

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

**О. Г. ВАСИЛЬЄВ, С. О. ГАВРИЛОВ,
С. І. ОЛЬШЕВСЬКИЙ**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання практичних і контрольних робіт
з дисципліни
"Системи керування електроприводами"**

Рекомендовано Методичною радою НУК

Електронне видання
комбінованого використання на DVD-ROM



МИКОЛАЇВ • НУК • 2016

УДК 681.51(076)
ББК 31.291я73
В 19

Автори:

О. Г. Васильєв, канд. техн. наук, доцент;
С. О. Гаврилов, канд. техн. наук, доцент;
С. І. Ольшевський, асистент

Рецензент Е. А. Швець, канд. техн. наук, доцент

Васильєв О. Г.

В19 Методичні вказівки до виконання практичних і контрольних робіт з дисципліни "Системи керування електроприводами" / О. Г. Васильєв, С. О. Гаврилов, С. І. Ольшевський. – Миколаїв : НУК, 2016. – 42 с.

Наведено матеріали для практичного засвоєння відповідних розділів дисципліни "Системи керування електроприводами" при вивченні будови систем керування двигунами постійного струму.

Призначено для студентів, які навчаються за напрямом 6.0507 "Електромеханіка".

УДК 681.51(076)
ББК 31.291я73

Навчальне видання

ВАСИЛЬЄВ Олександр Григорович
ГАВРИЛОВ Сергій Олексійович
ОЛЬШЕВСЬКИЙ Сергій Іванович

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання практичних і контрольних робіт з дисципліни
"Системи керування електроприводами"**

Комп'ютерне верстання *А. Й. Лихіна*
Коректор *М. О. Паненко*

© Васильєв О. Г., Гаврилов С. О.,
Ольшевський С. І., 2016
© Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова, 2016

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 2,4. Об'єм даних 6776 кб. Тираж 15 прим.
Вид. № 31. Зам. № 90.

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

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

1. РОЗРАХУНОК ТА МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ ІЗ ЗАГАЛЬНИМ СУМАТОРОМ

Виконаємо дослідження пуску двигуна постійного струму незалежного збудження П21-110-9К електропривода підйомної установки по системі регулювання з загальним суматором.

Крім головного зворотного зв'язку по швидкості використовується зворотний зв'язок по струму якоря. Струм якоря пропорційний моменту, тому керуючи струмом формується сила дії на механіку системи. Можна вважати, що від'ємний зворотний зв'язок по швидкості визначає точність регулювання, а зворотний зв'язок по струму – його швидкодію.

Зробимо наступні припущення: силовий перетворювач являє собою інерційну ланку першого порядку, регулятор і ланки зворотних зв'язків – безінерційні.

Тоді можна записати:

$$\omega(p) = \frac{K_d}{A(p)} U(p) - \frac{K_m(1 + T_m p)}{A(p)} M_c(p);$$

$$i(p) = \frac{T_m p}{R_a A(p)} U(p) + \frac{K_d}{A(p)} M_c(p);$$

$$U(p) = K_{\text{пер}} \frac{K_{\Pi}}{1 + \tau p} (U_3(p) - K_c \omega(p) \pm K_{\tau} i(p)),$$

де $U(p)$ – напруга на виході силового перетворювача; τ – стала силового перетворювача;

$$K_d = \frac{1}{k\Phi}; \quad K_m = \frac{R_{\text{яш}}}{(k\Phi)^2}; \quad K_{\tau} = \frac{U_{3\text{max}}}{I_{\text{max}}}; \quad K_c = \frac{U_{3\text{max}}}{\omega_0},$$

$$A(p) = T_m T_a p^2 + T_m p + 1.$$

Знак "+" відповідає додатному зворотному зв'язку, а знак "-" – від'ємному зворотному зв'язку.

Розв'язуючи систему відносно швидкості, запишемо для усталеного режиму

$$\omega = \frac{K}{1 + K_c K} U_3 - \frac{K_m \mu K K_d K_T}{1 + K_c K} M_c,$$

$$K = K_{\text{per}} K_p K_d.$$

Із рівняння визначаємо жорсткість характеристик і статизм системи:

$$\beta = \frac{1 + K K_c}{K_m \mu K K_d K_T}, \quad S = \frac{\Delta \omega}{\omega_0} = \frac{(K_m \mu K K_d K_T) M_c}{\omega_0 (1 + K_c K)}.$$

Для необхідного значення жорсткості або статизму системи можна розрахувати необхідний коефіцієнт підсилення регулятора $K_{\text{рег}}$.

Паспортні та розрахункові дані системи наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Паспортні та розрахункові дані системи

Параметр	Значення
Номінальна потужність, кВт	2100
Номінальна швидкість, рад/с	9,807
Номінальна напруга, В	860
Номінальний струм, А	2680
Номінальний ККД	0,914
Опір якорної ланки, Ом	0,01711
Момент інерції з урахуванням підйомної установки, кг·м ²	78965
Індуктивність якоря, Гн	0,0038
Коефіцієнт підсилення силового перетворювача	86
Стала часу силового перетворювача	0,01
Розрахункові дані	
Коефіцієнт ЕРС двигуна, В·с	83,04
Механічна стала часу, с	0,0389
Електромеханічна стала часу, с	0,22
Коефіцієнт регулятора	2
Коефіцієнт зворотного зв'язку по струму	$1,96 \cdot 10^{-4}$
Коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості	0.96

Структурна схема моделі з від'ємними зворотними зв'язками по швидкості та струму при використанні розширення пакета MATLAB–SIMULINK наведена на рис. 1.1.

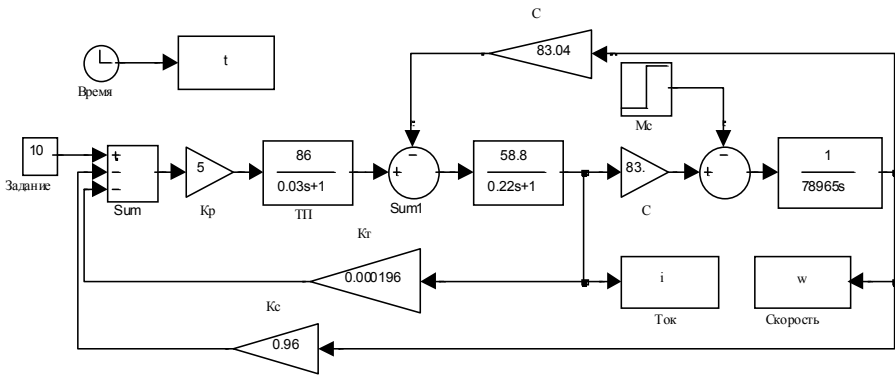


Рисунок 1.1 – Структурна схема моделі з від'ємними зворотними зв'язками по швидкості та струму

На рис. 1.2 наведена структурна схема моделі з використанням відсічки по струму з двократним обмеженням.

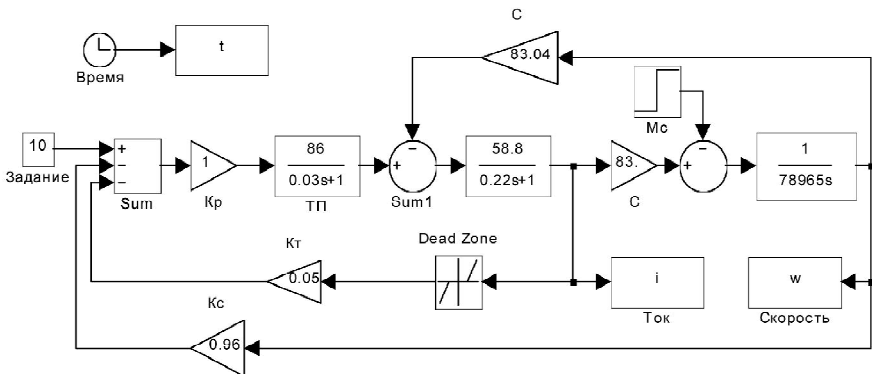


Рисунок 1.2 – Структурна схема моделі з використанням відсічки по струму з двократним обмеженням

На рис. 1.3 і 1.4 наведені діаграми перехідних процесів $i(t)$ та $\omega(t)$ у відносних одиницях до номінальних параметрів, отриманих на вказаних на рис. 1.1 та 1.2 моделях відповідно.

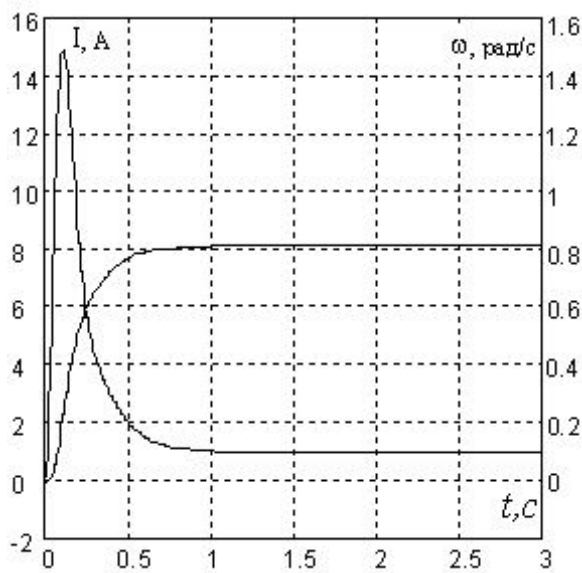


Рисунок 1.3 – Перехідні процеси $i(t)$, $\omega(t)$

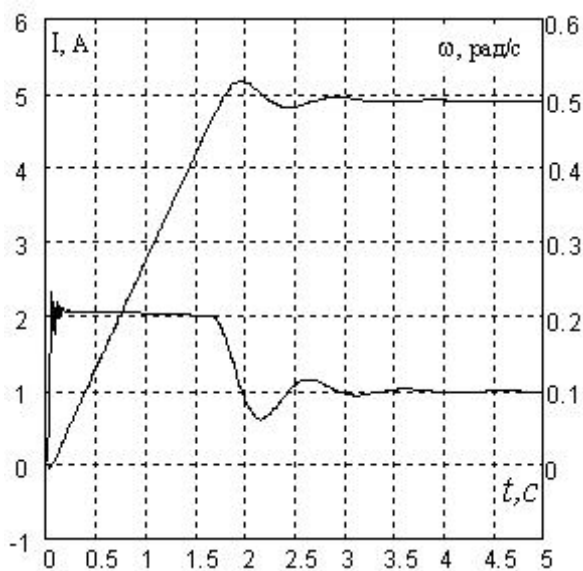


Рисунок 1.4 – Перехідні процеси $i(t)$, $\omega(t)$

2. РОЗРАХУНОК ТА МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ ПІДПОРЯДКОВАНОГО КЕРУВАННЯ

2.1. Настроювання системи на модульний оптимум

Настроювання контуру (розрахунок і вибір елементів послідовних коригувальних ланцюгів, тобто вибір типу регулятора і розрахунок його параметрів) звичайно виконують так, щоб одержати технічно оптимальний перехідний процес – настроювання на технічний (модульний) оптимум (МО). Технічно оптимальним перехідним процесом вважається такий процес, при якому час зміни регульованої величини від нуля до сталого значення був би мінімально можливим при перерегулюванні σ , що не перевищує припустимого значення, приблизно 4–10 %. Такий перехідний процес при стрибку завдання є компромісним між процесом більш швидким, але з більшим перерегулюванням, і процесом з меншим перерегулюванням, але більш повільним.

