

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ
МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ, ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА
КОМП'ЮТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ



МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ЩОДО ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ
З НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ
"СИСТЕМИ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ"
ДЛЯ СТУДЕНТІВ ЗАОЧНОЇ ФОРМИ НАВЧАННЯ ЗІ СПЕЦІАЛЬНОСТІ
6.092200 - "ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА
ЕЛЕКТРОПРИВОД"
(У ТОМУ ЧИСЛІ СКОРОЧЕНИЙ ТЕРМІН НАВЧАННЯ)

КРЕМЕНЧУК 2009

Методичні вказівки щодо виконання розрахунково-графічної роботи з дисципліни “Системи оптимального керування” для студентів заочної форми навчання зі спеціальності 6.092200 - “Електромеханічні системи автоматизації та електропривод” (у тому числі скорочений термін навчання)

Укладачі: к.т.н., доц. С.А. Сергієнко,
старш. викл. Ю.В. Зачепа,
асист. Н.В. Зачепа

Рецензент доц. А.П. Калінов

Кафедра САУЕ

Затверджено методичною радою КДПУ імені Михайла Остроградського
Протокол № ___ від _____ 2009р.

Заст. голови метод. ради _____ доц. С.А. Сергієнко

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Перелік завдань	
Завдання 1 Питання за курсом «Системи оптимального керування».....	5
Завдання 2 Розрахунок системи оптимального керування електроприводу ТП-Д на основі модифікованого принципу симетрії.....	7
Список літератури.....	21
Додаток А Паспортні дані двигунів.....	22

ВСТУП

Метою викладання дисципліни «Системи оптимального керування» (СОК) є вивчення методів, принципів побудови і дослідження оптимальних і адаптивних систем керування.

Задачею вивчення дисципліни є вивчення основних положень теорії оптимального керування, методів побудови оптимальних і адаптивних систем керування.

У результаті вивчення дисципліни студенти повинні знати математичні методи рішення задач оптимального керування, класифікацію і принципи побудови оптимальних і адаптивних систем, основи теорії оптимального керування, електроприводами постійного та змінного струму, що дозволяють при мінімальних витратах істотно підвищити продуктивність і швидкодію електродвигунів, а також повинні вміти математично описати систему з контурами оптимізації чи адаптації, обґрунтувати її застосування і виконати необхідні дослідження.

До виконання розрахунково-графічної роботи варто приступити тільки після вивчення відповідного теоретичного матеріалу. В об'єм розрахунково-графічної роботи входить написання конспекту з відповідями на питання курсу (завдання 1) та розрахунок системи оптимального керування (завдання 2).

При виконанні контрольних завдань необхідно пам'ятати, що відповіді на питання повинні бути вичерпними і не носити формального характеру. Відповіді варто ілюструвати графічними побудовами і схемами, що повинні бути виконані згідно вимог ЕСКД.

Номер варіанту вибирається за останніми двома цифрами номеру залікової книжки.

ПЕРЕЛІК ЗАВДАНЬ

ЗАВДАННЯ 1

Тема. Питання за курсом «Системи оптимального керування»

1. Структура і призначення САУ. Представлення математичної моделі ОУ в теорії оптимального керування. Рівняння і змінні стани. Простір стану. Траєкторія руху об'єкту. Природні та штучні обмеження.
2. Задача оптимального керування. Критерії оптимальності. Поняття спостережливості об'єктів керування. Класифікація задач оптимального керування.
3. Математичні методи рішення задач оптимального керування. Їх порівняльна характеристика. Рівняння Ейлера. Екстремалі. Квазіоптимальне керування.
4. Класичне варіаційне числення. Приклад.
5. Принцип Максимуму. Приклад.
6. Динамічне програмування. Приклад.
7. Аналітичне конструювання регуляторів.
8. Оптимальне керування позиційним електроприводом за мінімумом втрат у якорі при заданій програмі переміщення виконавчого механізму в повторно-короткочасному режимі роботи: без локальних обмежень, з обмеженням максимального струму, з обмеженням максимальної швидкості.
9. Оптимізація режиму розгону АД за мінімумом втрат у повторно-короткочасному режимі роботи при частотному керуванні.
10. Оптимізація режиму розгону АД за швидкодією в короткочасному режимі роботи при частотному керуванні.
11. Оптимальне керування АД при виконанні заданої програми переміщення в повторно-короткочасному режимі роботи з обмеженням за нагрівом при частотному керуванні.

12. Властивість симетрії систем автоматичного керування. Модифікований принцип симетрії.
13. Перетворення координат. Структурна реалізація алгоритмів керування в різних фазових просторах.
14. Релейні системи керування. Поняття ковзного режиму.
15. Адаптація й адаптивне керування. Структура САК при адаптивному керуванні. Класифікація адаптивних систем.
16. Система підпорядкованого регулювання з адаптивним контуром струму.
17. Система підпорядкованого регулювання з адаптивним контуром швидкості.
18. Класифікація самонастроювальних систем (аналітичні, пошукові, екстремальні) та їх характеристика.
19. Самонастроювальні системи із спостерігаючим пристроєм ідентифікації. Спостерігачі різних порядків.
20. Класифікація екстремальних систем. Приклади ЕС.

