

РОЗДІЛ «ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА. ЕЛЕКТРОТЕХНІКА»

УДК 62-52

ШЕРЕМЕТ О.І.*, к.т.н., доцент
САДОВОЙ О.В., д.т.н., професор
СОХІНА Ю.В., к.т.н., доцент

*Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ
Дніпродзержинський державний технічний університет

СИНТЕЗ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗАНОЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ НА БАЗІ ДИСКРЕТНОГО ЧАСОВОГО ЕКВАЛАЙЗЕРА

Вступ. До взаємозв'язаних систем електроприводу відносяться моталки прокатних станів, випробувальні стенди механічних трансмісій вертольотів та інших апаратів. Всі вони являють собою автоматичні системи регулювання різних змінних (швидкості, натягу, моменту тощо), які пов'язані між собою пружними зв'язками та об'єднані в складну систему, що виконує одну цільову функцію [1, 2].

Технологія виробництва і обробки більшості виробів хімічної, текстильної та ряду інших галузей промисловості характеризується безперервністю технологічного процесу (лінії з обробки металевих полос, дротяні і кабельні агрегати, пристрої для обробки різних плівкових матеріалів та хімічних волокон, агрегати з переробки бавовни, вовни, льону тощо). Тенденції розвитку сучасного виробництва ведуть до створення досконаліших технологічних процесів, які потребують збільшення числа керованих взаємозв'язаних електроприводів [1, 2].

У загальному випадку необхідність у взаємозв'язаному керуванні електроприводами обумовлена поєднанням наступних факторів [1]:

– для належного перетворення сировини в кінцевий продукт необхідно підтримувати величини вхідних потоків матеріалів та співвідношення між ними на заданому рівні всередині допустимих відхилень;

– запуск та зупинка деяких технологічних процесів потребує виконання специфічних точно синхронізованих операцій, які неможливо виконати без взаємозв'язаного керування;

– задача оптимізації технологічних процесів з метою підвищення якості продукції та зниження її собівартості вирішується за рахунок комплексної автоматизації та взаємозв'язаного керування електроприводами.

Метод синтезу автоматизованих електромеханічних систем на базі дискретного часового еквалайзера [3] дозволяє налаштувати окремі електроприводи, що задіяні у складному технологічному процесі, на дискретизовані перехідні функції бажаної форми та тривалості. Таким чином, у кожній з координат, яка задіяна у цільовій функції керування складним об'єктом, встановлюється бажана динамічна та статична поведінка.

Постановка задачі. Використовуючи матеріали досліджень [3], поставимо задачу визначення основних підходів щодо створення взаємозв'язаних автоматизованих електромеханічних систем на базі дискретного часового еквалайзера.

Результати роботи. Взаємозв'язані автоматизовані електромеханічні системи є багатодвигуновими. Багатодвигунові електроприводи промислових установок виконуються з використанням електродвигунів постійного і змінного струму. Однак електроприводи постійного струму виявляються простішими і набули більшого поширення в практиці взаємозв'язаного керування [1].

Силова частина багатодвигунових електроприводів постійного струму може бути виконана за схемою з загальним тиристорним перетворювачем (ТП) на всі або на групу електроприводів, або за схемою з індивідуальними ТП на кожен електропривод. При

цьому багатодвигунові електроприводи з індивідуальними ТП застосовуються без обмежень по потужності і забезпечують більш гнучке управління промисловими установками при широкому діапазоні регулювання швидкості.

Для чистової обробки металів в прокатних станах застосовують електроприводи з двозонним регулюванням швидкості. Електроприводи можуть також виконуватися реверсивними, якщо прокатка металевої смуги відбувається спочатку в одному, а потім у зворотному напрямку, проте для більшості інших промислових установок застосовують нереверсивні електроприводи з однозонним регулюванням швидкості [1].

Незалежно від того, в якій галузі використовується взаємозв'язаний електропривод, об'єкт керування повинен відтворювати деяку цільову функцію, аргументами якої є вихідні координати окремих електроприводів. Нехай об'єкт керування має n входів та повинен реалізовувати деяку n -вимірну функцію. За формування кожної з n вхідних координат об'єкта керування відповідає окремий автоматизований електропривод з дискретним часовим еквалайзером. Таким чином, на об'єкт керування поступають сигнали $y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)$ від локальних електроприводів, а на виході з нього утворюється деяка цільова функція $R(y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t))$. При цьому під дією збурень $g_1(t), g_2(t), \dots, g_k(t)$ значення цільової функції можуть відрізнитись від бажаних.

Електроприводи, що формують сигнали $y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)$, реалізовані на базі дискретного часового еквалайзера з модифікованим принципом симетрії об'єкта керування [3]. Кожен з них складається з наступних елементів (рис.1):

- програми завдання та налаштування еквалайзера;
- дискретного часового еквалайзера, що відповідає за формування динамічних та статичних характеристик привода;
- двох елементів квантування з періодом T ;
- екстраполятора нульового порядку, який виконує цифро-аналогове перетворення та узгоджує між собою дискретні та аналогові елементи схеми;
- виконавчої підсистеми (двигуна та керованого перетворювача);
- оберненої еталонної моделі виконавчої підсистеми;
- блока модифікації зворотного перетворення;
- датчика зворотного зв'язку.

