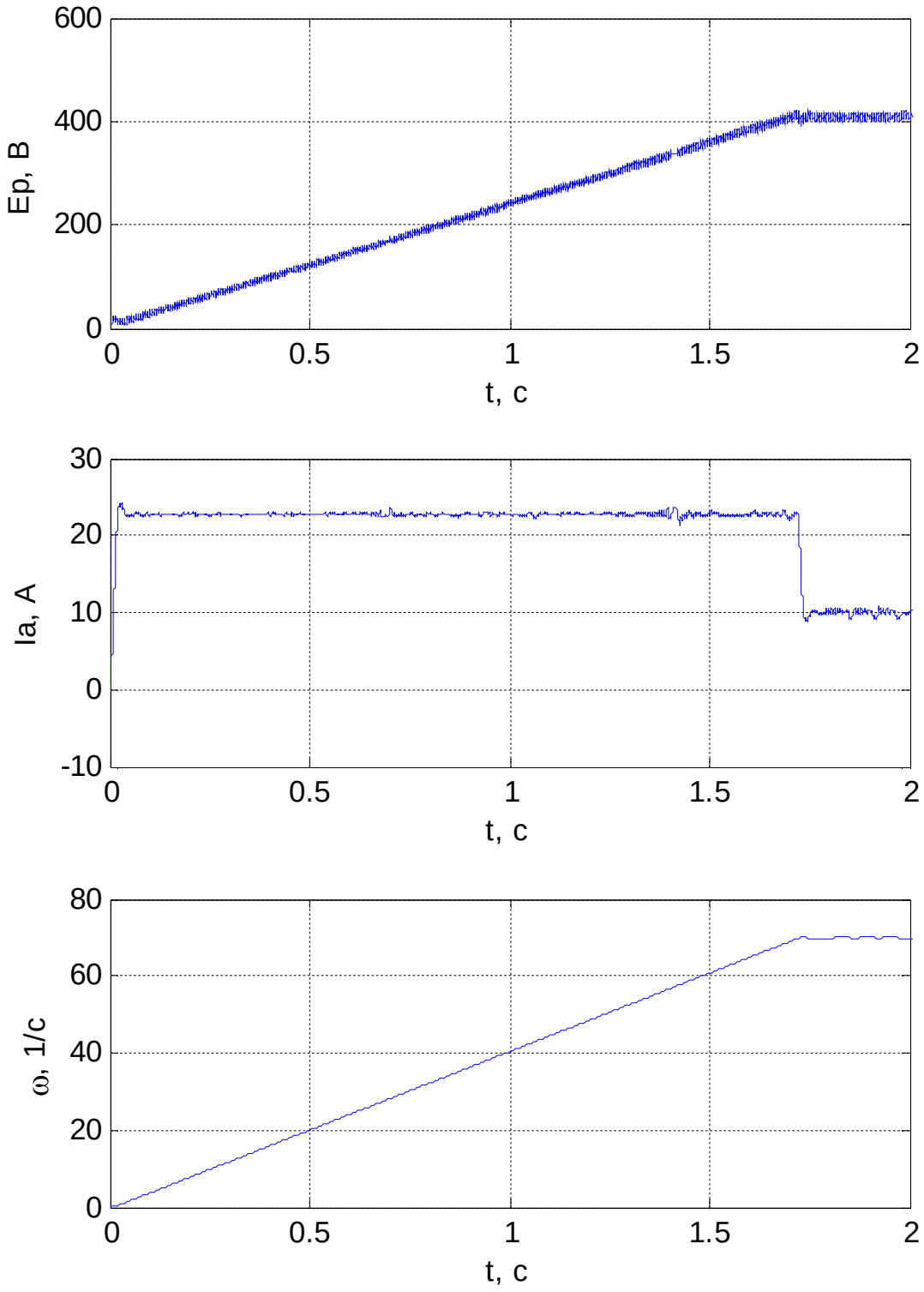


Рисунок 6.11 – Процессы пуска с нагрузкой при $0,7 \cdot J_{\Sigma}$

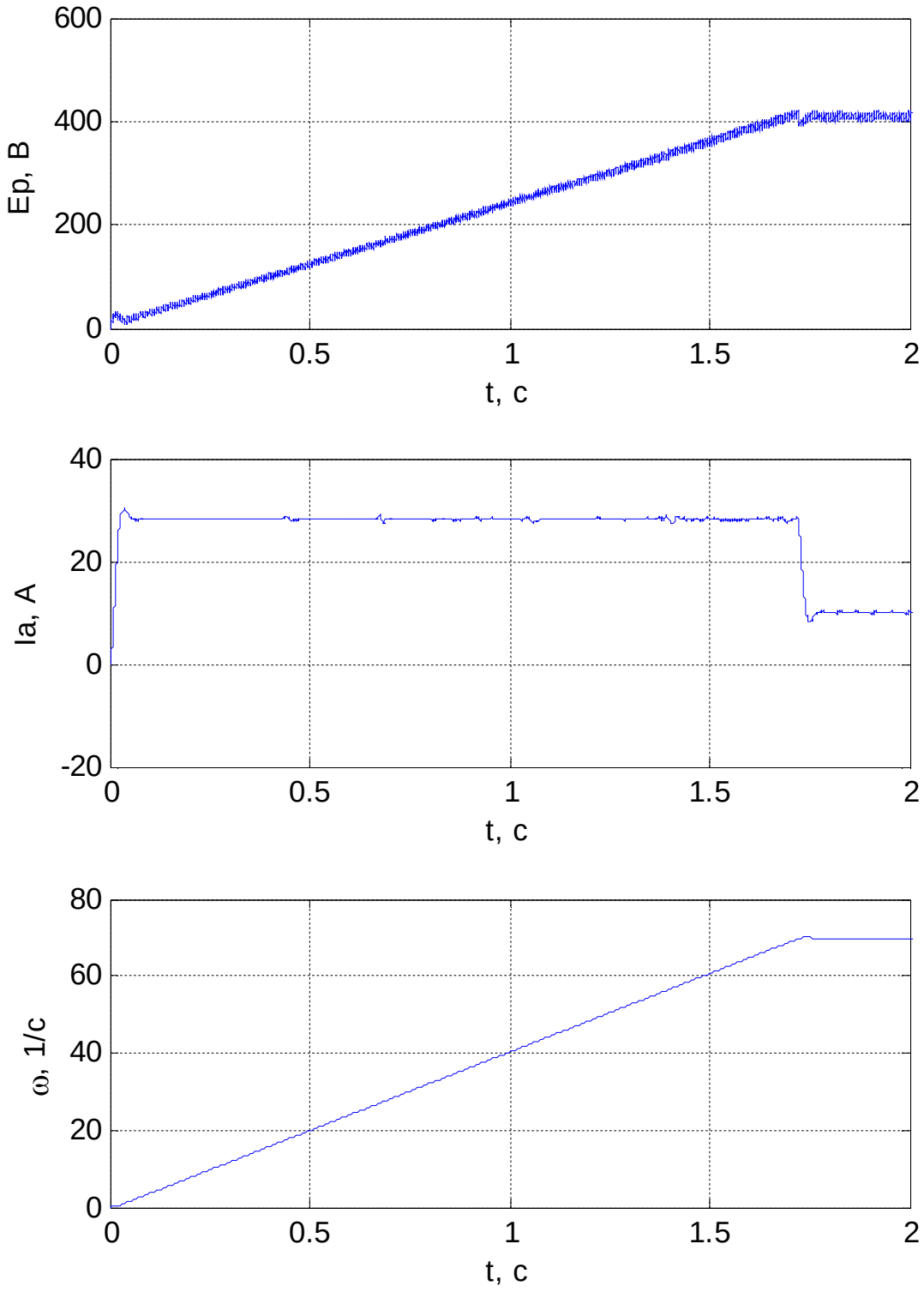


Рисунок 6.12 – Процессы пуска с нагрузкой при $1{,}5 \cdot T_э$

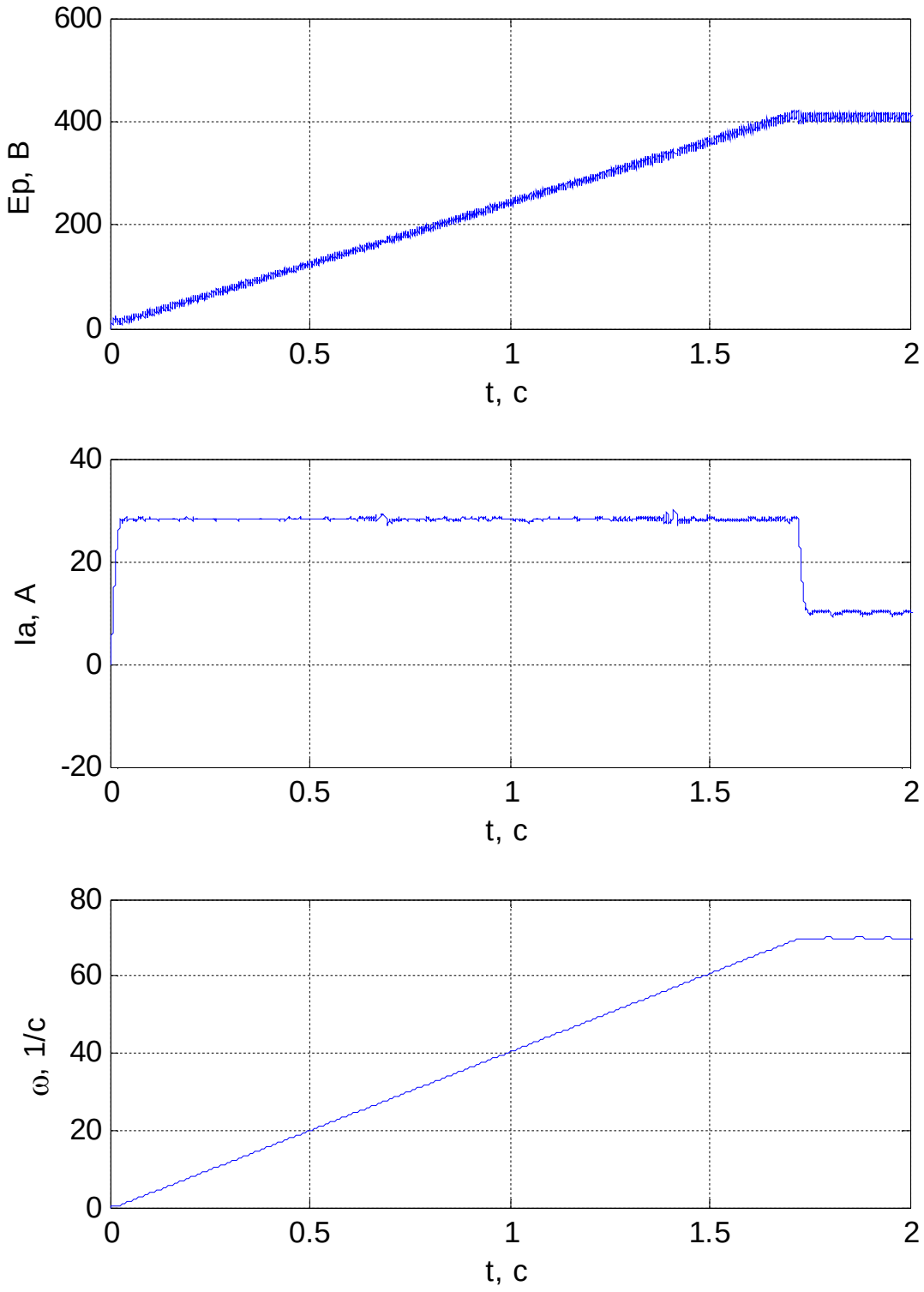


Рисунок 6.13 – Процессы пуска с нагрузкой при $0,7 \cdot T_э$

СТРУКТУРНО-АЛГОРИТМІЧНИЙ СИНТЕЗ РЕЛЕЙНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ДВОМАСОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА З ФРИКЦЫЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

4.1. Математичний опис об'єкта управління

У попередніх розділах об'єкт управління (швидкісний ЕП постійного струму) розглядався за умови абсолютної жорсткості складових його механічних елементів. Однак значна кількість промислових ЕП володіє пружними кінематичними зв'язками, що дозволяє розглядати даний клас об'єктів як двомасових ЕМС.

Відомо, що наявність пружної кінематичного зв'язку істотно впливає на динаміку ЕП, причому як при постійній, так і при фрикційної навантаженні [15]. У зв'язку з цим становить інтерес синтез РСУ для нового класу об'єктів - двомасових ЕП, що працюють з фрикційної навантаженням. Метою даного синтезу є:

- придушення фрикційних автоколивань;

- отримання необхідних динамічних показників якості та мінімальної статичної помилки;

- забезпечення квазіінваріантності до параметричних і координатних збурень.

Як об'єкт управління приймаємо двомасових ЕП постійного струму, що включає в себе двигун постійного струму з незалежним збудженням і керований перетворювач. В даному об'єкті управління першу масу з моментом інерції становить якір двигуна, гальмовий шків, муфта. Момент інерції другої маси становлять приведені до валу двигуна моменти інерції різних частин робочого органу машини. Статичне навантаження прикладається до другої маси.

Система диференціальних рівнянь, що описують рух даного об'єкта управління (без урахування статичного навантаження), має вигляд:

$$\begin{cases} p\omega_2 = \dfrac{1}{J_2} M_y; \\ pM_y = -c_{12}\omega_2 + c_{12}\omega_1; \\ p\omega_1 = -\dfrac{1}{J_1} M_y + \dfrac{c\Phi}{J_1} I; \\ pI = -\dfrac{c\Phi}{R_Э T_Э}\omega_1 - \dfrac{1}{T_Э} I + \dfrac{1}{R_Э T_Э} E_П; \\ pE_П = -\dfrac{1}{T_П} E_П + \dfrac{k_{УП}}{T_П} U_y, \end{cases} \qquad (4.1)$$

де ω_1 - кутова швидкість двигуна; ω_2 - кутова швидкість механізму;

M_y - момент пружного закручування вала.

Основні допущення:

- нехтуємо внутрішнім в'язким тертям;
- коефіцієнт жорсткості постійний;
- потік двигуна приймаємо незмінним;
- вплив реакція якоря і вихрових струмів дуже малий;
- швидкість механізму вимірювана;
- перетворювач розглядається в якості аперіодичної ланки першого порядку.

