

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ, ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ
І СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ



МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ЩОДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
З НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ
**«МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА
СИСТЕМИ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ»**
ДЛЯ СТУДЕНТІВ ДЕННОЇ ТА ЗАОЧНОЇ ФОРМ НАВЧАННЯ
ЗІ СПЕЦІАЛЬНОСТІ
141 «ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА
ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА»
ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНОЇ ТА ОСВІТНЬО-НАУКОВОЇ ПРОГРАМ
«ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ»

КРЕМЕНЧУК 2018

Методичні вказівки щодо виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Математичні методи моделювання та системи оптимального керування» для студентів всіх форм навчання зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітньо-професійної та освітньо-наукової програм «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод».

Укладачі: к.т.н., доцент Ю. В. Зачепа

к.т.н., старш. викл. Н. В. Зачепа

Рецензент к.т.н., доцент В. О. Огарь

Кафедра систем автоматичного управління і електроприводу

Затверджено методичною радою КрНУ імені Михайла Остроградського

Протокол № “_____” від “_____” _____ 2018 р.

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

Вступ

Оптимізація регулювання електричним приводом (ЕП) дозволяє при мінімальних витратах у деяких випадках істотно підвищити продуктивність і швидкодію ЕП. Електропривод промисловості і транспорту можна розділити на дві рівною мірою важливі групи: приводи, у яких визначальними є обмеження по нагріванню й енергії (інтегральні обмеження), і приводи, у яких є істотними лише обмеження по комутації, швидкості обертання, напрузі (локальні обмеження).

Оптимальне управління повинне в загальному випадку забезпечити, найкращі показники роботи електропривода при дотриманні обмежень, що залежать від параметрів електропривода і виконавчого механізму. Розмаїтість електроприводів і вимог, пропонованих до них, утрудняють вичерпну класифікацію задач оптимального управління електроприводами, однак можна усе-таки виділити основні, типові задачі.

Можливі наступні формулювання задачі оптимального управління:

1. Забезпечити максимальну продуктивність електропривода, при виконанні заданих обмежень (управління, оптимальне по продуктивності);
2. Забезпечити найкоротший час виконання заданої програми переміщень або зміни швидкості при виконанні заданих обмежень (управління, оптимальне по швидкодії).
3. Забезпечити мінімум втрат у якорі, при виконанні заданої програми переміщень або зміни швидкості в заданий час (управління, оптимальне по нагріванню). Це формулювання важливе для тих електроприводів, у яких електродвигуни вибираються по нагріванню, і де зменшення втрат у якорі дозволяє зменшити габаритні розміри, вагу і вартість електродвигуна.

Можливі й інші формулювання задачі оптимального управління, які зводяться не до трьох перерахованих. Так, може ставитися задача визначення управління, що забезпечує мінімум споживання електроенергії при виконанні заданої програми переміщень. Визначення управління, оптимального по мінімуму інтеграла від струму якоря (така задача актуальна для електродвигунів, що харчуються від акумуляторів) чи, наприклад, управління, що забезпечує мінімум встановленої потужності генератора і т.д.

Варто також мати на увазі, що проблема оптимізації управління цілком по різному ставиться для електроприводів короткочасного або повторно-короткочасного режимів роботи і для електроприводів, що працюють у тривалому режимі.

Проблема оптимізації регулювання для цих двох груп електроприводів вирішується різними шляхами. Якщо для електроприводів, у яких визначальними є локальні обмеження, оптимальні закони регулювання мають, як правило, розривний характер, визначаються за допомогою принципу максимуму і реалізуються регуляторами з характеристикою релейного типу, то для електроприводів, у яких головну роль грають, обмеження по нагріванню (інтегральні), закони оптимального регулювання є звичайно безупинними функціями, визначаються на основі математичного апарата класичного варіаційного числення і реалізуються за допомогою регуляторів безупинної дії.

Лабораторна робота № 1

Направлене нормування об'єкта управління. Реалізація об'єктів управління в різних фазових просторах.

Мета роботи: Отримати навички та провести практичний розрахунок системи ТП-ДПС у різних фазових просторах.

Теоретичні відомості.

Для дослідження статичних і динамічних режимів роботи електроприводів з електричними машинами постійного струму за схемою тиристорний перетворювач – двигун постійного струму (ТП-ДПС) (рис. 1.1), необхідно скласти математичну модель у формі системи диференціальних рівнянь або у вигляді передатних функцій. Опис об'єкта у вигляді системи диференціальних рівнянь є загальним, тому з нього, як окремий випадок, можна одержати рівняння для статичних режимів, прирівнявши похідні функцій до нуля.

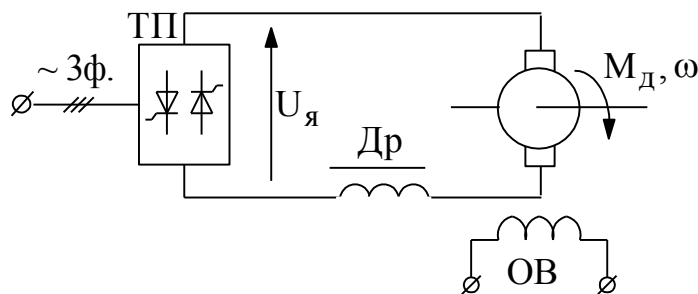


Рис. 1.1 Електрична схема системи ТП-Д

Система диференціальних рівнянь, яка описує систему ТП-ДПС:

$$\begin{cases} p\omega_d = \frac{R_e}{k\Phi} \cdot \frac{1}{T_m} \cdot (i_d - i_c) \\ pi_d = -\frac{k\Phi \cdot \omega_d}{R_e \cdot T_e} - \frac{1}{T_e} \cdot i_d + \frac{1}{R_e \cdot T_e} \cdot E_n \\ pE_n = -\frac{1}{T_n} E_n + \frac{k_n}{T_n} \cdot U_y \end{cases} \quad (1.1)$$

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

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

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

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

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

Системі диференціальних рівнянь відповідає структурна схема, що наведена на рис. 1.2.

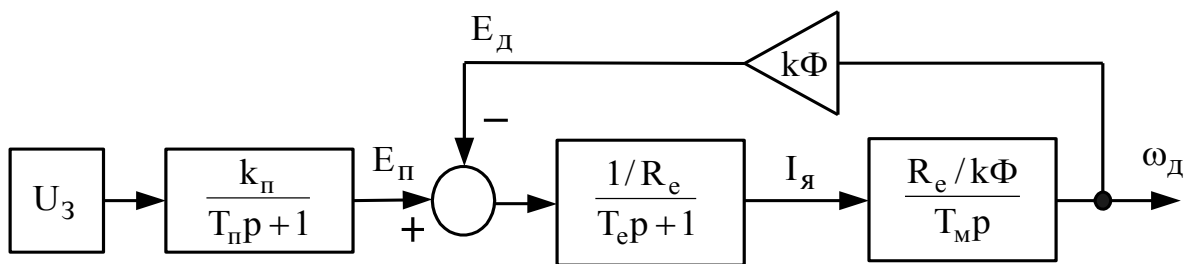


Рис.1.2 Схема для моделювання системи ТП-Д

Для спрощення аналізу перехідних процесів в системі та подальшого синтезу системи керування доцільно перейти до відносних одиниць. Для похідної системи диференціальних рівнянь, які описують систему ТП-Д (1.1): виконаємо нормування наступних величин:

$$y_1 = \frac{\omega_{\text{д}}}{\omega_{\text{д max}}}; \quad y_2 = \frac{i_{\text{д}}}{i_{\text{д max}}}; \quad y_3 = \frac{E_{\text{п}}}{E_{\text{п max}}}; \quad u = \frac{U_{\text{у}}}{U_{\text{у max}}},$$