ЗАВДАННЯ 2

Тема. Розрахунок системи оптимального керування електроприводу ТП-Д на основі модифікованого принципу симетрії

Короткі теоретичні відомості

Вихідною точкою аналізу й синтезу будь-якої системи автоматичного управління є створення її математичного опису, тобто системи рівнянь, що характеризують залежності координат системи від зовнішніх впливів і одна від одної.

При описі лінійних чи лінеаризованих систем найбільше поширення дістало представлення системи у виді передатних функцій, матричних рівнянь, структурних схем, системи диференціальних рівнянь.

Розглянемо об'єкт керування, рух якого описується системою диференціальних рівнянь у формі Коші:

$$p x_k = f_k(x_1, \dots, x_n, u_1, \dots, u_j, t), \quad k = 1, \dots, n, \quad (1.1)$$

де x_1, \dots, x_n - перемінні стани об'єкта керування, сукупність яких утворює n -мірний вектор стану $x = (x_1, \dots, x_n)$; u_1, \dots, u_j - керуючі впливи, що утворюють j -мірний вектор керування $u = (u_1, \dots, u_j)$; f_k - відомі функції, визначені для будь-яких значень x і u , - безперервні і безперервно-диференційовані необхідну кількість раз по x , u і t ; $p = d/dt$ - оператор диференціювання.

Рішення системи (1) являє собою закон руху точки, що зображує, x у фазовому просторі, а шлях, описуваний цією точкою, траєкторію руху.

Якщо функції f_k розкласти в ряд Тейлора в околиці деякої точки x_1, \dots, x_n ; u_1, \dots, u_j і виключити нелінійні члени, то рівняння (1.1) у першій наближенні можна представити у вигляді:

$$p x_i = \sum_{k=1}^n c_{ik} x_k(t) + \sum_{r=1}^j s_{ir} u_{yr}(t), \quad i = 1, \dots, n, \quad j \leq n. \quad (1.2)$$

У самому загальному випадку коефіцієнти c_{ik} і s_{ir} є відомими чи випадковими функціями часу. Вони характеризують перемінні параметри електромеханічної системи, до яких відносяться сталі часу, коефіцієнти

підсилення і т.п. Якщо зміна цих параметрів не виходить за межі діапазону, що допускає безаварійну роботу електромеханічної системи, то при синтезі систем управління ці коефіцієнти можуть бути прийняті постійними і відповідними номінальним параметрам об'єкта керування, тому що такі зміни не приводять до порушення стабільності керованого руху.

Керуючий вплив u_r при подальшому розгляді беруть скалярною функцією, тобто електромеханічна система розглядається як одноз'язаний об'єкт з одним входом, на який подається один сигнал керування. Тоді рівняння (1.2) буде мати вигляд:

$$p x_i = \sum_{k=1}^n c_{ik} x_k + s_n u_{yn}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (1.3)$$

Коефіцієнти c_{ik} , s_n – визначаються параметрами силової частини електропривода і мають відповідні розмірності. Це робить систему (1.3) розмірної і вносить визначених труднощів у процедури синтезу і дослідження систем керування. Шляхом уведення відносних значень залежних і незалежних перемінні системи:

$$y_i = \frac{x_i}{x_{im}}, \quad u = \frac{u_{yn}}{u_{ym}}, \quad (1.4)$$

система (1.3) приводиться до безрозмірної форми:

$$p y_i = \sum_{k=1}^n b_{ik} y_k + m_n u, \quad i = 1, \dots, n. \quad (1.5)$$

Раціональний вибір базових значень x_{im} і u_{ym} у (1.4) дозволяє максимально спростити вирази для коефіцієнтів:

$$b_{ik} = c_{ik} \frac{x_{km}}{x_{im}}, \quad m_n = s_n \frac{u_{ym}}{x_{nm}},$$

які завжди мають розмірність $1/c$.

У теорії оптимального керування використовується концепція збуреного-незбуреного руху. Серед усіх траєкторій руху системи (1.5) завжди можна виділити шуканий рух

$$y^* = (y_1^*, \dots, y_n^*), \quad (1.6)$$

яке додається об'єкту керування бажаним (програмним) керуванням u^* .

Такий рух називається незбуреним. При синтезі систем оптимального керування варто розглядати тільки такі бажані траєкторії руху, що фізично можуть бути реалізовані. Рух точки, що зображує, по фізично реалізованій траєкторії буде стійким. Реальний рух завжди відрізняється від бажаного з ряду причин (нестабільність параметрів об'єкта керування, неточна інформація про зовнішні збурень, що діють на систему тощо)

Концепція збуреного-незбуреного руху зв'язує усталеність рішення системи (1.5) з можливістю досяжності бажаної траєкторії руху.

Реальний рух об'єкта керування відрізняється від бажаного на величину відхилення

$$\eta_i(t) = y_i(t) - y_i^*(t), \quad i = 1, \dots, n; \quad (1.7)$$

$$U(t) = u(t) - u^*(t). \quad (1.8)$$

Тоді система (1.13) у просторі відхилень прийме вид:

$$p\eta_i = \sum_{k=1}^n b_{ik} \eta_k + m_n U, \quad i = 1, \dots, n, \quad (1.9)$$

Система (1.9) називається системою диференціальних рівнянь збуреного руху, чи системою диференціальних рівнянь у відхиленнях. Слід зазначити, що фазові простори реального руху $y(t)$, бажаного руху $y^*(t)$ і збуреного руху $\eta(t)$ мають однакову розмірність.