Дані припущення є загальноприйнятими для багатьох двомасових ЕП постійного струму і дозволяють обмежитися при їх описі лінійними диференціальними рівняннями, зберігаючи при цьому адекватність математичної моделі реальним процесам в системі.

Номінальні значення параметрів двомасових об'єкта управління, прийняті за основу в подальших дослідженнях, наведені в табл. 4.1.

Введемо наступні відносні координати:

$$x_1 = \frac{\omega_2}{\omega_M};\ x_2 = \frac{M_y}{M_{yM}};\ x_3 = \frac{\omega_1}{\omega_M};\ x_4 = \frac{I}{I_M};\ x_5 = \frac{E_П}{E_{ПМ}};\ U = \frac{U_y}{U_M}, \qquad (4.2)$$

де ω_M , $M_{УМ}$, I_M , $E_{ПМ}$ - прийняті максимальні значення відповідно кутової швидкості двигуна, моменту пружного закручування вала, струму якоря двигуна і ЕРС перетворювача, рівні:

$$\omega_M = \omega_{XX};\ M_{УМ} = 2M_H;\ I_M = 2I_H;\ E_{ПМ} = k_{УП}U_M.$$

На підставі (4.2), (4.3) запишемо систему (4.1) у відносних одиницях:

$$\begin{cases} px_1 = a_{12}x_2; \\ px_2 = a_{21}x_1 + a_{23}x_3; \\ px_3 = a_{32}x_2 + a_{34}x_4; \\ px_4 = a_{43}x_3 + a_{44}x_4 + a_{45}x_5; \\ px_5 = a_{55}x_5 + b_5U, \end{cases} \qquad (4.4)$$

де

$$a_{12} = \frac{M_{УМ}}{J_2\omega_M};\ a_{21} = -\frac{c_{12}\omega_M}{M_{УМ}};\ a_{23} = \frac{c_{12}\omega_M}{M_{УМ}};\ a_{32} = -\frac{M_{УМ}}{J_1\omega_M};\ a_{34} = \frac{I_M c\Phi}{J_1\omega_M};$$

$$a_{43} = -\frac{\omega_M c\Phi}{R_Э T_Э I_M};\ a_{44} = -\frac{1}{T_Э};\ a_{45} = \frac{E_{ПМ}}{R_Э T_Э I_M};\ a_{55} = -\frac{1}{T_П};\ b_5 = \frac{k_{УП}U_M}{T_П E_{ПМ}}.$$

У векторній формі система (4.4) має наступний вигляд:

$$p\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}U \qquad (4.5)$$

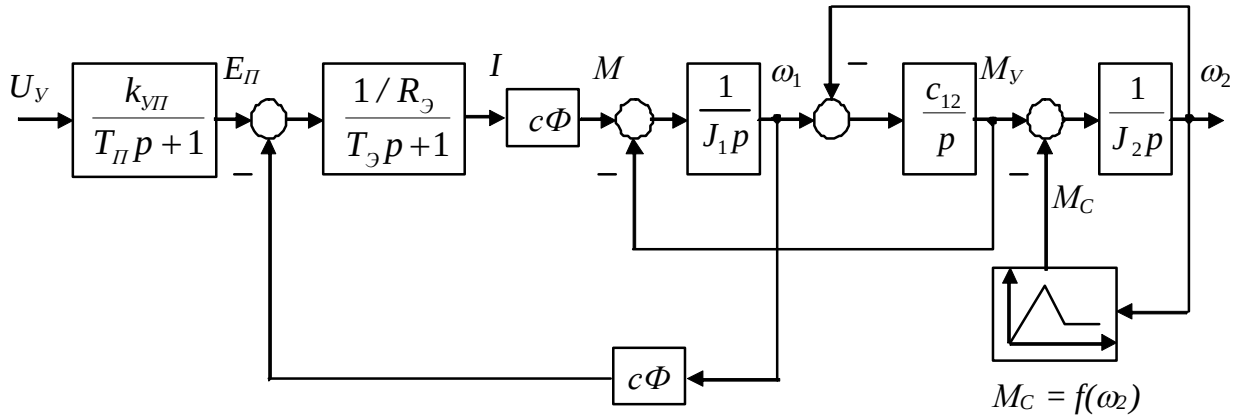
де $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix};\ \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & a_{23} & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & 0 & a_{34} & 0 \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} & a_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} \end{bmatrix};\ \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ b_5 \end{bmatrix}.$

Приймаємо припущення, що даний двомасовий об'єкт управління знаходиться під впливом нелінійного навантаження (2.6).

З урахуванням статичного навантаження система (4.1) перепишеться в наступному вигляді:

$$
\begin{cases}
p\omega_2 = \dfrac{1}{J_2} M_У - \dfrac{1}{J_2} M_C; \\
pM_У = -c_{12}\omega_2 + c_{12}\omega_1; \\
p\omega_1 = -\dfrac{1}{J_1} M_У + \dfrac{c\Phi}{J_1} I; \\
pI = -\dfrac{c\Phi}{R_Э T_Э}\omega_1 - \dfrac{1}{T_Э} I + \dfrac{1}{R_Э T_Э} E_П; \\
pE_П = -\dfrac{1}{T_П} E_П + \dfrac{k_{УП}}{T_П} U_У.
\end{cases}
\tag{4.6}
$$

На підставі (4.6) з урахуванням (2.6) отримуємо структурну схему об'єкта управління (рис. 4.1).



