

УДК 62-83::621.313.3

І.В. Сметана, А.О. Лозинський
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електричних машин і апаратів

АНАЛІЗ ЧУТЛИВОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З ВЕКТОРНИМ КЕРУВАННЯМ НА БАЗІ АД З К.З. РОТОРОМ ДО ПАРАМЕТРИЧНИХ ЗБУРЕНЬ

© Сметана І.В., Лозинський А.О., 2003

Розглянуто чутливість системи з векторним керуванням до зміни параметрів двигуна під час експлуатації електроприводу. Проведено аналіз існуючих підходів дослідження чутливості. Для моделі системи традиційного векторного керування (ФОС) з ПІ-регуляторами струму визначено міру чутливості системи, показано перехідні характеристики контурів регулювання потоку та швидкості обертання двигуна при зміні його параметрів.

In the given article the sensitivity of the vector control system to the motor parameters disturbances during electric drive performance is reviewed. The analysis of the existing approaches of the sensitivity investigations is conducted. For the traditional field-oriented control (FOC) system model with PI current controllers a measure of the system sensitivity is determined, also the transient characteristics of the flux and rotational speed control loops by changing motor parameters are shown.

Постановка проблеми

У системах керованих електроприводів з високими вимогами до точності регулювання вихідної координати, необхідно є досить точна установка параметрів регуляторів у контурах регулювання координат системи. Останнім часом у сучасних електроприводах застосовують різноманітні естиматори координат стану та параметрів (спостерігач Люенбергера, фільтр Калмана, авторегресивні системи адаптації тощо) для нормальної роботи яких важливою є точна ідентифікація параметрів системи.

При прецизійному налаштуванні параметрів регуляторів у системі керування, отримують необхідний розподіл нулів і полюсів системи і відповідні йому показники перехідного процесу в кожному контурі. Проте, на практиці досить часто виникає зміна параметрів двигуна під час роботи по відношенню до налаштування системи керування. При цьому зміна розміщення нулів та полюсів системи електроприводу впливає на якість і точність регулювання і може призвести до втрати стійкості.

Тому для систем електроприводів, в яких висунуті високі вимоги до показників перехідних процесів, стає необхідним аналіз чутливості системи до параметричних збурень. При цьому, через складність аналітичного визначення чутливості нелінійних систем, необхідно спочатку провести їх лінеаризацію, тобто досліджувати кілька окремих лінійних систем.

Аналіз останніх досліджень

Провідні науковці, що займалися дослідженнями чутливості, такі як Е.Н. Розенвассер, Р.М. Юсупов, [2, 6], Р. Томович [7], не дають однозначного простого аналітичного методу знаходження міри чутливості. Дослідники в галузі електроприводів переважно оминають

будь-які аналітичні спроби розрахунку значення чутливості, проводячи та аналізуючи при цьому експерименти при зміні параметрів на фізичних або математичних моделях системи. Так в [3] чутливість частотно-струмового векторного приводу до неточності задання параметрів регулювання визначена за допомогою експериментального зняття залежностей; в роботі [11] показані зміщення нулів та полюсів залежно від зміни параметрів та координат системи електроприводу на основі GTO-CSI інвертора з регулюванням ковзання.

Задачі досліджень

Параметричні збурення з боку двигуна в системі електроприводу під час його експлуатації виникають з відомих причин:

- зміна активних опорів обмоток внаслідок тривалих високо-температурних режимів при перевантаженнях;
- збільшення втрат у сталі при високих частотах перемагнічування, що призводить до збільшення активного опору гілки намагнічування заступної схеми АД;
- зміна (зменшення) індуктивних опорів заступної схеми АД при перенасиченнях контуру намагнічування або зубцевих зон.

У загальному випадку в теорії автоматичного керування [5] розглядають функцію чутливості як частинну похідну реакції досліджуваної координати системи до зміни одного з параметрів

$$U_{ki} = \frac{\partial x_k}{\partial p_i}, \quad (1)$$

де x_k – координата системи; p_i – змінний параметр; U_{ki} – функція чутливості k -ї координати до зміни i -го параметра.

