

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет

«Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**до виконання лабораторних і самостійних занять з дисципліни
«ОСНОВИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ СКЛАДНИХ ЕЛЕКТРО
МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ТА КОМПЛЕКСІВ»**

Частина 6

**«Моделювання електромагнітних процесів електропривода з пружним
ланцюгом тиристорного перетворювача по оптимізаційним критеріям»**

для студентів спеціальності G3 «Електрична інженерія»

всіх форм навчання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ до виконання лабораторних і самостійних занять з дисципліни «Основи наукових досліджень складних електромеханічних систем та комплексів» Частина 6 «Моделювання електромагнітних процесів електропривода з пружним ланцюгом тиристорного перетворювача по оптимізаційним критеріям» для студентів спеціальності G3 «Електрична інженерія» всіх форм навчання. Укл. В.В. Зіновкін, проф., д.т.н.; М.Л. Антонов, доц., к.т.н.; Ю.О. Крисан, доц., к.т.н.; – Запоріжжя. НУ «ЗП», 2026. – 20с.

Укладачі:

В.В. Зіновкін, проф., д.т.н.;
М.Л. Антонов, доц., к.т.н.;
Ю.О. Крисан, доц., к.т.н.

Рецензент:

А.Е. Казурова, доц., к.т.н.

Відповідний за випуск:

А.В. Пирожок, доц., к.т.н.

Затверджено на засіданні кафедри ЕПА
Протокол №5 від 04.02 2026 р.

Рекомендовано до видання НМК ЕТФ
Протокол № 7 від 19.02 2026 р.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
4 Робота №4. Теоретичні основи оптимізації перехідних електромеханічних процесів в тиристорному електроприводі з пружною ланкою.....	5
4.1 Завдання для дослідження	5
4.2 Похідні дані для проведення дослідження	5
4.3 Шляхи компенсації пружних коливань та підвищення швидкодії електромеханічних систем.....	5
4.4 Умови керованості і спостереження.....	7
4.5 Розподіл полюсів системи згідно закону Баттерворта.....	8
4.6 Оптимальні коефіцієнти зворотних зв'язків системи.....	10
4.7 Оформлення і захист роботи	12
5 Робота №5 Дослідження керуючого пристрою на базі двох операційних підсилювачів.....	13
5.1 Завдання для теоретичного дослідження.....	13
5.2 Похідні дані для проведення синтезу і аналізу.....	13
5.3 Порядок проведення дослідження.....	13
5.4 Аналітичне рішення завдання.....	15
5.5 Високоефективний метод компенсації пружних коливань....	16
5.6 Передавальна функція і побудова комп'ютерної моделі.....	17
5.8 Оформлення і захист роботи.....	18
Перелік джерел посилання.....	19

ВСТУП

Дисципліна «Основи наукових досліджень складних електромеханічних систем та комплексів» спеціальності G3 відповідає вимогам Освітньої програми «Електропривод та системи керування» і призначена для більш досконалого засвоєння інженерних методів електромагнітних та електромеханічних процесів в складних електромеханічних системах. Вона є складовою підготовки магістрів і спеціалістів денної та заочної форм навчання та сприяє виконанню самостійних та лабораторних робіт.

В методичних вказівках розглянуто практичні методи моделювання перехідних процесів в тиристорному асинхронному електроприводі. Використано сучасні теорії, методологічні підходи та засоби мікропроцесорної техніки та автоматизації. Наведено приклад аналізу та інженерного розрахунку оптимальних коефіцієнтів регуляторів системи та схема послідовного корегуючого пристрою на базі двох операційних підсилювачів, що забезпечує оптимальну швидкодію приводу. Наведено залежності перехідних процесів систем приводів.

В методичних вказівках наведенні методи та приклади можуть бути використанні при інженерних розрахунках та дослідженнях при виконанні практичних та самостійних робіт і дипломному проектуванні за спеціальністю.

4 РОБОТА №4.

МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПЕРЕХІДНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ТИРИСТОРНОМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІ З ПРУЖНОЮ ЛАНКОЮ

4.1 Завдання для дослідження

Дослідження теоретичних основ оптимізації перехідних електромеханічних процесів в електроприводі тиристора з пружною ланкою виконується на основі сучасної теорії автоматичного управління.