З теорії автоматичного регулювання відомо, що характер перехідного процесу замкнутої системи визначається співвідношенням сталих часу системи, і оптимальному перехідному процесу відповідає оптимальне співвідношення сталих часу. Математично це виражається певним (оптимальним) співвідношенням коефіцієнтів характеристичного рівняння системи [1].

Для системи, яка складається з n підлеглих контурів, що містять тільки безінерційні, інерційні та інтегруючі ланки (це обмеження не стосується регуляторів), характеристичні рівняння залежно від порядку системи (числа контурів) повинні мати співвідношення коефіцієнтів, зазначені в табл. 2.1. При таких характеристичних рівняннях перехідні процеси в системі по керуючому впливу будуть технічно оптимальними.

У рівняннях табл. 2.1. прийнято: T_1 – найменша стала часу першого (самого внутрішнього) контуру системи. Зазначені в табл. 2.1. значення часу регулювання й перерегулювання відносяться до випадку стрибкоподібної зміни вхідного (що задає) сигналу. Таблиця 2.1 може бути продовжена й для більш високих порядків рівнянь. При зазначеному у табл. 2.1 співвідношенні коефіцієнтів характеристичних рівнянь характер

перехідного процесу визначається не всіма членами рівняння, а виродженим характеристичним рівнянням другого порядку. Особливість цих вироджених рівнянь, наведених у табл. 2.1, полягає в тому, що всі вони (для будь-якого порядку повного рівняння) характеризуються коефіцієн-

том загасання, рівним $\frac{\sqrt{2}}{2} = 0,707$, що забезпечує необхідний технічно оптимальний характер перехідного процесу.

Таблиця 2.1 – Співвідношення коефіцієнтів характеристичних рівнянь

Порядок рівняння	Повне характеристичне рівняння	Вироджене характеристичне рівняння	Час регулювання	Перерегулювання, %
2	$2 T_1 p(T_1 p+1)$	$2 T_1 p(T_1 p+1)$	$4,7 T_1$	4,33
3	$4 T_1 p[2 T_1 p(T_1 p+1)+1]+1$	$4 T_1 p(2 T_1 p+1)+1$	$7,6 T_1$	8
4	$8 T_1 p\{[2 T_1 p(T_1 p+1)+1]+1\}+1$	$8 T_1 p(4 T_1 p+1)+1$	$14,4 T_1$	6,2

Задана вихідна система звичайно не має оптимального співвідношення сталих часу, тому, використовуючи корекцію, потрібно змінювати сталі часу системи, тобто для настроювання контуру на технічний оптимум потрібно підібрати такий тип регулятора і з такими параметрами, щоб одержати характеристичні рівняння системи, наведені в табл. 2.1. Як видно з цієї таблиці, рівняння не містять ніяких інших сталих часу, крім T_1 і більших за неї у 2^n раз. Отже, всі інші сталі часу потрібно усунути (компенсувати) і замінити їх потрібними. Природно, що фізично існуючу інерційність можна усунути, тільки вилучивши із системи елемент, що має цю інерційність, що неможливо. Але можна компенсувати вплив великих інерційностей системи, використовуючи форсировку перехідного процесу в даному елементі за рахунок збільшення напруги (моменту і т. п.) на час перехідного процесу. Повна компенсація при цьому неможлива, тому й роблять операцію заміни великої сталої часу меншою, але необхідного значення.

Звернемося для початку до елементарного контуру (рис. 2.1).

Якщо здійснювати корекцію контуру тільки за рахунок зміни коефіцієнта передачі пропорційного (П) регулятора k_p (або шляхом застосування регулятора з певними динамічними властивостями, про що буде сказано нижче), то можна ланки зі сталими часу T_0 й T_1 віднести до незмінної частини системи, позначивши її передатну функцію через $W_H(p)$.

Тоді передатна функція розімкнутого контуру буде:

$$W(p) = W_p(p)W_n(p),$$

де $W_n(p) = \frac{k_n k_{oc}}{T_1 p + 1} W_0(p)$ – передатна функція регулятора; $W_0(p)$ – передатна функція об'єкта регулювання.

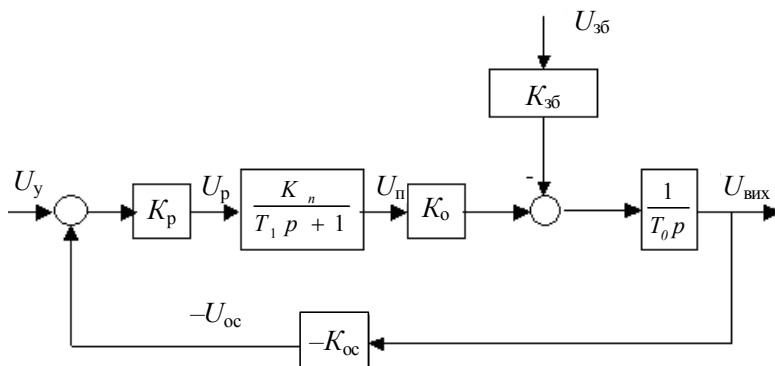


Рисунок 2.1 – Елементарний контур системи

У розглянутому контурі $W_0(p) = k_o / (T_o p)$, а регулятор пропорційний, завдяки чому $W_p(p) = k_p$.

Вибираючи передатний коефіцієнт регулятора по формулі

$$k_p = \frac{T_o}{2T_1 k_o k_n k_{oc}}, \quad (2.1)$$

можна одержати

$$W_p(p) = \frac{1}{2T_1 p (T_1 p + 1)}. \quad (2.2)$$

Передатна функція замкнутого контуру відповідно до виразу

$$W_3(p) = W(p) / \{ [1 + W(p)] W_{oc}(p) \}$$

виходить у вигляді

$$W_3(p) = \frac{1/k_{oc}}{2T_1 p(T_1 p + 1) + 1} = \frac{1/k_{oc}}{2T_1^2 p^2 + T_1 p + 1}. \quad (2.3)$$

Таким чином, вибір k_p відповідно до формули (2.2) приводить до того, що розглянутий контур описується передатною функцією коливальної ланки з коефіцієнтом демпфірування $\xi = \sqrt{2}/2$.

Реалізація настроювання на МО можлива і при інших передатних функціях об'єкта. Якщо об'єкт являє собою аперіодичну ланку з передатною функцією по керуванню

$$W_0(p) = k_0 / (T_0 p + 1), \quad (2.4)$$

то повинен бути використаний пропорційно-інтегральний (ПІ) регулятор з передатною функцією

$$W_0(p) = \beta_p \frac{\tau_p p + 1}{\tau_p p},$$

де β_p визначається по формулі, аналогічній (2.2), а стала часу регулятора τ_p вибирається рівною сталій часу об'єкта

$$\beta_p = \frac{T_0}{2T_1 k_0 k_n k_{oc}}; \quad \tau_p = T_0. \quad (2.5)$$

Якщо в контурі немає великої сталої часу T_0 , а передатна функція незмінної частини дорівнює

$$W_n(p) = \frac{k_n k_{oc} k_o}{T_1 p + 1},$$

то регулятор повинен бути інтегруючим (І):

$$W_p(p) = \beta_p / p, \quad (2.6)$$

$$\text{де } \beta_p = \frac{1}{2T_1 k_n k_{oc} k_o}.$$

Якщо об'єкт має передатну функцію по керуванню

$$W_0(p) = \frac{k_{01}k_{02}}{(T_{01}p + 1)(T_{02}p + 1)} \quad (2.7)$$

при $T_{01} > T_{02}$, то аналогічний результат може бути отриманий, якщо застосувати пропорційно-інтегрально-диференційний (ПІД) регулятор з передатною функцією

$$W_p(p) = \frac{(\tau_{p1}p + 1)(\tau_{p2}p + 1)}{\tau_{p1}p}, \quad (2.8)$$

вибравши $\beta_p = T_{01} / 2T_1 k_{01}k_{02}k_{oc}k_n$ і поклавши $\tau_{p1} = T_{01}$, $\tau_{p2} = T_{02}$.

