МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

# МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання курсової роботи з дисципліни

«ДИНАМІКА ТА РЕГУЛЮВАННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ»

*(для здобувачів вищої освіти спеціальностей*

*131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування»)*

Тема «Проектний розрахунок електрогідравлічного
слідкуючого приводу технологічного обладнання»

*(Електронне видання)*

ЗАТВЕРДЖЕНО
на засіданні кафедри
машинобудування та
прикладної механіки
Протокол № 4 від 23.12.2020 р.

Сєвєродонецьк 2021

УДК 621.646:62-83

Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Динаміка та регулювання технологічних систем» (для здобувачів вищої освіти спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування»). Тема «Проектний розрахунок електрогідравлічного слідкуючого приводу технологічного обладнання» (електронне видання) / Уклад.: В.І. Соколов, О.В. Браславська. – Сєвєродонецьк: вид-во СНУ ім. В. Даля. 2021. – 35 с.

Наведені матеріали, що необхідні для виконання курсової роботи з дисципліни «Динаміка та регулювання технологічних систем» за темою «Проектний розрахунок електрогідравлічного слідкуючого приводу технологічного обладнання». Методичні вказівки містять структуру курсової роботи з поясненням щодо змісту кожного з розділів, приклад виконання типового завдання, порядок оформлення та захисту курсової роботи, а також перелік рекомендованої літератури.

Методичні матеріали розраховані на здобувачів вищої освіти інженерно-технічних спеціальностей.

Укладачі: В.І. Соколов, д.т.н., проф.
О.В. Браславська, ст. викл.

Рецензент: Й.І. Стенцель, д.т.н., проф.

Зміст

ВСТУП……4
1 СТРУКТУРА КУРСОВОЇ РОБОТИ…….6
1.1 Завдання……....6
1.2 Вхідні дані……6
1.3 Проектний розрахунок ЕГСП технологічного обладнання……7
1.3.1 Побудова розрахункової схеми ЕГСП……..….7
1.3.2 Вибір робочої рідини та номінального робочого тиску……..….8
1.3.3 Розрахунок конструктивних параметрів та вибір гідроциліндра……....9
1.3.4 Вибір ЕГП……...10
1.3.5 Визначення параметрів ЗЗ……11
1.3.6 Визначення добротності та розрахунок коефіцієнта передачі ПП……12
1.3.7 Оцінка статичних характеристик ЕГСП……...13
1.3.8 Побудова лінійної моделі ЕГПС……...13
1.3.9 Оцінка стійкості……..15
1.3.10 Дослідження динамічних характеристик та якості регулювання……15
1.3.11 Корекція динамічних характеристик ЕГСП……...16
1.4 Висновки по курсовій роботі……....17
2 ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ……18
3 ПОРЯДОК ОФОРМЛЕННЯ ТА ЗАХИСТУ КУРСОВОЇ РОБОТИ,
КРИТЕРІЇ ОЦІНКИ……31
4 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ ЩОДО ЗАХИСТУ КУРСОВОЇ РОБОТИ……...33
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА…….....34

# ВСТУП

Основу курсової роботи по курсу «Динаміка та регулювання технологічних систем» складає проектний розрахунок електрогідравлічного слідкуючого приводу (ЕГСП) технологічного обладнання. ЕГСП знайшов застосування в різноманітному технологічному обладнанні багатьох галузей промисловості. Достатньо широко ЕГСП використовується в машинобудуванні, зокрема, у верстатах та верстаних комплексах, обладнанні для механічної обробки матеріалів тощо, завдяки поєднанню переваг електронних і електричних керуючих пристроїв та гідравлічних силових частин приводів.

Виконання курсової роботи передбачає використання знань та умінь, отриманих при вивченні, насамперед, курсу «Теорія автоматичного керування технологічними системами», а також курсів «Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка» і «Гідромашини, гідропневмоприводи та гідропневмоавтоматика». Крім того, виконання курсової роботи потребує навичок роботи у пакеті прикладних програм MATLAB.

Слід відзначити, що зміст курсової роботи також базується на матеріалах публікацій кафедри машинобудування та прикладної механіки, які проіндексовані у міжнародних наукометричних базах Scopus і Web of Science та наведені у списку літератури.

