

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

М. Я. ХЛОПЕНКО, І. М. ХЛОПЕНКО

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до курсового проектування
"Структурний синтез робастних регуляторів"**

Рекомендовано Методичною радою НУК

Електронне видання
комбінованого використання на DVD-ROM



МИКОЛАЇВ • НУК • 2018

УДК 681.5(076)

X58

Автори: М. Я. Хлопенко, д-р техн. наук, проф.;

І. М. Хлопенко, магістрант

Рецензент А. А. Ставинський, д-р техн. наук, проф.

Хлопенко М. Я.

X58

Методичні вказівки до курсового проектування "Структурний синтез робастних регуляторів" / М. Я. Хлопенко, І. М. Хлопенко. – Миколаїв : НУК, 2018. – 32 с.

Розроблено для самостійного виконання курсового проекту "Структурний синтез робастних регуляторів" з дисципліни "Адаптивне та робастне керування" магістрантами, які навчаються за спеціалізацією "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод" спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка".

Призначено для викладачів вищих навчальних закладів, дипломників, студентів інших спеціальностей, інженерів та фахівців, які займаються проектуванням сучасних робастних систем керування.

УДК 681.5(076)

Навчальне видання

ХЛОПЕНКО Микола Якович
ХЛОПЕНКО Іван Миколайович

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до курсового проектування
"Структурний синтез робастних регуляторів"**

Редактор *С. А. Яременко*
Комп'ютерне верстання та складання *В. В. Москаленко*
Коректор *М. О. Паненко*

© Хлопенко М.Я., Хлопенко І.М., 2018

© Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, 2018

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 1.9. Об'єм даних 1141 кб.
Тираж 15 прим. Вид. № 39. Зам. № 28.

Видавець і виготовник Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54025
E-mail : publishing@nuos.edu.ua

Свідцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2506 від 25.05.2006 р.

1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Згідно з нормативними вимогами вищої школи та іншими законодавчими актами України з питань освіти курсові проекти виконуються з метою закріплення, поглиблення та узагальнення знань, одержаних магістрантами протягом навчання та їх застосування під час комплексного вирішення конкретного фахового завдання.

Рекомендації до курсового проектування визначають компетенцію й функціональні обов'язки структурних підрозділів та посадових осіб, залучених до процесу виконання курсових проектів, а також усі необхідні вимоги до виконання та оформлення курсових проектів.

1.1. Мета і завдання курсового проектування

Мета курсового проектування – набуття навичок розробки оптимальних робастних регуляторів для систем автоматичного керування електроприводів на основі сучасних технічних засобів та принципів їх побудови.

Курсовий проект є завершальним етапом вивчення дисципліни "Адаптивне та робастне керування". По його виконанню судять про вміння магістранта застосовувати набуті знання для структурного синтезу, моделювання, розрахунку

та проектування систем оптимального робастного керування електроприводів різного призначення, про знання ним сучасної елементної бази та технічних пристроїв автоматизації, про вміння раціонально компоувати, налагоджувати та експлуатувати системи автоматизації.

Курсовий проект повинен підготувати магістранта до вдосконалення існуючих та створення перспективних систем робастного керування і до виконання дипломного проекту за обраною спеціальністю. Тому студенту доцільно заздалегідь, до початку виконання курсового проекту вибрати такий напрямок, який дозволив би йому на основі отриманих знань і умінь розв'язати науково-дослідницьку задачу з робастного керування, яка була б корисною виробництву і використовувався в дипломному проектуванні.

Виконання курсового проекту має здійснюватися переважно на науково-дослідних і проектно-конструкторських матеріалах кафедри, в науково-дослідних інститутах і виробничих організаціях, які є базою виробничої практики, та виходити з реальних завдань, що стоять перед промисловістю.

1.2. Етапи курсового проектування

Оптимальні робастні регулятори, що проектуються, повинні відповідати заданим вимогам і забезпечувати якісне функціонування системи керування невизначеними об'єктами в експлуатаційних умовах. Проектування таких регуляторів для систем керування електроприводів включає в себе наступні етапи:

- *технічне завдання*, що містить опис системи керування невизначеного об'єкта та обґрунтування доцільності використання оптимальних робастних регуляторів для його керування, формування вимог до системи керування, технічні вимоги

до структурного синтезу та проектування робастних регуляторів, які впливають з вимог до невизначеного об'єкта автоматизації, а також орієнтовні оцінки витрат та очікуваного економічного ефекту;

- *технічна пропозиція*, що передбачає створення комплексу проектних документів, які містять технічні та техніко-економічні обґрунтування доцільності розробки документації на підставі аналізу технічного завдання та різних варіантів можливих рішень;

- *ескізне проектування*, що включає в себе сукупність проектних документів, в яких розроблені принципові рішення щодо технічного проектування оптимальних робастних регуляторів для системи керування невизначеним об'єктом; розробку макетів систем і відповідність вихідних параметрів макетних зразків вимогам технічного завдання;

- *технічне проектування*, що містить остаточні технічні рішення, які дають повне уявлення про пристрій розроблюваного виробу і вихідні дані для розробки робочої документації;

- *робоче проектування*, що передбачає створення робочої документації, яка призначена для виготовлення та випробування створеної робастної системи керування. До складу робочого проекту входять відкориговані та деталізовані креслення і схеми технічного проекту, монтажно-комутаційні схеми й установочні креслення, програми для ЕОМ, інструкції про налагодження та експлуатацію створеної робастної системи та інші матеріали;

- *створення та впровадження* систем робастного керування в промисловість є важливими стадіями розробки автоматичних систем керування, які виконуються у вигляді монтажних-налагоджувальних робіт і введення систем автоматизації в експлуатацію.