2.2. Настроювання системи на симетричний оптимум

Зведення до нуля статичної помилки в контурі з об'єктом у вигляді інтегруючої ланки може бути досягнуте шляхом використання ПІ-регулятора замість пропорційного. Вибираючи β_p відповідно до формули (2.5), але при цьому поклавши $\tau_p = 4T_1$, можна одержати передатну функцію розімкнутого контуру, настроєного на симетричний оптимум (СО):

$$W_p(p) = \beta_p \frac{\tau_p p + 1}{\tau_p p} \cdot \frac{k_n k_{oc} k_o}{T_1 p + 1} \cdot \frac{1}{T_0 p} = \frac{4T_1 p + 1}{8T_1^2 p^2 (T_1 p + 1)}. \quad (2.9)$$

Передатна функція замкнутого контуру по керуванню має вигляд

$$W_3(p) = \frac{4T_1 p + 1}{(2T_1 p + 1)(4T_1^2 p^2 + 2T_1 p + 1)}. \quad (2.10)$$

При східчастому керуючому впливі час першого досягнення вихідною величиною сталого значення в контурі, настроєному на СО, становить $3,1 T_1$, максимальне перерегулювання досягає 43 %. Проте тривалість перехідного процесу по збурюванню відповідає передатній

функції:

$$\frac{\Delta u_{\text{вих}}(p)}{\Delta u_{\text{збур}}(p)} \alpha_z = \frac{4T_\mu p(T_\mu p + 1)}{8T_\mu^2 p^2(T_\mu p + 1) + 4T_\mu p + 1}.$$

Настроювання ПІ-регулятора на $\tau_p = 4T_1$ може бути зроблене і коли об'єкт являє собою аперіодичну ланку. Чим менше T_0 в порівнянні з T_1 , тим більше запас по фазі й тим менше перерегулювання в кривій перехідного процесу по керуванню. Максимальне відхилення при цьому теж зменшується. При $T_0 = 4T_1$ перехідні процеси відповідають процесам при настроюванні на МО. Якщо $T_0 < 4T_1$, настроювання регулятора на $\tau_p = 4T_1$ втрачає суть.

Якщо $W_0(p)$ визначається виразом (2.7), то, застосовуючи ПІД-регулятор і припускаючи, що $T_{01} > T_{02}$ і $T_{01} > 4T_1$, потрібно вибрати при $T_{02} > 4T_1$:

$$\tau_{p1} = T_{02}; \quad \tau_{p2} = 4T_1; \quad \beta_p = \frac{T_0}{2T_1 k_\pi k_{oc} k_{01} k_{02}} \cdot \frac{T_{01}}{4T_1}, \quad (2.11)$$

при $T_{02} < 4T_1$:

$$\tau_{p1} = 4T_1; \quad \tau_{p2} = T_{02}; \quad \beta_p = \frac{T_0}{2T_1 k_\pi k_{oc} k_{01} k_{02}}. \quad (2.12)$$

Викладені принципи корекції широко використовуються при корекції АСК ЕП.

Розглянемо, як проводиться розрахунок настроювання регулятора на прикладі контуру регулювання струму якоря двигуна постійного струму незалежного збудження в системі "тиристорний керований випрямляч – двигун", скориставшись апаратом передатних функцій. Розрахунок цього контуру проводиться для випадку нерухливого (загальмованого) якоря або при виключеному збудженні двигуна. Тоді структурна схема

цього контуру має вигляд, показаний на рис. 2.2, де наведені передатні функції перетворювача (керованого тиристорного випрямляча) і якірного ланцюга двигуна.

У контурі струму є дві інерційності, що характеризуються сталими часу: $T_e = L_e / R_e$ – електромагнітна стала часу якірного ланцюга; T_1 – стала часу, що відображає інерційність системи фазового керування випрямлячем, запізнювання (дискретність) випрямляча й інерційності датчика струму й регулятора. Ця стала часу називається некомпенсованою або малою сталою часу контуру, тому що звичайно $T_1 = 0,004\text{--}0,01\text{с} < T_e$. При цьому T_e називають великою сталою часу, яку потрібно компенсувати.

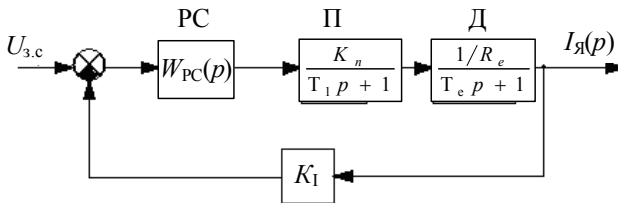


Рисунок 2.2 – Структурна схема контуру регулювання струму

У відповідності зі структурною схемою контуру струму (див. рис. 2.2) передатна функція перетворювача і якірного ланцюга двигуна дорівнює

$$W_1(p) = \frac{k_n / R_e}{(T_1 p + 1)(T_e p + 1)}.$$

Використовуючи сказане вище для настроювання системи на модульний оптимум, одержимо передатну функцію для замкнутого контуру з ПІ-регулятором струму

$$W_3(p) = \frac{1/k_1}{\frac{T_1 \beta_p R_e}{k_1 k_n} p^2 + \frac{\beta_p R_e}{k_1 k_n} p + 1}, \quad (2.13)$$

тобто замкнутий контур являє собою систему другого порядку.

Для того щоб одержати в цій системі оптимальний перехідний процес, потрібно, щоб

$$\beta_p = 2T_1 k_1 k_n / R_e. \quad (2.14)$$

Передавна функція регулятора струму прийме вигляд

$$W_{pc}(p) = \frac{(T_{ep} + 1)R_e}{2T_1 k_1 k_n p}. \quad (2.15)$$

При такому регуляторі струму передавна функція замкнутого контуру

$$W_3(p) = \frac{1/k_1}{2T_1 p(T_1 p + 1) + 1}. \quad (2.16)$$

Як видно із цієї передатної функції, вийшло характеристичне рівняння контуру з оптимальним співвідношенням коефіцієнтів, що й було потрібно. Тобто, перехідний процес у контурі струму при обраному настроюванні регулятора буде оптимальним. У результаті проведених операцій вийшла заміна двох інерційних ланок (одна з них – з великою сталою часу) коливальною ланкою з коефіцієнтом загасання 0,707, близьким до інерційної ланки зі сталою часу $2T_1$, тобто істотно підвищилася швидкість контуру при гарній якості перехідного процесу. Слід зазначити, що коефіцієнт при T_1 у характеристичних рівняннях табл. 2.1 не обов'язково брати рівним 2^n . Замість 2 можна брати число більше або менше. У першому випадку процес буде протікати більш повільно і з меншим перерегулюванням або без нього, у другому – більш швидко, але з більшим перерегулюванням.

Отримане викладеним способом настроювання контуру струму зберігають і при обертовому якорі, коли проявляється вплив ЕРС обертання. При $T_M > 2T_e$ і $T_M \gg T_1$ (де T_M – електромеханічна стала часу привода) цей вплив на перехідний процес у контурі струму при зміні завдання струму виявляється несуттєвим.

Аналогічним чином, як і у випадку контуру струму, розраховується настроювання (параметри регулятора) контуру регулювання швидкості. У цьому контурі використовується або П-регулятор, або ПІ-регулятор швидкості.

П-регулятор застосовується при малому діапазоні регулювання кутової швидкості. Оскільки параметри регулятора вибираються з умови забезпечення заданої якості перехідного процесу, то жорсткість механічних характеристик привода виявляється неконтрольованою і звичайно невисокою. Відношення статичного падіння кутової швидкості в системі з П-регулятором швидкості до статичного падіння кутової швидкості при роботі двигуна в розімкнутій системі дорівнює

$$4T_1 < T_M. \quad (2.17)$$

З виразу (2.17) виходить, що при $T_M < 4T_1$ статичний перепад кутової швидкості в системі підлеглого регулювання буде більше, ніж у розімкнутій системі. Система з П-регулятором швидкості часто називається однократно інтегруючою системою зі зворотним зв'язком по швидкості.

При великому діапазоні регулювання й у випадках, коли система з П-регулятором не забезпечує необхідного статизму механічних характеристик, застосовують ПІ-регулятор швидкості, при якому система стає астатичною по кутовій швидкості, тобто не має статичної помилки регулювання. Вона називається дворазово інтегруючою системою зі зворотним зв'язком по швидкості.

Приклад розрахунку

Виконаємо моделювання двоконтурної системи підпорядкованого керування реверсивного електропривода підйомної установки.

Номінальні та розрахункові дані електрообладнання наведені в табл. 2.2.

Структурна схема моделі для розрахунку при використанні розширення пакета MATLAB – SIMULINK наведена на рис. 2.3.

Коефіцієнт тиристорного перетворювача $k_{\text{ТП}} = 75$, але для встановлення напруги на двигуні на рівні номінальної напруга завдання становить $U_3 = 8,8$ В. Електромагнітна стала часу $T_\epsilon = 0,0238$ с, електро механічна стала $T_M = 0,003$ с. Шаг інтегрування прийнято $h = 0,0025$.

На рис. 2.4 наведені діаграми пуску двигуна в системі ТП-Д з підлеглим керуванням з обмеженням пускового струму на рівні $2I_N$ при моменті навантаження, що дорівнює нулю з подальшим збільшенням навантаження до номінального.

Таблиця 2.2 – Номінальні та розрахункові дані електрообладнання

Приводний двигун П22-145-6К	
Параметр	Значення
Номінальна потужність, кВт	1550
Номінальна швидкість, рад/с	2,513
Номінальна напруга, В	630
Номінальний струм, А	2900
Номінальний ККД	0,85
Опір якоря, Ом	0,01258
Опір додаткових полюсів, Ом	0,008751
Опір компенсаційної обмотки, Ом	0,00264
Момент інерції з урахуванням підйомної установки, кг·м ²	
Тиристорний перетворювач КТЕУ 3200/750	
Номінальна напруга живлячої мережі, В	6000
Номінальна випрямлена напруга, В	750
Номінальний випрямлений струм, А	3200
Згладжувальний дросель СРОСЗ-3200 МУХЛ4/2	
Номінальний струм, А	3200
Індуктивність, мГн	0,5
Трансформатор ТСЗП-4000/ 1 ОУЗ/ 1	
Номінальна потужність, кВт	3220
Напруга первинної обмотки, В	6000
Напруга вентильної обмотки, В	570
Струм вентильної обмотки, А	3265
Випрямлена напруга, В	660
Випрямлений струм, А	4000
Утрати холостого ходу, Вт	6400
Утрати короткого замикання, Вт	18000
Напруга короткого замикання, %	1
Розрахункові дані	
Коефіцієнт ЕРС двигуна, В·с	236,18
Коефіцієнт моменту двигуна, Нм/А	212,69
Еквівалентний опір, Ом	0,02563
Еквівалентна індуктивність, мГн	0,61
Пропорційна частина регулятора струму	0,2395
Інтегральна частина регулятора струму	19,8232
Пропорційна частина регулятора швидкості	5,5539
Інтегральна частина регулятора струму	138,841
Коефіцієнт зворотного зв'язку по струму	0,00172
Коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості	3,979