Пояснювальна записка і титульний лист до курсової роботи оформлюються на листах формату А4 відповідно до прийнятих вимог у СНУ ім. В. Даля. Рекомендований зміст пояснювальної записки:

Вступ

1. Завдання

2. Вхідні дані

3. Проектний розрахунок ЕГСП технологічного обладнання

3.1. Побудова розрахункової схеми ЕГСП

3.2. Вибір робочої рідини та номінального робочого тиску

3.3. Розрахунок конструктивних параметрів та вибір

гідроциліндра
3.4. Вибір електрогідравлічного підсилювача
3.5. Визначення параметрів зворотного зв’язку
3.6. Визначення добротності та розрахунок коефіцієнта передачі підсилювача-перетворювача
3.7. Оцінка статичних характеристик ЕГСП
3.8. Побудова лінійної моделі ЕГСП
3.9. Оцінка стійкості
3.10. Дослідження динамічних характеристик та якості регулювання
3.11. Корекція динамічних характеристик ЕГСП
Висновки по курсовій роботі
Список використаних джерел

# 1 СТРУКТУРА КУРСОВОЇ РОБОТИ

## 1.1 Завдання

Визначити основні параметри елементів та пристроїв (електрогідравлічного слідкуючого приводу (ЕГСП) технологічного обладнання, провести розрахунок статичних та динамічних характеристик ЕГСП, виконати оцінку якості регулювання та корекцію приводу.

## 1.2 Вхідні дані

Вхідними даними для розрахунку ЕГСП технологічного обладнання з поступальним рухом вихідної ланки прийняти наступні параметри: $R_{max}$ – максимальне навантаження; $V_{max}$ – максимальна швидкість стеження без навантаження; $\varepsilon_{max}$ – максимальна похибка стеження (або допустима похибка стеження при максимальній швидкості); $H$ – хід поршня (робочого органу); $m$ – приведена маса рухомих частин.

Варіанти вхідних даних наведені у табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Варіанти вхідних даних

| № вар. | $R_{max}$, *кН* | $V_{max}$, м/с | $\varepsilon_{max}$, *мм* | $H$, *мм* | $m$, *кг* |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 8,25 | 0,12 | 6,5 | 250 | 100 |
| 2 | 8,50 | 0,12 | 6,5 | 250 | 100 |
| 3 | 8,75 | 0,11 | 6,5 | 250 | 100 |
| 4 | 9,00 | 0,11 | 6,5 | 250 | 100 |
| 5 | 9,25 | 0,10 | 6,0 | 250 | 100 |
| 6 | 9,50 | 0,10 | 6,0 | 250 | 100 |
| 7 | 9,75 | 0,095 | 6,0 | 250 | 100 |
| 8 | 10,0 | 0,095 | 6,0 | 250 | 100 |
| 9 | 10,5 | 0,090 | 5,5 | 250 | 125 |

Продовження таблиці 1.1

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 10 | 11,0 | 0,090 | 5,5 | 250 | 125 |
| 11 | 11,5 | 0,085 | 5,5 | 200 | 125 |
| 12 | 12,0 | 0,085 | 5,5 | 200 | 125 |
| 13 | 12,5 | 0,080 | 5,0 | 200 | 125 |
| 14 | 13,0 | 0,080 | 5,0 | 200 | 125 |
| 15 | 13,5 | 0,075 | 5,0 | 200 | 125 |
| 16 | 14,0 | 0,075 | 5,0 | 200 | 125 |
| 17 | 14,5 | 0,070 | 4,5 | 200 | 150 |
| 18 | 15,0 | 0,070 | 4,5 | 200 | 150 |
| 19 | 15,5 | 0,065 | 4,5 | 200 | 150 |
| 20 | 16,0 | 0,065 | 4,5 | 200 | 150 |

## 1.3 Проектний розрахунок ЕГСП технологічного обладнання

### 1.3.1 Побудова розрахункової схеми ЕГСП

В розрахунковій схемі відображаються основні елементи і пристрої ЕГСП та формуються зв’язки між ними. Слід враховувати, що ЕГСП призначений для відтворення із заданою точністю робочим органом керуючого сигналу, що змінюється довільним чином. ЕГСП має електричний вхідний сигнал $U$ та електричний зворотній зв’язок у вигляді електричної напруги $U_{зз}$. Принцип дії ЕГСП складається в безперервному порівнянні вхідного сигналу з переміщенням вихідної ланки $y$ та регулюванні потоку робочої рідини, що надходить до гідродвигуна, в залежності від розузгодження названих величин, яке визначається сигналом розузгодження $U_{\varepsilon}$

$$U_{\varepsilon} = U - U_{зз}, \tag{1.1}$$

За основу може бути прийнята схема, що представлена на рис. 1.1. На схемі відображені підсилювач-перетворювач (ПП), електрогідравлічний підсилювач (ЕГП), гідродвигун (ГД), електричний зворотній зв'язок (ЗЗ).