Кожна з n виконавчих підсистем отримує свій сигнал керування $u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t)$. Також на кожну виконавчу підсистему діє декілька збурень $f_{11}(t), f_{12}(t), \dots, f_{1q}(t); f_{21}(t), f_{22}(t), \dots, f_{2q}(t); \dots; f_{n1}(t), f_{n2}(t), \dots, f_{nq}(t)$.

Датчики зворотних зв'язків виконують вимірювання координат $y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)$ та перетворюють їх на сигнали зворотних зв'язків $x_{зв.31}(t), x_{зв.32}(t), \dots, x_{зв.3n}(t)$, що подаються на входи суматорів, де віднімаються від відповідних вхідних сигналів $x_{вх1}(t), x_{вх2}(t), \dots, x_{вхn}(t)$.

Значення цільової функції $R(y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t))$ з виходу об'єкта керування вимірюється за допомогою відповідного датчика (коли цільова функція характеризується фізичною величиною, яка може бути виміряною) або обчислюється за допомогою відповідного пристрою чи програмного забезпечення (коли цільова функція не є фізичною величиною, яку можна безпосередньо виміряти за допомогою датчика). В результаті вимірювання або обчислення одержується значення \tilde{R} , котре з певною точністю відтворює реальне значення цільової функції R . Для того, щоб оцінити відхилення виміряного значення цільової функції \tilde{R} від бажаного, використовується еталонна модель об'єкта керування, яка на вході має всі сигнали зворотних зв'язків з датчиків локальних електроприводів $x_{зв.31}(t), x_{зв.32}(t), \dots, x_{зв.3n}(t)$ та \tilde{R} .