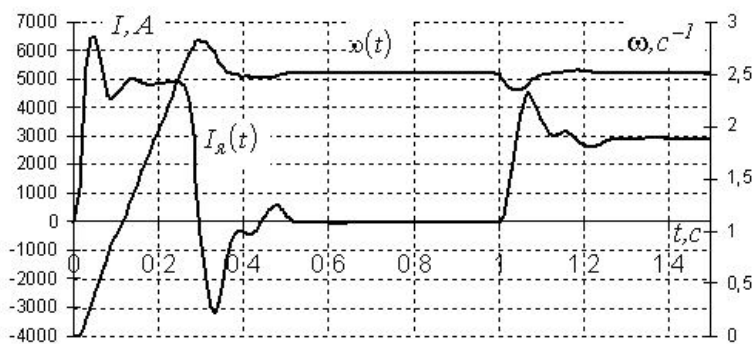


Рисунок 2.4 – Діаграми пуску двигуна

3. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до контрольних завдань з курсу

"Системи керування електроприводами"

Контрольне завдання 1

Розробити принципову схему й описати роботу СКЕП, призначеної для автоматичного керування (АК) пуском, гальмуванням або реверсом двигуна у функції часу, току або швидкості відповідно до варіанта завдання. Передбачити функцію захисту від аварійних режимів: розрив обмотки збудження ДПС, одночасне вмикання реверсивних контакторів, перевантаження двигуна, нульового і максимально-струмового захисту. Відповідно до варіанту завдання, виданого викладачем, визначити шифр завдання (табл. 1, Додаток 2), кожна з чотирьох цифр якого містить інформацію про тип двигуна (перша цифра), функції управління пуском і гальмуванням (друга і третя цифри) і про спосіб подавання командних сигналів (четверта цифра) – табл. 2, Додаток 2.

Приклад. Відповідно до варіанту 3 – шифр 1122 – необхідно розробити принципову схему автоматичного управління двигуном постійного току з незалежним збудженням, пуск якого повинен здійснюватися у функції часу, із застосуванням реле управління, що дають витримку часу при відключенні обмотки управління, і з динамічним гальмуванням у функції швидкості. Подача командних сигналів "Пуск", "Стоп" – від командоконтроллера. Схема повинна здійснювати функцію нульового і максимально-струмового захисту, захист ДПС від перевантаження, від обриву обмотки збудження.

Методичні вказівки до завдання 1

Принципова схема автоматичного управління двигуном у своєму складі містить типові вузли, що реалізують функції управління і захисту, тому до виконання контрольного завдання необхідно приступити після вивчення принципів побудови та реалізації функцій управління і захисту розізнаних СКЕП.

Опис роботи СКЕП повинен містити опис стану апаратів до подачі командного сигналу і роботи схеми після подачі відповідної команди.

При утрудненні в реалізації режимів пуску і гальмування (реверса) в одній схемі допускається подавання двох окремих схем управління.

Контрольне завдання 2

Розрахувати параметри регуляторів струму і швидкості електропривода системи тиристорний перетворювач–двигун постійного струму незалежного збудження. Система управління – двоконтурна підпорядкованого регулювання. Розрахунок параметрів регулятора зробити з умови оптимізації контурів регулювання за модульним оптимумом МО.

Дані до завдання взяти з табл. 3 Додатку 3, де:

$U_{\text{нд}}, I_{\text{нд}}, \omega_{\text{нд}}$ – номінальні напруга, струм і оберти ДПС;

$R_{\text{я}}$ – опір якоря ДПС;

$U_{\text{MAX}}, I_{\text{MAX}}, \omega_{\text{MAX}}$ – максимальні припустимі обмежені у часі напруга, струм і оберти ДПС при номінальному магнітному потоці (регулювання обертів у першій зоні);

$U_{\text{нп}}, I_{\text{нп}}$ – номінальні напруга і струм тиристорного перетворювача;

R_E, L_E – еквівалентні опір та індуктивність якріного ланцюга двигуна;

J – момент інерції електропривода, приведений до вала двигуна.

Перевірку відповідності настроювання контурів регулювання зробити на ПЕОМ.

Методичні вказівки до завдання 2

Перед виконанням завдання необхідно вивчити принципи побудови замкнутих СКЕП із підпорядкованим регулюванням параметрів, динамічні характеристики контуру, настроєного за МО, метод оптимізації контурів струму і швидкості за МО [1].

За функціональною схемою системи ТП–ДПС (рис. 1, Додаток 1) складається структурна схема для визначення і коригування динамічних характеристик (рис. 2, Додаток 1).

Кожний з елементів системи поданий динамічними ланками: перетворювач, якріний ланцюг електропривода, механічна частина електропривода, ланцюги негативних зворотних зв'язків з регульованих параметрів – струму і швидкості.

Динамічні ланки містять коефіцієнти передачі і сталі часу, що необхідно визначити до розрахунку параметрів регуляторів.

1. Розрахунок параметрів СКЕП відповідно до структурної схеми, наведеної на рис. 2, Додаток 1:

а) розрахунок параметрів тиристорного перетворювача:

коефіцієнт передачі ТП

$$K_{\text{ТП}} = E_{\text{П}} / U_{\text{у}},$$

де $U_{\text{у}}$ – напруга керування ТП;

$E_{\text{П}}$ – ЕРС ТП при максимальному значенні $U_{\text{у}} = 10 \text{ В}$;

$E_{\text{П}} \approx 1,1 U_{\text{НП}}$; $U_{\text{НП}}$ повинно бути не менше $U_{\text{МАХ}}$ двигуна;

$T_{\text{П}}$ – стала часу ТП, для трифазної мостової схеми випрямляча і напівпровідникового СІФУ $T_{\text{П}} \approx 0,004 \text{ с}$;

б) розрахунок параметрів ЕП:

$T_{\text{Е}}$ – електромагнітна стала часу кірного ланцюга,

$$T_{\text{Е}} = L_{\text{Е}} / R_{\text{Е}};$$

$T_{\text{М}}$ – електромеханічна стала часу ЕП,

$$T_{\text{М}} = J R_{\text{Е}} / C^2,$$

де C – стала двигуна, що визначається за номінальними параметрами, В·с/рад,

$$C = (U_{\text{Н}} - I_{\text{Н}} R_{\text{Я}}) / \omega_{\text{Н}} \text{ В·с/рад.};$$

в) розрахунок параметрів ланцюгів зворотних зв'язків:

коефіцієнт передачі негативного зворотного зв'язку за струмом,

$K_{\text{С}}$, В/А,

$$K_{\text{С}} = U_{\text{ЗС МАХ}} / I_{\text{МАХ}} \text{ В/А},$$

де $U_{\text{ЗС МАХ}}$ – величина з.з. за струмом при $\omega_{\text{МАХ}}$, $U_{\text{ЗС МАХ}} = 10 \text{ В}$ (приймається з розрахунку обмеження напруги виходу регулятора швидкості);

$I_{\text{МАХ}}$ – максимальний струм ДПС, А;

коефіцієнт передачі з.з. за швидкістю, $K_{\text{Ш}}$, Вс/рад,

$$K_{\text{Ш}} = U_{\text{ЗС МАХ}} / \omega_{\text{МАХ}}, \text{ Вс/рад},$$

де $U_{\text{ЗС МАХ}} = 10 \text{ В}$ – величина з.з. за швидкістю при максимальних обертах двигуна $\omega_{\text{МАХ}}$; $U_{\text{ЗС МАХ}}$ приймається з розрахунку максимальної напруги завдання швидкості $U_{\text{ЗЗ}} = 10 \text{ В}$.

Сталі часу фільтрів датчиків струму і швидкості, T_C і T_{III} , с.

Прийняти T_C і $T_{III} = 0,002$ с.

2. Визначення передатних функцій регуляторів.

Передатна функція розімкнутого, оптимізованого за МО контуру, має вигляд

$$W_{\text{ОПТ}}(p) = 1/(2T_{\mu}p(T_{\mu}p + 1)),$$

де T_{μ} – некомпенсована стала часу контуру.

Призначення регулятора – привести передатну функцію контуру відповідно до виду перехідної функції оптимізованого за МО контуру. У цьому випадку динамічні характеристики контуру будуть відповідати характеристикам контуру оптимальної структури з $W_{\text{ОПТ}}(p)$.

Структурна схема контуру струму подана на рис. 3, Додаток 1, і містить передатні функції ТП, якірного ланцюга ЕП і ланцюга з.з. за струмом.

Передатна функція об'єкта регулювання контуру струму

$$\begin{aligned} W_{\text{ОБК}}(p) &= K_{\Pi} / (T_{\Pi}p + 1) \cdot (1/R_E) / (T_Ep + 1) \cdot K_C / (T_Cp + 1) \approx \\ &\approx (K_{\Pi}K_C / R_E) / ((T_{\mu C}p + 1)(T_Ep + 1)), \end{aligned}$$

де $T_{\mu C} = T_{\Pi} + T_C$ – некомпенсована еквівалентна стала часу контуру струму.

Зрівняння

$$W_{\text{РС}}(p)W_{\text{ОБК}}(p) = W_{\text{ОПТ}}(p) = 1/(2T_{\mu C}p(T_{\mu C}p + 1))$$

знаходимо

$$\begin{aligned} W_{\text{РС}}(p) &= (T_Ep + 1)R_E / (2T_{\mu C}pK_{\Pi}K_C) = \\ &= T_ER_E / (2T_{\mu C}pK_{\Pi}K_C) + R_E / (2T_{\mu C}pK_{\Pi}K_C) = K_{\text{РС}} + 1/T_Cp, \end{aligned}$$

де $K_{\text{РС}} = T_ER_E / 2T_{\mu C}pK_{\Pi}K_C$; $T_{\text{РС}} = T_E / K_{\text{РС}}$.

Тобто, регулятор струму являє собою ІІІ-регулятор із коефіцієнтом передачі $K_{\text{РС}}$ і сталої часу $T_{\text{РС}}$.