У процесі структурно-алгоритмічного синтезу важлива роль приділяється раціональному вибору базису вектора стану об'єкта управління це дозволяє синтезувати закон управління різними структурними схемами, що відрізняються сполученням вимірюваних і спостерігаємих перемінних, складністю технічної реалізації і набором вимірників (датчиків), статичними властивостями і різним ступенем чутливості до параметричних і координатних збурень.

Для однозв'язної системи з одним керуючим впливом, до якого відноситься система електропривода, широко застосовуються рівняння

динаміки у формі Фробеніуса, коли окремі координати фазового простору відображають реальні перемінні стани об'єкта управління, а інші характеризують деякий фіктивний перемінні, обчислення яких дозволяє відновити повний вектор стану досліджуваного об'єкта.

Система диференціальних рівнянь, що описує динаміку об'єкта управління у формі Фробеніуса, має вид:

$$\begin{aligned} p\hat{\eta}_i &= \hat{\eta}_{i+1}; \quad (i = 1, \dots, n-1), \\ p\hat{\eta}_n &= \sum_{i=1}^n -a_i \hat{\eta}_i + M_n U, \end{aligned} \quad (1.10)$$

Дане вираження визначає простоту спостереження невимірюваних перемінні системи через вимірювані.

Якщо вважати, що координатні осі η_1, u и $\hat{\eta}_1, U$ систем (1.5) і (1.10) сполучені відповідно, тобто $\eta_1 = \hat{\eta}_1$ и $u = U$, то коефіцієнти a_i системи (1.10) обчислюються через коефіцієнти b_{ik} системи (1.5) у результаті рішення рівняння:

$$\begin{vmatrix} b_{11} - p & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} - p & \dots & b_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nn} - p \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -p & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -p & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -a_1 & -a_2 & -a_3 & \dots & -a_n - p \end{vmatrix}, \quad (1.11)$$

а коефіцієнт M_n - з рівняння:

$$\begin{vmatrix} 0 & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ 0 & b_{22} - p & \dots & b_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_n & b_{n2} & \dots & b_{nn} - p \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -p & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_n & -a_2 & -a_3 & \dots & -a_n - p \end{vmatrix}. \quad (1.12)$$

Якщо сполучені координатні осі з індексом 2, то коефіцієнти a_{ik} визначаються як рішення рівняння (1.11), а коефіцієнт M_n як рішення рівняння:

$$\begin{vmatrix} b_{11} - p & 0 & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & 0 & \dots & b_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n1} & m_n & \dots & b_{nn} - p \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -p & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -a_1 & M_n & -a_3 & \dots & -a_n - p \end{vmatrix}. \quad (1.13)$$

Аналогічно для інших змінних.

Розглянуті вище системи диференціальних рівнянь можуть бути використані для опису динаміки того самого об'єкта управління в різних фазових просторах перемінних.

У загальному вигляді задачу синтезу регулятора електромеханічної системи довільного порядку можна подати в наступній формі. Нехай рух об'єкта описується системою диференціальних рівнянь. Необхідно відшукати деякий керуючий вплив U , що забезпечує рух вихідної координати $y_i(t)$ системи згідно з деякою наперед заданою заданій наперед траєкторією $y_i^*(t)$, причому траєкторія $y_i^*(t)$ технічно досяжною. Тоді, визначаючи $y_i^*(t)$ як незбурений рух, задачу пошуку алгоритму керування можна сформулювати як пошук керуючого впливу U , що здійснює перехід системи з положення $\eta(0)$ в положення $\eta(\infty) = 0$. Отже, будь-яку задачу керування рухом можна розглядати як задачу пошуку оптимальної структури й параметрів закону керування, що стабілізує незбурений рух об'єкта керування.

Для об'єкта керування, динаміка якого описується системою диференціальних рівнянь збуреного руху у формі Коші (1.9) закон керування вигляду:

$$U_j = -\frac{m_n}{c_j} \sum_{i=0}^n v_{in}^j \eta_i = -\frac{g_j}{m_n} \sum_{i=0}^n v_{in}^j \eta_i \quad (1.14)$$

мінімізує інтегральний квадратичний функціонал якості Лєтова

$$J_j = \int_0^{\infty} \left(\frac{m_n^2}{c_j} \left(\sum_{i=0}^n v_{in}^j \eta_i \right)^2 + c_j U_j^2 \right) dt = \int_0^{\infty} \left(g_j \left(\sum_{i=0}^n v_{in}^j \eta_i \right)^2 + \frac{m_n^2}{g_j} U_j^2 \right) dt = \int_0^{\infty} \left(\sum_{i,k=0}^n w_{ik} \eta_i \eta_k + c_j U_j^2 \right) dt, \quad w_{ik} = w_{ki} \quad (1.15)$$

гарантуючи при цьому експонентний характер керованого руху регульованої змінної при ступеневій зміні впливу, що задає, і забезпечує замкнутій системі

астатичні властивості за рахунок наявності у своєму складі інтегральної

$$\eta_0 = \frac{1}{p} \eta_j \text{ складової.}$$

Коефіцієнти $v_{in}^j, v_{kn}^j, v_{nn}^j$, що входять до керуючого впливу (1.15), визначаються відповідно мінорами і-их, k-их, n-их елементів j-го стовпця визначника коефіцієнтів системи (1.9)

$$\Delta = \begin{vmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1(n-1)} & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2(n-1)} & b_{2n} \\ b_{i1} & b_{i2} & \dots & b_{i(n-1)} & b_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{n(n-1)} & b_{nn} \end{vmatrix}$$

за формулою

$$v_{in}^j = (-1)^{i+1} (-1)^{j+1} M_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (1.16)$$

Коефіцієнт v_{0n} при інтегральній складовій у законі керування

$$v_{0n} = (-1)^n \Delta \quad (1.17)$$

І не залежить від номера регульованої змінної.