Для нелінійної системи, поданої в такому вигляді:

$$\frac{dx_k}{dt} = f_k(x_1, x_2, \dots, x_n; p_1, p_2, \dots, p_m) \quad (2)$$

система лінійних рівнянь для знаходження функцій чутливості матиме вигляд

$$\frac{dU_{ki}}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f_k}{\partial x_i} \cdot U_{ki} + \frac{\partial f_k}{\partial p_i}, \quad (3)$$

де $k = 1 \dots n$; $i = 1 \dots m$.

У [2, 7, 6] для лінійних нестационарних систем, що описуються матричним рівнянням

$$X' = A(t) \cdot X + R(t); \quad X(t_0) = X_0, \quad (4)$$

рівняння чутливості приймає такий вигляд:

$$U'_i = A(t) \cdot U_i + \frac{\partial A(t)}{\partial p_i} \cdot X, \quad U(t_0) = U_0, \quad (5)$$

де X – вектор координат системи; $A(t)$, $R(t)$ – матриці системи; p_i – змінний параметр матриці $A(t)$.

У [7] частотна характеристика чутливості системи, для якої відома її передавальна функція, визначається як

$$S(s) = \frac{dW(s, p_i)}{dp_i} \cdot \frac{p_i}{W(s, p_i)} = \frac{d \ln W(s, p_i)}{d \ln p_i} \quad (6)$$

де $W(s, p_i)$ – передавальна функція системи; s – комплексна частота.

Для замкнутих багатовимірних систем, вигляду як на рис. 1, знаходиться, так звана, матриця чутливості [7]:

$$S(s) = (I + P'(s) \cdot G(s) \cdot H(s))^{-1}, \quad (7)$$

де I – одинична матриця; $P'(s) = P(s) + \Delta P(s)$ – змінена матрична передавальна функція внаслідок зміни параметрів об'єкта регулювання.

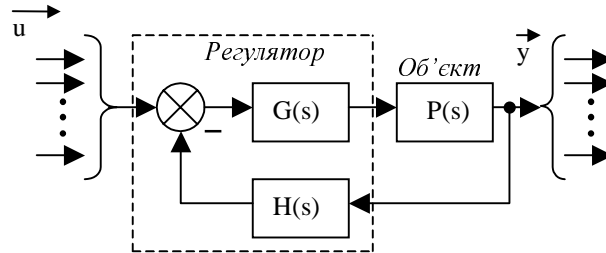


Рис. 1. Приклад багатовимірної замкнутої системи автоматичного керування

Наприклад, в [6] для систем з відомою передавальною функцією і нульовими початковими умовами, рівняння чутливості має вигляд

$$A(p) \cdot u_k = \frac{\partial B(p)}{\partial \alpha_k} \cdot y - \frac{\partial A(p)}{\partial \alpha_k} \cdot x, \quad (8)$$

де $k=1 \dots q$; α_k – k -й параметр системи;

$$\frac{y}{x} = W(p) = \frac{A(p)}{B(p)} = \frac{p^n + a_{n-1}(\alpha_1, \dots, \alpha_q)p^{n-1} + \dots + a_0(\alpha_1, \dots, \alpha_q)}{b_m(\alpha_1, \dots, \alpha_q)p^m + \dots + b_1(\alpha_1, \dots, \alpha_q)p + b_0(\alpha_1, \dots, \alpha_q)}. \quad (9)$$

Проте, як вже було відмічено вище, всі ці підходи не вирішують проблеми знаходження міри чутливості для конкретних систем електроприводів до параметричних збурень, не дають для цього простого аналітичного апарата.