Структурна схема контуру швидкості подана на рис. 4, Додаток 1, і містить оптимізований за МО замкнутий контур струму з передатною функцією та передатну функцію механічної частини ЕП зі зворотним зв'язком за швидкістю:

$$\Phi_{\text{ОПТ } C}(p) = (1/K_C)/(2T_{\mu C}^2 p^2 + 2T_{\mu C} p + 1) \approx (1/K_P)/(2T_{\mu C} p + 1).$$

Передатна функція об'єкта регулювання контуру швидкості

$$\begin{aligned} W_{\text{ОБК } C}(p) &= (1/K_C)/(2T_{\mu C} p + 1)(R_E/T_{\text{МШ}} p)K_{\text{Ш}}/(T_{\text{Ш}} p + 1) \approx \\ &\approx (R_E K_{\text{Ш}}/K_C)/(T_{\mu \text{Ш}} p + 1)T_{\text{МШ}} p, \end{aligned}$$

де $T_{\mu \text{Ш}} = 2T_{\mu C} p + T_{\text{Ш}}$ – мала некомпенсована еквівалентна стала часу контуру швидкості.

Зрівняння

$$W_{\text{РШ}}(p)W_{\text{ОБК } \text{Ш}}(p) = W_{\text{ОПТ}}(p) = 1/2T_{\mu \text{Ш}} p(T_{\mu \text{Ш}} p + 1)$$

знаходимо

$$W_{\text{РШ}}(p) = K_C T_M / (2T_{\mu \text{Ш}} p K_{\text{Ш}} R_E) = K_{\text{РШ}},$$

тобто регулятор швидкості являє собою П-регулятор із коефіцієнтом передачі $K_{\text{РШ}}$:

$$K_{\text{РШ}} = K_C T_M / (2T_{\mu C} K_{\text{Ш}} R_E).$$

3. Дослідити динамічні показники СУЕП за допомогою моделювання на ПЕОМ. Дослідити режим пуску з $M_C = 0,2M_{\text{НОМ}}$ та режим накиду статичного моменту навантаження $M_C = M_{\text{НОМ}}$.

Контрольне завдання 3

Дослідити статичні і динамічні властивості систем автоматичного регулювання швидкості обертання з різними видами зворотних зв'язків.

Дослідженню підлягають регулятори швидкості зі зворотним зв'язком по швидкості (третя підгрупа), зі зворотним позитивним і негативним зв'язками по струму (перша підгрупа) і зі зворотним зв'язком по напрузі (друга підгрупа). Функціональна схема системи автоматичного

регулювання електропривода постійного струму з різними видами зворотних зв'язків наведена на рис. 5, Додаток 4.

Варіант завдання вибирається в такий спосіб. Вся група студентів розбивається на три підгрупи: перша підгрупа виконує дослідження регулятора швидкості зі зворотним зв'язком по струму, друга – зі зворотним зв'язком по напрузі й третя – зі зворотним зв'язком по швидкості. Всі три підгрупи вибирають тип двигуна і його параметри з табл. 4 Додатку 5.

Розбивка навчальної групи на підгрупи виконується старостою групи. Списки підгруп разом із шифрами передаються викладачеві, що буде перевіряти контрольні роботи й проводити консультації по їхньому виконанню (або викладачеві, що читає лекції за курсом).

Завдання для дослідження регулятора швидкості з негативним зворотним зв'язком по швидкості, здійснюваним за допомогою тахогенератора ТГ (функціональна схема системи, рис. 5):

- визначити рівняння динаміки й передатні функції окремих ланок, що утворюють систему, а саме: підсилювача напруги ПН, керованого тиристорного перетворювача ТП, двигуна постійного струму з незалежним збудженням Д, тахогенератора ТГ, підсилювача напруги ланцюга зворотного зв'язку ПЗЗ. При складанні рівнянь елементи ПН, ПЗЗ, ТГ вважати лінійними безінерційними, властивості яких характеризуються наступними коефіцієнтами підсилення відповідно: $K_{\text{ПН}}$, $K_{\text{ЗЗЗ}}$, $K_{\text{ТГ}}$. При складанні рівнянь динаміки двигуна сталого струму необхідно враховувати як електромагнітну T_E , так і електромеханічну T_M сталі часу, а також момент статичного опору M_C (або струм статичного навантаження $T_C = M_C/C$, де C – стала по моменту), вважаючи при цьому статичну характеристику, що зв'язує швидкість обертання двигуна ω і напругу U_D , що прикладається до ланцюга якоря, тобто $\omega = f(U_D)$ при $U_B = \text{const}$, лінійною. Тиристорний перетворювач вважати лінійною, безперервною ланкою з передатною функцією $W_{\text{ТП}}(p) = K_{\text{ТП}}/(\tau_p + 1)$, де τ – середньостатистичне запізнювання ТП, а $K_{\text{ТП}}$ – його коефіцієнт підсилення;

- визначити диференціальне рівняння розімкнутої системи, що зв'язує вихід системи $\omega(t)$ із вхідним сигналом $U_D(t)$, при дії на систему збудування у вигляді моменту статичного опору $M_C(t)$ або струму $I_C(t)$;

- визначити передатну функцію розімкнутої системи по керуючому впливу $U_3(t)$:

$$W(p) = \left. \frac{\omega(p)}{U_3(p)} \right|_{M_C=0} ;$$

– визначити передатні функції замкнутої системи по впливу, що задає, $U_3(t)$:

$$\Phi(p) = \left. \frac{\omega(p)}{U_3(p)} \right|_{M_C=0};$$

і впливу, що збурює, $M_C(t)$:

$$\Phi_f(p) = \left. \frac{\omega(p)}{M_C(p)} \right|_{U_3=\text{const}};$$

– побудувати алгоритмічні схеми розімкнутої і замкнутої систем;
– визначити рівняння статички замкнутої системи, що зв'язують швидкість обертання двигуна ω с сигналом, що задає, U_3 і моментом статичного опору M_C . За отриманими рівняннями статички оцінити вплив $K_{33\text{III}}$ на жорсткість механічної характеристики $\omega = f(M_C)$ при $U_3 = \text{const}$ і величину статичної помилки. Для цього варто якісно побудувати характеристики $\omega = f(M_C)$ або $\omega = f(I_C)$ при $U_3 = \text{const}$ для декількох значень $K_{33\text{III}}$, включаючи $K_{33\text{III}} = 0$ (система без зворотного зв'язку); швидкість ідеального холостого ходу ω_{0P} у розімкнутій системі прийняти рівною швидкості ідеального холостого ходу ω_{03} у замкнутій системі;

– використовуючи ЕОМ, зняти перехідні характеристики замкнутої системи для трьох значень $K_{33\text{III}}$. За отриманими характеристиками, а також шляхом порівняння передатних функцій $W(p)$ і $\Phi(p)$ оцінити вплив жорсткого негативного зворотного зв'язку по швидкості на якість процесу керування (стійкість, якість перехідного процесу, точність);

– сформулювати основні властивості системи автоматичного регулювання швидкості із жорстким негативним зворотним зв'язком по швидкості.

Вирішити попереднє завдання для регуляторів швидкості із жорсткими позитивними й негативними зворотними зв'язками по струму (перша підгрупа) і з жорстким негативним зворотним зв'язком по напрузі (друга підгрупа).

Методичні вказівки до завдання 3

Приступати до виконання контрольної роботи треба тільки після вивчення теоретичної частини відповідного розділу.

Методика складання рівнянь динаміки окремих елементів і системи в цілому стосовно до регуляторів швидкості вивчалася в курсі ТАУ [4].

Визначення перехідних функцій регуляторів швидкості з різними видами зворотних зв'язків здійснюється за допомогою ЕОМ.

При визначенні перехідних функцій замкнутих систем регулювання швидкості варто самостійно вибрати коефіцієнти підсилення тахогенератора $K_{\text{ТГ}}$, тиристорного перетворювача разом із СІФК $K_{\text{ТП}}$, і коефіцієнт підсилення ланцюга зворотного зв'язку $K_{\text{ЗЗ}}$. Коефіцієнт підсилення (передачі) двигуна $K_{\text{Д}}$, а також некомпенсуєма стала часу τ розраховуються: $K_{\text{Д}}$ за даними табл. 4 Додатка 5 (по номінальній напрузі на вході й швидкості обертання), а τ – за формулою

$$\tau = t/mf_{\text{М}},$$

де m – число пульсацій випрямленої ЕРС за період t ; $f_{\text{М}} = 50$ Гц – частота живильної мережі.

Параметри $K_{\text{ТГ}}$, $K_{\text{ТП}}$, $K_{\text{ЗЗ}}$ повинні бути обрані так, щоб система була сталою ($A_{\text{ЗАП}} \geq 2$).

Контрольне завдання 4

Синтез коригувальних ланцюгів електропривода

Виконати синтез коригувальних ланцюгів системи автоматичного керування (САК) тиристорного електропривода.

Дані до завдання взяти з табл. 4.1 та 4.2 Додатка 5 і табл. 5 Додатка 6.

Методичні вказівки до завдання 4

Найбільш повні дослідження ВЕП з ПІ-регуляторами проведені в роботі [10], де на підставі аналізу замкнутої САК ВЕП рекомендується вибирати коригувальні ланцюги так, щоб характеристичне рівняння замкнутої по частоті обертання САК ВЕП мало один дійсний корінь і два комплексних. Причому дійсний корінь і дійсні частини комплексних коренів однакові по величині. Далі проведені розрахунки перехідних характеристик по керуючому впливу і впливу, що збурює, при заданих значеннях коренів. Задаючись формою перехідної характеристики, можна підібрати параметри коригувальних ланцюгів з ряду рекомендованих, виражених через узагальнені параметри A^* , B^* і C^* , значення яких наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Узагальнені параметри

Точки настроювання	Параметри оптимального настроювання			$\frac{\omega_c}{\omega_p}$
	A^*	B^*	C^*	
1	0,583	0,12	0,5	1,085
2	0,823	0,2	0,7	1,010
3	1,14	0,307	0,9	0,989
4	1,54	0,44	1,1	0,982
5	2	0,593	1,3	0,979

Формули для розрахунку коригувальних ланцюгів тиристорного електропривода підлеглого регулювання потоку якоря й частоти обертання записані через параметри структурної схеми (рис. 4.1).