Для об'єкта керування, динаміка якого описується системою диференціальних рівнянь збуреного руху у формі Фробеніуса (1.10) закон керування матиме вигляд:

$$U_j = -\frac{M_n}{c_j} \sum_{i=0}^n \hat{v}_{in} p^{i-j} \eta_j = -\frac{\hat{g}_j}{M_n} \sum_{i=0}^n \hat{v}_{in} p^{i-j} \eta_j \quad (1.18)$$

і гарантує аперіодичний перехідний процес переходу регульованої змінної з початкового положення в кінцеве в замкнутій астатичній системі, мінімізуючи при цьому інтегральний квадратичний функціонал Лєтова

$$\hat{J}_j = \int_0^{\infty} \left(\frac{M_n^2}{c_j} \left(\sum_{i=0}^n \hat{v}_{in} p^{i-j} \eta_j \right)^2 + c_j U_j^2 \right) dt = \int_0^{\infty} \left(\hat{g}_j \left(\sum_{i=0}^n \hat{v}_{in} p^{i-j} \eta_j \right)^2 + \frac{M_n^2}{\hat{g}_j} U_j^2 \right) dt = \quad (1.19)$$

$$\int_0^{\infty} \left(\sum_{i,k=0}^n \hat{w}_{ik} p^{i-j} \eta_j p^{k-j} \eta_j + c_j U_j^2 \right) dt = \int_0^{\infty} \left(\sum_{i,k=0}^n \hat{w}_{ik} \hat{\eta}_i \hat{\eta}_k + c_j U_j^2 \right) dt, \quad \hat{w}_{ik} = \hat{w}_{ki}$$

на траєкторіях руху системи (1.10).

У свою чергу коефіцієнти функції (1.18) пов'язані з параметрами об'єкта керування (1.10) співвідношеннями

$$\hat{v}_{ik} = a_{(i+1)} a_{(k+1)}, \quad (i, k = 0, 1, \dots, n). \quad (1.20)$$

Якщо у формулі (1.20) $i=n$ або $k=n$, то $a_{(i+1)}$ або $a_{(k+1)}$ набувають значень, що дорівнюють 1.

Структурно-алгоритмічний синтез контуру регулювання струму

Як об'єкт керування для подальшого синтезу й дослідження замкнутих систем керування прийнятий електропривод постійного струму із джерелом регульованої напруги в ланцюзі якоря (рис. 1). Робота електропривода розглядається при постійному магнітному потоці.

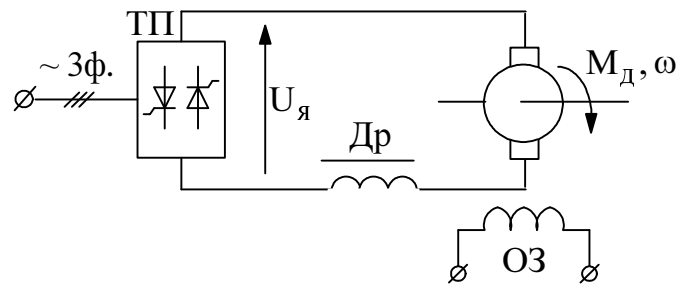


Рисунок 1 - Електрична схема системи ТП-Д

Система диференційних рівнянь, яка описує систему ТП-ДПС:

$$\begin{cases} p\omega_d = \frac{R_e}{k\Phi} \cdot \frac{1}{T_m} \cdot (i_d - i_c) \\ pi_d = -\frac{k\Phi \cdot \omega_d}{R_e \cdot T_e} - \frac{1}{T_e} \cdot i_d + \frac{1}{R_e \cdot T_e} \cdot E_n \\ pE_n = -\frac{1}{T_n} E_n + \frac{k_n}{T_n} \cdot U_y \end{cases} \quad (1.21)$$

де $p = \frac{d}{dt}$ - оператор диференціювання;

$T_m = \frac{JR_e}{k\Phi^2}$ - електромеханічна стала електроприводу;

$$T_e = \frac{L_e}{R_e} - \text{електромагнітна стала електроприводу};$$

$$L_e = L_{\text{я}} + L_{\text{др}} - \text{еквівалентна індуктивність системи ТП-ДПС};$$

$$R_e = R_{\text{я}} + R_{\text{др}} - \text{еквівалентний активний опір системи ТП-ДПС};$$

$$k_{\text{п}} = \frac{E_{\text{п}}}{U_{\text{кmax}}} - \text{коефіцієнт передачі ТП};$$

$E_{\text{п}} = 1.1 \cdot U_{\text{я}}$ - е.р.с. ТП на неробочому ході при максимальному значенні напруги керування $U_{\text{кmax}} = 10 \text{ В}$.

Системі диференційних рівнянь відповідає структурна схема, що наведена на мал. 2.