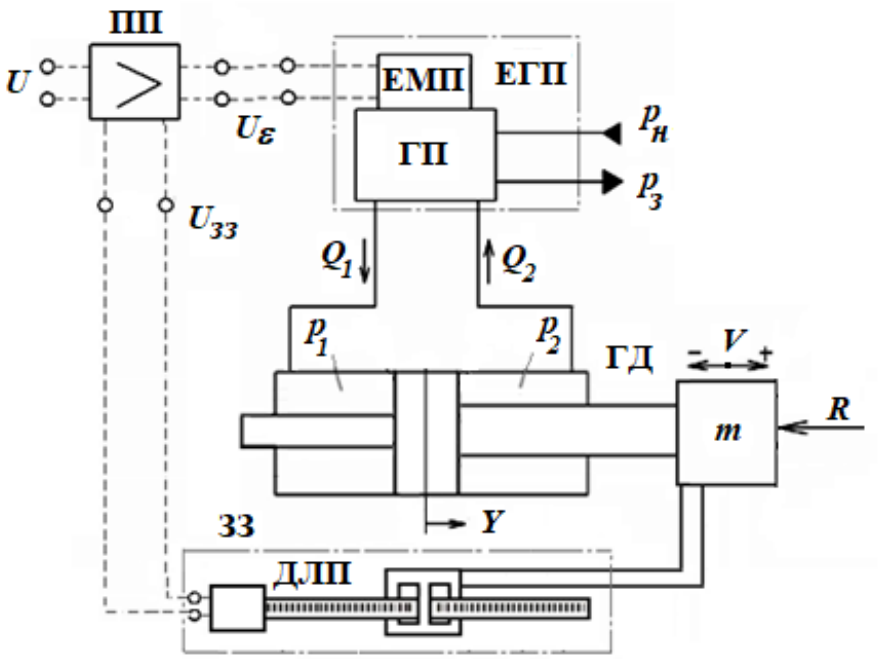



Рисунок 1.1 - Розрахункова схема ЕГСП

Зазвичай до ПП включають суматор, підсилювач напруги, коригуючу ланку (за необхідності корекції показників якості регулювання) та підсилювач потужності. Конструктивно ЕГП об'єднує електромеханічний перетворювач (ЕМП) та гідропідсилювач (ГП). ЕГП в номенклатурі гідрообладнання, що серійно випускається, представлені як дроселюючи гідророзподільники с електричним керуванням та гідроапаратура з пропорційним керуванням. Електричний ЗЗ в ЕГСП з поступальним рухом вихідної ланки формується за допомогою датчика лінійних переміщень (ДЛП).

### 1.3.2 Вибір робочої рідини та номінального робочого тиску

Робоча рідина обирається виходячи із технічних вимог, що пред'являються

до приводу машинобудівного обладнання, верстата, машини тощо, або рекомендацій, які містяться в технічних даних основного гідравлічного обладнання.

Номінальний робочий тиск $P_{ном}$ приймається у відповідності до можливостей гідроагрегатів, що серійно випускаються для машинобудівного обладнання. Значення $P_{ном}$ задається із стандартного ряду, *МПа*: ... 4; 6,3; 10; 12,5; 16; 20; 25; 32; 40 ...

1.3.3 Розрахунок конструктивних параметрів та вибір гідроциліндра.

Оцінюється ефективна площа гідроциліндра

$$F = (1{,}3 \ldots 1{,}5)\frac{R_{\max}}{P_{ном}} \quad . \tag{1.2}$$

По значенню $F$ визначається діаметр поршня. Для циліндра з двостороннім штоком та співвідношенням діаметрів штоку і поршня $d_{шт} / D = 1/2$

$$D = 4\sqrt{\frac{F}{3\pi}} \quad . \tag{1.3}$$

Розрахунковий діаметр поршня $D$ округляють до стандартних значень, *мм*: 10; 12; 16; 20; 25; 32; (36); 40; (45); 50; (56); 63; (70); 80; (90); 100; (110); 125; (140); 160 ... тощо (в дужках приведені значення додаткового ряду). Для штоків стандартні значення $d_{шт}$ , *мм*: 4; 5; 6; 8; 10; 12; (14); 16; (18); 20; (22); 25; (28); 32; (36); 40; (45); 50; (56); 63; (70); 80 ... тощо. Якщо розбіжність розрахункового діаметру поршня $D$ з меншим стандартним перевищує 5%, то приймається більше значення.