1.3. Тематика, зміст і обсяг курсового проектування

Тематика курсового проектування визначається кафедрою відповідно до змісту дисципліни.

Курсове проектування включає в себе основні види робіт, які виконують проектні організації на стадії технічного проекту. Курсовий проект закріплює теоретичні знання магістранта з навчальної дисципліни "Адаптивне та робастне керування", знайомить його з вимогами до оформлення проектів відповідно до державних стандартів. В процесі виконання проекту студент повинен удосконалити свої навички користування науково-технічною літературою, довідниками, ДСТУ та іншими нормативними документами.

У ролі тем для курсового проектування пропонуються теми з робастного керування електроприводами верстатів, судових кранів, компресорів, конвеєрних ліній, роботів та робототехнічних комплексів, холодного і гарячого водопостачання та ін. Дані для проектування автоматичних систем підбираються студентами під час проходження виробничої практики і визначаються особливостями технологічного процесу. Об'єктом курсового проекту може також бути частина держдоговірних та держбюджетних робіт, які виконуються за науковими напрямками кафедри, що узгоджуються зі змістом дисципліни.

Курсовий проект містить текстову частину, яка наводить-ся в розрахунково-пояснювальній записці (РПЗ), та графічну частину.

Обсяг РПЗ визначається кількістю годин самостійної роботи студента (СРС), які виділяються навчальним планом дисципліни на курсовий проект. Для 15 годин СРС він не перевищує 25–35 сторінок формату А4 (210×297) текстової частини з рамками основного напису за ГОСТ 2.105-95 та ГОСТ 2.104-2006 [1, 2].

Розрахунково-пояснювальна записка оформлюється згідно ГОСТ 2.105-95 [1]. Для позначення фізичних величин слід дотримуватися ГОСТ 8.417-2002 [3]. Графічна частина виконується на двох аркушах формату А4 або А3. Перший аркуш повинен містити креслення електричної принципової схеми робастного регулятора, а другий – функціональну схему системи робастного керування об'єктом. До електричної принципової схеми додається специфікація на окремому аркуші формату А4. Креслення і специфікацію слід розмішувати в кінці РПЗ.

Магістрант несе особисту відповідальність за прийняті в роботі рішення і правильність виконання текстової та графічної частини курсового проекту.

Розрахунково-пояснювальна записка курсового проекту повинна складатися з наступних розділів: титульного аркуша, завдання на проектування, реферату українською і англійською мовами, змісту, вступу, основної частини, висновку до виконаного проекту, списку використаних джерел, додатків. При виконанні типових завдань курсового проекту за однією схемою об'єкта, але з різними числовими вхідними даними, текст пояснювальної записки не повинен повторюватись (електронний трафарет).

Титульний аркуш є першою сторінкою розрахунково-пояснювальної записки і служить основним джерелом інформації. Він оформлюється за формою, встановленою навчальним закладом.

Завдання на курсове проектування видається магістранту згідно з діючою робочою програмою з підписом керівника проекту, а в окремих випадках також і з підписом завідувача кафедрою при затвердженні на засіданні кафедри. Згідно зі змістом дисципліни магістрант має право самостійно запропонувати тему з обґрунтуванням тематики, яка затверджується

на засіданні кафедри. В окремих випадках завдання на курсовий проект може передбачати виконання дослідного зразка, що зумовлюється індивідуальним завданням на курсовий проект. При цьому обсяг та зміст пояснювальної записки визначається за згодою керівника та магістранта і також затверджується на засіданні кафедри.

Реферат призначається для загального ознайомлення з курсовим проектом і повинен містити короткі відомості про зміст розділів курсового проекту в цілому. Текст реферату викладається в такій послідовності: відомості про обсяг курсового проекту; об'єкт розробки чи дослідження; основні конструктивні, технологічні та техніко-експлуатаційні характеристики і показники; рекомендації до використання виконаних розробок та галузі застосування; економічна ефективність; значення роботи і короткі висновки. Обсяг реферату не повинен перевищувати 500 символів, і він має розміщуватися на одній сторінці формату А4.

Зміст розташовують безпосередньо після реферату, починаючи з нової сторінки. У розрахунково-пояснювальній записці зміст включає в себе:

- вступ;
- послідовне перерахування найменувань усіх розділів і підрозділів, пунктів і підпунктів, якщо вони мають заголовки;
- висновки до виконаної роботи;
- список використаних джерел;
- додатки.

У **вступі** коротко викладають результати виконаних проектних робіт, що необхідні та достатні для розкриття сутності курсового проекту.

Текст вступу не розділяють на підрозділи та пункти, і він повинен розкривати зміст виконаних робіт за такими розділами основної частини проекту:

а) *технологічна частина*:

- загальні відомості про невизначений об'єкт;
- аналіз складу невизначеного об'єкта, виявлення керу-ваних частин;
- опис роботи об'єкта;
- мета і задачі курсового проектування;

б) *проектна частина*:

- обґрунтування та вибір системи робастного керування невизначеним об'єктом, складу принципів проектних рішень і методів їх реалізації;
- результати виконаних розрахунків, досліджень і експериментів;

в) *конструкторська частина*:

- склад, принципи розробки та призначення розробле-них конструкторських документів;
- основні функції керування та їх реалізація;

г) *актуальність виконаної роботи*:

- оцінка отриманих результатів курсового проектування з урахуванням повноти розв'язання поставлених задач;
- передбачувані галузі використання результатів курсово-го проекту.

Вступ розміщують на окремому аркуші або на аркушах (не більше двох).