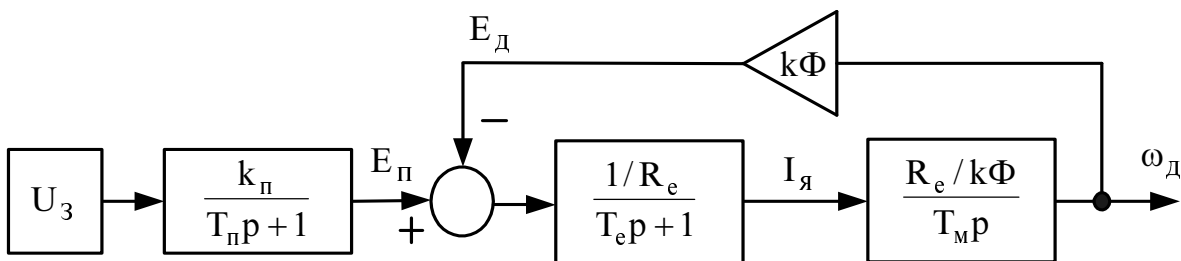


Рисунок 2 - Структурна схема системи ТП-Д

Для спрощення аналізу перехідних процесів у системі та подальшого синтезу системи керування доцільно перейти до відносних одиниць. Для похідної системи диференційних рівнянь, які описують систему ТП-Д (1.21) виконаємо нормування наступних величин:

$$y_1 = \frac{\omega_{\text{д}}}{\omega_{\text{дmax}}}; \quad y_2 = \frac{i_{\text{д}}}{i_{\text{дmax}}}; \quad y_3 = \frac{E_{\text{п}}}{E_{\text{пmax}}}; \quad u = \frac{U_{\text{к}}}{U_{\text{кmax}}},$$

де $\omega_{\text{дmax}} = \frac{E_{\text{пmax}}}{k\Phi}$ - максимальна швидкість обертання двигуна,

$i_{\text{дmax}} = \frac{E_{\text{пmax}}}{R_e}$ - максимально допустимий струм якоря двигуна,

$E_{\text{пmax}} = U_{\text{зmax}} \cdot k_{\text{п}}$ - максимальна напруга на виході перетворювача,

$U_{\text{кmax}} = 10 \text{ В}$ - максимальна напруга керування.

Тоді система диференціальних рівнянь у відхиленнях, що описують силову частину об'єкта керування, з урахуванням відносних одиниць набуде наступного вигляду:

$$\begin{cases} p\eta_1 = b_{12}\eta_2; \\ p\eta_2 = b_{21}\eta_1 + b_{22}\eta_2 + b_{23}\eta_3; \\ p\eta_3 = b_{33}\eta_3 + m_3U. \end{cases} \quad (1.22)$$

$$\text{де } b_{12} = \frac{1}{T_M}; \quad b_{21} = b_{22} = -\frac{1}{T_e}; \quad b_{23} = \frac{1}{T_e}; \quad b_{33} = -\frac{1}{T_{II}}; \quad m_3 = \frac{1}{T_{II}};$$

$\eta_n = y_n - y_n^*$ - відхилення фактичного значення координати y_n від її бажаного значення.

При синтезі контуру струму для об'єкта керування, що описаний системою диференціальних рівнянь у формі Коші (1.22), відповідно до (1.15) приймаємо інтегральний квадратичний функціонал якості:

$$J_2 = \int_0^{\infty} \left[g_2 \left(\frac{v_{03}}{p} \eta_2 + v_{13}\eta_1 + v_{23}\eta_2 + v_{33}\eta_3 \right)^2 + \frac{m_3^2}{g_2} U_2^2 \right] dt, \quad (1.23)$$

де g_2 - коефіцієнт підсилення розімкнутого контуру регулювання струму.

Оптимальне керування $U_2(\eta_1, \eta_2, \eta_3)$ регулятора струму, що мінімізує функціонал якості (1.23) на траєкторіях руху системи (1.22), за наявності обмеження

$$|U_2| \leq 1, \quad (1.24)$$

відповідно до виразу (1.14), визначається як:

$$U_2 = -\text{sat} \left[\frac{g_2}{m_3} \left(\frac{v_{03}}{p} \eta_2 + v_{13}\eta_1 + v_{23}\eta_2 + v_{33}\eta_3 \right) \right]; \quad (1.25)$$

де v_{i3} , ($i = 0, \dots, 3$) - коефіцієнти функції Ляпунова при $n=3$, що обчислюються з визначника коефіцієнтів системи (1.22) відповідно до виразів (1.16), (1.17) і рівні:

$$v_{03} = b_{12}b_{21}b_{33}; \quad v_{13} = -b_{21}b_{33}; \quad v_{23} = 0; \quad v_{33} = 0. \quad (1.26)$$

Тоді, підставивши значення v_{i3} , ($i = 0, \dots, 3$) в (1.25), одержимо оптимальне керування для фазового простору збуреного руху:

$$U_2 = -\text{sat} \left[\left(\frac{\lambda_{20}}{p} \eta_2 + \lambda_{21} \eta_1 \right) \right], \quad (1.27)$$

де $\lambda_{20} = \frac{g_2 b_{12} b_{21} b_{33}}{m_3}$; $\lambda_{21} = \frac{g_2 (-b_{21} b_{33})}{m_3}$.

Алгоритм (1.27) може бути реалізований у системі зі змішаною послідовно-паралельною корекцією.