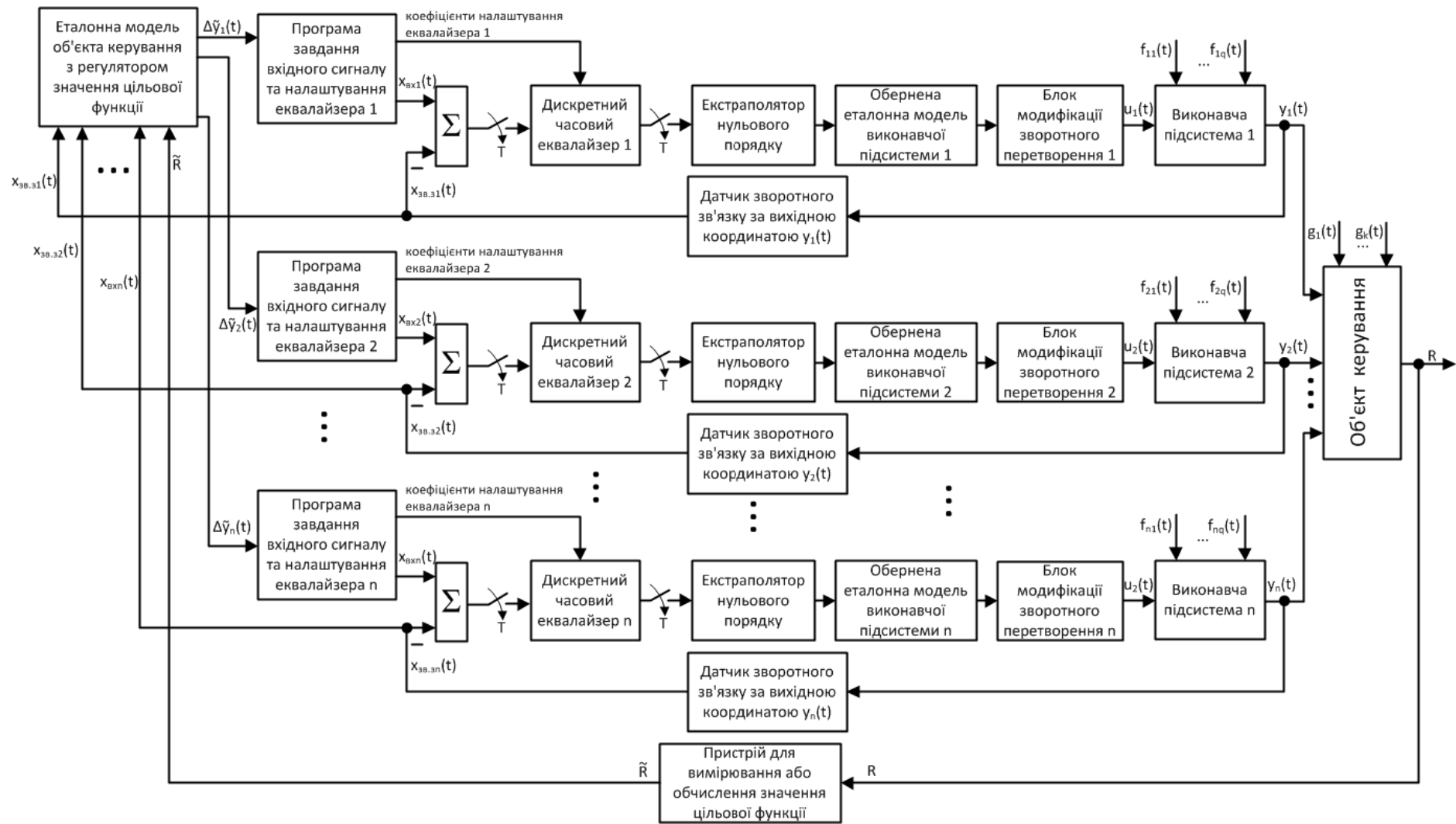


Рисунок 1 – Функціональна схема автоматизованої електромеханічної системи із взаємозв'язаного керуванням на базі дискретних часових еквайзерів

У результаті на виходах еталонної моделі формуються сигнали, що являють собою різницю між вимірними за допомогою датчиків значеннями координат

$$y_1(t) = k_{13}x_{зв.31}(t), y_2(t) = k_{23}x_{зв.32}(t), \dots, y_n(t) = k_{n3}x_{зв.3n}(t),$$

де $k_{13}, k_{23}, \dots, k_{n3}$ – коефіцієнти зворотних зв'язків у відповідних локальних електроприводах,

та розрахованими за $x_{зв.31}(t), x_{зв.32}(t), \dots, x_{зв.3n}(t), \tilde{R}$ значеннями $\tilde{y}_1(t), \tilde{y}_2(t), \dots, \tilde{y}_n(t)$. До цієї різниці можна застосувати деякі функціональні перетворення, наприклад, реалізувати пропорційний або пропорційно-інтегральний закон керування, використавши відповідний регулятор. Тоді коректуючий сигнал, що подаватиметься еталонною моделлю до програм завдання вхідних сигналів, визначатиметься наступними залежностями:

$$\Delta\tilde{y}_1(t) = \psi_1(y_1(t) - \tilde{y}_1(t)), \Delta\tilde{y}_2(t) = \psi_2(y_2(t) - \tilde{y}_2(t)), \dots, \Delta\tilde{y}_n(t) = \psi_n(y_n(t) - \tilde{y}_n(t)),$$

де $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n$ – деякі функції керування, що реалізуються регуляторами значень цільової функції.

Розглянемо приклад взаємозв'язаної системи керування натягненням смугового матеріалу, що перемотується або правиться. У машинах та механізмах, призначених для перемотки смугових матеріалів, таких, як: листовий метал, папір, різні плівки тощо – постає завдання регулювання зусилля у полосі, тобто натягнення. В більшості випадків точність підтримки натягнення (чи регулювання за заданим законом) безпосередньо впливає на якість готової продукції.

На рис.2 показана кінематична схема, яка може бути секцією папероробної машини або клітей прокатного стану. Двигун М1 обертає першу групу валків через редуктор Рд₁ з передатним числом i_1 , а двигун М2 приводить у рух другу групу валків через редуктор Рд₂ з передатним числом i_2 . Валки 1 обертаються зі швидкістю ω_1/i_1 , валки 3 – зі швидкістю ω_2/i_2 , а полоса 2 рухається з постійною швидкістю ϑ . Завданням взаємозв'язаного електроприводу клітей є підтримка постійної сили натягнення полоси F.

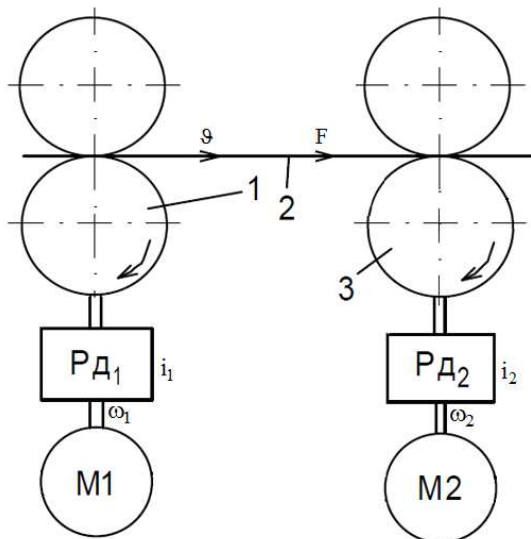


Рисунок 2 – Кінематична схема клітей прокатного стану

У відповідності до досліджень [2] для постійного значення лінійної швидкості полоси ϑ передатна функція пружної полоси як об'єкта керування має наступний вигляд:

$$W_{пол}(p) = \frac{F(p)}{\Delta\omega(p)} = \frac{E_0 r / \vartheta}{T_3 p + 1},$$

де $F(p)$ – зображення Лапласа від сили натягнення полоси;

$\Delta\omega(p) = \omega_2(p)/i_2 - \omega_1(p)/i_1$ – зображення Лапласа від різниці між швидкостями обертання валків;

r – середній радіус валків;

E_0 – модуль пружності полоси, приведений до її поперечного перерізу;

ϑ – лінійна швидкість руху полоси;

$T_\vartheta = \frac{\ell}{\vartheta}$ – стала часу полоси;

ℓ – довжина частини полоси між валками.