Розділи розрахунково-пояснювальної записки курсово-го проекту складають у вигляді тексту, ілюстрацій, таблиць або їх сполучень та оформлюють, як було зазначено вище, згідно з вимогами [1]. Сторінки РПЗ нумерують арабськими цифрами, дотримуючись прохідної нумерації по всьому тек-сту. Титульну сторінку й аркуші завдання на курсове проекту-вання включають у загальну нумерацію сторінок. Номер сто-рінки на таких аркушах не проставляють. Ілюстрації і таблиці, розташовані на окремих аркушах, включають у загальну ну-мерацію сторінок РПЗ.

Список використаних джерел слід розмішувати одним із таких способів: у порядку появи посилань у тексті, в алфавітному порядку прізвищ перших авторів або заголовків, у хронологічному порядку. При цьому посилання на джерело позначають цифрою і наводять у тексті в квадратних дужках.

Бібліографічний опис джерел складають відповідно до вимог стандарту [4].

В **додатки** доцільно включати допоміжний матеріал, необхідний для повноти сприйняття курсового проекту: проміжні математичні доведення, формули і розрахунки; таблиці допоміжних цифрових даних; протоколи й акти випробувань, впровадження, розрахунки економічного ефекту, інструкції та методики, описи алгоритмів і програм розв'язання задач на ПК, які розроблені в процесі курсового проектування; ілюстрації допоміжного характеру.

2. ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ ЧАСТИНИ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ

Даний розділ присвячений структурному синтезу оптимального робастного регулятора потокозчеплення ротора системи векторного керування. Він дає студенту загальне уявлення про такий синтез і може бути корисним при розрахунках передавальних функцій оптимальних робастних регуляторів та їх декомпозиції на простіші ланки. Тому в процесі виконання курсового проекту магістрант повинен дотримуватися послідовності змісту завдання при оформленні текстової частини розрахунково-пояснювальної записки.

2.1. Вступ

Посилення вимог до якості функціонування систем векторного керування асинхронних електроприводів в умовах невизначеності призводить до необхідності стабілізації потокозчеплення ротора. При цьому істотне значення має задача структурного синтезу стабілізуючого робастного регулятора. Однак такий регулятор зазвичай має високий порядок, що ускладнює його використання в системах векторного керування. Декомпозиція робастного регулятора на найпростіші ланки дозволяє позбутися цього недоліку [5]. Її суть полягає

в поданні регулятора у вигляді структури, що складається з типових ланок. Для створення регулятора з таких ланок існує елементна база. Реалізація регулятора на основі цієї бази дозволяє стабілізувати потокозчеплення ротора, а також провести модернізацію систем керування, що знаходяться в експлуатації, з невеликими фінансовими витратами.

Метою курсового проектування є структурний синтез та проектування стабілізуючого робастного регулятора потокозчеплення ротора системи векторного керування асинхронного електропривода.

2.2. Структурний синтез і результати досліджень робастного регулятора

На рис. 2.1 представлена структурна схема каналу потокозчеплення ротора в просторі сигналів "вхід-вихід", що включає в себе передавальні функції перетворювача частоти та обмоток статора 1 і ротора 2 асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором.

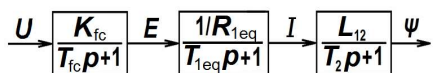


Рис. 2.1. Структурна схема каналу потокозчеплення ротора

У цій схемі за невизначені параметри, найбільш чутливі до змін моделі об'єкта, були обрані коефіцієнт підсилення перетворювача частоти K_{fc} , еквівалентний активний R_{1eq} і активний R_2 опори, індуктивності L_1 , L_2 і взаємна індуктивність L_{12} обмоток статора 1 і ротора 2, причому $R_{1eq} = R_1 + (k_2)^2 R_2$ (R_1 – активний опір); $k_2 = L_{12} / L_2$.

Перейдемо від структурної схеми до рівнянь стану в нормальній операторній формі

$$\begin{aligned}
 pE &= -\frac{1}{T_{fc}} E + \frac{K_{fc}}{T_{fc}} U; & pI &= -\frac{1}{T_{leq}} I + \frac{1}{R_{leq} T_{leq}} E; \\
 p\Psi &= -\frac{1}{T_2} \Psi + \frac{L_{12}}{T_2} I,
 \end{aligned} \tag{1}$$

де p – оператор Лапласа; E – ЕРС перетворювача частоти; U – керуючий вплив (проекція вектора напруги живлення статора на напрямок вектора потокозчеплення ротора); I – сила струму в каналі потокозчеплення ротора; T_{fc} – постійна часу перетворювача частоти; $T_{leq} = L_{leq}/R_{leq}$ – електромагнітна постійна часу обмотки статора; $L_{leq} = \sigma L_1$ – її еквівалентна індуктивність; Ψ – модуль вектора потокозчеплення ротора; $T_2 = L_2/R_2$ – електромагнітна постійна часу обмотки ротора; $\sigma = 1 - (L_{12})^2/(L_1 L_2)$ – коефіцієнт розсіювання магнітного поля.

Коефіцієнти k_2 і σ приймаються постійними.

Введемо безрозмірні величини

$$x_1 = \frac{\Psi}{\Psi_n}; \quad x_2 = \frac{I}{I_n}; \quad x_3 = \frac{E}{E_n}; \quad u = \frac{U}{U_n}, \tag{2}$$

де n – індекс номінальних величин.

Перейдемо в рівняннях (1) до безрозмірних величин (2):

$$\begin{aligned}
 px_1 &= -\frac{1}{T_2} x_1 + \frac{L_{12} I_n}{T_2 \Psi_n} x_2; & px_2 &= -\frac{1}{T_{leq}} x_2 + \frac{E_n}{R_{leq} T_{leq} I_n} x_3; \\
 px_3 &= -\frac{1}{T_{fc}} x_3 + \frac{K_{fc} U_n}{T_{fc} E_n} u.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Скориставшись рівняннями (3), побудуємо структурну схему системи в просторі станів (рис. 2.2).

