такий розкид в величинах точності при вимірюванні ускладнює процес розв'язку поставленої задачі і вимагає застосування спеціального підходу шляхом введення коефіцієнта регуляризації.

Відомо [2], що після проведення n діагностичних операцій в часових інтервалах структура матриці \mathbf{W} і вектора $\Delta \mathbf{U}$ має вигляд, представлений на Рис. 2(a).

Вектор містить значення величин з різним рівнем шуму як для електричної, так і для механічної системи, тобто $\Delta U_V = \Delta U + \delta V$ і $\Delta U_Z = \Delta U + \delta Z$. Якщо процедура (10) застосовується в процесі розв'язку рівнянь діагностики із структурою, показаною на рис.2(a), то коефіцієнт регуляризації повинен бути розрахований, як функція $\alpha_0 = f_0(\delta V, \delta Z)$.

Зважаючи на те, що величини $\delta V \approx 10^{-5}$, $\delta Z \approx 10^{-3}$ належать до різних діапазонів, необхідно враховувати те, що при здійсненні процедури регуляризації виникають проблеми з решіткою конвергенції.

Їх вирішення здійснюється шляхом перетворення \mathbf{W} і вектора $\Delta \mathbf{U}$ за допомогою алгоритму сортування елементів до структури, зображеної на рис. 2(b). Таке представлення матриці спрощує процедуру розрахунку коефіцієнтів регуляризації $\alpha_1 = f_1(\delta V)$, $\alpha_2 = f_2(\delta Z)$ і формування функціоналів (9) $\mathbf{M}_1[\delta \mathbf{P}(\alpha_1)]$, $\mathbf{M}_2[\delta \mathbf{P}(\alpha_2)]$ для розрахунку складових $\mathbf{W}_e, \Delta \mathbf{U}_e$ і $\mathbf{W}_m, \Delta \mathbf{U}_m$ діагностичних рівнянь (8).

Розв'язування цих рівнянь які описують мехатронну систему здійснюється шляхом мінімізації відповідних функціоналів, тобто

$$\min_{w.r.t. \delta \mathbf{P}} \mathbf{M}_1[\delta \mathbf{P}(\alpha_1)] \cdot \mathbf{M}_2[\delta \mathbf{P}(\alpha_2)] \quad (11)$$

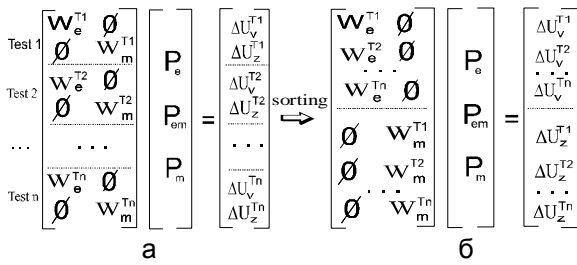


Рис. 2. Структура рівнянь діагностики до (а) і після (б) сортування

5. Результати досліджень

Проведемо дослідження з застосуванням моделі одноосьового маніпулятора руки робота, який складається з двигуна постійного струму, ротор якого зв'язаний з механічним маніпулятором (рис. 3).



Рис. 3. Схема одноосьового маніпулятора руки робота

Проаналізуємо функціонування електричної і механічної частини з заданими реальними параметрами.

Для електричної частини системи скористаємося двигуном постійного струму DC з номінальною напруга збудження 50V і номінальним струмом 5A, швидкість обертання $\omega = 75 \text{ rad/s}$, моментом інерції $J_e = 5.0 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2$, опором та індукцією ротора $R = 0.465 \text{ Ом}$ і $L = 15.4 \text{ мГн}$, відповідно. Сила тертя $D_m \omega$ і рух ротора обмежено пружиною з постійним K_s . Двигун розвиває постійний обертовий момент $F_s = K_s \phi$, електричний обертовий момент $F_e = K_e i$ і напруження, викликане в котушці, $K_m \omega$. Два керовані джерела з'єднують електричну і механічну частини.

Матриці з'єднання можна представити наступним чином:

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

$$[V \ z]^T = [i \ \omega \ \phi]^T$$

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

Коефіцієнти K_e, K_m відображають з'єднання електричної та механічної частини і вважаються

постійними. Вектор $P_{em} = [R \ L \ D_m \ K_s \ J_m]$ містить діагностовані параметри двигуна.