Виклад основного матеріалу

Теоретичні засади

Останнім часом, в теорії кіл та цифрової фільтрації набуло широкого вжитку поняття L^2 -чутливості системи до параметричних збурень – [8, 9, 10, 12]. Нехай лінійна система зображена у векторно-матричній формі:

$$\begin{cases} x' = A \cdot x + B \cdot u, \\ y = C \cdot x. \end{cases} \quad (10)$$

Передавальна функція системи (10) записується як:

$$H(s) = C \cdot (s \cdot I - A)^{-1} \cdot B. \quad (11)$$

У загальному випадку, при зміні параметрів системи, передавальну функцію (11) запишемо так:

$$\tilde{H}(s) = H(s) + \Delta H(s) = \tilde{C} \cdot (s \cdot I - \tilde{A})^{-1} \cdot \tilde{B} = (C + \Delta C) \cdot (s \cdot I - (A + \Delta A))^{-1} \cdot (B + \Delta B), \quad (12)$$

де ΔA , ΔB , ΔC – матриці приростів відповідно матриць A , B , C при зміні параметрів системи; $\Delta H(s)$ – приріст (похибка) передавальної функції.

Дисперсію приросту передавальної функції в частотній області, можна подати, як:

$$\sigma_{\Delta H}^2 = \int_D \sum_{i=1}^N \left| \frac{\partial H(j\omega)}{\partial p_i} \right|^2 \cdot \sigma^2 \cdot d\omega, \quad (13)$$

де D – діапазон частот пропускання системи (10); p_i – i -й параметр системи; N – кількість змінних параметрів в системі; $\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\Delta p_i)^2}{n}$ – середнє відхилення параметрів системи.

При сталому розкиді, незалежному від частоти, для одного параметра (13) можна записати як

$$S_p = \frac{\sigma_{\Delta H}^2}{\sigma_p^2} = \frac{\int_D \left| \frac{\partial H(j\omega)}{\partial p} \right|^2 \cdot \sigma_p^2 \cdot d\omega}{\sigma_p^2} = \int_D \left| \frac{\partial H(j\omega)}{\partial p} \right|^2 d\omega. \quad (14)$$

Враховуючи визначення [12], L^2 -чутливість системи (10) записується так:

$$S = \frac{\sigma_{\Delta H}^2}{\sigma^2} = \left\| \frac{\partial H(s)}{\partial A} \right\|_2^2 + \left\| \frac{\partial H(s)}{\partial B} \right\|_2^2 + \left\| \frac{\partial H(s)}{\partial C^T} \right\|_2^2 = \left\| G^T(s) \cdot F^T(s) \right\|_2^2 + \left\| G^T(s) \right\|_2^2 + \left\| F(s) \right\|_2^2, \quad (15)$$

де $F(s) = (s \cdot I - A)^{-1} \cdot B$, $G(s) = C \cdot (s \cdot I - A)^{-1}$.

$\|\bullet\|_2$ – L_2 -норма матриці, що для довільної матриці $X(j\omega)$, визначається як

$$\|X(j\omega)\|_2 = \left[\text{tr} \left(\int_D X(j\omega) \cdot X^T(j\omega) \cdot d\omega \right) \right]^{1/2}. \quad (16)$$

Згідно з доведенням, наведеним в [12], для знаходження чутливості, рівняння (11) запишемо у вигляді:

$$S \cong (\text{tr}[W_0] + 1) \cdot (\text{tr}[K_0] + 1) + \sqrt{2} \cdot \Delta \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \text{tr}[W_i] \cdot \text{tr}[K_i], \quad (17)$$

де $K_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot j} \int_{-j\infty}^{j\infty} F(s) \cdot F^T(-s) \cdot ds = \int_0^{\infty} e^{At} \cdot B \cdot B^T \cdot e^{A^T t} dt$ – Граміан*-керіваність системи;

$W_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot j} \int_{-j\infty}^{j\infty} G^T(s) \cdot G(-s) \cdot ds = \int_0^{\infty} e^{A^T t} \cdot C^T \cdot C \cdot e^{At} dt$ – Граміан*-спостережуваність системи;

$i=1,2,3,\dots$; Δ – дискретний період при апроксимації функції $e^{A \cdot t} = e^{A \cdot i\Delta}$.