Мал. 4.1. Структурна схема двомасових ЕП з фрикційної навантаженням

Задамося параметрами падаючого ділянки фрикційного навантаження:

$$\beta_C = -1000000 \text{ Нмс};$$

$$M_{CMIN} = 0.8\, M_H = 775374 \text{ Нм};$$

$$M_{CMAX} = 1.2\, M_H = 1163060 \text{ Нм}.$$

Розрахуємо інші параметри фрикційної навантаження даного виду:

$$M_{C0} = M_H - \beta_C \omega_H^* = 5679217 \text{ Нм};$$

$$\alpha = \frac{\beta_C M_{CMAX}}{M_{CMAX} - M_{C0}} = 257599 \text{ Нмс};$$

$$\omega_{П1} = \frac{M_{CMAX}}{\alpha} = 4.515\,\text{с}^{-1};$$

$$\omega_{П2} = \frac{M_{CMIN} - M_{C0}}{\beta_C} = 4.904\,\text{с}^{-1}.$$

Перевіримо, чи є обраний об'єкт управління нестійким під впливом фрикційної навантаження. З цією метою в середовищі Mathcad знайдемо корені характеристичного рівняння (1.3) при наступних параметрах прийнятого об'єкта управління:

$$\beta = \frac{(c\Phi)^2}{R_Э} = 1189345 \text{ Нмс}; \; b = \frac{\beta_C}{\beta} = -0.841; \; \gamma = \frac{J_1 + J_2}{J_1} = 1.716;$$

$$\Omega_{12} = \sqrt{\frac{c_{12}\gamma}{J_2}} = 205.912 \text{ с}^{-1}; \; T_{M1} = \frac{J_1}{\beta} = 0.0475 \text{ с}; \; T^*_{м1} = T_{M1}\Omega_{12} = 9.78;$$

$$\nu = T_{M1}T_Э\Omega_{12}^2 = 119.43.$$

В результаті обчислень отримуємо два комплексно-сполучених кореня з позитивною дійсною частиною і два кореня з негативною дійсною частиною (див. Додаток Ж), що відповідає, згідно [12], областііснування одночастотних АКФ.

На підтвердження теоретичних розрахунків була складена математична модель двомасових ЕП з фрикційної навантаженням (див. Додаток А) і проведено цифрове моделювання в середовищі MATLAB / Simulink. На рис. 4.2 представ¬лени перехідні процеси при пуску розімкнутої двухмассовой ЕМС з ОВТ в навантаженні, а також задана траєкторія зміни швидкості двигуна (розгін від нуля до ω^*_H = 4.71 с$^{-1}$ за 1 с.). На графіках перехідних процесів струму та швидкості двигуна чітко видно АКФ з частотою $f_{АКФ}$ = 10.5 Гц, що виникають при роботі на падаючому ділянці механічної характеристики фрикційної навантаження.

Таким чином доведено, що прийнятий двомасових електромеханічний об'єкт управління є нестійким під впливом ОВТ в навантаженні, в повній відповідності з викладеними теоретичними положеннями.

4.2. Синтез релейних систем управління двомасових електроприводу без урахування фрикційної навантаження в алгоритмах управління

4.2.1. Синтез в фазовому просторі регульованою координати і її похідних

Для синтезу релейних регуляторів в фазовому просторі регульованою координати і її похідних (особливо при високому порядку об'єкта управління) доцільно використовувати метод ОЗД, що дозволяє гранично просто отримати необхідний алгоритм управління.

Розглянемо синтез релейного регулятора швидкості для двомасових ЕМО, використовуючи концепції ОЗД.

Знайдемо матрицю керованості об'єкта (4.5):

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & s_{15} \\ 0 & 0 & 0 & s_{24} & s_{25} \\ 0 & 0 & s_{33} & s_{34} & s_{35} \\ 0 & s_{42} & s_{43} & s_{44} & s_{45} \\ s_{51} & s_{52} & s_{53} & s_{54} & s_{55} \end{bmatrix}, \qquad (4.7)$$

де

$$s_{15} = a_{12}a_{23}a_{34}a_{45}b_5;\ s_{24} = a_{23}a_{34}a_{45}b_5;\ s_{25} = a_{23}a_{34}a_{45}b_5(a_{44} + a_{55});\ s_{33} = a_{34}a_{45}b_5;$$
$$s_{34} = a_{34}a_{45}b_5(a_{44} + a_{55});\ s_{35} = (a_{23}a_{32} + a_{34}a_{43} + a_{44}^2 + a_{44}a_{55} + a_{55}^2)a_{34}a_{45}b_5;$$
$$s_{42} = a_{45}b_5;\ s_{43} = a_{45}b_5(a_{44} + a_{55});\ s_{44} = (a_{34}a_{43} + a_{44}^2 + a_{44}a_{55} + a_{55}^2)a_{45}b_5;$$
$$s_{45} = a_{45}b_5((2a_{34}a_{43} + a_{44}^2)a_{44} + (a_{34}a_{43} + a_{44}^2 + a_{44}a_{55} + a_{55}^2)a_{55});\ s_{51} = b_5;$$
$$s_{52} = a_{55}b_5;\ s_{53} = a_{55}^2b_5;\ s_{54} = a_{55}^3b_5;\ s_{55} = a_{55}^4b_5.$$

Оскільки ранг матриці керованості

$$rank(\mathbf{S}) = n = 5,$$

даний об'єкт повністю керований по входу U.

Як бажаний характеристичного полінома приймаємо наступний нормований поліном:

$$D_H(p) = p^4 + k_3\omega_0 p^3 + k_2\omega_0^2 p^2 + k_1\omega_0^3 p + k_0\omega_0^4 = p^4 + d_3p^3 + d_2p^2 + d_1p + d_0,$$

де $k_3 = 2.6;\ k_2 = 3.4;\ k_1 = 2.6;\ k_0 = 1$ (по Баттерворту), $\omega_0 = 150\,\text{с}^{-1}$.

Згідно з раніше представленої методики, отримуємо остаточний алгоритм управління релейного регулятора швидкості, синтезованого в фазовому просторі регульованою координати і її похідних методом ОЗД:

$$U_{PC} = - \text{sign}\,(\mathbf{L}\boldsymbol{\sigma}) = - \text{sign}\,(l_1 (z_1 - z_1^*) + l_2 z_2 + l_3 z_3 + l_4 z_4 + l_5 z_5), \qquad (4.8)$$

де

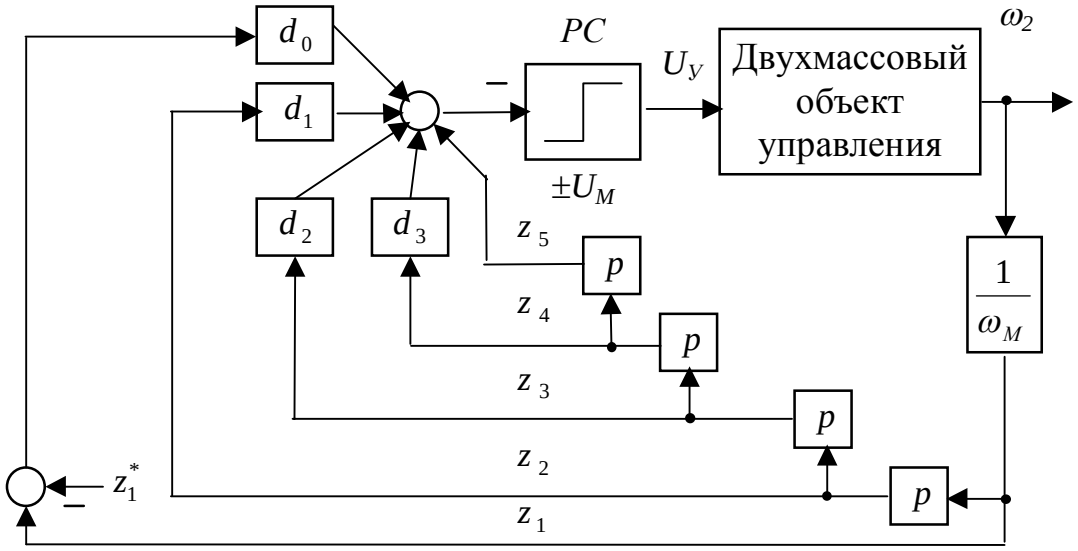
$$z_1 = \frac{\omega_2}{\omega_M};\ z_2 = \frac{p\omega_2}{\omega_M};\ z_3 = \frac{p^2\omega_2}{\omega_M};\ z_4 = \frac{p^3\omega_2}{\omega_M};\ z_5 = \frac{p^4\omega_2}{\omega_M};\ z_1^* = \frac{\omega_2^*}{\omega_M};$$

$$\mathbf{L} = \mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_0 \\ d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \\ l_4 \\ l_5 \end{bmatrix};\ \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{Z} - \mathbf{Z}^* = \begin{bmatrix} z_1 - z_1^* \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ z_5 \end{bmatrix}.$$

На математичної моделі, складеної в середовищі MATLAB / Simulink (див. Додаток А), було вироблено цифрове моделювання пуску двомасових ЕП з РСУ, що реалізує алгоритм (4.8) при наявності фрикційного навантаження. Результати моделювання представлені на рис. 4.3 - 4.4.

Отримані результати показують, що і в двомасових ЕМС застосування РСУ, синтезованих в фазовому просторі регульованою координати і її похідних, дозволяє придушити АКФ, забезпечуючи при цьому необхідні динамічні і статичні показники якості: при плавно наростаючому завданні: $\Delta\omega_C$ = 0.02 с$^{-1}$, δ_{MAX} = 0 %, $t_{ПП}$ = 1 с, при стрибкоподібному завданні: $\Delta\omega_C$ = 0.02 с$^{-1}$, δ_{MAX} = 0 %, $t_{ПП}$ = 0.4 с; Однак слід пам'ятати, що важливою умовою працездатності даних РСУ є відсутність перешкод а каналах зворотного зв'язку.

Структурна схема РСУ, відповідна алгоритму (4.8), представлена на мал. 4.5.



Мал. 4.5. Структурна схема контуру швидкості РСУ, що реалізує алгоритм (4.8) для двомасових ЕМО з ОВТ в навантаженні

4.2.2. Синтез в фазовому просторі вихідних координат

Відомо, що релейні системи управління, синтезовані в фазовому просторі регульованою координати і її похідних, мають обмежену область практичного застосування в слідстві їх підвищеної сприйнятливості до перешкод в каналах зворотного зв'язку. Тому, стосовно двохмасовим ЕМО з ОВТ в навантаженні, представляє інтерес синтез РСУ в інших фазових просторах. Найбільший інтерес представляє синтез РСУ в фазовому просторі вихідних координат ЕП (ω_2, $M_У$, ω_1, I, $E_П$).

Розглянемо синтез релейного регулятора швидкості методом ОЗД в фазовому просторі вихідних координат стосовно двомасових ЕМО (4.1).