Для того, щоб побудувати модель двохдвигунового електроприводу, цільовою функцією якого буде підтримання постійного значення сили натягнення полоси, задамо наступні чисельні значення параметрів: довжина полоси $\ell = 8$ м; швидкість руху – $\vartheta = 1$ м/с; модуль пружності сталеві полоси $E_0 = 210000$ МПа; стала часу полоси $T_\vartheta = 8/1 = 8$ с; швидкості обертання першого та другого двигунів відповідно $\omega_1 = 52,5 \text{ c}^{-1}$, $\omega_2 = 1,01 \cdot \omega_1 = 53,025 \text{ c}^{-1}$; передатні числа першого та другого редукторів відповідно $i_1 = i_2 = 10$; середній радіус валків $r = 0,2$ м.

При такому підході цільова функція буде мати наступний чисельний вираз:

$$R(\omega_1(p), \omega_2(p)) = F(p) = W_{\text{пол}}(p)\Delta\omega(p) = \frac{E_0 r / \vartheta}{T_\vartheta p + 1} (\omega_2(p) - \omega_1(p)) = \frac{4,2 \cdot 10^{10}}{8p + 1} (\omega_2(p) - \omega_1(p)).$$

У якості виконавчих підсистем оберемо двигуни постійного струму, що живляться від власних тиристорних перетворювачів. Тиристорні перетворювачі представимо у вигляді аперіодичних ланок з коефіцієнтами підсилення $k_{\text{ТП}} = 50$ та некомпенсованими сталими часу $T_\mu = 0,005$ с [3]. Кожен з двигунів постійного струму можна розділити на дві складові: електричну та механічну. Електричні складові (з електричним струмом в якості вихідного параметра) є аперіодичними ланками з електромагнітною сталою часу $T_\pi = 0,05$ с. Активний опір якірних кіл двигунів постійного струму $R_\pi = 0,01$ Ом. Конструктивний коефіцієнт $C = 2,5$ В·с. Механічні складові представлені інтегруючими ланками з коефіцієнтами підсилення R_π/C та електромеханічними сталими часу $T_M = 0,1$ с. При таких параметрах обидві виконавчі підсистеми матимуть наступні передатні функції:

$$W_{\text{вик1}}(p) = W_{\text{вик2}}(p) = \frac{800000}{p^3 + 88p^2 + 1680p + 16000}.$$

Принципи налаштування дискретних часових еквалайзерів оберемо з роботи [3]. Період квантування приймемо $T = 0,02$ с. Коефіцієнти зворотних зв'язків $k_{\text{зв.3}} = 0,1$. Тоді $Tk_{\text{зв.3}} = 0,002$. Коефіцієнти еквалайзерів при $k = 5$ становитимуть $a_4 = 20$, $a_3 = 15$, $a_2 = 10$, $a_1 = 5$, $a_0 = 2,5$. Передатні функції обох еквалайзерів будуть наступними:

$$W_{\text{екв1}}(z) = W_{\text{екв2}}(z) = \frac{20z^5 - 5z^4 - 5z^3 - 5z^2 - 2,5z - 2,5}{0,02z^5 - 0,04z^4 - 0,03z^3 - 0,02z^2 - 0,01z - 0,005}.$$

На рис.3 показана модель автоматизованої електромеханічної системи із взаємозв'язаним керуванням, зібрана з урахуванням наведених вище чисельних значень параметрів.

Еталонна модель з регулятором значення цільової функції на рис.3 обведена пунктирною лінією. Вона складається з наступних компонентів:

– власне з моделі (блок Model);