Системи рівнянь для знаходження $K_{0,1,2,\dots}$ і $W_{0,1,2,\dots}$ можна отримати при розв'язуванні рівнянь Ляпунова [13, 12]:

$$\begin{aligned} A \cdot K_i + K_i \cdot A^T &= -\frac{1}{2} \cdot \left(B \cdot B^T \cdot e^{A^T i\Delta} + e^{A i\Delta} \cdot B \cdot B^T \right) \\ A^T \cdot W_i + W_i \cdot A &= -\frac{1}{2} \cdot \left(C^T \cdot C \cdot e^{A i\Delta} + e^{A^T i\Delta} \cdot C^T \cdot C \right) \end{aligned} \quad (18)$$

При цьому апроксимація матричної експоненти, виконується так [20, с. 67]:

$$e^{At} = \begin{cases} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k!} \cdot A^k \cdot t^k, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (19)$$

Одним з наочних способів дослідження чутливості може бути також дослідження зміщення нулів та полюсів передавальної функції системи електроприводу при зміні параметрів двигуна.

Оцінка чутливості системи з векторним керуванням

На сьогодні системи з векторним керуванням набули широкого застосування і їх можна зобразити багатьма схемами. При виборі асинхронного приводу з векторним керуванням потоком та швидкістю обертання [1, 4], спрощену структурну схему системи в координатах x-y, що синхронно обертаються з полем статора, можна подати як на рис. 2, де R_s, R_r – відповідно активний опір фазних обмоток статора та ротора; L_m – індуктивність від головного потоку; L_s, L_r – відповідно індуктивності статора та ротора; p_{π} – кількість пар полюсів двигуна; J – момент інерції; i_{sx}, i_{sy} – проекції вектора струму статора на систему координат x-y; ω – кутова швидкість обертання ротора двигуна; ψ_r – потокозчеплення ротора; M_c – момент статичного навантаження на валі двигуна; $k_{зв.с}, k_{зв.п}, k_{зв.ш}$ – коефіцієнти зворотніх зв'язків відповідних контурів;

$$\sigma_0 = \frac{L_s \cdot L_r - L_m^2}{L_r}; T_r = \frac{L_r}{R_r}; R_{\Sigma} = R_s + R_r \cdot \frac{L_m^2}{L_r^2}; T_e = \frac{\sigma_0}{R_{\Sigma}}; k_{\mu} / (T_{\mu} p + 1)$$

– еквівалентна передавальна ланка ПЧ..

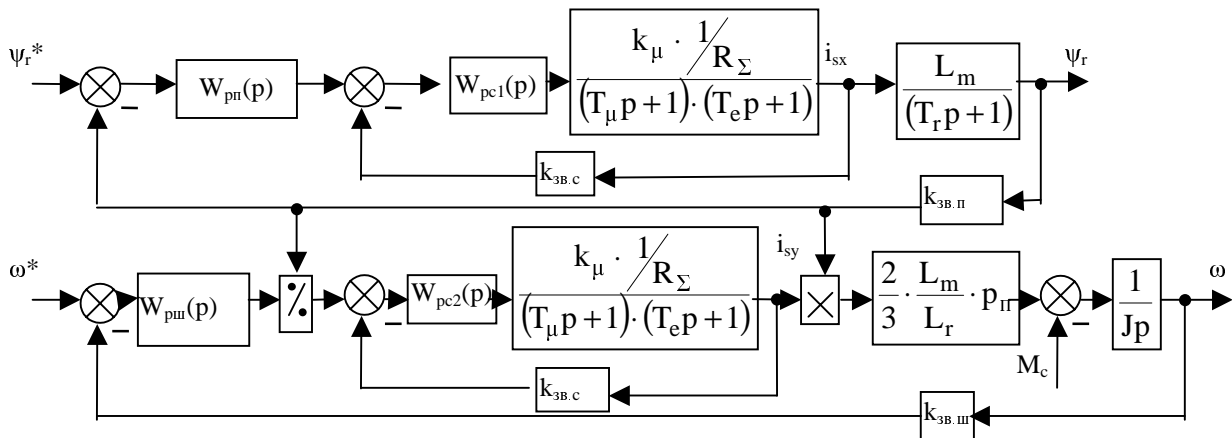


Рис. 2. Спрощена структурна схема системи регулювання потоку та швидкості асинхронного електроприводу при традиційному векторному керуванні (FOC) з ПІ-регуляторами струму, з орієнтацією за вектором потокозчеплення ротора