Знайдемо характеристичний поліном даного об'єкта управління:

$$D(p) = det[p\mathbf{E} - \mathbf{A}] = p^5 + g_4 p^4 + g_3 p^3 + g_2 p^2 + g_1 p + g_0 \qquad (4.9)$$

де

$$g_4 = -a_{44} - a_{55}; g_3 = a_{44}a_{55} - a_{34}a_{43} - a_{23}a_{32} - a_{12}a_{21}; g_2 = a_{43}a_{34}a_{55} + a_{23}a_{32}(a_{44} + a_{55}) +$$
$$+ a_{12}a_{21}(a_{44} + a_{55}); \; g_1 = -a_{44}a_{55}(a_{12}a_{21} + a_{23}a_{32}) + a_{12}a_{21}a_{34}a_{43}; \; g_0 = -a_{12}a_{21}a_{34}a_{43}a_{55}.$$

Як бажаний характеристичного полінома приймаємо наступний нормований поліном:

$$D_H(p) = p^4 + k_3\omega_0 p^3 + k_2\omega_0^2 p^2 + k_1\omega_0^3 p + k_0\omega_0^4 = p^4 + d_3 p^3 + d_2 p^2 + d_1 p + d_0$$

де $k_3 = 2.6;\ k_2 = 3.4;\ k_1 = 2.6;\ k_0 = 1$ (по Баттерворту), $\omega_0 = 150\,\text{с}^{-1}$.

Використовуючи концепції ОЗД, отримуємо остаточний алгоритм управління релейного регулятора швидкості, синтезованого в фазовому просторі вихідних координат з урахуванням НПІ-зв'язку:

$$U_{PC} = -\,\text{sign}\,(\Theta_{ПИ} + \mathbf{L\eta}) = -\,\text{sign}\,(\Theta_{ПИ} + l_1(x_1 - x_1^*) + l_2 x_2 + \\ + l_3(x_3 - x_3^*) + l_4 x_4 + l_5 x_5), \qquad (4.10)$$

де

$$l_1 = d_0 - \frac{d_1 s_{15}}{s_{24}} - \frac{d_2 s_{15}(k_{31}s_{24} - k_{21}k_{32}s_{15})}{s_{24}s_{33}} + (k_{21}k_{42}s_{15}s_{33} - s_{15}^2 k_{21}k_{32}k_{43} + k_{31}k_{43}s_{24}s_{15} -$$

$$- k_{41}s_{24}s_{33})\frac{d_3 s_{15}}{s_{24}s_{33}s_{42}} + (s_{51}s_{15}^2 k_{32}k_{43}g_4 + s_{52}s_{15}^2 k_{32}k_{43}k_{21} - s_{42}s_{15}^2 k_{32}k_{53}k_{21} - k_{51}s_{24}s_{33}s_{42} -$$

$$- s_{15}k_{21}k_{42}s_{33}s_{51}g_4 - s_{15}k_{21}k_{42}s_{33}s_{52} + s_{15}k_{21}k_{52}s_{33}s_{42} - s_{15}s_{24}s_{51}k_{31}k_{43}g_4 - s_{15}s_{24}s_{52}k_{31}k_{43} +$$

$$+ s_{15}s_{24}s_{42}k_{31}k_{53} + s_{24}s_{33}s_{51}k_{41}g_4 + k_{41}s_{24}s_{33}s_{52})\frac{s_{15}}{s_{24}s_{33}s_{42}s_{51}};\ l_2 = \frac{s_{15}d_1}{s_{24}} - \frac{d_2 s_{15}^2 k_{32}}{s_{24}s_{33}} -$$

$$- \frac{d_3 s_{15}^2(k_{42}s_{33} - s_{15}k_{32}k_{43})}{s_{24}s_{33}s_{42}} - (s_{15}s_{51}k_{32}k_{43} + s_{15}s_{52}k_{32}k_{43} - s_{15}s_{42}k_{32}k_{53} - s_{33}s_{51}k_{42}g_4 -$$

$$- s_{33}s_{42}k_{42} + s_{33}s_{42}k_{52})\frac{s_{15}^2}{s_{24}s_{33}s_{42}s_{51}};\ l_3 = \frac{d_2 s_{15}}{s_{33}} - \frac{d_3 s_{15}^2 k_{43}}{s_{33}s_{42}} + \frac{s_{15}^2(k_{43}s_{51}g_4 + k_{43}s_{52} - s_{42}k_{53})}{s_{33}s_{42}s_{51}};$$

$$l_4 = \frac{d_3 s_{15}}{s_{42}} - \frac{s_{15}(s_{51}g_4 + s_{52})}{s_{42}s_{51}};\ l_5 = \frac{s_{15}}{s_{51}};\ k_{21} = \frac{s_{24}g_4 + s_{25}}{s_{15}};\ k_{31} = \frac{s_{33}g_3 + s_{34}g_4 + s_{35}}{s_{15}};$$

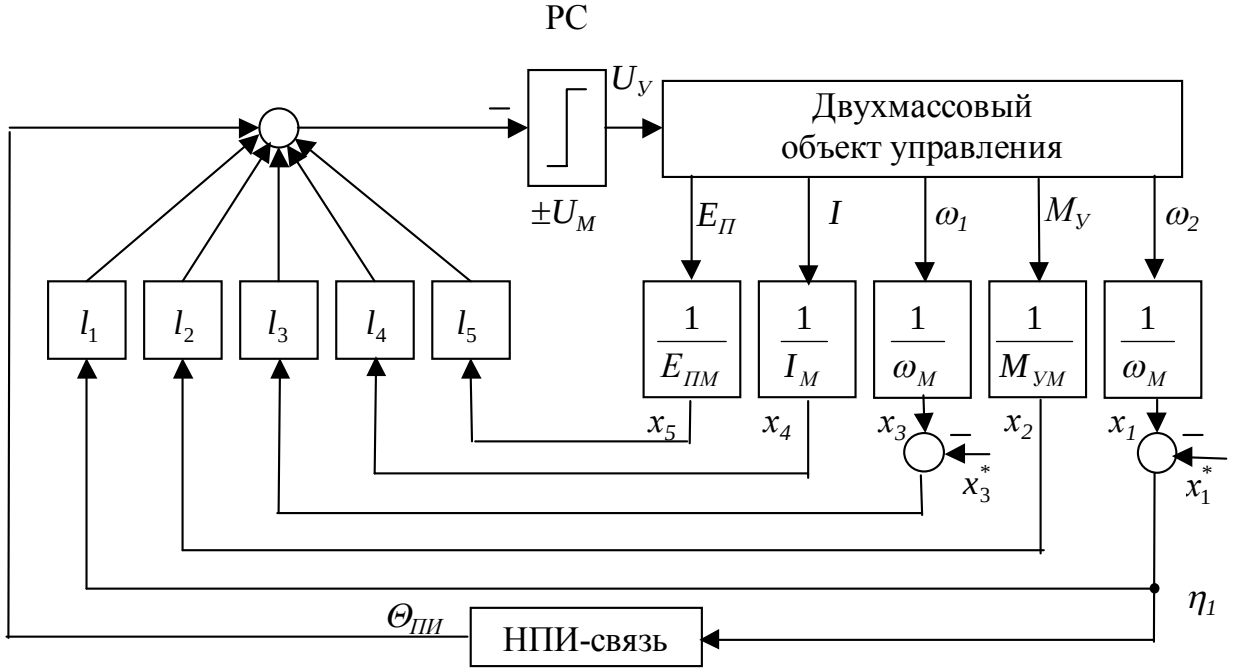
$$k_{41} = \frac{s_{42}g_2 + s_{33}g_3 + s_{44}g_4 + s_{45}}{s_{15}};\ k_{51} = \frac{s_{51}g_1 + s_{52}g_2 + s_{53}g_3 + s_{54}g_4 + s_{55}}{s_{15}};$$

$$k_{32} = \frac{s_{33}g_4 + s_{43}}{s_{15}};\ k_{42} = \frac{s_{42}g_3 + s_{43}g_4 + s_{44}}{s_{15}};\ k_{52} = \frac{s_{51}g_2 + s_{52}g_3 + s_{53}g_4 + s_{54}}{s_{15}};$$

$$k_{43} = \frac{s_{42}g_4 + s_{43}}{s_{15}};\ k_{53} = \frac{s_{51}g_3 + s_{52}g_4 + s_{53}}{s_{15}};$$

$\Theta_{ПИ}$ – см. (2.27); $s_{15} \ldots s_{55}$ – см. (4.7); $g_0 \ldots g_4$ – см. (4.9).

Структурна схема регулятора швидкості РСУ, що реалізує алгоритм управління (4.10), представлена на рис. 4.6.



Мал. 4.6. Структурна схема регулятора швидкості РСУ двомасових ЕМО, синтезованого в фазовому просторі вихідних координат ЕП з урахуванням НПІ-зв'язку

Тепер розглянемо процедуру синтезу релейного регулятора швидкості в фазовому просторі вихідних координат методом АКР для двомасових ЕМО (4.1). Запишемо рівняння обуреного рух даного об'єкта управління в матричного вигляді:

$$p\boldsymbol{\eta} = \mathbf{A}\boldsymbol{\eta} + \mathbf{B}U \qquad (4.11)$$

де $\boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \\ \eta_4 \\ \eta_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - x_1^* \\ x_2 \\ x_3 - x_3^* \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix}$; **A, B –** см. (4.5); $x_1 \ldots x_5$ – см. (4.2).