Стала часу ПІ-регулятора струму якоря

$$T_C = T_e(\omega_p). \quad (4.1)$$

Коефіцієнт пропорційності регулятора струму

$$\kappa_i = \frac{1}{\kappa_C \frac{\kappa_{BO}}{\kappa_e}(\omega_p)} \cdot \frac{\omega_p \cdot T_e(\omega_p)}{C}, \quad (4.2)$$

де κ_C – коефіцієнт зворотного зв'язку по струму;

κ_{BO} – динамічний коефіцієнт підсилення керованого випрямляча, що при лінеаризації тиристорного електропривода вважається постійним, залежним від робочої точки на характеристиці $U_C = f(\alpha)$;

ω_p – резонансна частота;

T_e – еквівалентна електромагнітна стала часу якорного ланцюга;

C – параметр оптимального настроювання.

Еквівалентний опір якорного ланцюга двигуна враховує перекриття вентилів керованого випрямляча

$$R_e = R_d + R_\Phi + \omega_0 L_\Phi \cdot \frac{m}{2\pi},$$

де R_d – власний активний опір обмотки якоря двигуна; R_Φ – активний опір фаз живильної мережі.

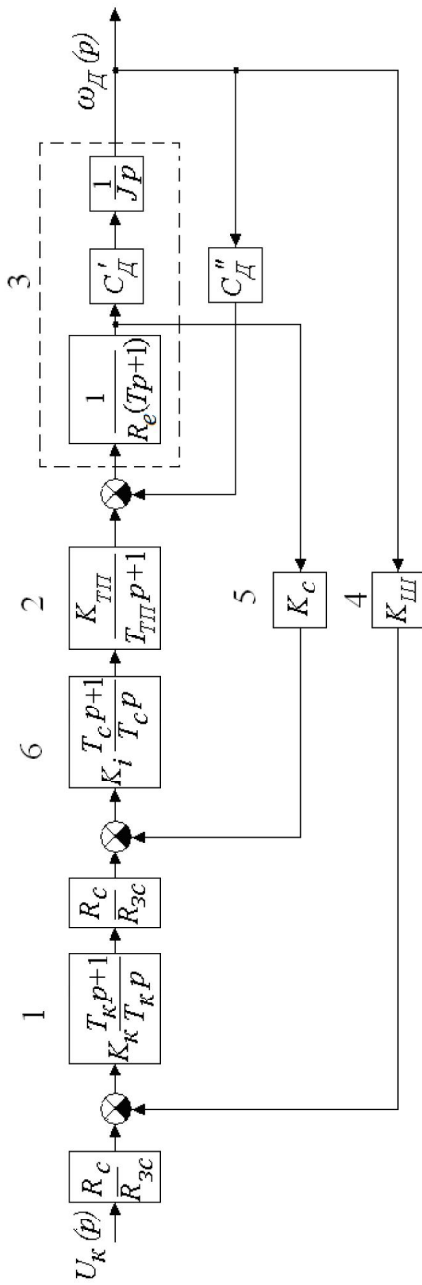


Рисунок 4.1 – Структурна схема:

1 – ПІ-регулятор швидкості; 2 – тиристорний перетворювач ТП; 3 – об'єкт керування – двигун Д; 4 – зворотний зв'язок по швидкості; 5 – зворотний зв'язок по струму; 6 – ПІ-регулятор струму

Стала часу ІІІ-регулятора частоти обертання, с,

$$T_k = \frac{A}{B} \cdot \frac{C}{\omega_p}, \quad (4.3)$$

де A, B, C – параметри оптимального настроювання.

Коефіцієнт пропорційного посилення регулятора частоти обертання

$$\kappa_k = \frac{A \cdot J \cdot \kappa_1}{C_\Phi \cdot \kappa_C} \cdot \frac{\omega_p}{C}, \quad (4.4)$$

де κ_C – коефіцієнт зворотного зв'язку по швидкості;

J – момент інерції механізму, приведений до валу двигуна;

C_Φ – стала двигуна.

Параметри T_e та $\frac{K_{BO}}{R_e}$ визначаються з експериментальних залеж-

ностей, наведених на рис. 4.2. Ці параметри істотно залежать від частоти й амплітуди струму якоря. Зі зменшенням амплітуди коливань струму якоря значення T_e (еквівалентна електромагнітна стала часу якірного

ланцюга) і $\frac{K_{BO}}{R_e}$ зменшуються, причому T_e зменшується більше,

ніж $\frac{K_{BO}}{R_e}$.

При такій зміні параметрів тиристорного електропривода і незмінного настроювання резисторів запас стійкості системи збільшується, тому що збільшується запас по фазі й по частоті зрізу струмового контуру у двоконтурних системах. Тому для аналізу САК необхідно, щоб значення еквівалентних параметрів ланцюга якоря двигуна, зняті при досить великій амплітуді коливань струму якоря на всіх частотах, були незмінними й рівні

$$I_{я} = 1,5 \cdot I_{Д},$$

де $I_{Д}$ – номінальний струм двигуна.

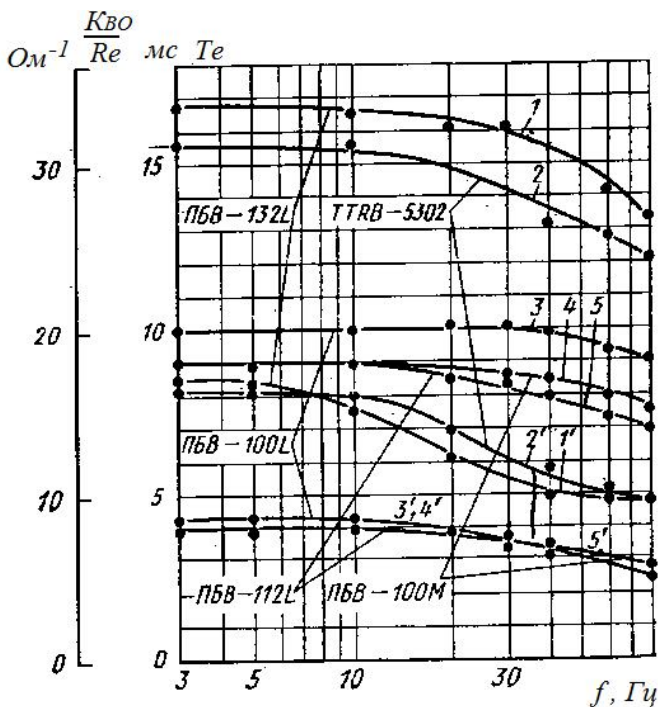


Рисунок 4.2 – Параметри якірних ланцюгів ВЕП серії ЕТ6 з різними двигунами при вторинній напрузі трансформатора 110 В:

$$1-5 - \frac{K_{BO}}{R_e}; \quad 1'-5' - T_e$$

Криві залежностей $T_e = f(f_p)$ і $\frac{K_{BO}}{R_e} = f(f_p)$, побудовані за експериментальними даними для двигунів, що працюють з електроприводом типу "КЕМЕК", наведені в табл. 4 додатка 5 і табл. 5 додатка 6. Розрахунок коригувальних ланцюгів проводиться з використанням цих залежностей.

Резонансна частота

$$\omega_p = \frac{C^*}{T_e'}$$

де T_e' – еквівалентна стала часу оптимізованого струмового контуру; практично збігається з частотою зрізу ω_C розімкнутого контуру швидкості обертання двигуна. У табл. 4.1 наведені відношення цих частот, розраховані для всіх точок настроювання.

При розрахунку параметрів коригувальних ланцюгів передбачалося, що КВ безінерційний. Реальні КВ мають обмежену робочу смугу частот і відмінний від одиниці відносний комплексний коефіцієнт передачі на субгармонійних частотах, що вимагає при синтезі ВЕП дотримання умов стійкості до автоколивань на субгармонійних частотах.

Параметри ВЕП наведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Параметри ВЕП

Параметр	$\omega_p = 2\pi \cdot 10c^{-1}$	$\omega_p = 2\pi \cdot 10c^{-1}$
Момент інерції двигуна J_D , $\text{кг} \cdot \text{м}^2$	0,011	
Момент інерції маховика J_M , $\text{кг} \cdot \text{м}^2$	0,059	
Стала двигуна C_Φ , В·с	0,520	
Коефіцієнт зворотного зв'язку: по струму κ_C , В·А	0,102	
по частоті обертання κ_{Π} , В·с	0,089	
Еквівалентні параметри якірного ланцюга: T_e , мс $\frac{K_{BO}}{R_e}$, Ом^{-1}	4,04 1801	
Параметри регулятора: – струму T_i , мс κ_i	0,4	
– частоти обертання T_k , мс κ_k	0,197 45,8 11,4	0,098 91,6 7
Частота вільних коливань q_2 , Гц	240	
Параметри згасання: ξ_2 ξ_1	0,0111 0,0527	
Частота резонансного мінімуму ξ_2 , Гц	98	
Максимальна смуга частот $\frac{\omega_{p\max}}{2\pi}$	11,9	8,02

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. **Башарин, А. В.** Управление электроприводами [Текст] : учебное пособие для вузов / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. – Л. : Энергоиздат, 1982. – 392 с.

2. **Елисеев, В. А.** Справочник по автоматизированному электроприводу [Текст] / В. А. Елисеев, А. В. Шинянский. – М. : Энергоиздат, 1983, 450 с.

3. **Зимін, Е. М.** Автоматичне керування електроприводами [Текст] / Е. М. Зимін, В. І. Яковлев. – К. : Вища школа, 1979. – 318 с.

4. **Ключев, В. И.** Теория электропривода [Текст] : учеб. для вузов / В. И. Ключев. – М. : Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.

5. **Лебедев, А. М.** Следящие электроприводы станков с ЧПУ [Текст] / А. М. Лебедев, Р. Т. Орлова, А. В. Пальцев. – М. : Энергоиздат, 1988. – 258 с.