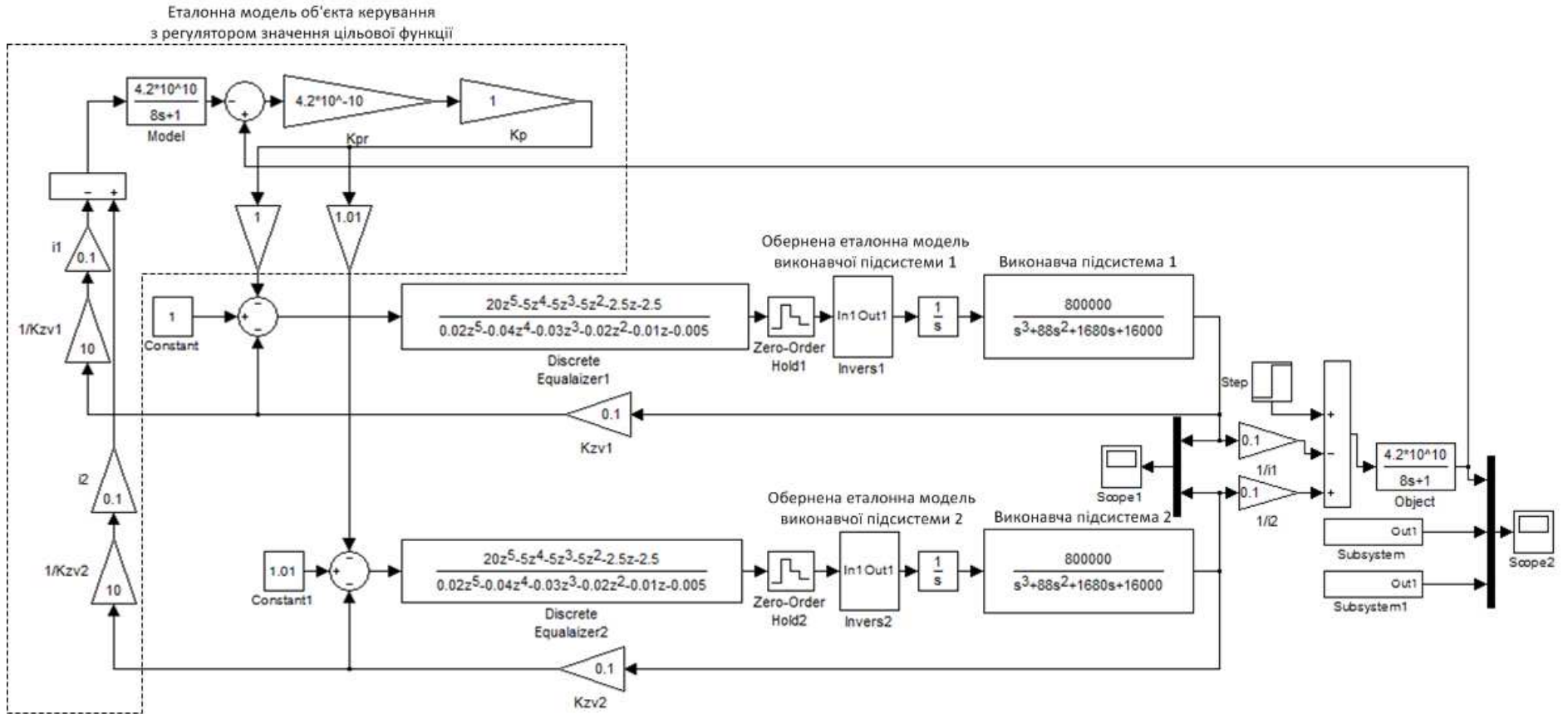


Рисунок 3 – Модель автоматизованої електромеханічної системи взаємозв'язаного керування, побудована із застосуванням дискретних часових еквайзерів (регулятор значення цільової функції пропорційний)

- коефіцієнтів, що компенсують вплив датчиків зворотного зв'язку ($1/Kzv1$ та $1/Kzv2$);
- коефіцієнтів, що враховують дію редукторів ($i1$ та $i2$);
- суматора, на якому реально виміряне або обчислене значення цільової функції віднімається від значення, одержаного на моделі;
- коефіцієнта, що приводить можливе відхилення цільової функції до нормованого значення – одиниці (Kpr);
- коефіцієнта пропорційного регулятора (Kp);
- двох коефіцієнтів, що враховують ступінь впливу кожного з локальних електроприводів на цільову функцію (1 та $1,01$).

Для штучного введення збурення в моделі використовується блок Step, котрий на п'ятдесятій секунді вносить стале значення швидкості руху полоси величиною $0,01$ м/с.

Для порівняння результатів роботи системи з корекцією цільової функції при дії постійного збурення з роботою системи без збурення та без корекції введено відповідні підсистеми Subsystem та Subsystem1. Результати роботи засобів корекції проілюстровано на рис.4 (залежності, зняті з блоку Scope2).