Приймаємо наступний функціонал якості:

$$I_1 = \int_0^\infty (\boldsymbol{\eta}^{\mathbf{T}}\mathbf{W}\boldsymbol{\eta})dt = \int_0^\infty (w_{11}\eta_1^2 + w_{33}\eta_3^2)dt.$$

Для визначення коефіцієнтів функції Ляпунова по формулі (2.14) необхідно вирішити матричне рівняння (2.12), яке в даному випадку має вигляд:

$$\begin{bmatrix}
0 & a_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
a_{12} & 0 & a_{32} & 0 & 0 & a_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & a_{23} & 0 & a_{43} & 0 & 0 & a_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & a_{34} & a_{44} & 0 & 0 & 0 & a_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & a_{45} & a_{55} & 0 & 0 & 0 & a_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & a_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & a_{12} & 0 & 0 & a_{23} & 0 & a_{43} & 0 & a_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & a_{12} & 0 & 0 & a_{34} & a_{44} & 0 & 0 & a_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & a_{12} & 0 & 0 & a_{45} & a_{55} & 0 & 0 & a_{32} & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{23} & 0 & 0 & 0 & a_{43} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{23} & 0 & a_{34} & a_{44} & 0 & a_{43} & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{23} & 0 & a_{45} & a_{55} & 0 & a_{43} & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{34} & 0 & a_{44} & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{34} & a_{45} & a_{44}+a_{55} & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{45} & a_{55}
\end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_{11} \\ v_{12} \\ v_{13} \\ v_{14} \\ v_{15} \\ v_{22} \\ v_{23} \\ v_{24} \\ v_{25} \\ v_{33} \\ v_{34} \\ v_{35} \\ v_{44} \\ v_{45} \\ v_{55} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -w_{11} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -w_{33} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Згідно з раніше представленої методики АКР, отримуємо алгоритм управління релейного регулятора швидкості в фазовому просторі вихідних координат:

$$U_{PC} = - \text{sign}\,(\Theta_{ПИ} + \mathbf{B}^{\mathbf{T}}\mathbf{V}\boldsymbol{\eta}) = - \text{sign}\,(\Theta_{ПИ} + l_1\,(x_1 - x_1^*) + l_2\,x_2 + \\ + l_3\,(x_3 - x_3^*) + l_4\,x_4 + l_5 x_5), \qquad (4.12)$$

де

$$l_1 = v_{15} = (-a_{55}^2 a_{23} a_{44}^2 a_{32} w_{11} - a_{55}^3 a_{23} a_{44} a_{32} w_{11} - a_{12}^2 a_{34} a_{21}^2 a_{43} w_{11} - 2a_{55} a_{12} a_{34} a_{44} a_{21} a_{43} w_{11} + \\ + a_{55} a_{12}^2 a_{44} a_{21}^2 w_{11} + a_{55}^2 a_{12}^2 a_{21}^2 w_{11} + a_{55}^3 a_{12} a_{44} a_{21} w_{11} + a_{55}^2 a_{12} a_{44}^2 a_{21} w_{11} + a_{44}^2 a_{21}^2 a_{32}^2 w_{33} - \\ - a_{55}^2 a_{12} a_{34} a_{21} a_{43} w_{11} + 2a_{55} w_{33} a_{32}^2 a_{44} a_{21}^2 + a_{55}^2 w_{33} a_{32}^2 a_{21}^2 + a_{23}^2 a_{44}^2 w_{11} a_{32}^2 + a_{55} a_{23}^2 a_{44} w_{11} a_{32}^2 + \\ + a_{12} a_{34} a_{23} a_{43} w_{11} a_{32} a_{21} + a_{55} a_{34} a_{23} a_{44} a_{43} w_{11} a_{32} + a_{12} a_{34}^2 a_{43}^2 w_{11} a_{21})\frac{a_{45} a_{55}}{AA};\ \ l_2 = v_{25} = \\ = -(a_{34}^2 a_{12} w_{11} a_{43}^2 a_{55} + a_{23} a_{34} a_{12} a_{44} w_{11} a_{43} a_{32} - a_{34} a_{12}^2 a_{44} w_{11} a_{43} a_{21} - a_{34} a_{12}^2 a_{21} a_{43} a_{55} w_{11} + \\ + 2a_{12}^2 a_{55}^2 a_{21} w_{11} a_{44} + a_{12}^2 a_{55} a_{21} a_{44}^2 w_{11} + a_{12}^2 a_{55}^3 a_{21} w_{11} - a_{55}^2 a_{43} a_{12} a_{34} w_{11} a_{44} - a_{55}^3 a_{43} a_{12} a_{34} w_{11} + \\ + a_{23} a_{34} a_{12} a_{32} a_{43} a_{55} w_{11} + a_{55} a_{32}^2 w_{33} a_{44}^2 a_{21} + 2a_{55}^2 a_{32}^2 w_{33} a_{44} a_{21} + a_{55}^3 a_{32}^2 w_{33} a_{21})\frac{a_{45} a_{55}}{AA};$$

$$l_3 = v_{35} = -(a_{32}a_{21}^2a_{44}a_{12}a_{55}w_{33} - a_{32}^2a_{21}a_{44}a_{23}a_{55}w_{33} - a_{32}^2a_{21}a_{23}a_{55}^2w_{33} - a_{32}a_{21}a_{43}a_{34}a_{55}^2w_{33} +$$
$$+ a_{32}a_{21}^2a_{44}^2a_{12}w_{33} + a_{44}^2w_{11}a_{12}a_{23}^2a_{32} + a_{44}w_{11}a_{12}a_{23}^2a_{55}a_{32} + a_{44}a_{43}w_{11}a_{12}a_{34}a_{23}a_{55} -$$
$$- a_{44}w_{11}a_{12}^2a_{23}a_{55}a_{21} - w_{11}a_{12}^2a_{23}a_{55}^2a_{21} - a_{44}^2w_{11}a_{12}a_{23}a_{55}^2 - a_{44}w_{11}a_{12}a_{23}a_{55}^3 + a_{43}w_{11}a_{12}^2a_{34}a_{23}a_{21} -$$
$$- a_{44}^2w_{33}a_{32}a_{21}a_{55}^2 - a_{44}w_{33}a_{32}a_{21}a_{55}^3 + a_{43}w_{33}a_{32}a_{21}^2a_{12}a_{34})\frac{a_{45}a_{55}}{AA};\ \ l_4 = v_{45} = (a_{23}^2a_{12}w_{11}a_{32}a_{44} +$$
$$+ a_{23}^2a_{12}w_{11}a_{32}a_{55} + a_{23}w_{11}a_{55}a_{43}a_{12}a_{34} - a_{23}a_{12}w_{11}a_{55}^2a_{44} - a_{23}a_{12}w_{11}a_{55}^3 + a_{12}a_{32}a_{21}^2w_{33}a_{44} +$$
$$+ a_{12}a_{32}a_{21}^2w_{33}a_{55} - w_{33}a_{32}a_{21}a_{55}^2a_{44} - w_{33}a_{32}a_{21}a_{55}^3)\frac{a_{34}a_{45}a_{55}}{AA};\ \ l_5 = v_{55} = -(a_{23}^2a_{12}w_{11}a_{32}a_{44} +$$
$$+ a_{23}^2a_{12}w_{11}a_{32}a_{55} + a_{23}w_{11}a_{55}a_{43}a_{12}a_{34} - a_{23}a_{12}w_{11}a_{55}^2a_{44} - a_{23}a_{12}w_{11}a_{55}^3 + a_{12}a_{32}a_{21}^2w_{33}a_{44} +$$
$$+ a_{12}a_{32}a_{21}^2w_{33}a_{55} - w_{33}a_{32}a_{21}a_{55}^2a_{44} - w_{33}a_{32}a_{21}a_{55}^3)\frac{a_{34}a_{45}^2}{AA};\ \ AA = (-a_{23}a_{32}a_{44}a_{55} - a_{23}a_{32}a_{55}^2 +$$
$$+ a_{12}a_{34}a_{21}a_{43} - a_{12}a_{55}a_{21}a_{44} - a_{12}a_{55}^2a_{21} - a_{43}a_{55}^2a_{34} + a_{55}^3a_{44} + a_{55}^4)a_{21}a_{32}a_{43}a_{44}a_{55};$$

$\Theta_{ПИ}$ – см. (2.27).

Структурна схема регулятора швидкості РСУ, яка реалізує алгоритм (4.12), повністю аналогічна схемі, наведеній на рис. 4.6.

На математичній моделі, складеній в середовищі MATLAB / Simulink (див. Додаток А), було вироблено цифрове моделювання пуску двомасових ЕП з РСУ, що реалізує алгоритми (4.10) і (4.12) при наявності фрикційного навантаження. Результати моделювання показані на мал. 4.7 - 4.10.

Отримані результати показують, що застосування РСУ, синтезованих методами АКР і ОЗД в фазовому просторі вихідних координат, дозволяє придушити АКФ в двомасових ЕМС з ОВТ в навантаженні, забезпечуючи при цьому необхідні статичні і динамічні показники якості (АКР, при плавно наростаючому завданні: $\Delta\omega_C$ = 0 с$^{-1}$, δ_{MAX} = 0.3 %, $t_{ПП}$ = 1 с, при стрибкоподібному завданні: $\Delta\omega_C$ = 0 с$^{-1}$, δ_{MAX} = 4 %, $t_{ПП}$ = 0.4 с; ОЗД, при плавно наростаючому завданні: $\Delta\omega_C$ = 0 с$^{-1}$, δ_{MAX} = 0.4 %, $t_{ПП}$ = 1 с, при стрибкоподібному завданні: $\Delta\omega_C$ = 0 с$^{-1}$, δ_{MAX} = 5 %, $t_{ПП}$ = 0.4 с).

Відзначимо, що при синтезі релейних алгоритмів керування (4.10) і (4.12) для ліквідації статичної помилки успішно застосовувалася НПІ-зв'язок виду (2.27). При цьому принципи, покладені в основу синтезу даної НПІ-

зв'язку і розрахунку її параметрів, однакові як для одномасової, так і для двомасових ЕП з РСУ.

Синтез релейних регуляторів струму в різних фазових просторах для двомасових ЕМО представлений в [136].

4.3. Синтез спостерігача стану

Характерною особливістю РСУ, синтезованих в фазовому просторі вихідних координат ЕП, є замикання системи зворотними зв'язками по повному вектору стану $\omega_2, M_y, \omega_1, I, E_П$ - для двомасових ЕМО). Однак на практиці досить часто реалізація деяких зворотних зв'язків неможлива або утруднена (наприклад, зворотні зв'язки по пружності моменту M_y і швидкості другої маси ω_2). У цьому випадку зворотний зв'язок може бути замкнутай не по реальному сигналу, а за оцінкою, отриманою за допомогою спостерігача стану.

Відомі різні типи спостерігачів стану [80, 91, 133, 150, 151], які відрізняються за функціональним призначенням, структурою і методами синтезу, набору вимірюваних координат та ін. Слід зазначити, що при такому різноманітті проблема вибору спостерігача стану вимагає уважного підходу і не має однозначного рішення [150, 151].

Перед нами поставлено завдання упевниться в працездатності РСУ двомасових ЕП з ОВТ в навантаженні при використанні спостерігача стану. Як уже зазначалося, для РСУ подібні дослідження раніше не проводилися (ні з постійною, ні з фрикційної навантаженням). Зауважимо, що перед нами не стоїть завдання вибору «найкращого» спостерігача стану і оцінки його впливу на стійкість і показники якості роботи різних РСУ - це тема для окремого і дуже об'ємного дослідження.