Перетворимо систему (1.22) до форми Фробеніуса:

$$\begin{cases} p\hat{\eta}_1 = \hat{\eta}_2; \\ p\hat{\eta}_2 = \hat{\eta}_3; \\ p\hat{\eta}_3 = -a_1\hat{\eta}_1 - a_2\hat{\eta}_2 - a_3\hat{\eta}_3 + M_3 U_2, \end{cases} \quad (1.28)$$

причому $\eta_2 = \hat{\eta}_2$.

Коефіцієнти a_i визначаються шляхом прирівнювання характеристичних визначників системи (1.22) і (1.28).

Тоді:

$$a_1 = b_{12} b_{21} b_{33}; a_2 = b_{22} b_{33} - b_{12} b_{21}; a_3 = -b_{22} - b_{33}, M_3 = m_3 b_{23}.$$

Визначимо оптимальне керування $U_2(\hat{\eta}_1, \hat{\eta}_2, \hat{\eta}_3)$ регулятора струму, що мінімізує на траєкторіях руху системи (1.28), при наявності обмеження (1.24), інтегральний квадратичний функціонал якості

$$\hat{J}_2 = \int_0^{\infty} \left[\hat{g}_2 (\hat{v}_{03} \hat{\eta}_0 + \hat{v}_{13} \hat{\eta}_1 + \hat{v}_{23} \hat{\eta}_2 + \hat{v}_{33} \hat{\eta}_3)^2 + \frac{M_3^2}{\hat{g}_2} U_2^2 \right] dt, \quad (1.29)$$

де $\hat{\eta}_0 = \frac{1}{p} \hat{\eta}_1 = \frac{1}{p^2} \hat{\eta}_2$.

Оптимальне керування відповідно до формули (1.18) варто шукати у вигляді:

$$U_2 = -\text{sat} \left[\frac{\hat{g}_2}{M_3} (\hat{v}_{03} \hat{\eta}_0 + \hat{v}_{13} \hat{\eta}_1 + \hat{v}_{23} \hat{\eta}_2 + \hat{v}_{33} \hat{\eta}_3) \right]; \quad (1.30)$$

або

$$U_2 = -\text{sat} \left[\frac{\hat{g}_2}{M_3} \left(\frac{\hat{v}_{03}}{p^2} + \frac{\hat{v}_{13}}{p} + \hat{v}_{23} + \hat{v}_{33}p \right) \hat{\eta}_2 \right];$$

де \hat{v}_{i3} , ($i = 0, \dots, 3$) - коефіцієнти функції Ляпунова при $n=3$, що визначаються відповідно до виразу (1.20)

$$\hat{v}_{03} = a_1, \hat{v}_{13} = a_2, \hat{v}_{23} = a_3, \hat{v}_{33} = 1. \quad (1.31)$$

У силу рівнянь (1.30), (1.31) одержимо алгоритм оптимального керування у функції помилки регулювання струму:

$$U_2(\eta_2) = -\text{sat} \left[\left(\frac{\alpha_{20}}{p^2} + \frac{\alpha_{21}}{p} + \alpha_{22} + \alpha_{23}p \right) \eta_2 \right], \quad (1.32)$$

$$\text{де } \alpha_{20} = \frac{\hat{g}_2 b_{12} b_{21} b_{33}}{m_3 b_{23}}; \quad \alpha_{21} = \frac{\hat{g}_2 (b_{22} b_{33} - b_{12} b_{21})}{m_3 b_{23}};$$

$$\alpha_{22} = \frac{\hat{g}_2 (-b_{22} - b_{33})}{m_3 b_{23}}; \quad \alpha_{23} = \frac{\hat{g}_2}{m_3 b_{23}}.$$

Алгоритм керування (1.32) реалізується ПІІ²Д регулятором. Складова І² забезпечує повну компенсацію диференціюю чого впливу внутрішнього зворотного зв'язку за проти-е.р.с. двигуна. Усунення цієї складової з закону керування приводить до появи статичної помилки стабілізації струму. Однак, при досить великому коефіцієнті підсилення \hat{g}_2 значенням помилки можна знехтувати, що дозволяє виключити складову І². Тоді закон керування набуде вигляду:

$$U_2(\eta_2) = -\text{sat} \left[\left(\frac{\alpha_{21}}{p} + \alpha_{22} + \alpha_{23}p \right) \eta_2 \right]. \quad (1.33)$$

При реалізації закону керування можна уникнути диференціювання відхилення струму від заданого рівня, якщо виразити складову $p\eta_2$ через інші координати обуреного руху в силу другого рівняння системи (1.22). Тоді алгоритми керування (1.32), (1.33) приймуть вигляд:

$$U_2(\eta) = -\text{sat} \left[\left(\frac{\delta_{20}^*}{p^2} + \frac{\delta_{20}}{p} + \delta_{22} \right) \eta_2 + \delta_{21} \eta_1 + \delta_{23} \eta_3 \right], \quad (1.34)$$

$$U_2(\eta) = -\text{sat} \left[\left(\frac{\delta_{20}}{p} + \delta_{22} \right) \eta_2 + \delta_{21} \eta_1 + \delta_{23} \eta_3 \right], \quad (1.35)$$

$$\text{де } \delta_{20}^* = \frac{\hat{g}_2 b_{12} b_{21} b_{33}}{m_3 b_{23}}; \quad \delta_{20} = \frac{\hat{g}_2 (b_{22} b_{33} - b_{12} b_{21})}{m_3 b_{23}};$$

$$\delta_{21} = \frac{\hat{g}_2 b_{21}}{m_3 b_{23}}; \quad \delta_{22} = \frac{\hat{g}_2 (-b_{33})}{m_3 b_{23}}; \quad \delta_{23} = \frac{\hat{g}_2}{m_3}.$$