По параметрам $P_{ном}$, $D$, $d_{шт}$ та ходу поршня $H$ із каталогів або довідкової

літератури вибираємо гідроциліндр, що серійно випускається. При відсутності відповідного двигуна, що серійно випускається, складається технічне завдання на розробку оригінального гідроциліндра.

У подальших розрахунках приймається уточнена ефективна площа

$$F = \frac{\pi}{4}\left(D^2 - d_{шт}^2\right). \tag{1.4}$$

1.3.4 Вибір ЕГП

Вибір ЕГП здійснюється по каталогам або з довідкової літератури. Максимальний робочий тиск ЕГП повинен перевищувати або дорівнювати номінальному робочому тиску $P_{ном}$, що прийнятий в пп. 3.2,

$$P_{max} \geq P_{ном}. \tag{1.5}$$

Витрата $Q_{ЕГП}$ при перепаді тиску $\Delta P_{ЕГП}$, що вказаний в технічних даних, повинна задовільнять вимогі

$$Q_{ЕГП} \geq (1{,}1...1{,}2) F V_{\max} \sqrt{\frac{\Delta P_{ЕГП}}{P_п}}, \tag{1.6}$$

де $P_п = P_н - P_з$ – підведений тиск (різниця тисків в напірній $P_н$ та зливній $P_з$ магістралях ЕГП, див. рис. 1.1).

Рекомендується прийняти

$$P_п = (0{,}75...0{,}85) P_{ном}. \tag{1.7}$$

В табл. 1.2 наведені основні технічні дані деяких дроселюючих

гідророзподільників, які можуть бути використані при виконанні бакалаврської роботи.

Таблиця 1.2

Основні технічні характеристики дроселючих гідророзподільників

| № | ЕГП (виробник) | $P_{max}$, *Мпа* | $Q_{ЕГП}$, *л/хв* (при $\Delta P_{ЕГП}$, *Мпа)* | *v**, *Гц* | $U_{ЕГП}$, *В* |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | D765S04 (Moog) | 31,5 | 4 (7) | 100 | ±10 |
| 2 | D765S10 (Moog) | 31,5 | 10 (7) | 100 | ±10 |
| 3 | D765S19 (Moog) | 31,5 | 19 (7) | 100 | ±10 |
| 4 | D765S38 (Moog) | 31,5 | 38 (7) | 100 | ±10 |
| 5 | D765S63 (Moog) | 31,5 | 63 (7) | 100 | ±10 |
| 6 | УГ-176-04 (ПМЗ «Схід») | 21 | 4 (7) | 120 | ±10 |
| 7 | УГ-176-10 (ПМЗ «Схід») | 21 | 10 (7) | 120 | ±10 |
| 8 | УГ-176-20 (ПМЗ «Схід») | 21 | 20 (7) | 120 | ±10 |
| 9 | УГ-176-30 (ПМЗ «Схід») | 21 | 30 (7) | 120 | ±10 |
| 10 | УГ-176-40 (ПМЗ «Схід») | 21 | 40 (7) | 120 | ±10 |

В таблиці вказані: *v*, Гц* – частота при зсуві по фазі $90^0$; $U_{ЕГП}$, *В* – максимальна напруга вхідного сигналу.

Для вибраного ЕГП визначається коефіцієнт передачі для витрати по напрузі, $м^3/(с \cdot В)$,

$$K_{QU} = \frac{Q_{ЕГП}}{U_{ЕГП}} \sqrt{\frac{P_n}{\Delta P_{ЕГП}}} . \qquad (1.8)$$

1.3.5 Визначення параметрів ЗЗ

Як відзначено вище, електричний ЗЗ (рис. 1.1) формується за допомогою ДЛП, який по ходу поршня *H* можна вибрати за каталогами або із довідкової

літератури.

Для визначення коефіцієнту передачі ЗЗ будемо вважати, що «нульове» переміщення ($Y$=0) вихідної ланки приводу відповідає середньому положенню поршня (див. рис. 1), а максимальне переміщення складає $\pm H/2$ та відповідає максимальній напрузі вихідного сигналу ДЛП $\pm U_{ДЛП}$.