Метою дослідження є придбання навиків побудови математичних і комп'ютерних моделей і інженерного розрахунку оптимальних параметрів регуляторів з урахуванням зворотних зв'язків електромеханічної системи.

4.2 Похідні дані для проведення дослідження

В якості похідних даних використовуються аналітичні залежності електромеханічних параметрів від різних збудливих чинників і вибору найбільш оптимального технічного рішення з урахуванням особливостей умов експлуатації, при забезпеченні максимальної швидкодії приводу.

4.3 Шляхи компенсації пружних коливань та підвищення швидкодії електромеханічних систем

Учені країн світового економічного співробітництва при дослідженні оптимізаційних умов компенсації пружних коливань і підвищення максимальної швидкодії електромеханічних систем з регуляторами тиристорів пропонують різні пристрої, що коректують. У основі цих рішень використовується чотириполосники, що складаються з R , L , C і інших електротехнічних елементів [1-7]. При практичній реалізації R - L - C фільтру використовуються спеціалізовані котушки з достатньо великою індуктивністю в межах 30-50 Гн. При цьому корекція на вході регулятора швидкості повинна задовольнятися при ємності $C > 0,1$ мкФ, що приводить до генерації високочастотних перешкод. Це, у свою чергу, приводить до

некоректного відробітку і зривів роботи системи імпульсно фазового керування перетворювача тиристора (СІФК ТП).

Традиційні вирішення електромеханічних процесів і оптимізація динамічних і статичних режимів електроприводів тиристорів з пружною механічною ланкою можуть бути істотно оптимізовані шляхом використання методологічного підходу, який в літературних джерелах носить найменування «теореми Кальмана-Фробенюса» [2–7].

Оптимальне управління забезпечується введенням лінійних зворотних зв'язків по всіх змінних стану системи електроприводу. Для визначення оптимальних коефіцієнтів зворотних зв'язків (регуляторів) по критеріях Кальмана-Фробенюса необхідно рівняння динаміки приводу представити у формі Коші

$$\frac{dx}{dy} = Ax + Bu + Cf, \quad (4.1)$$

де

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{T_2} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{T_c} & 0 & \frac{1}{T_c} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_1} & 0 & \frac{1}{T_1} \\ 0 & 0 & \frac{K_e K_\gamma}{T_\gamma} & -\frac{1}{T_\gamma} \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_\pi K_\gamma}{T_\gamma} \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$x^T = [\omega_2 \ M_\gamma \ \omega_1 \ M]$; $f = M_{CT}$; u - сигнал управління; ω_1 , ω_2 , M , M_{CT} і M_γ відносні зміни кутових швидкостей і моментів електродвигуна і

механізму, а також пружного моменту сполучного валу; T_1 і T_2 механічні постійні часу двигуна і механізму; T_c і T_γ постійні часу пружного валу і якірного ланцюга двигуна; K_n , K_e і K_γ , і коефіцієнти передач ТП і двигуна (по внутрішній о. с. і прямому каналу) [1,3].

4.4 Умови керованості і спостереження

Визначення керованості електромеханічної системи і спостережливості можливо оцінити шляхом аналізу матриці представленої в наступному вигляді:

$$V = \begin{bmatrix} B & AB & A^2B & A^3B \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$Q = \begin{bmatrix} C^T & A^T C^T & (A^T)^2 C^T & (A^T)^3 C^T \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

мають $\text{rank}V = \text{rank}Q = 4$

Згідно теоремі Калмана-Фробеньюса [4] спочатку необхідно скласти наступні спеціальні матриці:

$$\begin{cases} \theta_1 = A\theta_2 + \alpha_1 B; \\ \theta_2 = A\theta_3 + \alpha_2 B; \\ \theta_3 = A\theta_4 + \alpha_3 B; \\ \theta_4 = B. \end{cases} \quad (4.4)$$