Реалізація такого алгоритму керування ускладнена через необхідність знати бажану траєкторію руху об'єкта y_i^* за кожною координатою. У системах керування, побудованих за принципом підпорядкованого регулювання керуючий вплив, що подається на регулятор, можна вважати незмінним у часі. Прийняте допущення дозволяє перейти до алгоритмів управління вигляду:

$$U_2(y) = \text{sat} \left[\left(\frac{\beta_{20}^*}{p^2} + \frac{\beta_{20}}{p} + \beta_{22}^* \right) (y_2^* - y_2) + \beta_{21} y_1 + \beta_{22} y_2 - \beta_{23} y_3 \right] \quad (1.36)$$

$$U_2(y) = \text{sat} \left[\left(\frac{\beta_{20}}{p} + \beta_{22}^* \right) (y_2^* - y_2) + \beta_{21} y_1 + \beta_{22} y_2 - \beta_{23} y_3 \right], \quad (1.37)$$

$$\text{де } \beta_{20}^* = \frac{\hat{g}_2 b_{12} b_{21} b_{33}}{m_3 b_{23}}; \quad \beta_{20} = \frac{\hat{g}_2 (b_{22} b_{33} - b_{12} b_{21})}{m_3 b_{23}}; \quad \beta_{22}^* = \frac{\hat{g}_2 (-b_{22} - b_{33})}{m_3 b_{23}};$$

$$\beta_{21} = \frac{\hat{g}_2 (-b_{21})}{m_3 b_{23}}; \quad \beta_{22} = \frac{\hat{g}_2 (-b_{22})}{m_3 b_{23}}; \quad \beta_{23} = \frac{\hat{g}_2}{m_3}.$$

Структурно-алгоритмічний синтез контуру регулювання швидкості

При синтезі регулятора швидкості об'єктом керування є силова частина електропривода з замкненим контуром регулювання струму. Диференціальні рівняння збуреного руху такого об'єкта одержимо шляхом підставки в систему (1.22) керуючого впливу (1.35):

$$\begin{cases} p\eta_1 = b_{12}\eta_2; \\ p\eta_2 = b_{21}\eta_1 + b_{22}\eta_2 + b_{23}\eta_3; \\ p\eta_3 = b_1\eta_1 + b_2\eta_2 + b_3\eta_3 + U_1. \end{cases} \quad (1.38)$$

$$\text{де } b_1 = -\frac{\hat{g}_2 b_{22} b_{33}}{b_{23} b_{12}}; \quad b_2 = \frac{\hat{g}_2 b_{33}}{b_{23}}; \quad b_3 = b_{33} - \hat{g}_2;$$

U_1 – керуючий вплив регулятора швидкості.

Оптимальне керування $U_1(\eta_1, \eta_2, \eta_3)$ регулятора швидкості, що мінімізує на траєкторіях руху системи (1.38), розраховується аналогічно як і для контуру струму:

$$U_1(\eta) = -\text{sat} \left[\left(\frac{\lambda_{10}}{p} + \lambda_{11} \right) \eta_1 + \lambda_{12} \eta_2 + \lambda_{13} \eta_3 \right], \quad (1.39)$$

$$\text{де } \lambda_{10} = g_1 b_{12} (b_{21} b_3 - b_{23} b_1); \quad \lambda_{11} = g_1 (b_{22} b_3 - b_{23} b_1); \quad \lambda_{12} = g_1 (-b_{12} b_3);$$

$$\lambda_{13} = g_1 b_{12} b_{23}.$$

Для системи, що представлена у формі Фробеніуса:

$$U_1(\eta_1) = -\text{sat} \left[\left(\frac{\alpha_{10}}{p} + \alpha_{11} + \alpha_{12} p + \alpha_{13} p^2 \right) \eta_1 \right], \quad (1.40)$$

$$\text{де } \alpha_{10} = \hat{g}_1 b_{12} (b_{21} b_3 - b_{23} b_1); \quad \alpha_{11} = \hat{g}_1 (b_{22} b_3 - b_{23} b_2 - b_{12} b_{21});$$

$$\alpha_{12} = \hat{g}_1 (-b_{22} - b_3); \quad \alpha_{13} = \hat{g}_1.$$

Алгоритми керування (1.39) реалізуються в системі з послідовної корекцією ПДД²-регулятором швидкості.

Якщо до електроприводу не висуваються високі вимоги до статичної точності, можна використовувати однократно інтегруючий контур регулювання швидкості.

Тоді оптимальне керування набуде вигляду:

$$U_1(\eta_1) = -\text{sat} \left[(\alpha_{11} + \alpha_{12} p + \alpha_{13} p^2) \eta_1 \right]. \quad (1.41)$$

Алгоритм оптимального керування (1.41) реалізується в системі з послідовною корекцією ПДД²-регулятором швидкості.