Відповідно до поставленим завданням дослідження в якості спостерігача пристрої приймаємо асимптотический спостерігач повного (по відношенню до відновлюваної частини об'єкта управління) порядку. Відзначимо,

що даний спостерігач стану найбільш часто застосовувався при синтезі систем модального управління і підлеглого регулювання двомасових ЕМО з ОВТ в навантаженні, наприклад, в [78, 79, 95].

Розглянемо синтез обраного спостерігача стану за методикою, викладеною в [152]. Приймаються наступні допущення:

- корекція роботи спостерігача стану здійснюється за швидкістю двигуна ω_1;

- спостерігач стану управляється за допомогою ЕРС перетворювача $E_П$;

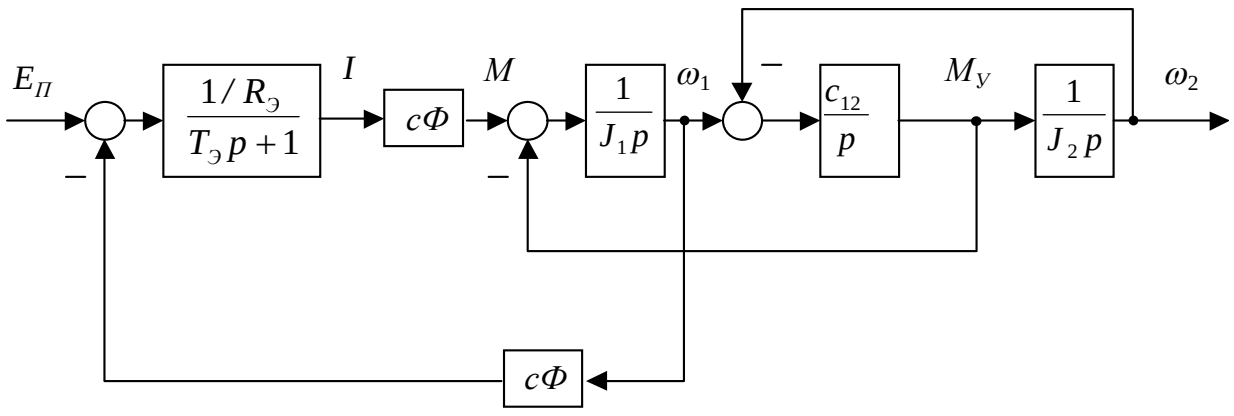
- прямому вимірюванню недоступний тільки пружний момент $M_У$;

- нехтуємо статичним навантаженням ($M_C = 0$).

З урахуванням прийнятих припущень відновлювана частина об'єкта управління (4.6) описується наступною системою рівнянь:

$$\begin{cases} p\omega_2 = \dfrac{1}{J_2} M_У; \\ pM_У = -c_{12}\omega_2 + c_{12}\omega_1; \\ p\omega_1 = -\dfrac{1}{J_1} M_У + \dfrac{c\Phi}{J_1} I; \\ pI = -\dfrac{c\Phi}{R_Э T_Э}\omega_1 - \dfrac{1}{T_Э} I + \dfrac{1}{R_Э T_Э} E_П. \end{cases} \qquad (4.13)$$

Структурна схема, відповідна системі рівнянь (4.13), показана на рис. 4.11.



Мал. 4.11. Структурна схема відновлюваної частини об'єкта управління (4.6)

Запишемо систему рівнянь (4.13) в матричному вигляді в відносних одиницях:

$$p\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}U \qquad (4.14)$$

де $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$; $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & a_{23} & 0 \\ 0 & a_{32} & 0 & a_{34} \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}$; $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ b_4 \end{bmatrix}$; $U = x_5$;

$x_1 \ldots x_5$ – см. (4.2); $b_4 = a_{45}$; $a_{12} \ldots a_{45}$ – см. (4.4).

Згідно [152], об'єкт управління n-го порядку повністю спостерігаємо, якщо матриця спостережливості, що має вигляд:

$$\mathbf{Q_H} = \left[\mathbf{C^T}; \mathbf{A^T C^T} \ldots (\mathbf{A^T})^{\mathbf{n-1}} \mathbf{C^T}\right] \qquad (4.15)$$

має ранг, рівний n. C - матриця виходу об'єкта управління, в даному випадку рівна:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \qquad (4.16)$$

Використовуючи формули (4.15), (4.16), знайдемо матрицю спостережливості об'єкта (4.14):

$$\mathbf{Q_H} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & a_{21}a_{32} & 0 \\ 0 & a_{32} & 0 & (a_{12}a_{21} + a_{23}a_{32})a_{32} + a_{32}a_{34}a_{43} \\ 1 & 0 & a_{23}a_{32} + a_{34}a_{43} & a_{34}a_{43}a_{44} \\ 0 & a_{34} & a_{34}a_{44} & a_{23}a_{32}a_{34} + a_{34}(a_{34}a_{43} + a_{44}^2) \end{bmatrix}.$$

Оскільки ранг матриці спостережливості

$$rank(\mathbf{Q_H}) = n = 4,$$

даний об'єкт є повністю контрольованим.

Запишемо в матричному вигляді рівняння спостерігача стану повного порядку, охопленого зворотними зв'язками помилково спостереження:

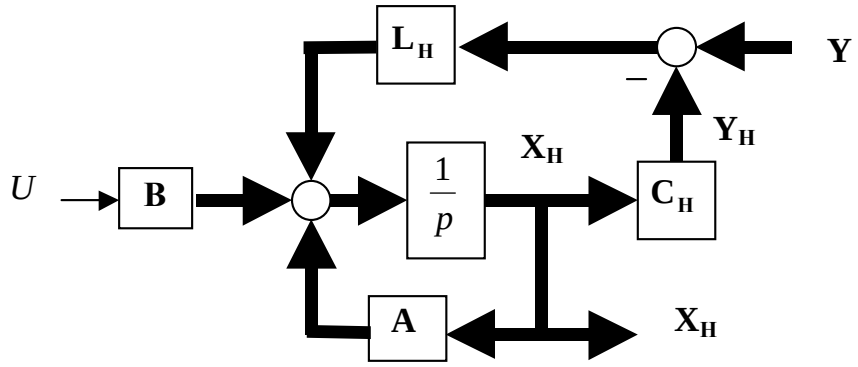
$$p\mathbf{X_H} = \mathbf{A}\mathbf{X_H} + \mathbf{L_H}(\mathbf{Y} - \mathbf{Y_H}) + \mathbf{B}U, \qquad (4.17)$$

де $\mathbf{X_H}$ - вектор відновлених координат; $\mathbf{L_H}$ - матриця коефіцієнтів зворотних зв'язків помилково спостерігача стану; $\mathbf{Y}$, $\mathbf{Y_H}$ - вектора вихідних координат відповідно об'єкта управління і спостерігача стану, рівні:

$$\mathbf{X_H} = \begin{bmatrix} x_{1H} \\ x_{2H} \\ x_{3H} \\ x_{4H} \end{bmatrix};\ \mathbf{L_H} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & l_{1H} & 0 \\ 0 & 0 & l_{2H} & 0 \\ 0 & 0 & l_{3H} & 0 \\ 0 & 0 & l_{4H} & 0 \end{bmatrix};\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X};\ \mathbf{Y_H} = \mathbf{C_H}\mathbf{X_H};\ \mathbf{C_H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$\mathbf{C_H}$ - матриця виходу спостерігача стану.

Структурна схема синтезованого спостерігача стану в матричному вигляді представлена на мал. 4.12.



Мал. 4.12. Структурна схема асимптотичного спостерігача повного порядку в матричному вигляді

Знайдемо характеристичний поліном синтезованого спостерігача стану:

$$D(p) = det[p\mathbf{E} - \mathbf{A} + \mathbf{L_H}\mathbf{C}] = p^4 + g_3 p^3 + g_2 p^2 + g_1 p + g_0, \qquad (4.18)$$

де

$$g_0 = a_{12}a_{21}(a_{44}l_{3H} + a_{34}a_{43} - a_{34}l_{4H}) - a_{21}a_{32}a_{44}l_{1H};\ g_1 = a_{32}a_{44}(a_{23} - l_{2H}) + a_{21}a_{32}l_{1H} +$$
$$+ a_{12}a_{21}(a_{44} - l_{3H});\ g_2 = a_{34}l_{4H} - a_{44}l_{3H} - a_{34}a_{43} - a_{23}a_{32} + a_{32}l_{2H} - a_{12}a_{21};\ g_3 = l_{3H} - a_{44}.$$

Як бажаний характеристичного полінома приймаємо наступний нормований поліном:

$$D_H(p) = p^4 + k_3\omega_0 p^3 + k_2\omega_0^2 p^2 + k_1\omega_0^3 p + k_0\omega_0^4 = p^4 + d_3 p^3 + d_2 p^2 + d_1 p + d_0, \quad (4.19)$$

де $k_3 = 2.6;\ k_2 = 3.4;\ k_1 = 2.6;\ k_0 = 1$ (по Баттерворту), $\omega_0 = 250\,\text{с}^{-1}$.