де $\omega_{\text{д max}}$ - максимальна швидкість обертання двигуна, $\omega_{\text{д max}} = \frac{E_{\text{п max}}}{k\Phi}$;

$i_{\text{д max}}$ - максимально допустимий струм якоря двигуна $i_{\text{д max}} = \frac{E_{\text{п max}}}{R_e}$;

$E_{\text{п max}}$ - максимальна напруга на виході перетворювача

$$E_{\text{п max}} = U_{3 \text{ max}} \cdot k_{\text{п}};$$

$U_{\text{у max}}$ - максимальна напруга управління ($U_{\text{у max}} = 10 \text{ В}$).

Тоді система диференціальних рівнянь прийме наступний вигляд:

$$\begin{aligned}
 p y_1 &= b_{12} \cdot y_2 \\
 p y_2 &= b_{21} \cdot y_1 + b_{22} \cdot y_2 + b_{23} \cdot y_3 \\
 p y_3 &= b_{33} \cdot y_3 + m_3 \cdot U
 \end{aligned}
 \tag{1.2}$$

де $b_{12} = \frac{1}{T_M}$; $b_{21} = \frac{-1}{T_{\text{я}}}$; $b_{22} = \frac{-1}{T_{\text{я}}}$; $b_{23} = \frac{1}{T_{\text{я}}}$; $b_{33} = \frac{-1}{T_{\text{п}}}$; $m_3 = \frac{1}{T_{\text{п}}}$ – коефіцієнти системи.

Структурна схема прийме вигляд, наведений на рис. 1.3.

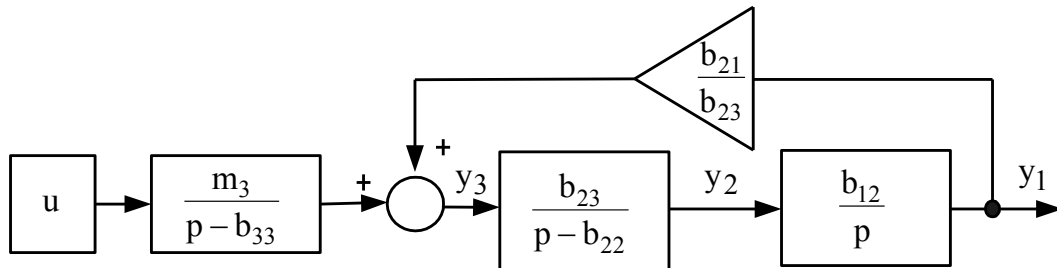


Рис.1.3 Схема системи ТП-Д у відносних одиницях

Для однозв'язної системи з одним керуючим впливом, до якої відноситься система електропривода ТП-Д, широко застосовуються рівняння динаміки у формі Фробеніуса (у канонічній формі), 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 вигляд:

$$\begin{aligned}
 p \hat{y}_i &= \hat{y}_{i+1}; \quad (i = 1, \dots, n-1), \\
 p \hat{y}_n &= \sum_{i=1}^n -a_i \hat{y}_i + M_n U,
 \end{aligned}
 \tag{1.3}$$

чи в розгорнутому вигляді для електроприводу, що розглядається

$$\begin{aligned}
 p \hat{y}_1 &= \hat{y}_2; \\
 p \hat{y}_2 &= \hat{y}_3; \\
 p \hat{y}_3 &= -a_1 \hat{y}_1 - a_2 \hat{y}_2 - a_3 \hat{y}_3 + M_3 U.
 \end{aligned}
 \tag{1.4}$$

Система (1.4) відповідає координатному базису, що має назву $\hat{\eta}$ -базис. Даний вираз обумовлює простоту спостереження невимірюваних змінних системи через вимірювані.

Розглянуті вище системи диференціальних рівнянь можуть бути використані для опису динаміки того самого об'єкта управління в різних фазових просторах перемінних. Аналогічним образом алгоритми управління цим об'єктом можуть бути синтезовані в різних координатних базисах. Шляхом відповідного вибору базису вектора стану замкненої системи управління можна додати їй властивості, що задовольняють умовам структурної і технічної простоти реалізації при заданій чутливості до змін параметрів і зовнішніх збурень.

Коефіцієнти a_i та M_n знаходять прирівнюванням характеристичних поліномів системи (1.1) та (1.3). Для системи ТП-ДПС вони мають наступні значення:

$$a_1 = b_{12}b_{21}b_{33}$$

$$a_2 = b_{22}b_{33} - b_{12}b_{21}$$

$$a_3 = -b_{22} - b_{33}$$

при суміщенні змінних y_1 та \hat{y}_1 : $M_3 = m_3b_{12}b_{23}$

при суміщенні змінних y_2 та \hat{y}_2 : $M_3 = m_3b_{23}$

Структурна схема моделі буде мати вигляд, що наведений на рис. 1.4.

Хід роботи.

1. Записати систему диференціальних рівнянь в абсолютних величинах. У математичному пакеті MatLAB виконати моделювання системи ДПС із керованим підсилювачем потужності в абсолютних одиницях. Паспортні дані двигуна взяти згідно з варіантом (табл. 1 додаток). Одержати графіки перехідних процесів основних величин: струм якоря ДПС, швидкість обертання, електрорушійна сила перетворювача.

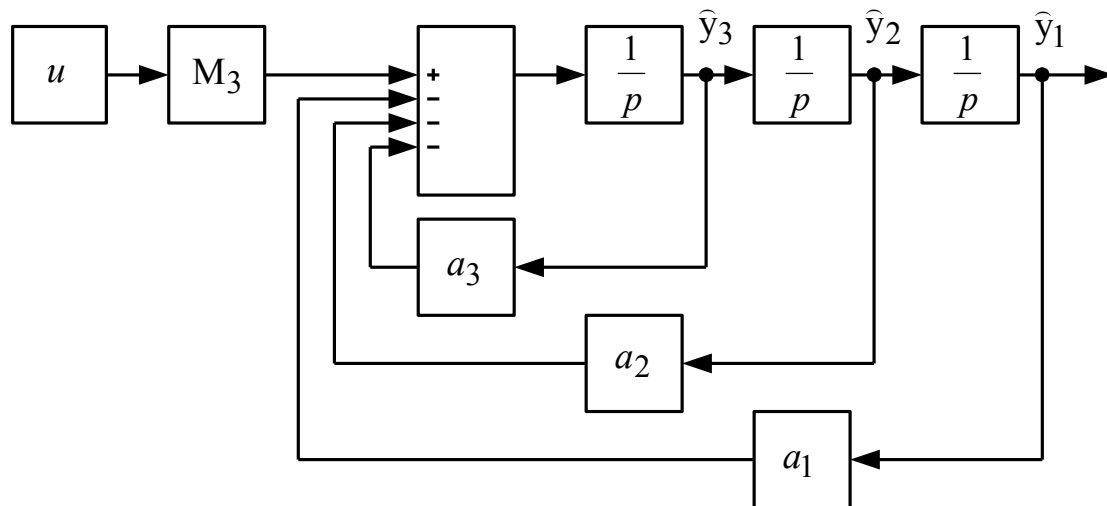


Рис.1.4 Схема системи в канонічному фазовому просторі

2. Записати систему диференціальних рівнянь у відносних величинах. У математичному пакеті MatLAB виконати моделювання системи ДПС із керованим підсилювачем потужності у відносних одиницях. Одержати графіки перехідних процесів $y_1(t); y_2(t); y_3(t)$.