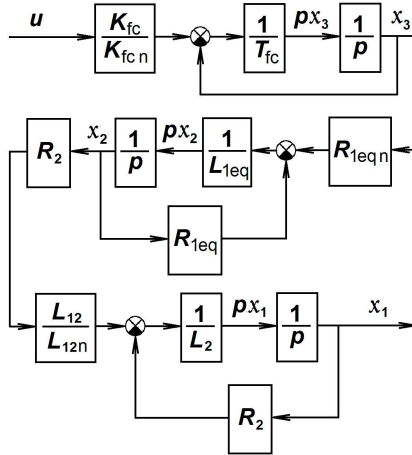


Рис. 2.2. Структурна схема каналу потокозчеплення ротора в просторі станів

Припустимо, що невизначені параметри системи K_{fc} , R_{1eq} , R_2 , L_1 , L_2 і L_{12} змінюються в інтервалах

$$\begin{aligned} K_{fc} &= K_{fc n}(1 + p_{K_{fc}} \delta_{K_{fc}}); & R_{1eq} &= R_{1eq n}(1 + p_{R_{1eq}} \delta_{R_{1eq}}); \\ R_2 &= R_{2n}(1 + p_{R_2} \delta_{R_2}); & L_{1eq} &= L_{1eq n}(1 + p_{L_{1eq}} \delta_{L_{1eq}}); \\ L_2 &= L_{2n}(1 + p_{L_2} \delta_{L_2}); & L_{12} &= L_{12n}(1 + p_{L_{12}} \delta_{L_{12}}), \end{aligned} \quad (4)$$

де $p_{K_{fc}}$, $p_{R_{1eq}}$, p_{R_2} , $p_{L_{1eq}}$, p_{L_2} , $p_{L_{12}}$ – коефіцієнти відхилень відносних значень невизначених параметрів $\delta_{K_{fc}}$, $\delta_{R_{1eq}}$, δ_{R_2} , $\delta_{L_{1eq}}$, δ_{L_2} і $\delta_{L_{12}}$.

Замінімо кожен з параметрів (4), представлених на рис. 2.2, структурною схемою. В результаті отримаємо структурну схему системи з параметричною невизначеністю (рис. 2.3).

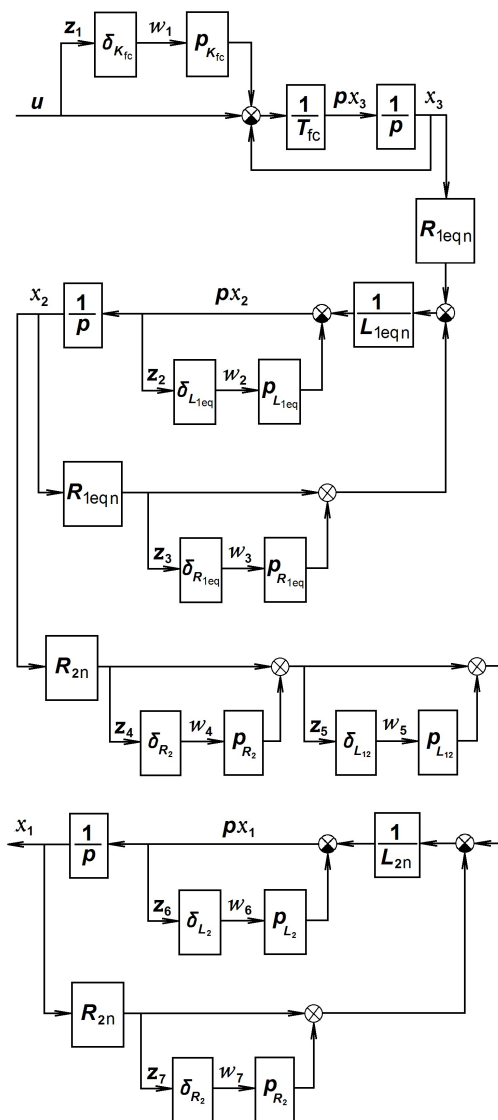


Рис. 2.3. Структурна схема каналу потокозчеплення ротора з невизначеними параметрами

Перейдемо від цієї структурної схеми до векторних рівнянь стану в операторній формі

$$\begin{aligned} px &= Ax + B_1w + B_2u; \quad z = C_1x + D_{11}w + D_{12}u; \\ y &= C_2x + D_{21}w + D_{22}u. \end{aligned} \quad (5)$$

Наведені у формулах (5) матриці описуються виразами

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} -\frac{R_{2n}}{L_{2n}} & \frac{R_{2n}}{L_{2n}} & 0 \\ 0 & -\frac{R_{1eqn}}{L_{1eqn}} & \frac{R_{1eqn}}{L_{1eqn}} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_{fc}} \end{bmatrix}; \\ B_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{pR_2}{L_{2n}} & \frac{pL_{12}}{L_{2n}} & 0 & -\frac{pR_2}{L_{2n}} \\ 0 & -pL_{1eq} & -\frac{pR_{1eq}}{L_{1eqn}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{pK_{fc}}{T_{fc}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \\ C_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_{1eqn}}{L_{1eqn}} & \frac{R_{1eqn}}{L_{1eqn}} \\ 0 & R_{1eqn} & 0 \\ 0 & R_{2n} & 0 \\ 0 & R_{2n} & 0 \\ -\frac{R_{2n}}{L_{2n}} & \frac{R_{2n}}{L_{2n}} & 0 \\ R_{2n} & 0 & 0 \end{bmatrix}; \end{aligned}$$

$$D_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -p_{L_{1eq}} & -\frac{p_{R_{1eq}}}{L_{1eqn}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{R_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{p_{R_2}}{L_{2n}} & \frac{p_{L_{12}}}{L_{2n}} & 0 & -\frac{p_{R_2}}{L_{2n}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$B_2^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{T_{fc}} \end{bmatrix}; \quad C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$D_{12}^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$D_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad D_{22} = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix},$$