6. **Соколовский, Г. Г.** Электроприводы переменного тока с частотным регулированием [Текст] / Г. Г. Соколовский. – М. : Издательский центр "Академия", 2006. – 272 с.

7. **Соляник, В. П.** Системы керування електроприводами [Текст] / В. П. Соляник. – К. : УМКВ, 1992.

8. **Терехов, В. М.** Системы управления электроприводов [Текст] : учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. М. Терехов, О. И. Осипов ; под ред. В. М. Терехова. – 2-е изд., стер. – М. : Изд. центр "Академия", 2006. – 304 с.

9. **Чиликин, М. Г.** Общий курс электропривода [Текст] / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер. – М. : Энергоиздат, 1981. – 575 с.

10. Эффективность применения высокомоментных двигателей в станкостроении [Текст] / Э. Г. Королев, И. А. Волкомирский, А. М. Лебедев [и др.]. – М. : Машиностроение, 1981.

Додаток 1

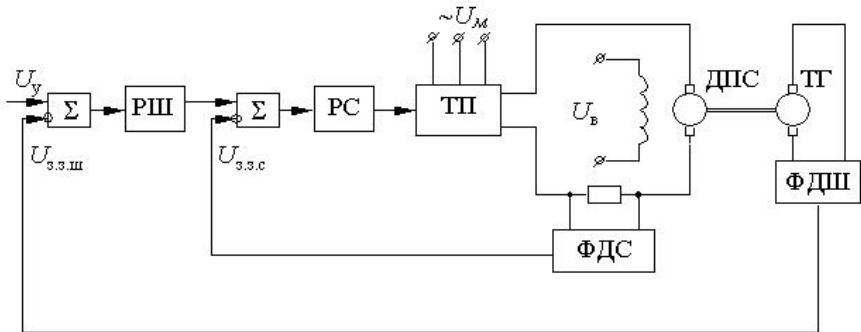


Рисунок 1 – Функціональна схема системи ТП–ДПС:

U_y – керуючий сигнал;

$U_{3.3.ш.}$ – сигнал зворотного зв'язку за швидкістю;

$U_{3.3.c.}$ – сигнал зворотного зв'язку за струмом;

$P_{ш}$ – регулятор швидкості;

P_c – регулятор струму;

ТП – тиристорний перетворювач;

ДПС – двигун постійного струму;

ТГ – тахогенератор;

ФДС – фільтр датчика струму;

ФДШ – фільтр датчика швидкості;

$\sim U_M$ – напруга трифазної мережі;

U_B – напруга збудження ДПС

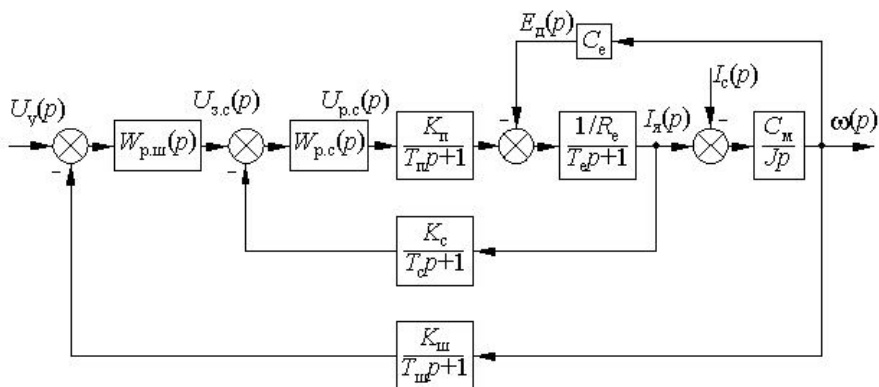


Рисунок 2 – Структурна схема двоконтурної системи підпорядкованого регулювання:

- $W_{p.\omega}$ – передавальна функція регулятора швидкості;
 $W_{p.c}$ – передавальна функція регулятора струму;
 K_{Π} – коефіцієнт підсилення тиристорного перетворювача;
 T_{Π} – стала часу тиристорного перетворювача;
 R_e, T_e – відповідно активний опір і стала часу якорного кола двигуна;
 C_m, C_e – відповідно коефіцієнти моменту та проти-ЕРС двигуна;
 J – момент інерції електропривода, приведений до вала двигуна;
 K_c, T_c – відповідно коефіцієнт підсилення і стала часу ДС;
 K_{ω}, T_{ω} – відповідно коефіцієнт підсилення і стала часу ДШ;
 $U_{\omega.c}(p)$ – сигнал завдання струму;
 $U_{p.c}$ – сигнал на виході регулятора струму;
 $E_d(p)$ – ЕРС двигуна;
 $I_a(p)$ – струм якоря двигуна;
 $I_c(p)$ – струм статичного навантаження;
 $\omega(p)$ – частота обертання вала двигуна

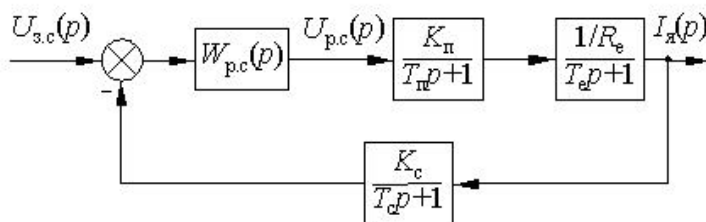


Рисунок 3 – Структурна схема контуру струму

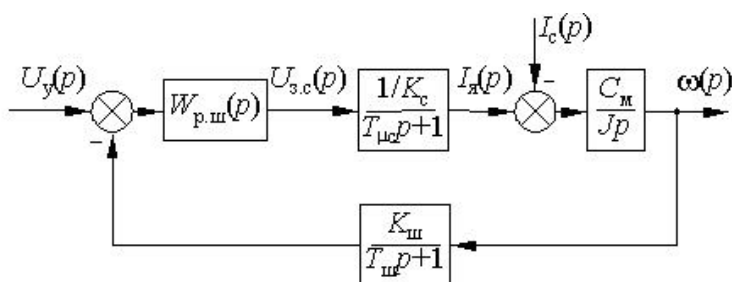


Рисунок 4 – Структурна схема контуру швидкості

Додаток 2

Таблиця 1 – Номери варіантів контрольного завдання 1

Номер варіан- та 1	Шифр завдан- ня 2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
		8	3241	16	1142	24	3412	32	1211	40	1322
1	1121	9	2131	17	1241	25	1421	33	1112	41	2111
2	1221	10	2231	18	1242	26	1422	34	1212	42	2211
3	1122	11	2132	19	4351	27	3132	35	3111	43	2112
4	1222	12	2232	20	4451	28	3232	36	3211	44	2212
5	3131	13	1311	21	1411	29	3142	37	3112	45	4352
6	3231	14	1312	22	1412	30	3242	38	3212		
7	3141	15	1141	23	3411	31	1111	39	1321		

Таблиця 2 – Шифр завдання

Цифра шифру завдання				Зміст завдання
1 ^а	2 ^а	3 ^а	4 ^а	
1				АУ двигуном постійного струму незалежного збудження
2				АУ асинхронним короткозамкненим двигуном (АД)
3				АУ АД із фазним ротором
4				Важкий пуск синхронного двигуна (СД)
	1			Пуск у функції часу (із застосуванням електромагнітних реле часу з витримкою часу при відключенні обмотки управління)
	2			Пуск у функції часу (із застосуванням реле часу з витримкою часу при подачі напруги на обмотку управління)
	3			Пуск (подача збудження СД) у функції швидкості (ЕДС)
	4			Пуск (подача збудження СД) у функції струму
		1		Гальмування динамічне у функції часу
		2		Гальмування динамічне у функції швидкості
		3		Гальмування противключенням у функції швидкості (зупинка двигуна)
		4		Гальмування противключенням у функції швидкості (реверс двигуна)
		5		Гасіння поля СД
			1	Управління кнопками (Пуск, Стоп, Вперед, Назад)
			2	Управління командоконтроллером

Додаток 3

Таблиця 3 – Вихідні дані до завдання 2

Ва- ріант	$U_{нд},$ В	$I_{нд},$ А	$\omega_n,$ рад/с	$U_{тах},$ В	$I_{тах},$ А	$\omega_{тах},$ рад/с	$R_я,$ Ом	$U_{ни},$ В	$I_{ни},$ А	$R_с,$ Ом	$L_с,$ мГн	$\zeta,$ кг м ²
1	50	20	105	100	40	210	0.2	100	40	0.4	5	0.02
2	60	18	105	120	36	210	0.25	120	40	0.5	6	0.02
3	70	17	105	140	34	210	0.3	140	40	0.6	8	0.025
4	80	16	105	160	32	210	0.35	160	40	0.7	10	0.025
5	90	15	105	180	30	210	0.4	180	40	0.8	12	0.03
6	100	14	105	200	28	210	0.5	200	40	1.0	15	0.03
7	110	13	105	220	26	210	0.6	220	40	1.2	18	0.03
8	120	12	105	240	24	210	0.7	240	40	1.4	22	0.035
9	130	11	105	260	22	210	0.8	260	40	1.6	26	0.035
10	140	10	105	280	20	210	0.9	280	40	1.8	32	0.04
11	160	9	105	320	18	210	1.0	320	40	2.0	36	0.04
12	180	8	105	360	16	210	1.2	360	40	2.4	40	0.04
13	200	7	105	400	14	210	1.4	400	40	2.8	45	0.045
14	220	6	105	440	12	210	1.6	440	40	3.2	50	0.045
15	230	5.5	105	460	11	210	1.8	460	40	3.6	58	0.045
16	50	5	157	100	10	315	1	100	10	2.0	34	0.002
17	60	5	157	120	9.5	315	1.5	120	10	3.0	40	0.003
18	70	4	157	140	9	315	2	140	10	4	46	0.003
19	80	4	157	160	8.5	315	2.2	160	10	4.4	52	0.003
20	90	4	157	180	8	315	2.3	180	10	4.6	60	0.003
21	100	3.5	157	200	7.5	315	2.4	200	10	4.8	70	0.004
22	110	3.5	157	220	7	315	2.5	220	10	5	75	0.005
23	120	3.5	157	240	6.5	315	2.6	240	10	5.2	80	0.006
24	130	3	157	260	6	315	2.8	260	10	5.6	80	0.005
25	140	3	157	280	6	315	2.7	280	10	5.4	90	0.007
26	160	3	157	320	5.5	315	2.9	320	10	5.8	100	0.008
27	180	3	157	360	5	315	3.2	360	10	6.4	105	0.009
28	200	3	157	400	4.5	315	3.5	400	10	7	107	0.01
29	220	2	157	440	4	315	4	440	10	8	110	0.01
30	230	2	157	460	3.5	315	4.2	460	10	8.4	117	0.01
31	50	50	80	100	100	160	0.09	100	100	0.18	3.5	0.09
32	60	50	80	120	95	160	0.1	120	100	0.2	4	0.1