де θ_1 , θ_2 і θ_3 коефіцієнти характеристичного полінома

$$(D = s_4 + \theta_3 s_3 + \theta_2 s_2 + \theta_1 s + \theta_0),$$

а матриці мають наступні конкретні значення:

$$\alpha_1 = \frac{T_\Sigma}{T_1 T_2 T_\gamma T_c}; \quad (4.5)$$

$$\alpha_2 = \frac{K_e K_{\text{я}}}{T_1 T_{\text{я}}} + \frac{T_{\Sigma}}{T_1 T_2 T_c};$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{T_{\text{я}}};$$

$$\alpha_0 = \frac{K_e K_{\text{я}}}{T_1 T_2 T_{\text{я}} T_c}$$

де $T_{\Sigma} = T_1 + T_2$ сумарна механічна постійна часу приводу.

4.5 Розподіл полюсів системи згідно закону Баттерворта

Якщо бажаний розподіл полюсів системи вибрати згідно із законом Баттерворта з коефіцієнтами $\bar{\alpha}_i$ $i = \overline{0;3}$ то для вирішення завдання потрібно визначити наступні різниці вказаних коефіцієнтів:

$$\left\{ \begin{array}{l} r_1 = \bar{\alpha}_0 - \alpha_0 = \omega_0^4 - \frac{k_e k_{\text{я}}}{T_1 T_2 T_{\text{я}} T_c}; \\ r_1 = \bar{\alpha}_1 - \alpha_1 = \omega_0^3 - \frac{T_{\Sigma}}{T_1 T_2 T_{\text{я}} T_c}; \\ r_1 = \bar{\alpha}_2 - \alpha_2 = \omega_0^2 - \frac{k_e k_{\text{я}}}{T_1 T_{\text{я}}} - \frac{T_{\Sigma}}{T_1 T_2 T_c}; \\ r_1 = \bar{\alpha}_3 - \alpha_3 = \omega_0 - \frac{1}{T_{\text{я}}}, \end{array} \right. \quad (4.6)$$

де ω_0 частота, що визначає швидкодію системи (для даної системи $\omega_0 = 1, 61(T_1 T_c)^{-1/2}$ [5]).

За допомогою (4.4) складається матриця типу $\theta = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3 \quad \theta_4]_{\text{тобто}}$

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta_{11} & 0 & 0 & 0 \\ \theta_{21} & \theta_{22} & 0 & 0 \\ \theta_{31} & \theta_{32} & \theta_{33} & 0 \\ \theta_{41} & \theta_{42} & \theta_{43} & \theta_{44} \end{bmatrix}, \quad (4.7)$$

де

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \begin{bmatrix} \theta_{11} \\ \theta_{21} \\ \theta_{31} \\ \theta_{41} \end{bmatrix} = \frac{K_{\Pi} K_{\mathcal{I}}}{T_{\mathcal{I}}} \begin{bmatrix} \frac{1}{T_1 T_2 T_c} \\ 0 \\ 1 \\ \frac{1}{T_1 T_2 T_c} \\ 0 \end{bmatrix}; \\ \theta_2 &= \begin{bmatrix} 0 \\ \theta_{22} \\ \theta_{32} \\ \theta_{42} \end{bmatrix} = \frac{K_{\Pi} K_{\mathcal{I}}}{T_{\mathcal{I}}} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{T_1 T_2 T_c} \\ 0 \\ T_{\Sigma} \\ \frac{1}{T_1 T_2 T_c} \end{bmatrix}; \\ \theta_3 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \theta_{33} \\ \theta_{43} \end{bmatrix} = \frac{K_{\Pi} K_{\mathcal{I}}}{T_{\mathcal{I}}} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_1} \\ 0 \end{bmatrix}; \\ \theta_4 &= B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{T_{\Pi} T_{\mathcal{I}}}{T_{\mathcal{I}}} \\ \frac{1}{T_{\mathcal{I}}} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Коефіцієнти регуляторів (зворотних зв'язків) системи визначаються виразом

$$R = \bar{R} \theta^{-1}, \quad (4.9)$$

де $\bar{R} = [r_1 \quad r_2 \quad r_3 \quad r_4]$.