3. Записати систему диференціальних рівнянь у формі Фробеніуса. Розрахувати коефіцієнти a_i та M_n . У математичному пакеті MatLAB виконати моделювання системи ДПС із керованим підсилювачем потужності у формі Фробеніуса. Одержати графіки перехідних процесів основних величин: $\hat{y}_1(t); \hat{y}_2(t); \hat{y}_3(t)$.

4. Зробити аналіз отриманих результатів.

Зміст звіту.

1. Назва та мета роботи.
2. Система диференціальних рівнянь та структурна схема в абсолютних одиницях, що описують систему ТП-ДПС.
3. Графіки перехідних процесів: $I_{я}(t), \omega_{д}(t), E_{п}(t)$.
4. Система диференціальних рівнянь та структурна схема у відносних одиницях, що описують систему ТП-ДПС.
5. Графіки перехідних процесів: $y_1(t); y_2(t); y_3(t)$.
6. Система диференціальних рівнянь та структурна схема у формі Фробеніуса.

7. Графіки перехідних процесів: $\hat{y}_1(t); \hat{y}_2(t); \hat{y}_3(t)$.

8. Висновки.

Питання для контролю.

1. Дайте визначення абсолютним та відносним величинам?
2. Поясніть основні принципи та переваги нормування величин в системах диференціальних рівнянь, що описують динаміку електроприводу?
3. Що таке фазовий простір? Як виконується перехід системи до нового фазового простору?
4. Вкажіть переваги та умови застосування представлення електроприводу в канонічній формі (формі Фробеніуса)?
5. Дайте порівнювальний аналіз моделювання електромеханічних систем у різноманітних фазових просторах?

Лабораторна робота 2

Дослідження оптимального за швидкодією регулювання ЕП із використанням контролю координат системи

Мета роботи: дослідження позиційного слідкуючого електропривода з оптимальним регулюванням за швидкодією з використанням контролю координат системи.

Теоретичні відомості.

Визначаючи оптимальне за швидкодією регулювання електроприводами без урахування обмеження за нагрівом, як правило, маємо справу з лінійними функціоналами, і в такому разі виправдане застосування принципу максимуму, зміст якого полягає в тому, що для лінійної системи оптимальним буде релейне регулювання, що змінюється стрибком від $U = +1$ до $U = -1$ і обернене.

Число інтервалів сталості регулюючого впливу відповідно до теореми про n - інтервали не перевищує число речовинних коренів n характеристичного рівняння об'єкта регулювання (ОР). Число переключень регулюючого впливу не перевищує $(n-1)$.

Для системи 2-го порядку, якою може бути представлено позиційний електропривод, алгоритм оптимального регулювання має вигляд:

$$U = +1, \text{ якщо } \varepsilon > 0,$$

$$U = -1, \text{ якщо } \varepsilon < 0,$$

$$U = 0, \text{ якщо } \varepsilon = 0.$$

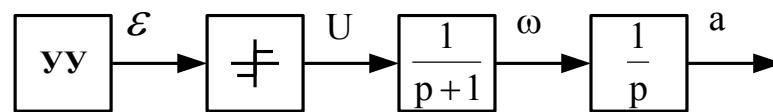


Рис. 2.1 Структурна схема позиційного електроприводу

На рисунку прийняті наступні позначення:

ε - сигнал на вході релейного елемента (керуючий вплив), U - напруга на вході двигуна, ω - швидкість обертання двигуна, (швидкість зміни вихідної координати), a – переміщення робочого органа РО (вихідна координата).

Керуючий вплив ε , поданий у виді функції вихідної координати a і швидкості її зміни ω , що контролюються в процесі регулювання.

$$\varepsilon = (a^* - a) - a_1 = (a^* - a) - [|\omega| - \ln(1 + |\omega|)] \cdot \text{sign } \omega,$$

де a_1 - вихідна координата в момент перемикавання,

a^* - задане значення вихідної координати.

Хід роботи.

1. Виконати моделювання позиційного слідкуючого електропривода, з оптимальним регулюванням за швидкодією з використанням контролю координат системи (моделювання виконати з використанням пакета MatLAB).

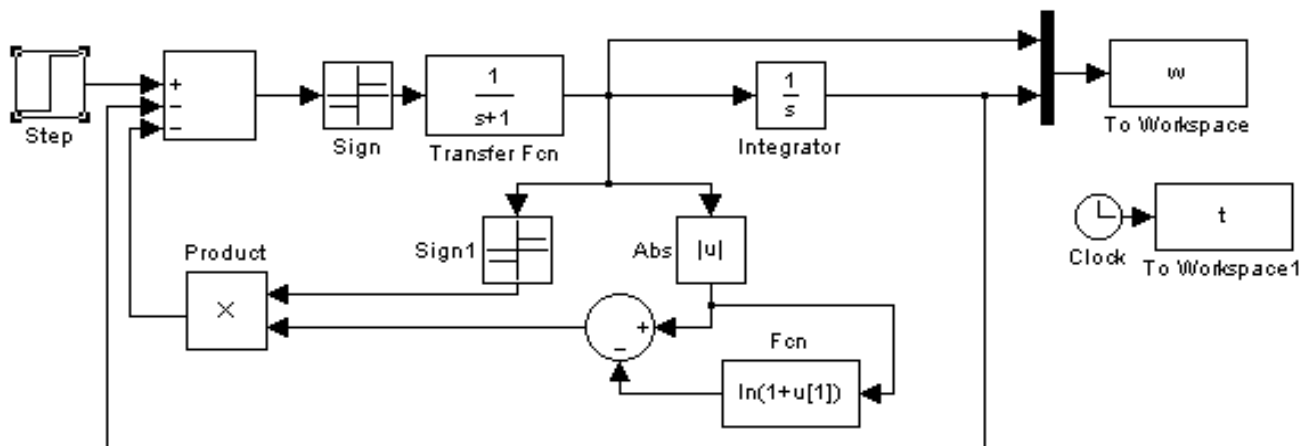


Рис. 2.2 Математична модель системи керування електроприводу

2. Дослідити роботу системи оптимального регулювання при $a^*=1$ та при значенні a^* , що задане викладачем.
3. Дослідити впливи зворотних зв'язків на характеристики системи.
4. Побудувати графіки зміни координат системи оптимального регулювання при відпрацьовуванні заданої програми переміщення.
- 5 Пояснити принцип роботи системи.

Зміст звіту.