Прирівнюючи коефіцієнти характеристичного полінома спостерігача стану (4.18) і коефіцієнти бажаного полінома (4.19) при однакових ступенях, отримуємо систему з чотирьох рівнянь, з якої знаходимо значення коефіцієнтів зворотних зв'язків спостерігача:

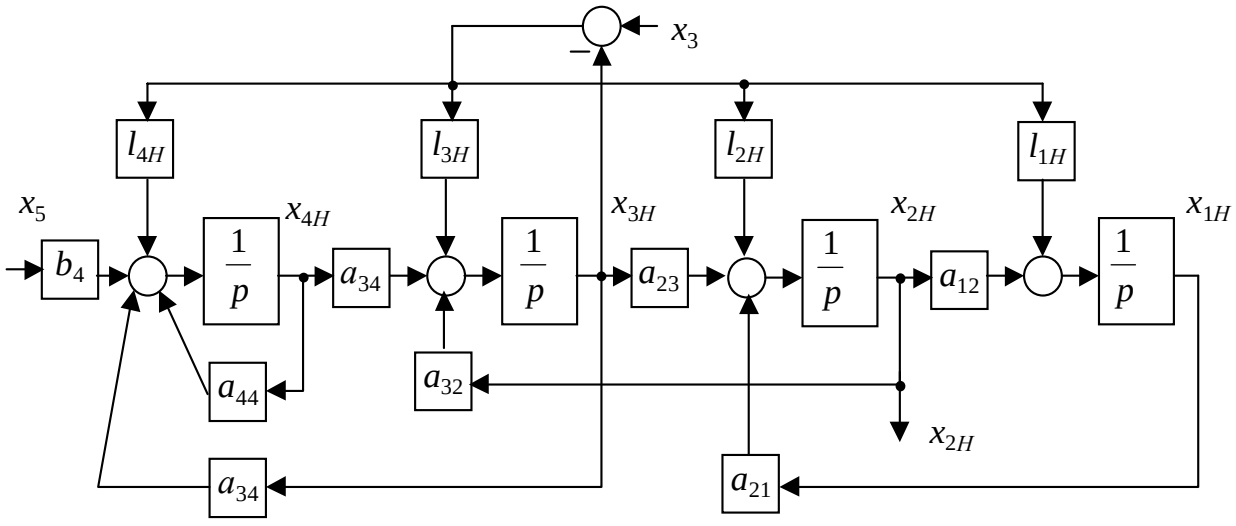
$$l_{4H} = \frac{d_0 + a_{44}d_1 + a_{44}^2 d_2 + a_{44}^3 d_3 + a_{44}^4 + a_{44}^2 a_{34}a_{43} - a_{12}a_{21}a_{34}a_{43}}{a_{34}(a_{44}^2 - a_{12}a_{21})};\ l_{3H} = d_3 + a_{44};$$

$$l_{2H} = \frac{d_2 + a_{44}l_{3H} + a_{34}a_{43} - a_{34}l_{4H} + a_{23}a_{32} + a_{12}a_{21}}{a_{32}};$$

$$l_{1H} = \frac{d_1 - a_{23}a_{32}a_{44} + a_{32}a_{44}l_{2H} + a_{12}a_{21}d_3}{a_{21}a_{32}};$$

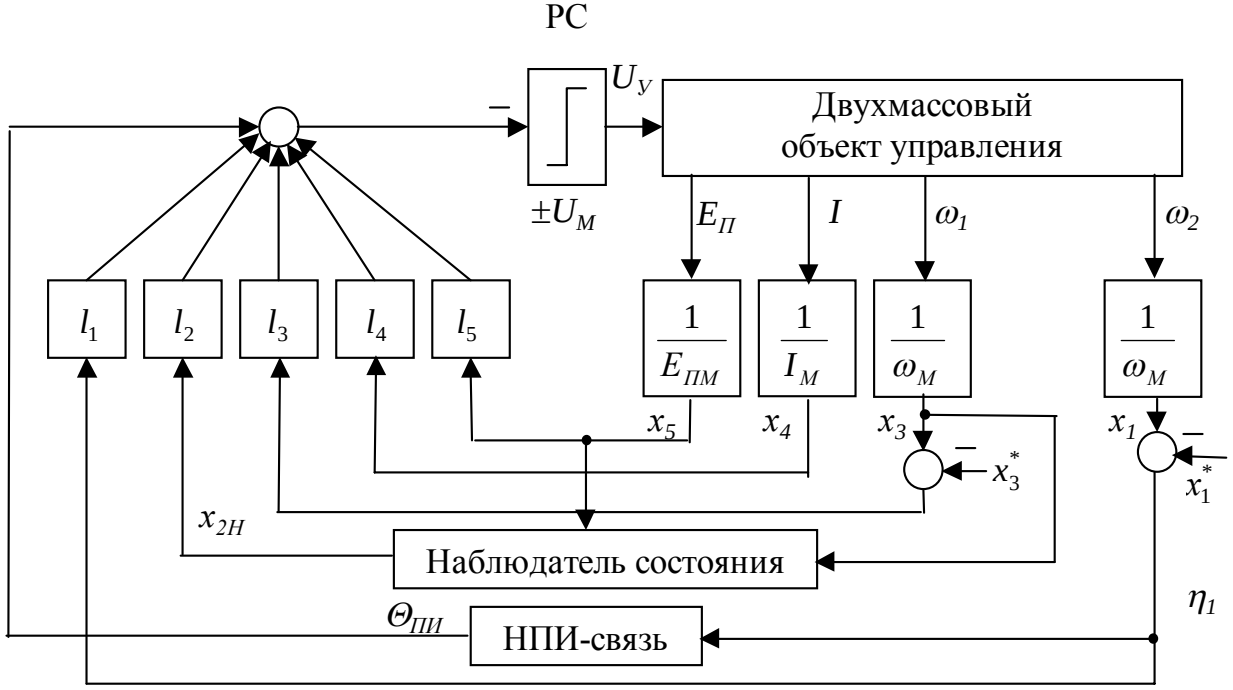
де a_{12} ... a_{44} – см. (4.4).

Повна структурна схема синтезованого спостерігача стану показана на мал. 4.13.



Мал. 4.13. Структурна схема асимптотичного спостерігача повного порядку з корекцією за швидкістю двигуна та управлінням по ЕРС перетворювача

Структурна схема регулятора швидкості РСУ двомасових ЕМО, синтезованого в фазовому просторі вихідних координат і розширена за рахунок спостерігача стану і НПІ-зв'язку, представлена на мал. 4.14.



Мал. 4.14. Структурна схема регулятора швидкості РСУ двомасових ЕМО, синтезованого в фазовому просторі вихідних координат ЕП з урахуванням НПІ-зв'язку і використанням спостерігача стану

Для підтвердження працездатності РСУ двомасових ЕМО з ОВТ при використанні спостерігачем стану в середовищі MATLAB / Simulink була складена математична модель (див. Додаток А) і проведено цифрове моделювання тих же процесів, що і в попередньому підрозділі. При цьому для здійснення зворотного зв'язку з пружного моменту була використана оцінка за допомогою синтезованого спостерігача стану. Результати моделювання представлені на рис. 4.15 - 4.18.

Порівнюючи графіки перехідних процесів на рис. 4.7 - 4.10 та 4.15 - 4.18, ми не виявляємо істотних відмінностей. Таким чином, результати математичного моделювання свідчать про можливість успішного застосування спостерігачів стану в РСУ, синтезованих методами АКР і ОЗД в фазовому просторі вихідних координат для двомасових ЕМО з ОВТ в навантаженні.

При цьому зберігаються високі статичні та динамічні показники якості, як і в РСУ без використання спостерігачів стану: АКР, при плавно наростаючому завданні: $\Delta\omega_C$ = 0 с$^{-1}$, δ_{MAX} = 0 %, $t_{ПП}$ = 1 с, при стрибкоподібному завданні: $\Delta\omega_C$ = 0 с$^{-1}$, δ_{MAX} = 0 %, $t_{ПП}$ = 0.4 с; ОЗД, при плавно наростаючому завданні: $\Delta\omega_C$ = 0 с$^{-1}$, δ_{MAX} = 0 %, $t_{ПП}$ = 1 с, при скачкообразном задании: $\Delta\omega_C$ = 0 с$^{-1}$, δ_{MAX} = 0 %, $t_{ПП}$ = 1 с.

Приклад розрахунку асимптотичного спостерігача повного порядку в середовищі Mathcad наведено в додатку З.

4.4. Синтез релейних систем управління двомасового електроприводу з урахуванням фрикційного навантаження в алгоритмах управління

Методика синтезу РСУ з урахуванням фрикційного навантаження в алгоритмах управління для одномасової ЕМО була досить докладно викладена в третьому розділі дисертаційної роботи. Очевидно, що висновок, отриманий раніше для РСУ одномасової ЕП, справедливий і для РСУ двомасових ЕП: облік ОВТ в навантаженні при синтезі релейних алгоритмів керування дозволяє дещо розширити область максимально-допустимого зміни параметрів ЕМС.

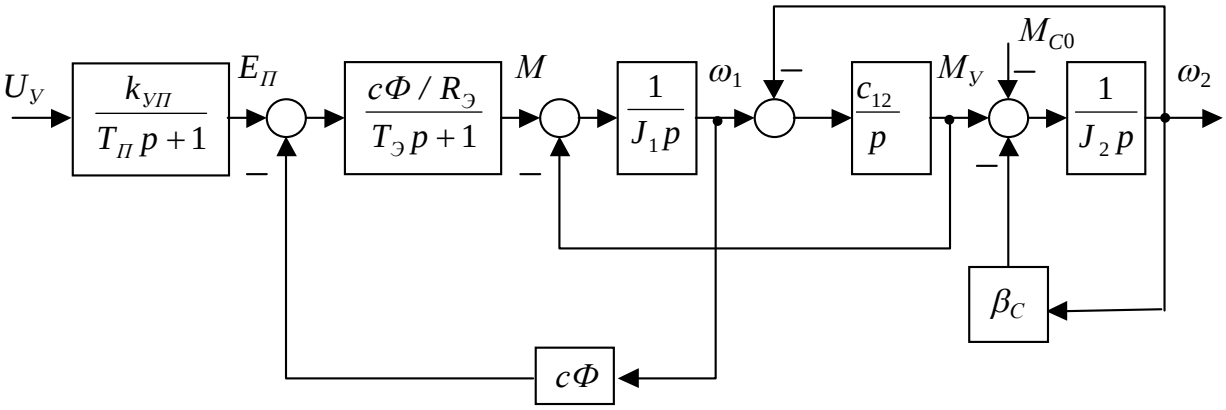
Для підтвердження цього висновку стосовно двохмасових ЕМО (мал. 4.19) розглянемо синтез релейного регулятора швидкості методом ОЗД в фазовому просторі вихідних координат з урахуванням ОВТ за допомогою лінеаризованої залежності (2.6). При цьому скористаємося тими ж положеннями і припущеннями, що і при синтезі РСУ одномасової ЕМО (див. Розділ 3).

Запишемо рівняння обуреного руху даного об'єкта управління в матричного вигляді:

$$p\boldsymbol{\eta} = \mathbf{A}\boldsymbol{\eta} + \mathbf{B}U \qquad (4.20)$$

де $\boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \\ \eta_4 \\ \eta_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - x_1^* \\ x_2 \\ x_3 - x_3^* \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix}$; $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & a_{23} & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & 0 & a_{34} & 0 \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} & a_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} \end{bmatrix}$; $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ b_5 \end{bmatrix}$;

$x_1 \ldots x_5$ – см. (4.2); $a_{12} \ldots a_{55}$, b_5 – см. (4.4); $a_{11} = -\dfrac{\beta_C}{J_2}$.