Зворотна матриця i з обліком (4.7) має вигляд

$$\theta^{-1} = \frac{1}{\det \theta} \begin{bmatrix} \bar{\theta}_{11} & 0 & 0 & 0 \\ \bar{\theta}_{21} & \bar{\theta}_{22} & 0 & 0 \\ \bar{\theta}_{31} & \bar{\theta}_{32} & \bar{\theta}_{33} & 0 \\ \bar{\theta}_{41} & \bar{\theta}_{42} & \bar{\theta}_{43} & \bar{\theta}_{44} \end{bmatrix}, \quad (4.10)$$

де

$$\left\{ \begin{array}{l} \det \theta = \left(\frac{kk}{T} \right)^4 \frac{1}{T_1^3 T_2 T_c^2}; \bar{\theta}_{11} = \theta_{22} \theta_{33} \theta_{44}; \\ \bar{\theta}_{21} = -\theta_{21} \theta_{33} \theta_{44}; \bar{\theta}_{22} = \theta_{11} \theta_{33} \theta_{44}; \\ \bar{\theta}_{31} = \theta_{44} (\theta_{21} \theta_{32} - \theta_{31} \theta_{32}); \bar{\theta}_{32} = -\theta_{11} \theta_{32} \theta_{44}; \\ \bar{\theta}_{33} = \theta_{44} \theta_{11} \theta_{22}; \bar{\theta}_{41} = - \begin{bmatrix} \theta_{21} & \theta_{22} & 0 \\ \theta_{31} & \theta_{32} & \theta_{33} \\ \theta_{41} & \theta_{42} & \theta_{43} \end{bmatrix}; \\ \bar{\theta}_{42} = \theta_{11} (\theta_{32} \theta_{43} - \theta_{33} \theta_{42}); \\ \bar{\theta}_{43} = -\theta_{11} \theta_{22} \theta_{43}; \bar{\theta}_{44} = \theta_{33} \theta_{11} \theta_{22}. \end{array} \right. \quad (4.11)$$

4.6 Оптимальні коефіцієнти зворотних зв'язків системи

Згідно (4.6), (4.9) і (4.11) загальні вирази для визначення оптимальних коефіцієнтів зворотних зв'язків (регуляторів) системи приймають наступний вигляд:

$$\begin{cases} R_1 = \frac{1}{\det \theta} (r_1 \bar{\theta}_{11} + r_2 \bar{\theta}_{21} + r_3 \bar{\theta}_{31} + r_4 \bar{\theta}_{41}); \\ R_2 = \frac{1}{\det \theta} (r_2 \bar{\theta}_{22} + r_3 \bar{\theta}_{32} + r_4 \bar{\theta}_{42}); \\ R_3 = \frac{1}{\det \theta} (r_3 \bar{\theta}_{33} + r_4 \bar{\theta}_{43}); \\ R_4 = \frac{1}{\det \theta} r_4 \bar{\theta}_{44}. \end{cases} \quad (4.12)$$

Підставляючи значення θ_{ij} з (4.11) в (4.12) з обліком (4.8), визначимо розрахункові формули оптимальних коефіцієнтів регуляторів (зворотних зв'язків) системи електроприводу

$$\begin{cases} R_1 = \frac{T_1 T_2 T_\Sigma T_c \omega_0^4 - K_e K_\Sigma}{K_\Pi K_\Sigma}; \\ R_2 = \frac{\omega_0}{K_\Pi K_\Sigma} \left(2 T_1 T_2 T_c \omega_0^2 - \frac{T_\Sigma T_\Sigma}{T_2} \right); \\ R_3 = \frac{T_1 T_\Sigma}{K_\Pi K_\Sigma} \left(3 \omega_0^2 - \frac{K_e K_\Sigma}{T_1 T_\Sigma} - \frac{T_\Sigma}{T_1 T_2 T_c} \right); \\ R_4 = \frac{T_\Sigma \omega_0 - 1}{K_\Pi K_\Sigma}. \end{cases} \quad (4.13)$$

Таким чином приведені теоретичні дослідження дозволяють розробити комп'ютерні моделі, які істотно підвищують оперативність і вибір найбільш оптимального технічного вирішення електромеханічної системи залежно від умов експлуатації і дії зовнішніх збудливих чинників. Коротко розглянемо методологічні підходи побудови комп'ютерних моделей в яких використовується приведені вище теоретичні відомості.