9. Назва та мета роботи.
10. Структурна схема позиційного електроприводу.
11. Графіки перехідних процесів: $\omega(t)$, $a(t)$:
 - а) завдання на переміщення незмінне $a^* = 1$,
 - б) завдання на переміщення незмінне a^* ,
 - в) відпрацювання заданої програми переміщень $a^*(t) = \begin{cases} t < t_{\text{перекл}}, a^* = 1 \\ t < t_{\text{перекл}}, a^* = -1 \end{cases}$
4. Графіки перехідних процесів $\omega(t)$, $a(t)$ при дослідженні впливу зворотних зв'язків на статичні та динамічні показники системи.
5. Висновки.

Питання для контролю.

6. Що таке оптимальне управління?
7. Назвіть задачі оптимального управління?
8. Наведіть приклади штучних та природних обмежень в електроприводі?
9. Дайте порівняльну характеристику математичним методам вирішення оптимальних задач управління?
10. В чому полягає оптимальне за швидкодією управління, без обліку обмеження за нагрівом? Вкажіть його особливості?

Лабораторна робота 3

Дослідження системи оптимального керування, що забезпечує мінімальні втрати в якорі, за допомогою принципу симетрії

Мета роботи: реалізація оптимального керування ДПС, що забезпечує мінімальні втрати в якорі ЕД, при виконанні заданої програми переміщення в повторно короткочасному режимі роботи ($\Phi = \text{const}$ і $M_c = \text{const}$) за допомогою принципу симетрії.

Теоретичні відомості.

Оптимальне керування повинне забезпечити найкращі показники роботи електропривода при дотриманні обмежень, що залежать від параметрів електропривода виконавчого механізму. Однією з можливих формулювань задачі оптимального керування є забезпечення мінімуму втрат у якорі, тобто мінімум інтеграла:

$$Q = \int_0^T i^2 d\tau, \quad (3.1)$$

при виконанні заданої програми переміщення чи зміни швидкості в заданий час (керування, оптимальне по нагріванню). Такий вид керування дозволяє зменшити габарити, вагу, вартість електропривода, а також зменшити споживання електричної енергії, що є важливим у разі живлення від автономного джерела.

Задача оптимізації електроприводів з урахуванням обмежень за нагрівом зручно вирішувати методами класичного варіаційного числення. Класичне варіаційне числення зручне при дослідженні нелінійних систем у загальному виді.

Оптимальне регулювання двигуном постійного струму (ДПС) при виконанні заданої програми переміщення в повторно короткочасному режимі роботи при $\Phi = \text{const}$ і $M_c = \text{const}$, ціллю якого є максимальна швидкість або продуктивність при урахуванні обмеження з нагріву, або забезпечення заданої швидкості або продуктивності при мінімальних втратах у якорі ДПС, може бути отримане при лінійній діаграмі струму і параболічній діаграмі швидкості:

$$i = \mu_0 + \frac{6\alpha}{T^2} \left(1 - \frac{2\tau}{T} \right) \quad v = \frac{6\alpha}{T^2} \left(\tau - \frac{\tau^2}{T} \right), \quad (3.2)$$

де i , v - струм якоря та швидкість ЕД у відносних одиницях (в.о.); α - шлях переміщення або кут повороту у в.о.; за одиницю шляху прийнято шлях, що проходить виконавчий механізм за час $t = T_M$ при номінальній швидкості обертання ЕД (T_M - механічна постійна часу ЕД); T - час переміщення з початкового стану в кінцеве у в.о.; μ_0 - момент опору виконавчого механізму у в.о.: $\mu_0 = M_c / M_H$; τ - час у в.о.: $\tau = t / T_M$.

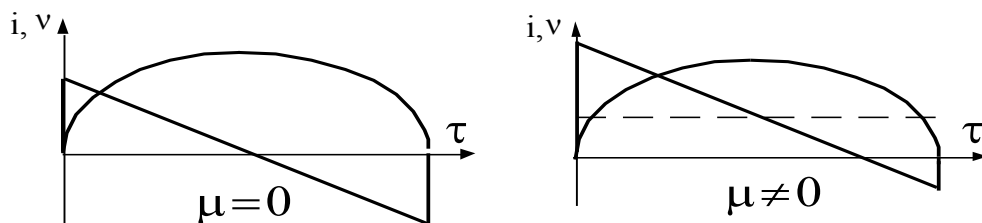


Рис. 3.1 Діаграми струму якоря та швидкості при керуванні, що оптимальне за нагрівом

Розмір переміщення α при оптимальному регулюванні залежить від Q :

$$\alpha = \frac{1}{3,46T^2} \sqrt{\frac{Q}{T} - \mu_0^2}. \quad (3.3)$$

Будь-яке інше рівняння, відмінне від оптимального, приведе або до зменшення α при заданому Q , або до збільшення Q при заданому α .

Якщо $i_{max} = \mu_0 + 6\alpha / T^2 > i_{дон}$ за умовами комутації, діаграма струму при оптимальному регулюванні буде змішана, т.ч. складаються з ділянок меж області $i = \pm i_{max}$ і ділянки екстремалі:

$$\begin{aligned}
 T_1 &= \frac{3Q}{4i_m^2} - \frac{T}{4} + \mu_0 T / 2i_m; \\
 T_1 + T_2 &= \left(\frac{3Q}{i_m^2} - T / 2\right); \\
 T_2 &= \frac{3Q}{4i_m^2} - \frac{T}{4} - \mu_0 T / 2i_m;
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

Якщо $i_m = \sqrt{\frac{Q}{T}}$, тобто $T_1 + T_2 > T$, тобто лінійна ділянка оптимальної діаграми струму зникає, маємо «вироджену» діаграму струму.

«Вироджена» діаграма струму оптимальна для електроприводів повторно короткочасного режиму роботи, у яких час паузи набагато більше часу роботи:

$$T_1 = \frac{T}{2} + \mu_0 \frac{T}{2i_m}; \quad T_2 = \frac{T}{2} - \mu_0 \frac{T}{2i_m}.$$

Параболічна діаграма швидкості має максимум $v_m = \frac{3\alpha}{2T}$.

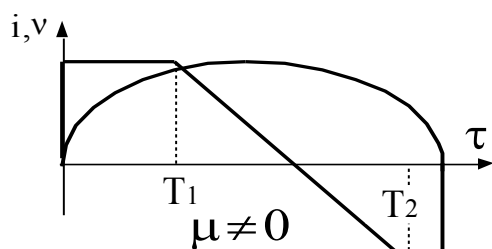


Рис. 3.2 Діаграми струму якоря та швидкості при обмеженні струму

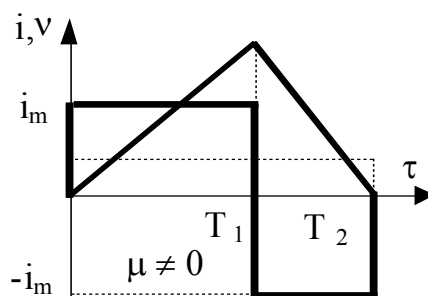


Рис. 3.3 «Вироджена» діаграми струму якоря та швидкості

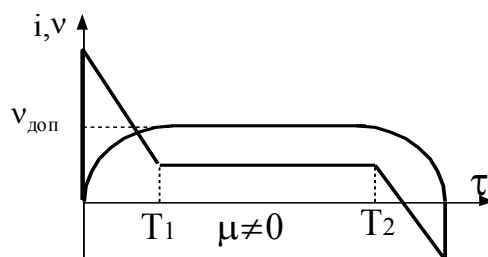


Рис. 3.4 Діаграми струму якоря та швидкості при обмеженні швидкості

Якщо $v_{onm} > v_{don}$, екстремум досягається на складовій діаграмі швидкості, складеної з відрізків екстремалей - парабол і ділянки межі області $v = v_{don}$. Якщо

$$\text{задана } Q, T \text{ та } v_0, \text{ то } \alpha = v_0 T - \frac{16v_0^3}{9(Q - \mu_0 T)}.$$

Метою лабораторної роботи є реалізація оптимального регулювання ДПС, що забезпечує мінімальні втрати в якорі ЕД при виконанні заданої програми переміщення в повторно короткочасному режимі роботи ($\Phi = \text{const}$ і $M_c = \text{const}$).