Передавальні функції ПІ-регуляторів струму визначаються налагоджуванням контурів струму на модульний оптимум

$$W_{pi1}(p) = W_{pi2}(p) = \frac{R_{\Sigma p} \cdot (T_{ep} \cdot p + 1)}{k_{зв.с} \cdot k_{\mu p} \cdot 2T_{\mu p} \cdot p},$$

де індекс “р” – належить до параметрів регуляторів, що задаються відповідно до параметрів двигуна і під час роботи залишаються незмінними

Зовнішній контур регулювання потоку налаштовується на симетричний оптимум. Передавальна функція ПІ-регулятора потоку

$$W_{p\Pi} = \frac{(T_{rp} \cdot p + 1)}{k_{зв.п} \cdot L_{mp} \cdot 4T_{\mu p} \cdot p}.$$

Регулятор швидкості вибирається пропорційним і має таку передавальну функцію:

$$W_{pш} = \frac{2L_{rp} \cdot p_{\Pi} \cdot J_p}{3L_{mp} \cdot 4T_{\mu p} \cdot k_{зв.ш}}.$$

Контур регулювання потоку є набагато швидкодіючим аніж контур регулювання швидкості, тому окремо ці контури розглядаються лінійними. При цьому, сигнал поточозчеплення ротора в контурі швидкості можна зарахувати до одного з параметрів цього контуру з розкидом, що визначається контуром регулювання потоку.

Передавальна функція контуру регулювання потоку має вигляд:

$$W_{\Psi} = \frac{b_2 \cdot p^2 + b_1 \cdot p + b_0}{a_5 \cdot p^5 + a_4 \cdot p^4 + a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0}, \quad (20)$$

де

$$b_2 = k_{\mu} \cdot R_{\Sigma p} \cdot T_{ep} \cdot L_m \cdot T_{rp};$$

$$b_1 = k_{\mu} \cdot R_{\Sigma p} \cdot L_m \cdot (T_{rp} + T_{ep});$$

$$b_0 = k_{\mu} \cdot R_{\Sigma p} \cdot L_m;$$

$$a_5 = 8 \cdot k_{зв.с} \cdot k_{зв.п} \cdot T_{\mu p}^2 \cdot T_{\mu} \cdot T_e \cdot T_r \cdot k_{\mu p} \cdot L_{mp} \cdot R_{\Sigma};$$

$$a_4 = (8T_{\mu p}^2 \cdot k_{\mu p} \cdot L_{mp} \cdot R_{\Sigma} \cdot (T_{\mu} \cdot T_e + (T_{\mu} + T_e) \cdot T_r)) \cdot k_{зв.с} \cdot k_{зв.п};$$

$$a_3 = k_{зв.с} \cdot k_{зв.п} \cdot (4T_{\mu p} \cdot L_{mp} \cdot (2T_{\mu p} \cdot k_{\mu p} \cdot R_{\Sigma} \cdot (T_{\mu} + T_e) + (2T_{\mu p} \cdot k_{\mu p} \cdot R_{\Sigma} + k_{\mu} \cdot R_{\Sigma p} \cdot T_{ep}) \cdot T_r));$$

$$a_2 = (4k_{зв.с} \cdot T_{\mu p} \cdot L_{mp} \cdot (2T_{\mu p} \cdot k_{\mu p} \cdot R_{\Sigma} + k_{\mu} \cdot R_{\Sigma p} \cdot (T_r + T_{ep})) + T_{ep} \cdot T_{rp} \cdot k_{\mu} \cdot L_m \cdot R_{\Sigma p}) \cdot k_{зв.п};$$

$$a_1 = (4k_{зв.с} \cdot T_{\mu p} \cdot L_{mp} \cdot k_{\mu} \cdot R_{\Sigma p} + L_m \cdot k_{\mu} \cdot R_{\Sigma p} \cdot (T_r + T_{ep})) \cdot k_{зв.п};$$

$$a_0 = L_m \cdot k_{\mu} \cdot R_{\Sigma p} \cdot k_{зв.п}.$$

Передавальна функція контуру регулювання швидкості обертання має такий вигляд:

$$W_{\omega} = \frac{b_1 \cdot p + b_0}{a_4 \cdot p^4 + a_3 \cdot p^3 + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0}, \quad (21)$$