4.7 Оформлення і захист роботи

Оформлення роботи здійснюється кожним студентом самостійно в паперовому вигляді з послідуочим захистом отриманих результатів.

Основні положення можливо прокоментувати з доказами фізичного тлумачення аналітичних зв'язків між електромагнітними та електромеханічними параметрами електромеханічної системи.

5 РОБОТА №5. ДОСЛІДЖЕННЯ КЕРУЮЧОГО ПРИСТРОЮ НА БАЗІ ДВОХ ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ

5.1 Завдання для теоретичного дослідження

Завдання роботи полягає в набутті студентам навиків використання теоретичного матеріалу, що отримані в лекціях, при дослідженні на комп'ютерних моделях складних електромеханічних систем і об'єктів. З цією метою студент конспективно повторює основні теоретичні положення використання методів, що дозволяють отримувати більш достовірні результати дослідження з меншими похибками та компенсацією несприятливих зовнішніх збурень.

Нижче приведено

5.2 Похідні дані для проведення синтезу і аналізу

В якості похідного матеріалу використано основні теоретичні положення дослідження фільтру Калмана-Бьюсі. Для отримання високоточних оцінних величин $\bar{\omega}_2$ і $\bar{M}_y$ спостерігач забезпечений власними зворотними зв'язками з коефіцієнтами передачі $Ki, i = \bar{1}; 3$

5.3 Порядок проведення дослідження

Синтез спостерігача при обліку збурення параметрів електроприводу проводиться згідно рівнянням відносно ω_1

$$\begin{aligned}\dot{\check{x}} &= A\check{x} + K(y - \check{y}) + L\check{M}_{CT}; \\ \check{M}_{CT} &= \int (y - \check{y})dt,\end{aligned}\tag{5.1}$$

де y і $\check{y}$ вихідні сигнали об'єкту і фільтру Калмана-Бьюсі

$$(y = C \cdot x \text{ і } \check{y} = C \cdot \check{x} \quad C = [0 \quad 0 \quad 1])$$

$$L^T = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_2} & 0 & 0 \end{bmatrix}; K = \begin{bmatrix} K_1 & K_2 & K_3 \end{bmatrix}$$

Для вибору оптимальних коефіцієнтів зворотних зв'язків спостерігача (K_1, K_2, K_3) використовується квадратичний функціонал

$$J = \int_0^{\infty} (x^T N x + u^T R u) dt \rightarrow \min \quad (5.2)$$

де

$$N = \text{diag} \left\{ \left[\max_{t \in [0;3]} x_1(t) \right]^{-2} \left[\max_{t \in [0;3]} x_2(t) \right]^{-2} \left[\max_{t \in [0;3]} x_3(t) \right]^{-2} \right\};$$

$$R = \left[\max_{t \in [0;3]} \bar{U}(t) \right]^{-2}.$$

Для приводів безперервних прокатних станів

$$N = \text{diag}[0,76 \quad 0,26 \quad 0,76] \text{ і } R = 0,25.$$

По критеріях Калмана-Бьюсі коефіцієнти зворотних зв'язків спостерігача $K_i, i = \overline{1;3}$ визначаються формулою

$$K = P * C^{*T} R^{-1}, \quad (5.3)$$

де P – позитивно певна матриця, що є вирішенням наступного рівняння Ріккати:

$$A^T P + P A - P A R^{-1} P + N = 0. \quad (5.4)$$

5.4 Аналітичне рішення завдання

На підставі фізико-математичного представлення нелінійних властивостей електромеханічної системи розглядається аналіз взаємних зв'язків між визначальними параметрами.

Аналітичне рішення (5.4) вельми скрутно, унаслідок його нелінійності.

Складність можливо подолати при застосуванні матриці Гамільтона

$$H = \begin{bmatrix} -A^T & C^{*T} R^{-1} C^* \\ N & A \end{bmatrix}. \quad (5.5)$$

Характеристичне рівняння матриці H завжди можна представити у вигляді наступних співмножників:

$$\det(sE - H) = (-1)^n h(s)h(-s), \quad (5.6)$$

де $h(s)$ поліном n -го порядку системи, коріння якого мають негативні дійсні частини;

$h(-s)$ поліном $h(s)$, що сполучає.