Розглянемо реалізацію системи оптимального керування, що забезпечує мінімальні втрати в якорі, за допомогою принципу симетрії.

Проблема синтезу систем автоматичного керування з необхідними динамічними властивостями тією чи іншою мірою зв'язана з концепціями зворотних задач динаміки, у результаті рішення яких *за заданим законом руху системи* визначаються *керуючі впливи*, під дією яких цей рух здійснюється.

Операції формування бажаного керуючого впливу зворотні операціям, що визначають структуру математичної моделі об'єкта керування, тобто вхідна перемінна y_1^* алгоритму керування являє собою звернену перемінну y_1 математичної моделі об'єкта керування. Таким чином, можна сформулювати наступне правило: алгоритм формування керуючого впливу будується за принципом симетрії структури і обернення операцій стосовно структури й групи операцій, що відповідають математичній моделі керованого процесу.

Розглянемо структурну схему в загальному виді лінійного чи лінеаризованного об'єкта керування (мал. 3.5).

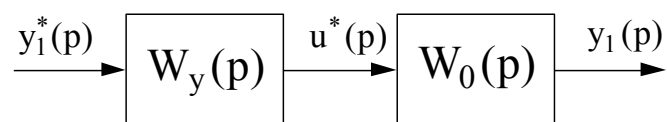


Рис. 3.5 Структурна схема лінійного об'єкта керування

Для забезпечення ідеального відтворення бажаної траєкторії руху $y_1 = y_1^*$ за принципом симетрії необхідно, щоб еквівалентна передатна функція розглянутої розімкнутої системи дорівнювала одиниці. Ця умова виконується якщо передатна

функція керуючої частини системи $W_y(p)$ є зворотною передатної функції керованого об'єкта $W_0(p)$:

$$W_y(p) = \frac{1}{W_0(p)} \quad (3.5)$$

На рис. 3.6 приведена структурна схема системи керування, побудованої відповідно до рівняння (3.5) при $n=2$.

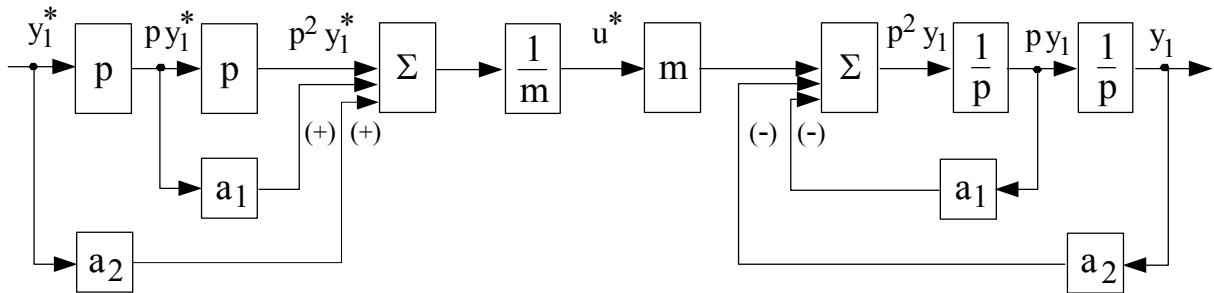


Рис. 3.6 Система керування об'єктом другого порядку ($n=2$)

Однак, відтворення заданих траєкторій руху в розімкнутих системах, побудованих на підставі принципу симетрії, можливо лише для стаціонарних об'єктів із незмінними параметрами при відсутності зовнішніх збурень. Для реальних електромеханічних об'єктів розглянутий принцип керування в розімкнутій системі позбавлений змісту.

Здійснимо замикання системи, включивши в її склад підсилювальний елемент із коефіцієнтом передачі g (рис. 3.7).

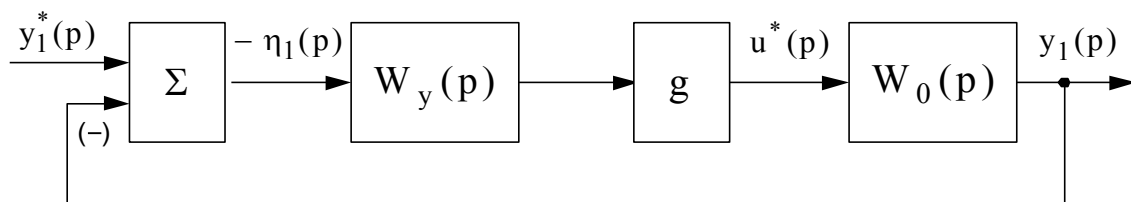


Рис. 3.7 Замкнена САУ з підсилювальним елементом g

Передатна функція такої системи

$$W_y(p) = \frac{gW_y(p)W_0(p)}{1 + gW_y(p)W_0(p)} \quad (3.6)$$

чи з урахуванням (3.5)

$$W_3(p) = \frac{g}{1+g}. \quad (3.7)$$

Останнє вираження показує, що використання властивостей симетрії теоретично дозволяє побудувати безінерційну замкнену систему керування, а при $g \rightarrow \infty$ забезпечити рівність одиниці передатної функції такої системи. Отже, що керує частина системи повинна цілком компенсувати власну динаміку об'єкта керування і забезпечити ідеальне відтворення східчастого впливу, що задає. Реалізація нескінченно великого коефіцієнта підсилення можлива тільки при наявності джерела енергії необмеженої потужності, що неможливо реалізувати в реальних електромеханічних системах. Крім того, в існуючих системах керування електроприводами завжди має місце обмеження на максимальне значення керуючого впливу.

Хід роботи.

1. Здійснити моделювання об'єкта керування в формі Фробеніуса (використати модель із попередньої лабораторної роботи).

2. Скласти та змоделювати розімкнену систему керування за принципом симетрії (див. рис. 3.5 та 3.6). При моделюванні системи керування слід використовувати не ідеальні диференціатори, а реальні з малою сталою часу (наприклад-0,001с).

3. Виконати моделювання блоку завдання оптимальної діаграми швидкості (БЗОДШ) відповідно до рис. 3.9 (блок Step необхідний для припинення сигналу завдання швидкості у момент часу $\tau=1$), та настроїти систему оптимального керування при значеннях α , що задається викладачем. Прийняти $T=1$ і $\mu_0=0$.