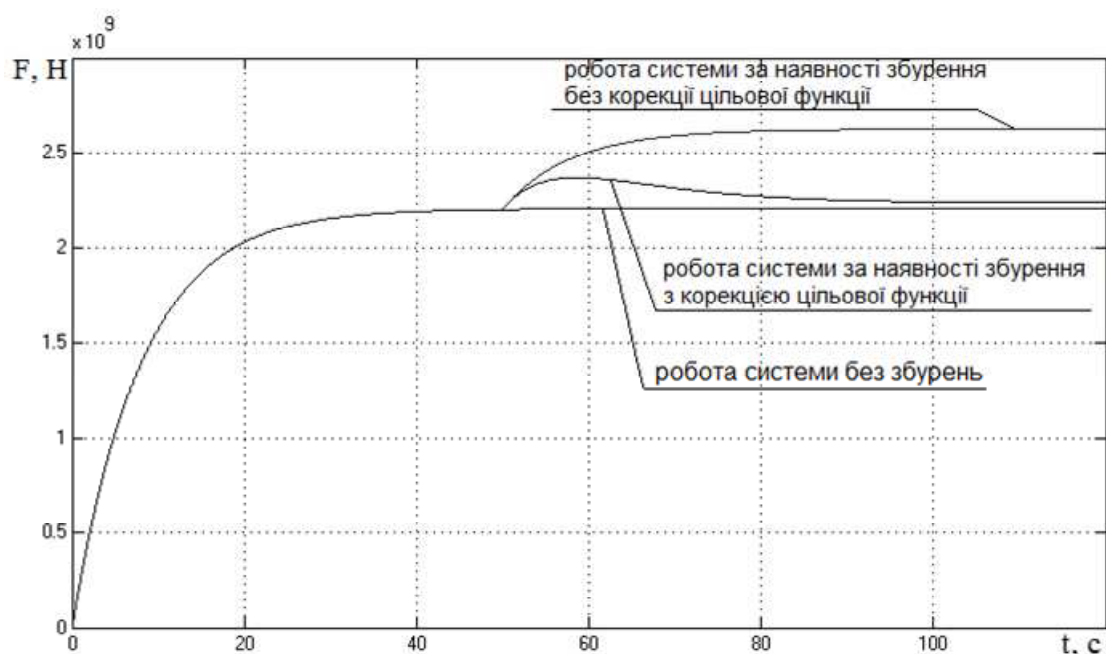


Рисунок 4 – Перехідні функції за силою натягнення полоси (регулятор цільової функції пропорційний)

Аналізуючи перехідні функції, показані на рис.4, можна зазначити, що без збурень після закінчення монотонного переходного процесу система виходить на підтримання сталого натягнення полоси з силою $F = 2,2 \cdot 10^9$ Н. Коли на п'ятдесятій секунді починає діяти стале значення збурення, сила натягнення збільшується до $F_1 = 2,62 \cdot 10^9$ Н. За рахунок корекції цільової функції сила натягнення зменшується до $F_2 = 2,24 \cdot 10^9$ Н, тобто спостерігається статична похибка $\Delta F = 0,04 \cdot 10^9$ Н, обумовлена застосуванням пропорційного регулятора цільової функції.

На рис.5 наведено перехідні функції, що ілюструють зміну координат на виходах локальних електроприводів з дискретними часовими еквалайзерами при застосуванні еталонної моделі об'єкта керування з пропорційним регулятором цільової функції.

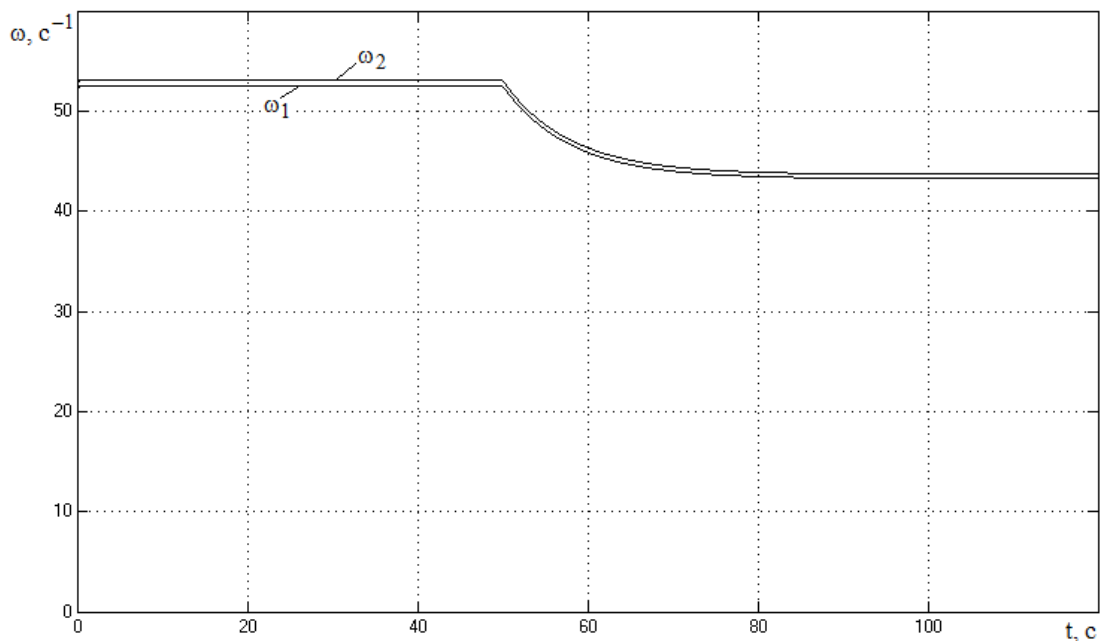


Рисунок 5 – Перехідні функції швидкостей обертання локальних електроприводів з дискретними часовими еквалайзерами

Застосуємо пропорційно-інтегральний регулятор значення цільової функції з передатною функцією

$$W_p(p) = 1 + \frac{0,0015}{p}.$$

Введення такого регулятора дозволить позбавитися від статичної похибки, котра спостерігається при застосуванні пропорційного регулятора (рис.4).