де $x = (x_1, x_2, x_3)^T$ – фазовий вектор; y – одинірний вектор виходу, за яким замикається зворотний зв'язок; $z = (z_1, z_2, \dots, z_7)^T$, $w = (w_1, w_2, \dots, w_7)^T$ – відповідно вхідний і вихідний вектори невизначеності, представлені на рис. 2.3.

Отриманим рівнянням (5) відповідає матрична передавальна функція $P(p)$, яка в загальноприйнятій формі має вигляд (6)

$$P(p) = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Вона містить відомі елементи і не містить невизначеності. Матрична передавальна функція, яка містить невизначеність, має вигляд (7)

$$\Delta(p) = \begin{bmatrix} \delta_{K_{fc}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \delta_{L_{1eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \delta_{R_{1eq}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \delta_{R_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \delta_{L_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \delta_{L_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \delta_{R_2} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Вона визначає зв'язок вектора $w(p)$ з вектором $z(p)$. Цей зв'язок описується матричним виразом $w(p) = \Delta(p) \cdot z(p)$, який відображає систему рівнянь (8)

$$\begin{aligned} w_1 &= \delta_{K_{fc}} z_1; \quad w_2 = \delta_{L_{1eq}} z_2; \quad w_3 = \delta_{R_{1eq}} z_3; \\ w_4 &= \delta_{R_2} z_4; \quad w_5 = \delta_{L_{12}} z_5; \quad w_6 = \delta_{L_2} z_6; \quad w_7 = \delta_{R_2} z_7. \end{aligned} \quad (8)$$

Ця система рівнянь отримана на основі рис. 2.3.

Таким чином, побудована математична модель каналу потокозчеплення ротора в просторі станів з параметричною невизначеністю.

Синтез оптимального стабілізуючого регулятора $K(p)$ проводився методом змішаної чутливості для об'єкта $P(p)$ з невизначеністю $\Delta(p)$. Структурна схема об'єкта $P(p)$ з невизначеністю $\Delta(p)$ і регулятором $K(p)$ представлена на рис. 2.4.

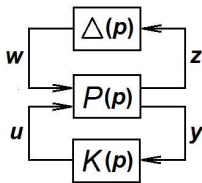


Рис. 2.4. Структурна схема об'єкта $P(p)$ з невизначеністю $\Delta(p)$ і регулятором $K(p)$

Чисельний розв'язок проводився в середовищі MATLAB 12 при наступних значеннях вихідних даних: $T_{fc} = 0,001$ с, $R_{1n} = 2,65$ Ом, $R_{2n} = 2,0$ Ом, $L_{1n} = 0,186$ Гн, $L_{2n} = 0,189$ Гн; $L_{12n} = 0,179$ Гн, $\sigma = 0,0996$, відповідних асинхронному електроприводу з двигуном MDXMA100-32. Якість системи контролювалася за допомогою трьох вагових функцій [6], приєднаних до об'єкта $P(p)$. У процесі розв'язання отримана математична модель H_∞ -субоптимального робастного регулятора. Його урізана строго правильна передавальна функція $K(p)$ (при частоті настройки $\omega_0 = 46,6$ рад/с однієї з вагових функцій [6]) має вигляд

$$\frac{5,016 \cdot 10^5 (p^2 + 148,963p + 1,0612 \cdot 10^4)}{p^3 + 1,451 \cdot 10^4 p^2 + 1,262 \cdot 10^7 p + 3,532 \cdot 10^7}. \quad (9)$$

Використовуючи алгоритм давньогрецького математика Евкліда, розкладемо передавальну функцію (9) в ланцюговий дріб [7]

$$\frac{5,016 \cdot 10^5}{p + \frac{0,6963}{10^4} + \frac{1}{-19,7p + \frac{0,5709}{10^4} + \frac{1}{1256p + \frac{1}{r}}}}, \quad (10)$$

де $r = 0,2879 \cdot 10^{-3}$.

Структурна схема регулятора, що відповідає дробу (10), зображена на рис. 2.5. Вона складається з трьох інтегруючих і чотирьох пропорційних ланок.

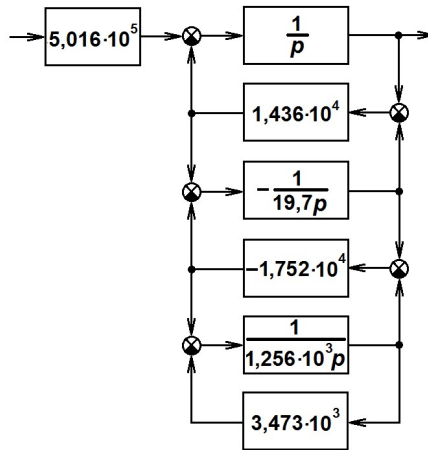


Рис. 2.5. Структурна схема H_∞ -субоптимального стабілізуючого робастного регулятора

На рис. 2.6 представлені криві (суцільні лінії), отримані при моделюванні перехідних процесів поточкозчеплення ротора в пакетах Robust Control Toolbox (рис. 2.6,*а*) і Simulink (рис. 2.6,*б*) при одиничній стрибкоподібній зміні задаючого впливу, причому крива на рис. 2.6,*б* побудована із залученням структурної схеми регулятора, зображеної на рис. 2.5. Як і слід було очікувати, обидві криві повністю збігаються на сталому режимі. На перехідному режимі вони дещо відрізняються між собою за характером і швидкістю протікання перехідних процесів і мають перерегулювання близько 25 %. Це перерегулювання легко усувається аперіодичною ланкою з передавальною функцією $1/(0,32p + 1)$, розташованою праворуч за задатчиком сигналу (штрихова лінія на рис. 2.6,*б*).