Замінюючи в поліномі оператора " s " на матрицю H і вирішивши лінійне матричне рівняння

$$[-P^*, E]h(H) = 0, \quad (5.7)$$

визначаємо значення P , які задовольняють рівнянню Ріккати (5.3). Таким шляхом знайдені значення P вводяться в (5.3), за допомогою яких визначаються оптимальні коефіцієнти зворотних зв'язків, що забезпечують мінімізацію помилки вихідних сигналів спостерігача і об'єкту регулювання системи.

5.5 Високоєфективний метод компенсації пружних коливань

Високоєфективне, з погляду придушення пружних коливань і отримання максимальної швидкодії, а також надійний в експлуатації пристрій, що коректує, можна конструювати на базі двох інтеграторів і трьох операційних підсилювачів. Для цієї мети записуються рівняння руху приводу з в'язкопружної механічної передачі в операторному вигляді

$$\begin{cases} s \cdot X(s) = A^* X(s) + B^* U(s), \\ Y(s) = C^* X(s) \end{cases}, \quad (5.8)$$

$$A^* = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{T_2} & 0 \\ -\frac{1}{T_c} & \frac{T_d T_\Sigma}{T_c T_1 T_2} & \frac{1}{T_c} \\ 0 & -\frac{1}{T_1} & 0 \end{bmatrix};$$

$$B^* = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{T_d}{T_1 T_c} \\ \frac{1}{T_2} \end{bmatrix}; C^{*T} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

де Y - вихідний сигнал об'єкту (тобто ω_2);

T_d - постійна часу в'язкого тертя механічної передачі приводу.

Рішення (5.8) виражається, як

$$Y(s) = C^* (sE - A^*) B^* U(s). \quad (5.9)$$

Таким чином, отримуємо визначальні параметри для знаходження передавальної функції і побудови комп'ютерної моделі.

5.6 Передавальна функція і побудова комп'ютерної моделі

Вводячи значення A , B і C визначаємо передавальну функцію електромеханічного об'єкту

$$W_0(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{T_\Sigma s} \cdot \frac{T_1'^2 s^2 + T_d s + 1}{T_2'^2 s^2 + T_d s + 1}, \quad (5.10)$$

де $T_1' = (T_2 \cdot T_c)^{1/2}$; $T_2' = (T_1 T_2 T / T_\Sigma)^{1/2}$.

Оскільки корегувальник призначено для компенсації впливу пружних коливань, які аналітично описуються другим співмножником (5.10), то передавальну функцію корегування зручно представити в наступному вигляді:

$$W_k(s) = \frac{U_2(s)}{U_1(s)} = \frac{T_3^2 s^2 + T_4 s + 1}{T_5^2 s^2 + T_6 s + 1}, \quad (5.11)$$

де $U_1(s)$ і $U_2(s)$ - відповідно вхідний і вихідний сигнали коректора.

Аналіз отриманих теоретичних положень, що відповідають виразу (5.11) витікає наступна рівність:

$$U_2(P) = \frac{1}{T_5 \cdot s} \left[\frac{U_1(s) - U_2(s)}{T_5 \cdot s} + \frac{T_4}{T_5} U_1(s) - \frac{T_6}{T_5} U_2(s) \right] + \left(\frac{T_3}{T_5} \right)^2 U_1(s). \quad (5.12)$$

Відповідно рівнянню (5.12) структурну схему моделювання впливу коректора можливо представити як приведено на рис.5.1.