Рис. 3.8 Реалізація ідеального та реального ланцюга, що виконує диференціювання, у пакеті Matlab

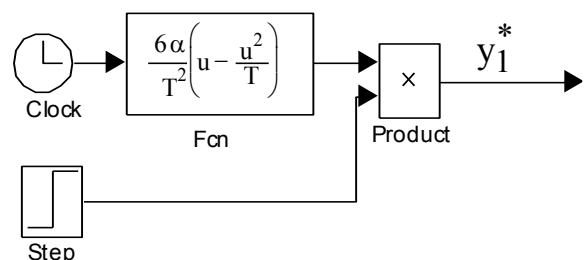


Рис. 3.9 Реалізація БЗОДШ

4. Розрахувати побудовану модель методом Рунге-Кутта (ode4(Runge-Kutta)) при фіксованому кроці (0,0001), та отримати графіки зміни координат системи оптимального керування $v^*(t)$, $i^*(t)$, $v(t)$, $i(t)$ і $\alpha(t)$ при відпрацьовуванні заданої програми переміщення (графіки $v^*(t)$ та $v(t)$ побудувати в одній системі координат).

Зміст звіту.

12. Назва та мета роботи.
13. Структурна схема замкненої системи оптимального керування.
14. Алгоритми оптимального керування.
15. Графіки перехідних процесів координат електроприводу:
 - а) розімкненої системи;
 - б) замкненої системи для різних значень коефіцієнтів підсилення.
5. Висновки.

Питання для контролю.

1. Які переваги дає оптимальне керування ДПС, що забезпечує мінімальні втрати в якорі? В яких системах ЕП такий принцип керування використовується?
2. Як розраховуються втрати в якорі ДПС? Якими методами та при яких допущеннях вирішується поставлена задача оптимізації?
3. При якому вигляді перехідних процесів за швидкістю та струмом отримуються мінімальні втрати в якорі ДПС? Чим відрізняються графіки перехідних процесів за струмом при $\mu_0=0$ та $\mu_0 \neq 0$?
4. Як і за рахунок чого реальна перехідна характеристика за струмом буде відрізнятися від ідеальної? Як можна максимально наблизити реальний перехідний процес до ідеального?
5. Що таке квазіоптимальне керування та в якому випадку його слід використовувати?
6. За якими умовами здійснюють обмеження струму якоря ДПС? На якому рівні встановлюють ці обмеження?

7. Який вигляд будуть мати перехідні характеристики, якщо $T_1=T_2$ (дивись рис. 3.2)? При якому режимі роботи ДПС можливі перехідні характеристики такого вигляду?

8. В чому полягає концепція зворотних задач динаміки та властивість симетрії систем автоматичного керування?

9. Назвіть умову ідеального відтворення бажаної траєкторії руху у розімкнених та замкнених системах автоматичного керування побудованих за принципом симетрії?

10. Назвіть недоліки розімкнених та замкнених системах автоматичного керування побудованих за принципом симетрії?

Лабораторна робота № 4

Дослідження двоконтурної системи підпорядкованого регулювання

Мета роботи: Провести моделювання та дослідити статичні та динамічні властивості двоконтурної системи підпорядкованого регулювання з настроюванням контуру струму на модульний та симетричний оптимумами.

Теоретичні відомості.

При побудові системи підлеглого регулювання (СПР) із послідовною корекцією об'єкт керування розбиваються на n частин, число яких дорівнює кількості керованих перемінних силовий частини ЕП (чи числу великих постійних часу системи, що підлягають компенсації). Автоматичний керуючий пристрій складається з n регуляторів ($W_{p1} \div W_{pn}$), включених послідовно, причому кожен внутрішній контур регулювання підлеглий наступному, зовнішньому (стосовно внутрішнього) контуру. У таких системах головною керованою перемінною є та, котра визначає основну мету керування. Інші перемінні вважаються допоміжними, тому що вони є підлеглими головній перемінній.

При побудові систем підпорядкованого регулювання використовуються стандартні настройки контурів на модульний (МО), або технічний, та симетричний оптимуми. У системі, що настроєна на МО, при східчастому керуючому впливі, час першого досягнення вихідною величиною сталого значення (час першого узгодження) складає $t_{пс}=4,7T_{\mu}$, максимальне перерегулювання $\sigma=4,3\%$, час регулювання $t_p=6,3T_{\mu}$. У системі, що настроєна на МО час першого узгодження складає $t_{пс}=3,1T_{\mu}$, максимальне перерегулювання $\sigma=43\%$, час регулювання $t_p=16,5T_{\mu}$. Якщо установити у каналі завдання аперіодичний фільтр із постійної часу $T_{\phi}=4T_{\mu}$, то перерегулювання σ може бути знижене до 8%. При цьому $t_{пс}=7,6T_{\mu}$, $t_p=13,3T_{\mu}$.

На рис. 4.1 представлена структурна схема двоконтурної системи підпорядкованого регулювання для дослідження динамічних характеристик.

Передаточна функція регулятора струму:

$$W_{рс}(p) = k_{рс} + \frac{1}{T_{рс}p}, \quad (4.1)$$

де $k_{рс} = \frac{T_e}{2T_{\muс} \cdot (1/R_e) \cdot k_{п} \cdot k_{дс}}$ - коефіцієнт передачі РС,

$T_{рс} = \frac{T_e}{k_{рс}}$ - стала часу інтегральної складової РС,

$T_{\muс} = T_{дс} + T_{п}$ - мала некомпенсована стала часу контуру струму.

Передаточна функція регулятора швидкості при настроюванні контуру на МО:

$$W_{рш}^{МО}(p) = \frac{J \cdot k_{дс}}{2T_{\muш} \cdot k_{\Phi} \cdot k_{дш}} = k_{рш}. \quad (4.2)$$

де $T_{\muш}$ - мала некомпенсована стала часу контуру швидкості:

$$T_{\muш} = T_{дш} + 2T_{\muс}.$$

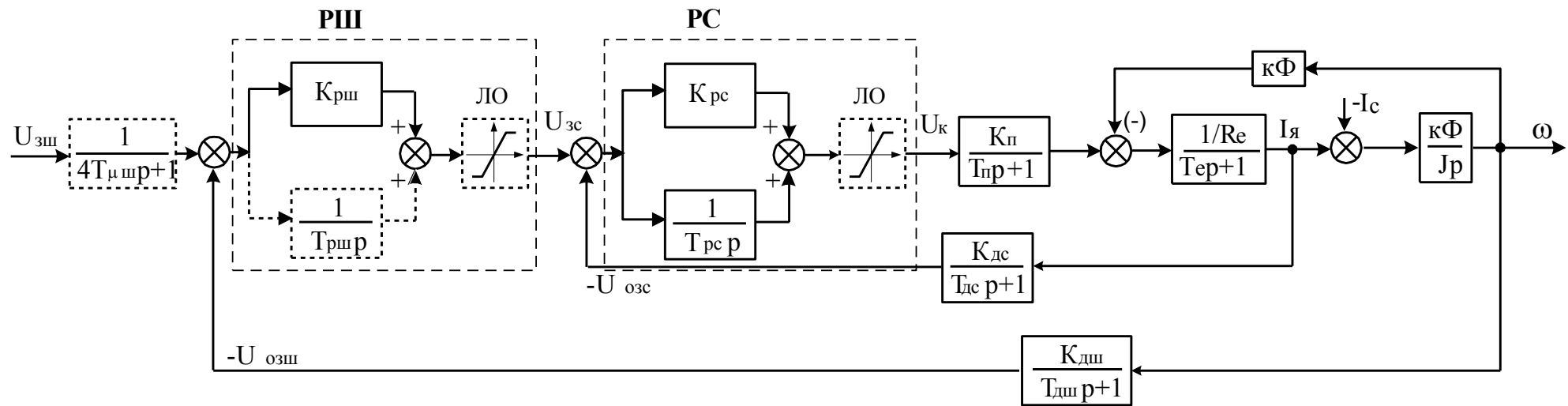


Рис. 4.1 Структурна схема системи ТП-ДПС

Передаточна функція регулятора швидкості при настроюванні контуру на СО:

$$W_{рш}^{со}(p) = k_{рш} + \frac{1}{T_{рш}p}, \quad (4.3)$$

де $k_{рш} = \frac{1}{2T_{\muш} \cdot \frac{1}{J \cdot k_{дс}} \cdot k_{\Phi} \cdot k_{дш}}$ - коефіцієнт передачі РШ,

$T_{рш} = \frac{4T_{\muш}}{k_{рш}}$ - стала часу інтегральної складової РШ.

Коефіцієнти, що необхідні для розрахунку параметрів моделі двоконтурної системи підпорядкованого регулювання:

- коефіцієнт передачі ТП:

$$k_{п} = \frac{E_{п}}{U_{кmax}}, \quad (4.4)$$

де $E_{п} = 1,1U_{пн}$ - е.р.с. ТП на холостому ході при максимальному значенні напруги керування $U_{кmax} = 10\text{В}$;

- $T_{п}$ - стала часу ТП; для трифазної мостової схеми випрямляча і напівпровідникового СІФУ $T_{п} = 0,004\text{с}$;

- коефіцієнт передачі датчика струму:

$$k_{дс} = \frac{U_{ззсmax}}{I_{max доп}}, \quad (4.5)$$

де $U_{ззсmax}$ - максимальна напруга зворотного зв'язку за струмом якоря (10В);

$I_{max доп}$ - максимально допустиме значення струму якорного ланцюга,

$$I_{max доп} = (1,5 \div 2,5)I_{н}. \quad (4.6)$$

- коефіцієнт передачі датчика швидкості:

$$k_{дш} = \frac{U_{ззшmax}}{\omega_{max}}, \quad (4.7)$$

де $U_{ззшmax}$ - максимальна напруга зворотного зв'язку за швидкістю обертання (10 В);

$\omega_{\max} = \omega_0$ - швидкість ідеального холостого ходу.

- сталі часу датчиків струму та швидкості, обумовлені наявністю фільтруючих компонентів: $T_{дс} = T_{дш} = 0,002$ с.

Хід роботи.

1. Для структурної схеми, що приведена на рис. 4.1, згідно з варіантом (вихідні дані наведені у додатку у таблиці 1) розрахувати коефіцієнти зворотних зв'язків за струмом та швидкістю. Розрахувати коефіцієнти регуляторів струму та швидкості.

2. У математичному пакеті MatLAB виконати моделювання двоконтурної системи підпорядкованого регулювання з настроюванням контуру струму на модульний та симетричний оптимуми.

3. Одержати графіки перехідних процесів $E_n(t)$, $i(t)$, $\omega(t)$ при відпрацюванні керуючого та збурюючого впливу в одній системі координат при наступних настроюваннях системи регулювання електроприводом :

- контур швидкості настроєний на МО;
- контур швидкості настроєний на СО;
- контур швидкості настроєний на СО з фільтром у каналі завдання.

Одержати також графіки перехідних процесів при вказаних настроюваннях та наявності ланок обмежень (ЛЮ) у контурах регулювання.

4. Зробити аналіз отриманих результатів.

Зміст звіту.

1. Назва та мета роботи.
2. Структурна схема двоконтурної системи підпорядкованого регулювання.
3. Передаточні функції регуляторів та розраховані коефіцієнти зворотних зв'язків за струмом та швидкістю, розраховані коефіцієнти регуляторів струму та швидкості.
4. Графіки перехідних процесів $E_n(t)$, $i(t)$, $\omega(t)$ згідно з п. 3 ходу роботи.
5. Висновки.

Питання для контролю.

1. Які основні задачі регулювання координат? Які основні вимоги до динаміки системи? Укажіть переваги та недоліки систем підпорядкованого регулювання.
2. Поясніть основні принципи побудови двоконтурних систем підпорядкованого регулювання та методи оптимізації контурів. Які умови приймаються при оптимізації контурів?
3. Які бувають стандартні настроювання контурів регулювання? Наведіть показники якості перехідного процесу при настроюванні контуру швидкості на МО та СО. Дайте характеристику статичним та динамічним похибкам у системі, що настроєна на МО та СО.
4. Від чого залежить статичні та динамічні характеристики систем підпорядкованого регулювання?

Лабораторна робота № 5

Моделювання оптимальної САУ, що синтезована методом аналітичного конструювання регуляторів (АКР)

Мета роботи: Провести моделювання та дослідити статичні та динамічні властивості оптимальної САУ електроприводом, що синтезована методом аналітичного конструювання регуляторів (АКР).

Теоретичні відомості.

Структурним синтезом оптимальної САУ електроприводом за методом АКР були отримані:

- алгоритм оптимального керування регулятора струму:

$$U_{PC}(\omega, i, E_{II}) = U_{ym} \cdot \text{sign} \left[K_{2PC}^* \cdot i^* - K_{2PC} \cdot i - K_{1PT} \cdot \omega - K_{3PC} \cdot E_{II} \right], \quad (5.1)$$

де вагові коефіцієнти в алгоритмі оптимального керування мають вид:

$$K_{2PC}^* = \frac{T_{\Pi}}{T_e} + 1, \quad K_{2PC} = 1, \quad K_{1PC} = -\frac{T_{\Pi} \cdot k\Phi}{T_e \cdot R_e}, \quad K_{3PC} = \frac{T_{\Pi}}{T_e \cdot R_e}. \quad (5.2)$$

- алгоритм оптимального керування регулятора швидкості:

$$U_{PШ}(\omega, i, E_{\Pi}) = U_{ym} \cdot \text{sign} \left[K_{1PШ}^* \cdot \omega^* - K_{1PШ} \cdot \omega - K_{2PШ} \cdot i - K_{3PШ} \cdot E_{\Pi} \right], \quad (5.3)$$

де вагові коефіцієнти в алгоритмі оптимального керування мають вид:

$$K_{1PШ}^* = \frac{T_{\Pi}}{T_M} + 1, \quad K_{1PШ} = 1, \quad K_{2PШ} = \frac{T_e \cdot R_e}{T_M \cdot k\Phi}, \quad K_{3PШ} = \frac{T_{\Pi}}{T_M \cdot k\Phi}. \quad (5.4)$$

Аналітичне конструювання регуляторів струму і швидкості дозволяє скласти структурну схему (рис. 5.1) оптимальної системи релейного керування непозиційним електроприводом.