Тоді коефіцієнт передачі ЗЗ визначається як, *В/м*,

$$K_{ЗЗ} = \frac{2U_{ДЛП}}{H}. \tag{1.9}$$

У зв'язку із різноманітністю ДЛП, що серійно випускаються, на етапі попереднього розрахунку ЕГСП допустимо прийняти рівними максимальні напруги вихідного сигналу ДЛП $U_{ДЛП}$, вхідного сигналу ЕГП $U_{ЕГП}$ та відповідно керуючого сигналу $U_{max}$ для приводу.

$$U_{ДЛП}=U_{ЕГП} = U_{max}. \tag{1.10}$$

Розбіжність технічних характеристик у подальшому може бути скорегована коефіцієнтом передачі ПП.

1.3.6 Визначення добротності та розрахунок коефіцієнта передачі ПП

Добротність ЕГСП $D_П$ є коефіцієнт підсилення контуру регулювання (розімкнутої системи) та призначається з урахуванням вимог до точності привода, 1/*с*,

$$D_П \geq (1{,}05...1{,}1)V_{\max} / \varepsilon_{\max}. \tag{1.11}$$

По значенню $D_П$ визначається коефіцієнт передачі $K_{ПП}$ ПП

$$K_{ПП} = \frac{D_П F}{K_{QU} K_{ЗЗ}}. \tag{1.12}$$

1.3.7 Оцінка статичних характеристик ЕГСП

Статичними характеристиками ЕГСП є залежності, що зв'язують швидкість вихідної ланки $V$, навантаження $R$ та сигнал розузгодження $U_\varepsilon = U - U_{ЗЗ}$.

Рекомендується побудувати швидкісну $V(U_\varepsilon)$ та навантажувальну $U_E$ $V$ ® характеристики по наступній наближеній залежності

$$V = U_\varepsilon \frac{D_П}{K_{ЗЗ}} \sqrt{1 - \frac{R}{P_n F} sign U_\varepsilon} \quad . \tag{1.13}$$

Швидкісна характеристика отримується при $R$ =0 в діапазоні $-K_{ЗЗ}\varepsilon_{max} \leq U_\varepsilon \leq K_{ЗЗ}\varepsilon_{max}$, розрахунок навантажувальної характеристики виконується при $U_\varepsilon = \pm K_{ЗЗ}\varepsilon_{max}$ в діапазоні $-P_n F \leq R \leq P_n F$.

1.3.8 Побудова лінійної моделі ЕГПС

Оцінка параметрів лінійної моделі виконується у відповідності до структурної схеми передачі керуючого сигналу, що представлена на рис. 1.2.

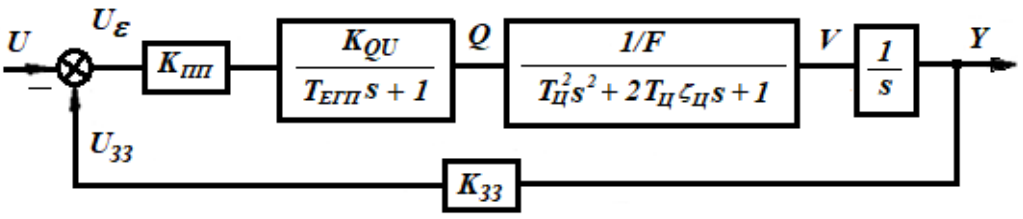



Рисунок 1.2 - Структурна схема передачі керуючого сигналу

Для безрозмірних відхилень змінних від нульових значень

$$y = \frac{2Y}{H}; \quad u = \frac{U}{U_{\max}}; \quad u_{ЗЗ} = \frac{U_{ЗЗ}}{U_{ДЛП}}; \quad u_{\varepsilon} = \frac{U_{\varepsilon}}{U_{ЕГП}} \tag{1.14}$$