де

$$b_1 = L_{rp} \cdot J_p \cdot \psi_r \cdot L_m \cdot k_{\mu} \cdot R_{\Sigma p} \cdot T_{ep};$$

$$b_0 = L_{rp} \cdot J_p \cdot \psi_r \cdot L_m \cdot k_{\mu} \cdot R_{\Sigma p};$$

$$a_4 = 8T_{\mu p}^2 \cdot L_{mp} \cdot J \cdot \psi_r \cdot L_r \cdot T_{\mu} \cdot k_{\mu p} \cdot R_{\Sigma} \cdot T_e \cdot k_{зв.с} \cdot k_{зв.ш};$$

$$a_3 = 8T_{\mu p}^2 \cdot L_{mp} \cdot J \cdot \psi_r \cdot L_r \cdot k_{\mu p} \cdot R_{\Sigma} \cdot (T_e + T_{\mu}) \cdot k_{зв.с} \cdot k_{зв.ш};$$

$$a_2 = 4T_{\mu p} \cdot L_{mp} \cdot J \cdot \psi_r \cdot L_r \cdot (2T_{\mu p} \cdot k_{\mu p} \cdot R_{\Sigma} + k_{\mu} \cdot R_{\Sigma p} \cdot T_{ep}) \cdot k_{зв.с} \cdot k_{зв.ш};$$

$$a_1 = k_{\mu} \cdot R_{\Sigma p} \cdot \psi_r \cdot (4k_{зв.с} \cdot T_{\mu p} \cdot L_{mp} \cdot J \cdot L_r + L_{rp} \cdot J_p \cdot L_m \cdot T_{ep}) \cdot k_{зв.ш};$$

$$a_0 = L_{rp} \cdot J_p \cdot \psi_r \cdot L_m \cdot k_{\mu} \cdot R_{\Sigma p} \cdot k_{зв.ш}.$$

Згідно з (13) вектор чутливості контуру до зміни параметрів двигуна буде мати вигляд

$$\bar{S}_p = \int_D \left| \frac{\partial W_\psi(j\omega)}{\partial \alpha} \right|^2 \cdot \bar{\alpha}^2 d\omega, \quad D \in (0, \omega_{зр}), \quad (22)$$

де $\omega_{зр}$ – частота зрізу ЛАЧХ передавальної функції (20,21); $\bar{\alpha} = [R_r \quad R_s \quad L_m \quad L_{\sigma s} \quad L_{\sigma r}]^T$ – вектор параметрів; $\bar{S}_p = [S_{R_r} \quad S_{R_s} \quad S_{L_m} \quad S_{L_{\sigma s}} \quad S_{L_{\sigma r}}]^T$ – вектор чутливості.

За (22), шукається вектор чутливості як контуру потоку, так і контуру швидкості.

Після переходу від лінійної системи, зображеної передавальною функцією, до системи, записаної у векторно-матричній формі (10), L^2 -чутливість системи до зміни її параметрів (елементів матриць А, В, С) визначається алгоритмом, що впливає з рівнянь (17)–(19).

Результати досліджень

Таблиця 1

Дані для досліджень

| № з/п | Асинхронний двигун | | Еквівалентна ланка перетворювача частоти | |
|-------|-------------------------|----------|--|---------------------|
| | Параметр | Значення | Параметр | Значення |
| 1 | P_n , кВт | 7,5 | k_μ | 40 |
| 2 | U_n , В | 220 | T_μ , с ⁻¹ | $3,3 \cdot 10^{-4}$ |
| 3 | p_p | 2 | Коефіцієнти зворотних зв'язків | |
| 4 | I_n , А | 16,5 | | |
| 5 | R_s , Ом | 0,728 | | |
| 6 | R_r , Ом | 0,706 | | |
| 7 | L_m , Гн | 0,0969 | Параметр | Значення |
| 8 | $L_{\sigma s}$, Гн | 0,0027 | $k_{зв.с}$ | 0,606 |
| 9 | $L_{\sigma r}$, Гн | 0,0027 | $k_{зв.п}$ | 10,1 |
| 10 | J , кг·м ² | 0,062 | $k_{зв.ш}$ | 0,067 |