Мал. 4.19. Структурна схема двомасових ЕМО з фрикційної навантаженням, представленої линеаризованной залежністю (2.6)

Знайдемо матрицю керованості об'єкта (4.20):

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & s_{15} \\ 0 & 0 & 0 & s_{24} & s_{25} \\ 0 & 0 & s_{33} & s_{34} & s_{35} \\ 0 & s_{42} & s_{43} & s_{44} & s_{45} \\ s_{51} & s_{52} & s_{53} & s_{54} & s_{55} \end{bmatrix}, \qquad (4.21)$$

де

$$s_{15} = a_{12}a_{23}a_{34}a_{45}b_5;\ s_{24} = a_{23}a_{34}a_{45}b_5;\ s_{25} = a_{23}a_{34}a_{45}b_5(a_{44} + a_{55});\ s_{33} = a_{34}a_{45}b_5;$$

$$s_{34} = a_{34}a_{45}b_5(a_{44} + a_{55});\ s_{35} = (a_{23}a_{32} + a_{34}a_{43} + a_{44}^2 + a_{44}a_{55} + a_{55}^2)a_{34}a_{45}b_5;$$

$$s_{42} = a_{45}b_5;\ s_{43} = a_{45}b_5(a_{44} + a_{55});\ s_{44} = (a_{34}a_{43} + a_{44}^2 + a_{44}a_{55} + a_{55}^2)a_{45}b_5;$$

$$s_{45} = a_{45}b_5((2a_{34}a_{43} + a_{44}^2)a_{44} + (a_{34}a_{43} + a_{44}^2 + a_{44}a_{55} + a_{55}^2)a_{55});\ s_{51} = b_5;$$

$$s_{52} = a_{55}b_5;\ s_{53} = a_{55}^2b_5;\ s_{54} = a_{55}^3b_5;\ s_{55} = a_{55}^4b_5.$$

Оскільки ранг матриці керованості

$$rank(\mathbf{S}) = n = 5,$$

даний об'єкт повністю керований по входу U.

Визначимо характеристичний поліном даного об'єкта управління

$$D(p) = det[p\mathbf{E} - \mathbf{A}] = p^5 + g_4 p^4 + g_3 p^3 + g_2 p^2 + g_1 p + g_0, \qquad (4.22)$$

де

$$g_4 = -a_{44} - a_{55} - a_{11}; g_3 = a_{44}a_{55} - a_{34}a_{43} - a_{23}a_{32} - a_{12}a_{21} + a_{11}(a_{44} + a_{55});$$
$$g_2 = a_{43}a_{34}a_{55} + a_{23}a_{32}(a_{44} + a_{55}) + a_{12}a_{21}(a_{44} + a_{55}) + a_{11}(a_{23}a_{32} + a_{34}a_{43} - a_{44}a_{55});$$
$$g_1 = -a_{44}a_{55}(a_{12}a_{21} + a_{23}a_{32}) + a_{12}a_{21}a_{34}a_{43} - a_{11}a_{34}a_{43}a_{55} - a_{11}a_{23}a_{32}(a_{44} + a_{55});$$
$$g_0 = -a_{12}a_{21}a_{34}a_{43}a_{55} + a_{11}a_{23}a_{32}a_{44}a_{55}.$$

Як бажаний характеристичного полінома приймаємо наступний нормований поліном:

$$D_H(p) = p^4 + k_3\omega_0 p^3 + k_2\omega_0^2 p^2 + k_1\omega_0^3 p + k_0\omega_0^4 = p^4 + d_3 p^3 + d_2 p^2 + d_1 p + d_0,$$

де $k_3 = 2.6;\ k_2 = 3.4;\ k_1 = 2.6;\ k_0 = 1$ (по Баттерворту), $\omega_0 = 250$ с$^{-1}$.

Використовуючи концепції ОЗД, отримуємо остаточний алгоритм управління релейного регулятора швидкості, синтезованого в фазовому просторі вихідних координат з урахуванням НПІ-зв'язку і ОВТ в навантаженні:

$$U_{PC} = -\operatorname{sign}(\Theta_{ПИ} + \mathbf{L\eta}) = -\operatorname{sign}(\Theta_{ПИ} + l_1(x_1 - x_1^*) + l_2 x_2 +$$
$$+ l_3(x_3 - x_3^*) + l_4 x_4 + l_5 x_5), \qquad (4.23)$$

де

$$l_1 = d_0 - \frac{d_1 s_{15}}{s_{24}} - \frac{d_2 s_{15}(k_{31}s_{24} - k_{21}k_{32}s_{15})}{s_{24}s_{33}} + (k_{21}k_{42}s_{15}s_{33} - s_{15}^2 k_{21}k_{32}k_{43} + k_{31}k_{43}s_{24}s_{15} -$$
$$- k_{41}s_{24}s_{33})\frac{d_3 s_{15}}{s_{24}s_{33}s_{42}} + (s_{51}s_{15}^2 k_{32}k_{43}g_4 + s_{52}s_{15}^2 k_{32}k_{43}k_{21} - s_{42}s_{15}^2 k_{32}k_{53}k_{21} - k_{51}s_{24}s_{33}s_{42} -$$
$$- s_{15}k_{21}k_{42}s_{33}s_{51}g_4 - s_{15}k_{21}k_{42}s_{33}s_{52} + s_{15}k_{21}k_{52}s_{33}s_{42} - s_{15}s_{24}s_{51}k_{31}k_{43}g_4 - s_{15}s_{24}s_{52}k_{31}k_{43} +$$
$$+ s_{15}s_{24}s_{42}k_{31}k_{53} + s_{24}s_{33}s_{51}k_{41}g_4 + k_{41}s_{24}s_{33}s_{52})\frac{s_{15}}{s_{24}s_{33}s_{42}s_{51}};\ l_2 = \frac{s_{15}d_1}{s_{24}} - \frac{d_2 s_{15}^2 k_{32}}{s_{24}s_{33}} -$$
$$- \frac{d_3 s_{15}^2(k_{42}s_{33} - s_{15}k_{32}k_{43})}{s_{24}s_{33}s_{42}} - (s_{15}s_{51}k_{32}k_{43} + s_{15}s_{52}k_{32}k_{43} - s_{15}s_{42}k_{32}k_{53} - s_{33}s_{51}k_{42}g_4 -$$

$$-s_{33}s_{42}k_{42}+s_{33}s_{42}k_{52})\frac{s_{15}^2}{s_{24}s_{33}s_{42}s_{51}};\ l_3=\frac{d_2s_{15}}{s_{33}}-\frac{d_3s_{15}^2k_{43}}{s_{33}s_{42}}+\frac{s_{15}^2(k_{43}s_{51}g_4+k_{43}s_{52}-s_{42}k_{53})}{s_{33}s_{42}s_{51}};$$

$$l_4=\frac{d_3s_{15}}{s_{42}}-\frac{s_{15}(s_{51}g_4+s_{52})}{s_{42}s_{51}};\ l_5=\frac{s_{15}}{s_{51}};\ k_{21}=\frac{s_{24}g_4+s_{25}}{s_{15}};\ k_{31}=\frac{s_{33}g_3+s_{34}g_4+s_{35}}{s_{15}};$$

$$k_{41}=\frac{s_{42}g_2+s_{33}g_3+s_{44}g_4+s_{45}}{s_{15}};\ k_{51}=\frac{s_{51}g_1+s_{52}g_2+s_{53}g_3+s_{54}g_4+s_{55}}{s_{15}};$$

$$k_{32}=\frac{s_{33}g_4+s_{43}}{s_{15}};\ k_{42}=\frac{s_{42}g_3+s_{43}g_4+s_{44}}{s_{15}};\ k_{52}=\frac{s_{51}g_2+s_{52}g_3+s_{53}g_4+s_{54}}{s_{15}};$$

$$k_{43}=\frac{s_{42}g_4+s_{43}}{s_{15}};\ k_{53}=\frac{s_{51}g_3+s_{52}g_4+s_{53}}{s_{15}};$$

$\Theta_{ПИ}$ – см. (2.27); $s_{15}\ldots s_{55}$ – см. (4.21); $g_0\ldots g_4$ – см. (4.22).

Повна структурна схема РСУ двомасових ЕМО, синтезованої методом ОЗД в фазовому просторі вихідних координат і розширеної за рахунок використання спостерігача стану і обліку в алгоритмі управління (4.23) ОВТ та НПІ-зв'язку, представлена на рис. 4.20.

На математичної моделі, складеної в середовищі MATLAB / Simulink (див. Додаток А), було вироблено цифрове моделювання роботи РСУ з алгоритмами (4.10), (4.23) при різних видах навантаження. При цьому використовувався раніше синтезований спостерігач стану. Результати моделювання представлені на рис. 4.21 - 4.26 і в табл. 4.2.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити наступні висновки:

- облік ОВТ в алгоритмах управління при синтезі РСУ двомасових ЕМО дозволяє розширити область максимально-допустимого зміни параметрів ЕП (в даному випадку на 8 - 22%);

- РСУ, синтезована з урахуванням ОВТ, однаково добре працює як з постійною, так і з фрикційної навантаженням в різних режимах роботи;

Таблиця 4.2 –

Допустиае зміна величини J_2 для прийнятого двомасового ЕМО з релейними управліннями (4,10), (4.23) при роботі з фрикційної навантаженням

Метод синтезу РСУ	Допустиме зменшення величини J_2	
	Пуск під навантаженням	Наброс навантаження
ОЗД, алгоритм управління (4.10), без урахування ОВТ	В 2.7 рази	В 2.5 рази
ОЗД, алгоритм управління (4.23), з урахуванням ОВТ	В 3.3 рази	В 2.7 рази

- при набросах і скидах навантаження в умовах істотного зменшення моменту інерції механізму спостерігаються кидки струму і відповідні їм просадки по швидкості (як і при роботі РСУ одномасової ЕП). Аналіз даних процесів був проведений в попередньому розділі.

Також слід зазначити, що синтезовані РСУ двомасових ЕП, що працюють з фрикційної навантаженням, зберігають свою працездатність при значних зміни коефіцієнта жорсткості c_{12}. Це наочно представлено на рис. 4.27 - 4.28.

Результати досліджень, представлених у другому розділі дисертаційної роботи, відображені в публікаціях [153-155].