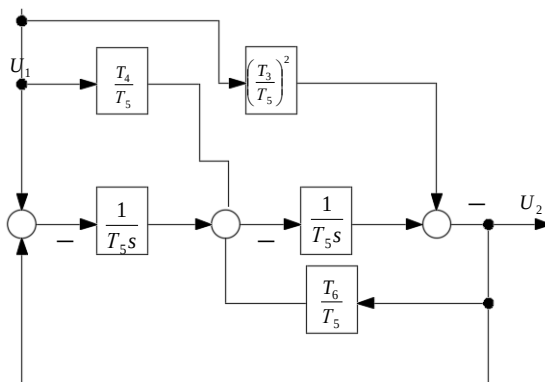


Рисунок 5.1 – Структурна схема послідовного пристрою пружного електроприводу, що корегує

Частотний аналіз (5.12) показав можливість встановити її оптимальні параметри в наступному вигляді:

$$T_3 = T_5 = T_1'; \quad T_4 = T_d, \quad T_6 = 17,5 \cdot T_d \quad (5.13)$$

Отриманий пристрій, що корегує, є послідовним і його необхідно включити на вході регулятора швидкості так само, як це зроблено в схемі для приводу тиристора з підлеглим регулюванням.

Доцільно виконати моделювання та привести отримані результати дослідження.

5.8 Оформлення і захист роботи

Оформлення роботи здійснюється кожним студентом самостійно в паперовому вигляді з послідовним захистом отриманих результатів.

Основні положення можливо підтвердити на комп'ютерній моделі та змістовно пояснити фізичне тлумачення процесу компенсації збурень.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Теорія автоматичного керування: навч. посібник / П.В. Леонтьєв та ін. Суми : Сумський державний університет, 2024. 296 с. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/97189>
2. Гуров А. П., Ольшевський С. І., Черно О. О., Бугрім Л. І. Теорія автоматичного керування: навч. посібник. Миколаїв: НУК, 2018. URL: <https://eir.nuos.edu.ua/items/c6d19b91-5ad4-4563-a13d-b3960e55d85>
3. Марченко А. А., Гулий В. С. Теорія автоматичного керування. Комп'ютерний практикум: навч. посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. URL: <https://ela.kpi.ua/items/40b17431-d0a6-42bf-9387-eb408c1bfbf3>
4. Толочко О. І. Теорія автоматичного керування. Математичні методи та програмування в MATLAB для теорії керування : навч. посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. URL: <https://ela.kpi.ua/items/2cb5a885-ee3-4b52-bf9d-bb218ce48929>
5. Гайденко Ю.А. Теорія автоматичного керування. Комп'ютерний практикум: навч. посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. URL:[<https://ela.kpi.ua/items/edac02be-d940-4fd4-a566-7c8b782b89a2>
6. Іносов С.В., Соболевська Т.Г. Теорія автоматичного керування: метод. вказівки до лабор. і практ. робіт. Київ : КНУБА, 2024. URL: <https://repository.knuba.edu.ua/items/82da287f-a9d2-43e9-8f9a-1e8d7f7dc136>
7. Мірошник М.А., Лістровий С.В., Клименко Л.А. Теорія автоматичного керування, штучний інтелект і автоматизація процесу прийняття рішення : навч. посібник. Харків : УкрДУЗТ, 2019. URL: <https://dspace.onua.edu.ua/items/d64933de-004c-4977-a0bf-68c744eede6f>
8. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: підручник. 2-ге вид. Київ : Либідь, 2007. 656 с. URL:[<https://uareferats.com/index.php/book/details/336>
9. Zinovkin V., Antonov M., Krysan Y. The study of non-stationary electromagnetic processes in synchronous electric drive. Proc. Int. Conf. on Modern Electrical and Energy Systems (MEES 2017) . Kremenchuk, 2017. P. 148–151.
10. Зіновкін В. В., Антонов М. Л., Крисан Ю. О. Вплив нестационарних електромагнітних процесів на електромеханічні

параметри в синхронному електроприводі. Електротехніка та електроенергетика . 2017. № 2. С. 6–17.

11. Зіновкін В. В., Кулінич Е. М. Багатопараметрична система автоматизованого управління технологічним процесом приготування газобетону. Східно-Європейський журнал передових технологій . 2009. № 3/3 (39). С. 38–43.

12. Зіновкін В. В., Кулінич Є. М. Моделювання процесів утилізації відходів у технології приготування газобетонів. Стратегія якості у промисловості і освіті : матеріали VI Міжнар. конф. (6–13 червня 2009 р., м. Варна, Болгарія). Дніпропетровськ: Пороги, 2009. Т. 2. С. 176–179.