Таблиця 2

Результати розрахунку чутливості

| № з/п | Контур керування | Параметрична чутливість контуру за формулою (17), S |
|-------|---------------------|---|
| 1 | потоком | $S_\psi = 152,345$ |
| 2 | швидкістю обертання | $S_\omega = 244,280$ |

Таблиця 3

Чутливість до зміни окремого параметра

| № з/п | Параметр | Розкид параметра | Дисперсія передавальної функції | |
|-------|----------------|------------------|---------------------------------|------------------|
| | | | Контур потоку | Контур швидкості |
| 1 | R_s | 0,2 | 0,043 | 4,4316 |
| 2 | R_r | 0,3 | 11,807 | 223,3285 |
| 3 | L_m | 0,06 | 0,014 | 163,7745 |
| 4 | $L_{\sigma s}$ | 0,0017 | 7,603 | 69928,4 |
| 5 | $L_{\sigma r}$ | 0,0017 | 7,208 | 65024,1 |
| 6 | J | 0,062 | - | 2739195,2 |

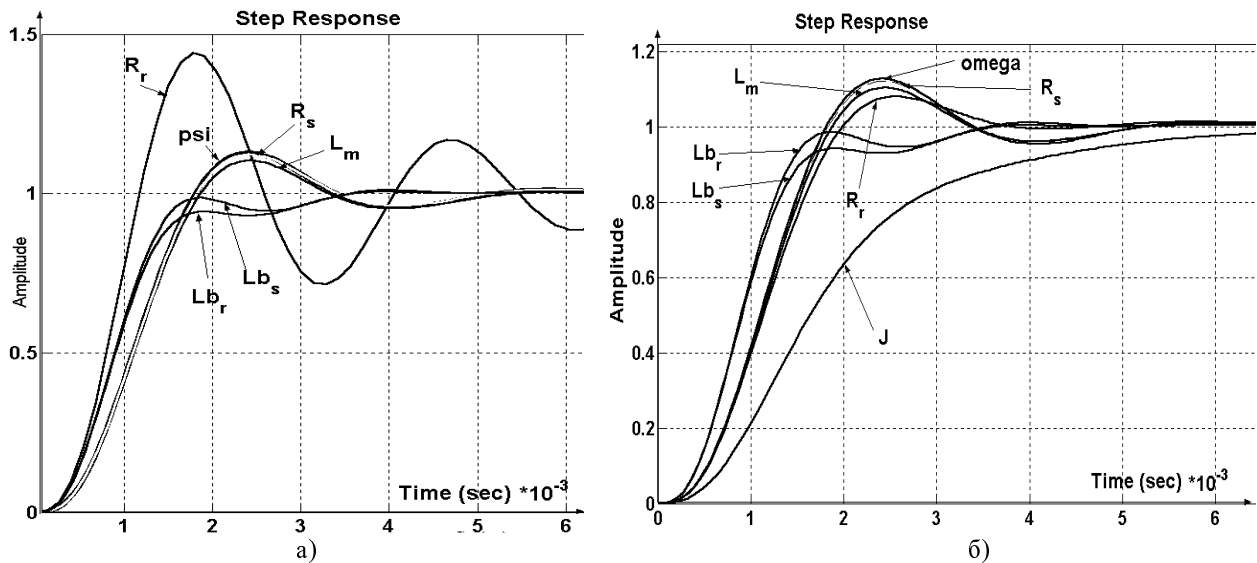


Рис. 3. Перехідні характеристики при зміні параметрів двигуна:
а – контуру потоку ; б – контуру швидкості

У табл. 2 наведені значення параметричної чутливості обох лінійних контурів окремо, визначеної програмно, враховуючи алгоритм (17), (18), (19). Для застосування цього методу, необхідно також перейти від зображення системи передавальною функцією до її зображення у векторно-матричній формі (10).