Аналогічні розрахунки проводилися при різноманітних поєднаннях невизначених параметрів, збільшених і зменшених у два рази. При цьому відхилень перехідних процесів від номінальних кривих не спостерігалось.

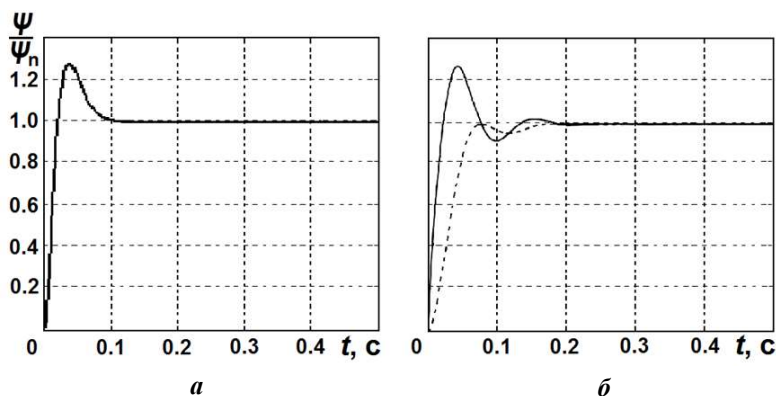


Рис. 2.6. Перехідні процеси потокозчеплення ротора в пакетах Robust Control Toolbox (*a*) та Simulink (*б*): штрихова лінія – перерегулювання 0 %; суцільна лінія – 25 %

Висновки

Запропоновано методику структурного синтезу стабілізуючого робастного регулятора потокозчеплення ротора, H_∞ -субоптимальна структурна схема якого представлена у вигляді з'єднання простіших інтегруючих і пропорційних ланок того ж порядку, що і регулятор із строго правильною передавальною функцією, і враховує параметричну невизначеність об'єкта керування.

Результати моделювання перехідних процесів у різних пакетах додатку MATLAB підтверджують адекватність і малу чутливість системи до параметричних збурень.

3. ПРОЕКТУВАННЯ РОБАСТНОГО РЕГУЛЯТОРА

Елементною базою для створення робастних регуляторів із інтегрувальних і пропорційних ланок та суматорів є операційні підсилювачі (ОП). Вони випускаються у вигляді монолітних інтегральних мікросхем. За своїми розмірами і ціною ОП майже не відрізняються від окремо взятого транзистора. Завдяки практично ідеальним характеристикам операційних підсилювачів реалізація схем на їх основі виявляється значно простішою, ніж на окремих транзисторах.

Для отримання пристроїв із заданими характеристиками на операційних підсилювачах потрібно не тільки вибрати ОП потрібного типу, але й врахувати його особливості в різних схемах вмикання і вміти аналізувати роботу пристрою в цілому. Цьому мають сприяти виведені основні співвідношення для різних типових ланок на операційних підсилювачах.

3.1. Зображення операційного підсилювача на принципових схемах

Згідно з ГОСТ 2.759-82 [8] позначення елементів аналогової техніки, до числа яких належить і ОП, виконують на основі прямокутника. Він може містити основне і одне або два додаткових поля, розташованих по обидві сторони від основного (рис. 3.1,*a*).

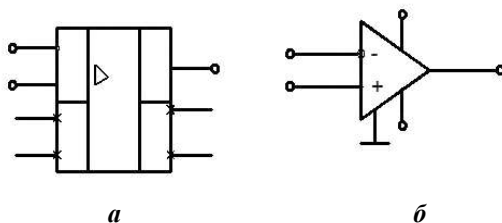


Рис. 3.1. Умовне графічне позначення ОП на схемах:
a – позначення ОП згідно з ГОСТ 2.759-82; ***б*** – позначення ОП,
широко розповсюджене в технічній літературі

На схемах підсилювач позначається трикутником на основному полі [8, 9].

Праворуч від цього трикутника вказують коефіцієнт підсилення, а зліва – додаткові функції, виконувані мікросхемою. Якщо конкретне значення коефіцієнта підсилення несуттєве, його допускається не вказувати (можна також вписати знак нескінченності – ∞).

Розмір прямокутника по ширині залежить від наявності додаткових полів і числа розміщених у них міток, що позначають функції елемента; по висоті – від числа виводів, інтервалів між ними і числа рядків інформації в основному та додаткових полях.

Для кращого розуміння і більшої наочності принципових схем в технічній літературі широко використовується спрощене позначення ОП у вигляді рівностороннього трикутника (див. рис. 3.1, ***б***).

Виводи ОП поділяються на входні, вихідні та виводи, які не несуть функціонального навантаження, до яких під'єднуються кола напруги живлення та елементи, що забезпечують нормальну роботу ОП (рис. 3.2).

Виводи з мітками *FC* використовуються для під'єднання кола, що коректує амплітудно-частотну характеристику ОП;

виводи *NC* – для підключення елементів балансування по постійному струму (установки нуля на виході), а вивід металевого корпусу ($\perp$) – для з'єднання з загальним проводом пристрою, до якого входить ОП.