На рис.6 наведено модель автоматизованої електромеханічної системи із взаємозв'язаним керуванням, у котрій використано пропорційно-інтегральний регулятор з представленою вище передатною функцією $W_p(p)$. Результати роботи регулятора проілюстровано на рис.7 (залежності, зняті з блоку Scope2).

Аналізуючи перехідні функції, показані на рис.7, можна зазначити, що, як і в попередній моделі, без наявності збурень система монотонно виходить на підтримання сталого натягнення полоси з силою $F = 2,2 \cdot 10^9$ Н. Коли починає діяти стале значення збурення (на п'ятдесятій секунді), то сила натягнення збільшується до $F_1 = 2,62 \cdot 10^9$ Н. За рахунок корекції цільової функції сила натягнення зменшується до попереднього значення $F_2 = 2,2 \cdot 10^9$ Н, тобто статична похибка повністю усувається за рахунок застосування пропорційно-інтегрального регулятора цільової функції.

Висновки. Розглянутий підхід до побудування автоматизованих електромеханічних систем зі взаємозв'язаним керуванням дозволяє виконати представлення об'єкта у вигляді деякої багатокординатної цільової функції, причому кожна з координат цієї функції визначається окремим електроприводом зі своїм дискретним часовим еквалайзером. Перевагою такого підходу є локалізація електроприводів, які за допомогою дискретних еквалайзерів налаштовуються на власні динамічні та статичні показники якості

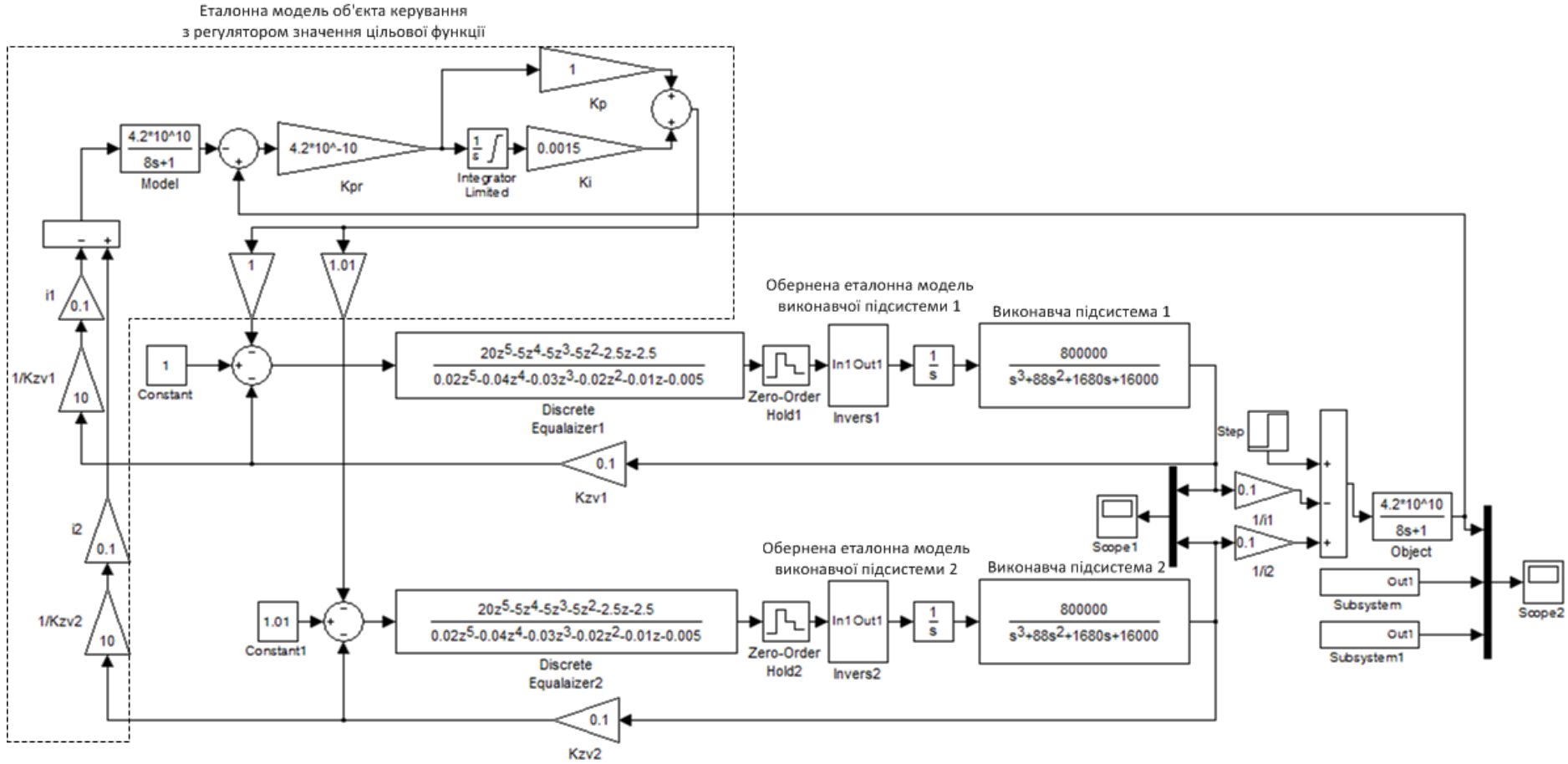


Рисунок 6 – Модель автоматизованої електромеханічної системи взаємозв'язаного керування, побудована із застосуванням дискретних часових еквайзерів (регулятор значення цільової функції пропорційно-інтегральний)