У табл. 3 наведені обчислені за формулою (13) дисперсії передавальних функцій, при зміні параметрів системи, що слугує оцінкою чутливості до зміни цих параметрів (22). Для таблиці 3 взято дані системи електроприводу з табл. 1, а також пораховано відповідні розкиди параметрів асинхронного двигуна, які виникають через вищевказані причини. Зміна моменту інерції J відповідає збільшенню махових мас у два рази.

На рис. 3 зображено перехідні характеристики контурів потоку та швидкості при зміні параметрів двигуна згідно з табл. 3. Криві "psi" та "omega" є перехідними характеристиками контуру потоку та швидкості, відповідно, без розлагоджень.

Висновки

Отримані результати міри чутливості підтверджують наведені в літературі дані та співвідношення чутливості систем векторного керування до зміни параметрів [3, 11]. Зокрема, як свідчать ці результати, найвища чутливість є до зміни опору ротора (табл. 3, рис. 3). Також, при навантаженнях двигуна, в кілька разів вищих за номінальне, значний вплив на систему має зміна індуктивностей розсіяння статора та ротора (режими перевантажень).

Метод L^2 -чутливості доцільно використовувати для порівняння різних схем керування, поданих у лінеаризованому вигляді. Зокрема, для схем векторного керування, а саме: пряме та непряме (DFOC, IFOC), з ПІ- або з гістерезисними регуляторами струму.

Для оцінки чутливості системи до зміни окремого параметра, використовується дисперсія передавальної функції. При цьому результати аналітичних розрахунків необхідно доповнювати графіками розміщення нулів і полюсів, що відображає перехідні процеси в системі, або ж графіками перехідних характеристик.

Метод L^2 -чутливості системи до зміни параметрів можна застосувати для створення нових систем керування, малочутливих до параметричних збурень, за допомогою вибору координат стану та їх комбінацій, що відповідає сучасним тенденціям розвитку систем керування електроприводами.

1. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. – Л., 1982. – 392с. 2. Городецкий В.И., Захарин Ф.М., Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М. Методы теории чувствительности в автоматическом управлении. – Л., 1971. 3. Поздеев А.Д. Чувствительность асинхронных регулируемых электроприводов с частотно-токовым векторным управлением к неточности задания параметров настройки // *Электротехника*. – 1998. – № 6. – С. 1–7. 4. Теорія електропривода / За ред. М.Г. Поповича. – К., 1993. 5. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування. – К., 1997. – 544 с. 6. Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М. Чувствительность систем автоматического управления. – Л., 1969. – 208 с. 7. Томович Р., Вукобратович М. Общая теория чувствительности. – М., 1972. – 240 с. 8. Yan W.-Y., Moore J.B. On L^2 -Sensitivity minimization of linear state-space systems // *IEEE Trans.Circuits Syst. I*. – Aug. 1992. – Vol. 39. – P. 641–648, 9. Iwatsuki M., Kawamata M. and Higuchi T. Statistical sensitivity and minimum sensitivity structures with fewer coefficients in discrete time linear systems // *IEEE Trans.Circuits Syst. I*. – Jan. 1989. – Vol. 37. – P. 72–80. 10. Li G., Anderson B.D.O., Gevers M., Optimal FWL design of state-space digital systems with weighted sensitivity minimization and sparseness consideration // *IEEE Trans.Circuits Syst. I*. – May 1992. – Vol. 39. – P. 365–376. 11. Wu B., Slemon G. R., Dewan S.B. Eigenvalue sensitivity analysis of GTO-CSI induction mashine drives // *IEEE Trans. on Industry Applications*. – May 1994. – Vol. 30, N 3. – P. 767–775. 12. Hinamoto T., Yokoyama S., Inoue T., Zeng W., Lu W.-S. Analysis and minimization of L^2 -Sensitivity for linear systems and two-dimensional state-space filters using general controllability and observability Gramians // *IEEE Trans.Circuits Syst.* – Sept. 2002. – Vol. 49. – P. 1279–1289. 13. Kailath T., *Linear System*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1980. 14. Сметна І.В., Лозинський А.О. Ідентифікація потягозчеплення асинхронного двигуна з к.з. ротором на основі координат стану // *Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика: Вісн. XIII*. – 2002.