Якщо виразити складові p_{ij} через інші координати збуреного руху в силу рівнянь системи (1.38) в алгоритмі оптимального керування (1.41) можна позбутися від подвійного диференціювання помилки аналогічно, як і для контуру струму.

Хід роботи

1. Записати систему рівнянь, що описує динаміку об'єкта керування (система ТП-Д), скласти структурну схему системи.

2. Виконати нормування системи, визначити математичну модель динаміки об'єкта у відхиленнях (форма Фробеніуса), здійснити перехід системи до нового координатного базису.

3. Синтезувати алгоритми оптимального керування контурів струму та швидкості в різних фазових просторах у системі з послідовною корекцією. Розрахувати коефіцієнти алгоритмів, скласти структурні схеми.

4. Здійснити перетворення отриманих алгоритмів з метою виключення диференціальних складових із законів керування (перехід до систем із послідовно-паралельною корекцією). Розрахувати коефіцієнти алгоритмів, скласти структурні схеми.

5. Скласти структурні схеми синтезованих систем оптимального керування з послідовною та послідовно-паралельною корекцією.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРИ

№

- 1 Зимин Е.Н., Яковлев В.И. Автоматическое управление электроприводами. – М.: ВШ, 1979. – 318 с.
- 2 Справочник по автоматическому электроприводу /Под ред. Елисеева В.А., Шинянского А.В. – М.: Энергоиздат, 1983. – 616с.
- 3 Чураков Е.П. Оптимальные и адаптивные системы. – М.: Энергоиздат, 1987. – 255 с.
- 4 Петров Ю.П. Оптимальное управление электроприводом. – Л.: Энергия, 1971. – 140 с.
- 5 Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
- 6 Дунаев В.И. Квазиоптимальные по быстродействию системы автоматического управления. – М.: Энергия. 1970. – 63 с.
- 7 Мандровский Б.Ю., Туник А.А. Системы экстремального управления при случайных возмущениях: Справочник. – К.: Наукова думка, 1970. – 172 с.
- 8 Садовой А.В., Сухинин Б.В., Сохина Ю.В. Системы оптимального управления прецизионными электроприводами. – К.: ИСИМО, 1996. – 298 с.
- 9 Смольников В.Н. Синтез квазиоптимальных систем автоматического управления. – М.: Энергоатомиздат, 1967. – 125 с.
- 10 Кунцевич В.М. “Системы экстремального управления”. – К.: Наукова думка, 1981. – 150 с.
- 11 Мееров М.В. “Синтез структур систем автоматического регулирования высокой точности”. – М.: Наука, 1967. – 423 с.

Таблиця 1 – Паспортні дані двигунів

№	ДПС	Рном, кВт	n _н ,, об/хв	U _н , В	η, %	R _я , Ом	L _я , мГн	J, кг м ²
1.	ПБСТ-22МУ	11	3000	110	85,5	0,08	1,8	0,065
2.	ПБСТ-22МУ	2	3000	110	79	0,805	26	0,021
3.	ПБСТ-22МУ	3,6	3150	110	78,5	0,084	10	0,035
4.	ПБСТ-22МУ	1,5	3000	220	79,5	0,33	11	0,012
5.	ПБСТ-23МУ	1,25	1060	220	68,5	0,517	7,2	0,012
6.	ПБСТ-23МУ	3,4	2200	110	78	0,413	6,2	0,014
7.	ПБСТ-23МУ	1,15	2200	110	80,5	0,3	3,7	0,014
8.	ПБСТ-23МУ	7,1	750	110	82,5	1,06	36	0,087
9.	ПБСТ-32МУ	5,3	3350	110	79,5	0,46	1,5	0,031
10.	ПБСТ-32МУ	1,3	3000	220	80	0,35	3	0,014
11.	ПБСТ-32МУ	1,5	2200	110	82,5	0,14	3	0,025
12.	ПБСТ-33МУ	7,5	2200	220	83	0,055	1,1	0,64
13.	ПБСТ-33МУ	1,6	1500	220	82,4	0,28	5	0,032
14.	ПБСТ-42МУ	1,4	1000	110	79	0,39	9	0,045
15.	ПБСТ-42МУ	2,1	1500	110	84,5	0,19	4,5	0,046
16.	ПБСТ-42МУ	2,9	2200	110	86	0,11	2,4	0,046
17.	ПБСТ-43МУ	1,9	1000	110	80	0,31	7,1	0,056
18.	ПБСТ-33МО	1,4	1500	220	82,4	0,31	5,4	0,032
19.	ПБСТ-42МО	2,8	1500	110	76,5	0,601	15	0,084
20.	ПБСТ-42МО	1,9	1500	110	84,5	0,22	4,8	0,045

Методичні вказівки щодо виконання розрахунково-графічної роботи з навчальної дисципліни “Системи оптимального керування” для студентів заочної форми навчання зі спеціальності 6.092200 - “Електромеханічні системи автоматизації та електропривод” (у тому числі скорочений термін навчання)

Укладачі: доц. С.А. Сергієнко, ст. викл. Ю.В. Зачепа, асист. Н.В. Зачепа

Відповідальний за випуск: старш. викл. Г.Г. Юдіна

Підп. до др. _____. Формат 60x84 1/16. Папір тип. Друк ризографія.

Ум. друк. арк. _____. Наклад _____ прим. Зам. № _____. Безкоштовно.

Видавничий відділ КДПУ

39614, м. Кременчук, вул. Першотравнева, 20