Продовж. табл. 3

Ва- ріант	$U_{нд},$ В	$I_{нд},$ А	$\omega_{н},$ рад/с	$U_{max},$ В	$I_{max},$ А	$\omega_{max},$ рад/с	$R_{я},$ Ом	$U_{нп},$ В	$I_{нп},$ А	$R_{е},$ Ом	$L_{е},$ мГн	$\mathfrak{I},$ кг м ²
33	70	45	80	140	90	160	0.12	140	100	0.24	4.2	0.1
34	80	45	80	160	85	160	0.14	160	100	0.28	5	0.15
35	90	40	80	180	80	160	0.16	180	100	0.32	5.2	0.15
36	100	40	80	200	75	160	0.18	200	100	0.36	6	0.2
37	110	35	80	220	70	160	0.20	220	100	0.4	6	0.2
38	120	35	80	240	65	160	0.22	240	100	0.44	6.5	0.25
39	130	30	80	260	60	160	0.25	260	100	0.5	6.2	0.25
40	140	30	80	280	60	160	0.24	280	100	0.48	6.5	0.3
41	160	30	80	320	55	160	0.26	320	100	0.52	7	0.35
42	180	25	80	360	50	160	0.28	360	100	0.56	7	0.4
43	200	25	80	400	47	160	0.3	400	100	0.6	8	0.4
44	220	22	80	440	45	160	0.32	440	100	0.64	8	0.45
45	230	22	80	460	43	160	0.35	460	100	0.7	9	0.45

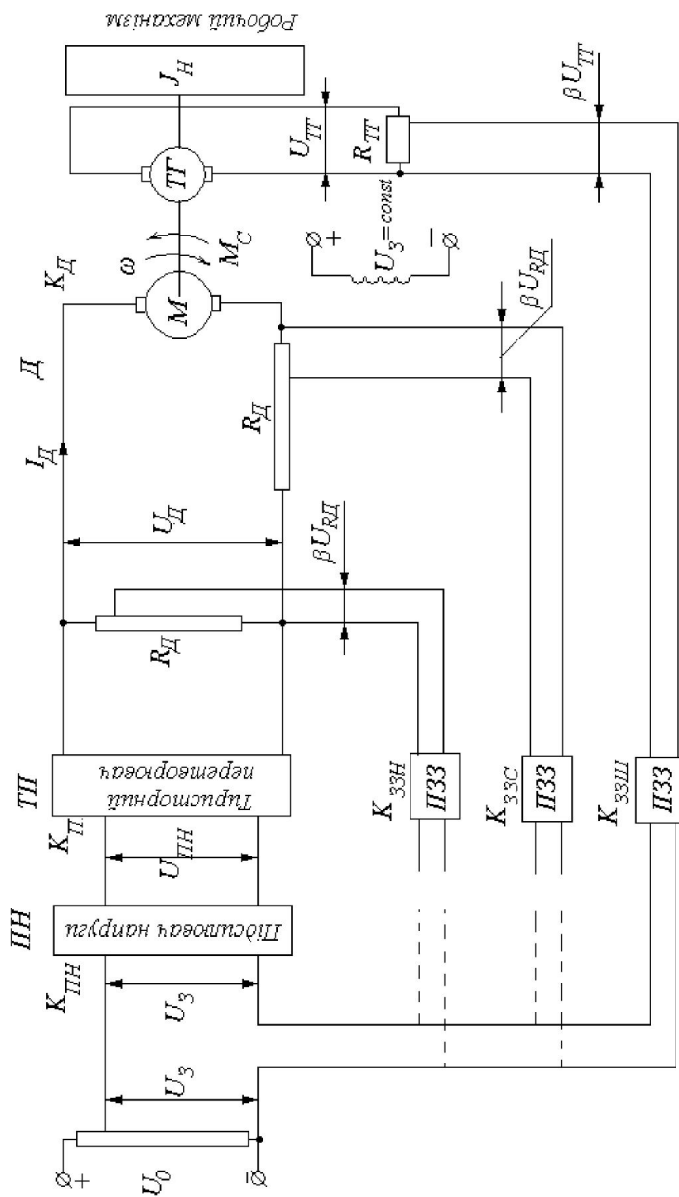


Рисунок 5 – Функціональна схема системи керування електроприводом з різними видами зворотних зв'язків

Додаток 5

Таблиця 4 – Технічні дані двигунів серії ПБВ

Найменування	ПБВ100		ПБВ112			ПБВ132		ПБВ160	
	М	L	S	М	L	М	L	М	L
Номінальний момент, Нм	7,16	10,5	14	17,5	21	35	47,7	76,4	105
Номінальна частота обертання, об/хв	1000	1000	750	600	500	600	600	500	500
Номінальна потужність, кВт	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	2,2	3,0	4,0	5,5
Номінальна напруга, В	52	56	44	47	50	53	70	66	78,5
Номінальний струм, А	18	24	31,5	29	28	50	50	78,5	90
Електро механічна стала часу, мс	10,3	7,6	13,2	10,1	8,6	14,2	12,3	8,5	7,9
Електромагнітна стала часу, мс	6,3	6,74	6,75	7,3	7,65	7,35	7,85	10,63	11,8
Стала ЕРС, В/(об/хв)	0,045	0,044	0,051	0,069	0,085	0,077	0,105	0,118	0,141

Додаток 6

Таблиця 5 – Технічні дані двигунів серії ПБСТ

№	ДПС	Потужність, кВт		U_n , В	n_n , 1/хв	n_{max} , 1/хв	η , %	Опір при 15°C		L_a , мГн	Момент інерції якоря, кгм ²	M_n , Нм
		ном	max					якоря	ДП			
1	ПБСТ-22МУ	0,4	0,56	110	1000	2500	70	1,8	1,1	70	0,011	3,9
2	ПБСТ-22МУ	0,6	0,8	110	1500	3750	74	1,08	0,66	40	0,011	3,9
3	ПБСТ-22МУ	0,85	1,2	110	2200	4000	78	0,48	0,37	20	0,012	3,8
4	ПБСТ-22МУ	1	1,4	110	3000	4000	79,5	0,33	0,19	11	0,012	3,3
5	ПБСТ-23МУ	0,55	0,77	110	1000	2500	71	1,3	0,9	10	0,012	5,4
6	ПБСТ-23МУ	0,85	1,2	110	1500	3750	80,5	0,52	0,51	6,8	0,014	5,5
7	ПБСТ-23МУ	1,15	1,6	110	2200	4000	80,5	0,3	0,3	3,7	0,014	5,1
8	ПБСТ-23МУ	1,3	1,8	110	3000	4000	80	0,2	0,15	3	0,014	4,2
9	ПБСТ-32МУ	0,8	1,1	110	1000	2500	75	0,61	0,61	8	0,024	7,8
10	ПБСТ-32МУ	1,2	1,7	110	1500	3750	79,5	0,26	0,26	4	0,024	7,8
11	ПБСТ-32МУ	1,5	2,1	110	2200	4000	82,5	0,139	0,128	3	0,025	6,7
12	ПБСТ-33МУ	1	1,4	110	1000	2500	79	0,45	0,34	10	0,031	9,8
13	ПБСТ-33МУ	1,6	2,2	110	1500	3750	82,4	0,28	0,25	5	0,032	10,4
14	ПБСТ-42МУ	1,4	2	110	1000	2500	79	0,39	0,31	9	0,045	13,7
15	ПБСТ-42МУ	2,1	2,9	110	1500	3750	84,5	0,19	0,15	4,5	0,046	13,7
16	ПБСТ-42МУ	2,9	4	110	2200	4000	86	0,11	0,06	2,4	0,046	12,9
17	ПБСТ-43МУ	1,9	2,7	110	1000	2500	80	0,31	0,19	7,1	0,056	18,6
18	ПБСТ-22МО	0,36	0,5	110	1000	2500	70	1,99	1,22	78	0,011	3,5
19	ПБСТ-22МО	0,54	0,72	110	1500	3750	74	1,3	0,93	33	0,011	3,5
20	ПБСТ-22МО	0,76	1,04	110	2200	4000	78	0,74	0,42	26	0,012	3,4
21	ПБСТ-22МО	0,9	1,26	110	3000	4000	79,5	0,41	0,27	16	0,012	2,9
22	ПБСТ-23МО	0,5	0,7	110	1000	2500	71	1,5	1	12	0,012	4,9
23	ПБСТ-23МО	0,76	1,08	110	1500	3750	80,5	0,56	0,56	7,4	0,014	4,9
24	ПБСТ-23МО	1	1,44	110	2200	4000	80,5	0,36	0,35	4,5	0,014	4,4
25	ПБСТ-23МО	1,15	1,63	110	3000	400	80	0,35	0,2	13	0,014	3,7
26	ПБСТ-32МО	0,72	1	110	1000	2500	75	0,7	0,7	10	0,024	7

ЗМІСТ

1. Розрахунок та моделювання систем із загальним суматором	3
2. Розрахунок та моделювання систем підпорядкованого керування .	7
2.1. Настроювання системи на модульний оптимум	7
2.2. Настроювання системи на симетричний оптимум	11
3. Методичні вказівки до контрольних завдань з курсу "Системи керування електроприводами"	19
Рекомендована література	32
Додаток 1	33
Додаток 2	36
Додаток 3	37
Додаток 4	39
Додаток 5	40
Додаток 6	41