Для механічної частини (одноосьовий маніпулятор) за змінні стану вибрано θ, ψ - кутову швидкість і кут обертання, відповідно. Матриці та вектори рівняння (2) мають такий вигляд:

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

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

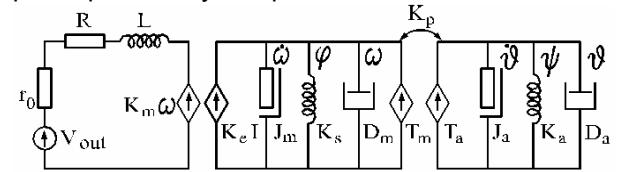


Рис. 4. Еквівалентна модель кола двигуна DC і руки маніпулятора

У структурі матриці чутливості S , розміром 8×8 , кількість стовпців відповідає розміру вектора $P = P_e + P_{em} + P_m$, а кількість рядків - розміру вектора ΔU . Вектор ΔU складається з $\Delta U_e = [\Delta V_1, \dots, \Delta V_{11}, \Delta i]$ і $\Delta U_m = [\Delta \omega, \Delta j, \Delta J, \Delta \psi]$.

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

Шляхом розв'язування задачі мінімізації (11) можна обчислити значення

$$dP'(a_1) = (W_e^* W_e + a_1 I)^{-1} (W_e^*) \Delta U_v$$

$$dP''(a_2) = (W_m^* W_m + a_2 I)^{-1} (W_m^*) \Delta U_z,$$

де $(W_e)^*, (W_m)^*$ матриця конвергенції, а $\delta P'(\alpha_1) = [\delta P_e, \delta' P_{em}, 0]$, $\delta P''(\alpha_2) = [0, \delta P''_{em}, \delta P_m]$ вектори.

На наступному кроці моделювання формується вектор $P^{(q+1)} = (1 + \delta P^{(q)})$, складова якого $\delta P^{(q)} = [\delta P_e, \delta P_{em}, \delta P_m]$ містить два вектори $\delta P', \delta P''$. Величини δP_{em} підбираються емпірично шляхом зміни електричних параметрів $\delta L, \delta R$ від $\delta P'_{em}$ і зміни механічних параметрів $\delta D_m, \delta K_s, \delta J_m$ від $\delta P''_{em}$. Номінальні значення діагностованих параметрів є складовими елементами

тами вектора \mathbf{P}^n . Значення K_e, K_m дорівнюють 1.23, а k_p рівне 5.

В результаті діагностики отримано величини $\mathbf{P}^f, \mathbf{P}^d$ пошкоджених і діагностованих параметрів, відповідно. Як показано в третьому стовпці таблиці 1 значення пошкоджених параметрів \mathbf{P}^f відрізняються на 5%-30% від їхніх номінальних значень \mathbf{P}^n . Процедура діагностики, яка почалася з номінальних значень, була завершена після 43 ітерацій. Якість ідентифікації (п'ятий стовпець) була краща ніж 5 %.

Таблиця 1. Величини номінальних і діагностованих параметрів

| | \mathbf{P}^n | \mathbf{P}^f | $\frac{\mathbf{P}^f - \mathbf{P}^n}{\mathbf{P}^n}$ | \mathbf{P}^d | $\frac{\mathbf{P}^d - \mathbf{P}^f}{\mathbf{P}^f}$ |
|-------|----------------|----------------|--|----------------|--|
| 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% |

Висновки

В статті представлений метод виявлення несправностей в динамічних мехатронних (лінійних) системах. Вказано на відмінність діагностики електронних кіл і мехатронних систем. Проблема різних шумових рівнів розв'язана за до-

могою інтегральної чутливості і техніки регуляризації з різними коефіцієнтами регуляризації. М'які відхилення були зафіксовані в моделі маніпулятора руки робота із задовільною точністю.

Література

1. *R. Rosing, A. Richardson, A. Dorey & A. Peyton*, "Test Support Strategies for MEMS", IEEE Int. Mixed Signal Test Workshop, Whistler, Canada, June 1999.
2. *V. Brygilewicz, J. Wojciechowski*, "Time-domain fault diagnosis of analogue circuits in the presence of noise," IEE Proc. Circuit Devices and Systems, Vol. 145, 1998, pp.125-131.
3. *G. Hachtel, A. Sangiovanni-Vincentelli*, A survey of Third-Generation Simulation Technique, Proc. Of IEEE Vol.69, No10, 1981, pp. 1264-1280.
4. *A. Tikhonov, V. Arsenin*, "Methods for solving incorrect tasks," Nauka, Moscow 1979
5. *V. Brygilewicz, J. Wojciechowski, J. Starzyk*, "Diagnosis of analog dynamic system based on integral sensitivity" Proc. EECTD 99, Stressa, pp 1043-1046, 1999.
6. *L. Ljung*. Identification of linear Multivariable system operating under Linear Feedback Control. IEEE Trans Automatic control, V-19, N6, pp. 836-840, 1974.