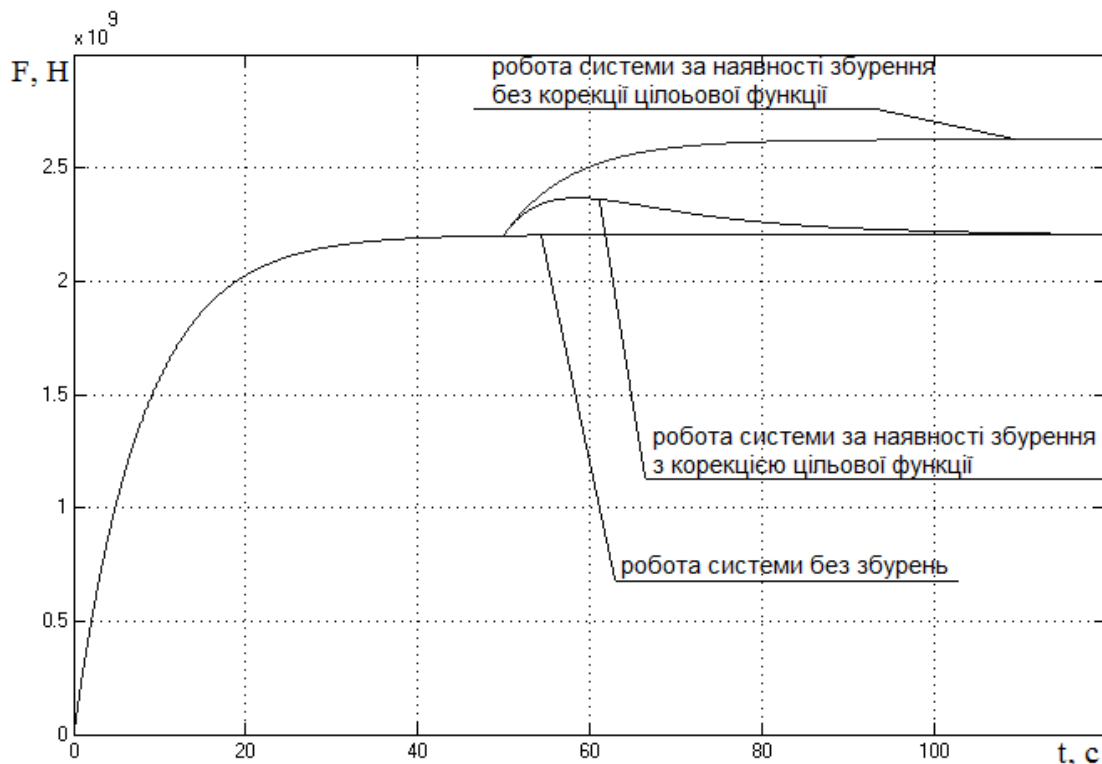


Рисунок 7 – Перехідні функції за силою натягнення полюси (регулятор цільової функції пропорційно-інтегральний)

незалежно від решти системи. Загалом, контроль за точністю відтворення цільової функції здійснюється еталонною моделлю з регулятором цільової функції, який формує додаткове додатне або від’ємне завдання на входах локальних електроприводів.

Слід зазначити, що принципи керування у взаємозв’язаних системах суттєво залежать від самого об’єкта, тобто від того, яким чином пов’язані між собою координати цільової функції (за допомогою пружних зв’язків, в’язкостей, коефіцієнтів підсилення, інтеграторів тощо), тому для кожного окремого випадку потрібно визначати свій раціональний підхід щодо структури регуляторів цільової функції та врахування відхилення цільової функції від бажаного значення у налаштуваннях на роботу локальних електроприводів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Селиванов В.А. Системы управления электроприводами: уч. пос. / Селиванов В.А. – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2010. – 275с.
2. Иванов Г.М. Автоматизированный многодвигательный электропривод постоянного тока / Г.М.Иванов, Г.М.Левин, В.М.Хуторецкий. – М.: Энергия, 1978. – 160с.
3. Садовой О.В. Аналітичний синтез регуляторів за квантованою формою бажаної перехідної функції / О.В.Садовой, О.І.Шеремет // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). – Дніпродзержинськ: ДДТУ. – 2010. – Випуск 1(14). – С.258-264.

Надійшла до редколегії 27.02.2014.