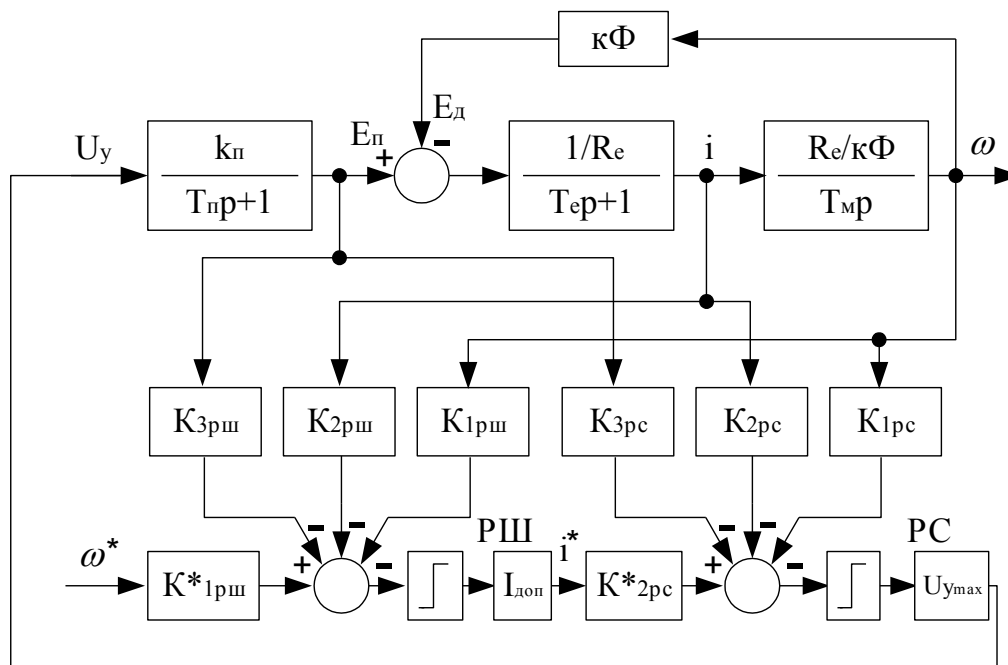


Рис. 5.1 Структурна схема оптимальної системи релейного керування непозиційним електроприводом

Зазначені вище алгоритми оптимальних керувань релейних регуляторів струму і швидкості забезпечують їх просту технічну реалізацію, тому що всі керування отримані у функції фазових координат об'єкта (ω, i, E_{Π}) .

З зазначених алгоритмів оптимальних керувань впливає, що релейні регулятори струму і швидкості повинні по черзі підключатися до об'єкта таким

чином, щоб здійснити оптимальну стабілізацію координат ω та i . Найбільше просто поставлена задача зважається при використанні принципу підпорядкованого регулювання.

Кінцевою метою оптимального керування в розглянутій системі є якнайшвидший висновок вихідної координати об'єкта керування на рівень стабілізації і забезпечення мінімуму інтегральних квадратичних відхилень її поточного значення від заданого рівня. Всі інші координати для досягнення основної мети керування повинні бути виведені на задані (у тому числі і максимально припустимі) рівні й оптимально, тобто з мінімальною інтегральною квадратичною помилкою, застабілізовані на них. Стабілізація кожної фазової координати здійснюється при ковзному режимі роботи відповідного релейного регулятора, вихід якого у виді оптимального релейного керування повинний бути поданий на вхід силової частини об'єкта керування.

При використанні принципу підпорядкованого регулювання структурна схема системи оптимального релейного керування непозиційним електромеханічним об'єктом буде мати вид показаний на рис. 5.1. Тут на вхід регулятора швидкості (РШ) подане завдання U_3 відповідне заданому значенню ω^* . Вихідна напруга U_{PC} відповідно до принципу підпорядкованого керування є завданням i^* для регулятора струму РС. На входи РШ і РС відповідно до алгоритмів (5.1) і (5.3) подані зворотні зв'язки по усіх фазових координатах.

Перевагою застосування принципу підпорядкованого регулювання є можливість використання серійних елементів, що випускаються електропромисловістю для реалізації систем оптимального релейного керування.

Хід роботи.

1. Для структурної схеми, що приведена на рис. 5.1, згідно з варіантом (вихідні дані наведені у додатку у таблиці 1) розрахувати коефіцієнти алгоритмів оптимальних САУ.

2. У математичному пакеті MatLAB виконати моделювання оптимальної САУ, що отримана структурним синтезом за методом АКР.

3. Одержати графіки перехідних процесів $E_n(t)$, $i(t)$, $\omega(t)$ при відпрацюванні керуючого та збурюючого впливу в одній системі координат. В іншій системі координат при відпрацюванні керуючого та збурюючого впливу одержати графіки перехідних процесів релейних регуляторів $U_{рш}(t)$, $U_{рс}(t)$.

4. Зробити аналіз отриманих результатів.

Зміст звіту.

1. Назва та мета роботи.
2. Алгоритми оптимального керування релейними регуляторами струму та швидкості. Розраховані вагові коефіцієнти алгоритмів оптимальних САУ.
3. Структурна схема оптимальної САУ.
4. Графіки перехідних процесів згідно з п. 3 ходу роботи.
5. Висновки.

Питання для контролю.

1. Назвіть переваги систем регулювання з коефіцієнтом підсилення, що дорівнює безмежності? Як реалізується безмежний коефіцієнт підсилення у релейних системах з ковзним режимом роботи?
2. Дайте характеристику перевагам та недолікам систем керування, синтезованих методом АКР?
3. Назвіть та поясніть основні етапи структурного синтезу оптимальної САУ електроприводом методом АКР.
4. Поясніть принципи побудови структурних схем електроприводу постійного струму з САУ, що синтезована за методом АКР.
5. Як вирішується задача оптимального керування при використанні принципу підпорядкованого регулювання?
6. Поясніть принцип роботи релейних регуляторів оптимальної САУ, намалюйте діаграми роботи регуляторів?

Таблиця 1 Паспортні данні двигунів

№ вар.	$P_H,$ кВт	$U_{я},$ В	$I_{я},$ А	$n_{ном},$ об/хв	$R_e,$ Ом	$L_e,$ Гн	$J,$ Нм	$k\Phi,$ Вб
1	4	220	24	900	1,40	0,0310	0,041	1,96
2	15	220	85,4	1400	0,29	0,0055	0,155	1,32
3	30	440	76,7	3070	0,34	0,0056	0,135	1,29
4	5,5	440	15,7	800	4,15	0,1050	0,080	4,42
5	11	440	30	1090	1,47	0,0400	0,142	3,50
6	11	440	30,7	825	1,62	0,0520	0,216	4,53
7	15	440	40,8	1030	1,01	0,0310	0,246	3,72
8	8	220	47,3	600	0,88	0,0230	0,216	2,87

Методичні вказівки щодо виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Математичні методи моделювання та системи оптимального керування» для студентів всіх форм навчання зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітньо-професійної та освітньо-наукової програм «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод».

Укладачі: к.т.н., доцент Ю. В. Зачепа

к.т.н., старш. викл. Н. В. Зачепа

Відповідальний за випуск зав. кафедри САУЕ Д.Й. Родькін

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

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

Видавничий відділ
Кременчуцького національного університету
імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600