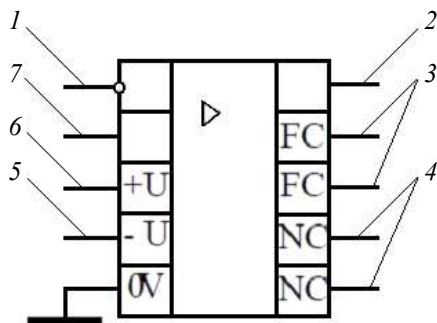


Рис. 3.2. Виводи операційного підсилювача:

1 – інвертуючий вхід; 2 – вихід; 3 – частотна корекція;
4 – балансування нуля; 5, 6 – живлення ОП; 7 – неінвертуючий вхід

Більшість ОП мають один несиметричний вихід і два входи, симетричних по відношенню до загального проводу.

Прямі входи і виходи позначають лініями, що приєднуються до контуру графічного зображення ОП без будь-яких знаків, а з кружками в місці приєднання – інверсні входи і виходи.

Прямий вхід ще називають неінвертуючим, оскільки фаза вихідного сигналу збігається з фазою сигналу, поданого на цей вхід.

Інший вхід називають інвертуючим, оскільки фаза вихідного сигналу зміщена на 180° щодо вхідного сигналу. Тому входи здійснюють на вихідну напругу рівну в кількісному відношенні, але протилежну за знаком впливу.

Якщо до входів прикладені синфазні сигнали, що діють одночасно, однакові за величиною і фазою відносно загального проводу, то їх вплив буде взаємно скомпенсовано. На вході та виході буде нульовий потенціал, завдяки чому параметри ОП мало чутливі до змін напруги живлення, температури й інших зовнішніх факторів.

Напруга на виході ОП має бути лише в тому випадку, коли на його входах діють різні за рівнем і фазою сигнали.

Вихідна напруга пропорційна різниці рівнів сигналів, що називається диференціальним сигналом.

Вихідна напруга ОП вимірюється відносно загального проводу. Загальний провід, який грає роль сигнального виводу, допускається не показувати на схемах.

Вихідний вивід ОП в більшості випадків приєднується до навантаження, яке, як правило, з'єднується з корпусом, але ця умова дотримується не завжди.

Для того щоб забезпечити можливість роботи ОП як з додатними, так і з від'ємними вхідними сигналами, потрібна двополярна напруга живлення. Для цього необхідно застосувати два джерела постійної напруги, які підключаються до відповідних виводів ОП. Якщо живлячих напруг декілька, їх умовно нумерують (ЕП1, ЕП2) і вказують кожен біля свого виводу в додатковому полі. Замість букви можна вказувати номінальне значення напруги та її полярність (виводи з мітками $+15$ і -15 В, див. рис. 3.2).

При двополярному живленні постійна напруга на несиметричному виході відсутня за умови, що постійних напруг на вході ОП немає. Напруги джерела живлення можуть бути ± 15 , ± 12 і ± 6 В згідно з ГОСТ 17230-71 [10]. Відомі ОП, розраховані на роботу від джерела з напругою живлення ± 27 В. Деякі типи ОП зберігають працездатність при зниженні напруги живлення до 3 В. Рідше зустрічається несиметрична ($+12$ і -6 В) і однополярна напруга живлення.

В даний час номенклатура ОП налічує сотні найменувань.

Операційні підсилювачі випускаються в малогабаритних корпусах і дуже дешеві, що сприяє їх масовому поширенню. Корпуси бувають металоскляними, металокерамічними, керамічними та пластмасовими. Кожен металоскляний, металокерамічний і керамічний корпус має кришку і рамку виводів, а пластмасовий корпус виготовляється обпресуванням кристалу і рамок виводів.

Виводи корпусів нумеруються проти годинникової стрілки, якщо дивитися з боку кришки. Для визначення початку відліку (вивід 1) існує ключ: біля круглого металевого корпусу – вушко, біля пластмасового корпусу – кругла мітка, біля керамічного – виріз на корпусі.

3.2. Параметри статичних і динамічних властивостей операційних підсилювачів

Статичні та динамічні властивості ОП характеризуються сукупністю електричних параметрів і характеристик [9]. У цій сукупності можна виділити кілька подібних за смисловим змістом груп параметрів.

Перша група відображає вихідну напругу спокою і його нестабільність, приведені до входу ОП, і включає в себе напругу зсуву, середній вхідний струм і різницю вхідних струмів, а також коефіцієнти впливу на ці параметри зміни температури, часу і нестабільність напруг джерел живлення.

Друга група характеризує підсилювальні властивості ОП для диференціальної та синфазної вхідної напруги в режимі "малого сигналу" та імітансні властивості та містить коефіцієнт підсилення по напрузі, коефіцієнт ослаблення синфазних вхідних напруг, вхідні опори для диференціальної і синфазної вхідних напруг, а також частотні та перехідні характеристики ОП.

У третю групу можна об'єднати параметри, що відображають поведінку ОП в режимі "великого сигналу". До них відносяться швидкість наростання вихідної напруги, гранична частота і частота одиничного підсилення.

Четверта група параметрів характеризує шумові властивості ОП і включає в себе нормовані ЕРС і струми шуму.

3.3. Креслення типових ланок на операційних підсилювачах для розробки принципової схеми робастного регулятора

Принципова схема робастного регулятора розробляється за структурною схемою (див. рис. 2.5) та правилами ГОСТ 2.702-2011 [11]. Вона складається з наступних операційних підсилювачів [9]:

- інвертуючий підсилювач (рис. 3.3) з передавальною функцією

$$W(p) = -R_2 / R_1;$$

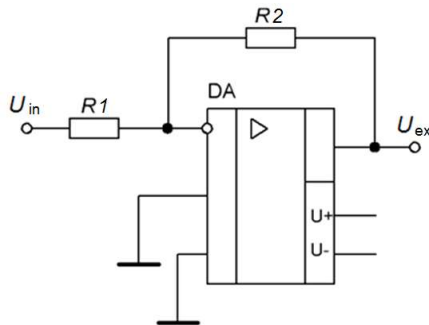


Рис. 3.3. Інвертуючий підсилювач

- неінвертуючий підсилювач (рис. 3.4) з передавальною функцією

$$W(p) = 1 + R_2 / R_1;$$

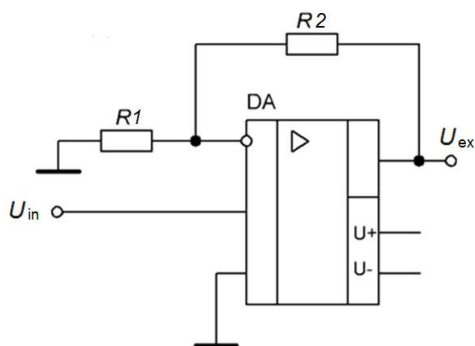


Рис. 3.4. Неінвертуючий підсилювач

- інтегруючий підсилювач (рис. 3.5) з передавальною функцією

$$W(p) = -1 / (RC);$$

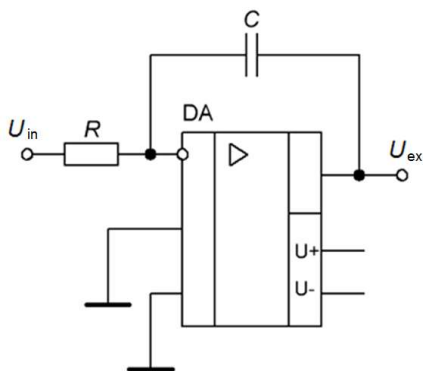


Рис. 3.5. Інтегруючий підсилювач

- суматор (рис. 3.6) з напругою

$$U_{\text{ex}} = U_{\text{in2}} - U_{\text{in1}} \text{ при } R_1 = R_2 = R_3 = R_4.$$

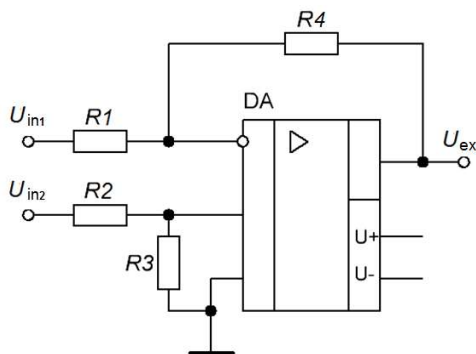


Рис. 3.6. Суматор

Ширина основного поля операційних підсилювачів повинна бути не менше 10, додаткових – не менше 5 мм (при більшій кількості знаків у мітках і позначенні функції елемента ці розміри відповідно збільшують), відстань між выводами – 5 мм, між выводом та горизонтальною стороною позначення (межею зони) – не менше 2,5 мм і кратним цій величині. При поділі груп выводів інтервалом величина останнього повинна бути не менше 10 і кратна 5 мм.

До принципової схеми на окремому аркуші додається перелік елементів за ГОСТ 2.701-2008 [12].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ*

1. ГОСТ 2.105-95 ЕСКД. Общие требования к текстовым документам. Минск, 2016. 31 с.
2. ГОСТ 2.104-2006 ЕСКД. Основные надписи. Москва, 2006. 20 с.
3. ГОСТ 8.417-2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин. Москва, 2003. 24 с.
4. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. Київ, 2016. 20 с.
5. Хлопенко Н.Я., Хлопенко И.Н. Структурный синтез стабилизирующего робастного регулятора потокосцепления ротора Електротехніка і електромеханіка. 2017. № 1. С.21–25. DOI: 10.20998/2074-272X.2017.1.04.
6. Richard Y., Chiang R., Michael G., Safonov M. MATLAB: Robust Control Toolbox. User's Guide. Version 2, 1998. 230 p. URL: <http://www.mathworks.com>.
7. Хинчин Д.Я. Цепные дроби. – Москва: Наука, 1978. – 112 с.
8. ГОСТ 2.759-82 ЕСКД. Обозначения условные графические. Элементы аналоговой техники. Москва, 1982. – 13 с.

* Список літератури оформлено згідно з ДСТУ 8302:2015

9. Мамий А.Р., Тлячев В.Б. Операционные усилители. – Майкоп: АГУ, 2005. – 192 с.

10. ГОСТ 17230-71. Микросхемы интегральные. Ряды питающих напряжений. Москва, 1972. 3 с.

11. ГОСТ 2.702-2011. ЕСКД. Правила выполнения электрических схем. Москва, 2011. 26 с.

12. ГОСТ 2.701-2008 ЕСКД. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению. Москва, 2009. 15 с.

ЗМІСТ

1. Загальні положення	3
1.1. Мета і завдання курсового проектування	3
1.2. Етапи курсового проектування	4
1.3. Тематика, зміст і обсяг курсового проектування	6
2. Приклад виконання розрахункової частини курсового проекту	11
2.1. Вступ	11
2.2. Структурний синтез і результати досліджень робастного регулятора	12
3. Проектування робастного регулятора	22
3.1. Зображення операційного підсилювача на принципових схемах	22
3.2. Параметри статичних і динамічних властивостей операційних підсилювачів	26
3.3. Креслення типових ланок на операційних підсилювачах для розробки принципової схеми робастного регулятора	27
Список літератури	30