з урахуванням (1.10-1.12) маємо структурну схему, що зображена на рис. 1.3, де постійна часу ЕГП $T_{ЕГП}$ визначається по частоті $\nu^*$ при зсуві по фазі $90^0$

$$T_{ЕГП} = \frac{1}{2\pi\nu^*}, \tag{1.15}$$

постійна часу привода $T_п$

$$T_п = \frac{1}{D_П}, \tag{1.16}$$

механічна постійна часу гідроциліндра $T_ц$

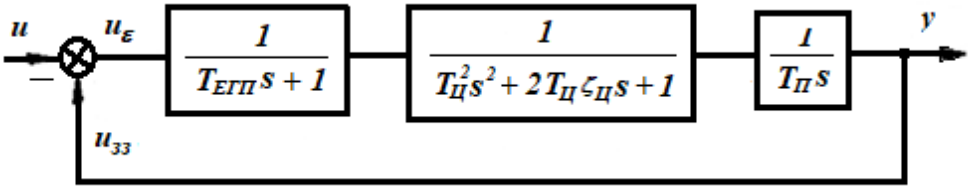
$$T_ц = \sqrt{\frac{mH}{4E_ц F}}. \tag{1.17}$$

Приведений модуль пружності гідроциліндра $E_ц$ для попереднього розрахунку рекомендується прийняти

$$E_ц = (0{,}85 \ldots 0{,}95)E, \tag{1.18}$$

де $E$ – модуль пружності робочої рідини.

Коефіцієнт відносного демпфування $\zeta_ц$ також приймається приблизно із діапазону




$$\zeta_ц = 0{,}2...0{,}5 \quad . \tag{1.19}$$

Рисунок 1.3 - Структурна схема для безрозмірних змінних

Відповідно до структурної схеми (рис. 1.3) передавальна функція ЕГСП по керуючому сигналу для безрозмірних відхилень змінних має вид

$$W(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{1}{a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + 1} \quad , \tag{1.20}$$

де

$$a_1 = T_n; \;\; a_2 = \left(T_{ЕГП} + 2T_ц \zeta_ц\right) T_n; \;\; a_3 = \left(2T_{ЕГП} T_ц \zeta_ц + T_ц^2\right) T_n; \;\; a_4 = T_{ЕГП} T_ц^2 T_n \quad . \tag{1.21}$$

1.3.9 Оцінка стійкості

Оцінку стійкості зручно провести по критерію Гурвіца. Для системи 4-го порядку, що має передавальну функцію виду (1.16), потрібно при додатних коефіцієнтах $a_1 ... a_4$ виконання наступних нерівностей

$$a_1 a_2 - a_3 > 0; \;\; a_1\left(a_2 a_3 - a_1 a_4\right) - a_3^2 > 0 \quad . \tag{1.22}$$

У випадку нестійкої системи рекомендується за погодженням з керівником виконати корекцію вхідних даних або ввести до ЕГСП додаткові корегуючі пристрої.

1.3.10 Дослідження динамічних характеристик та якості регулювання

Виконується розрахунок перехідного процесу, амплітудно-фазової, амплітудно-частотної та фазо-частотної характеристик. Проводиться оцінка часу перехідного процесу, перерегулювання, смуги пропускання. Робляться висновки щодо необхідності корекції ЕГСП.

Розрахунки рекомендується виконувати в середовищі пакета прикладних програм MATLAB, як безпосередньо, так і в підсистемі Simulink, а також з використанням додатково напрацьованих програм на кафедрі машинобудування та прикладної механіки.

1.3.11 Корекція динамічних характеристик ЕГСП

Для корекції ЕГСП достатньо ефективною є послідовна установка перед ЕГП (рис. 1.4) пропорційно-диференційного (ПД) регулятора с передавальною функцією

$$W_p(s) = Ts + k, \tag{1.23}$$

де $T$, $k$ – постійна часу та коефіцієнт передачі регулятора.

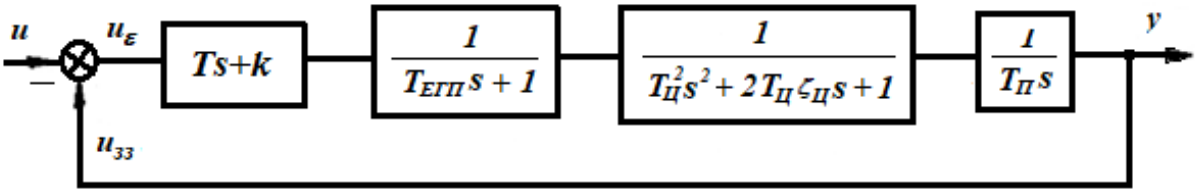



Рисунок 1.4 - Введення ПД-регулятора до ЕГСП

Відповідно до структурної ЕГСП з регулятором (рис. 1.4) передавальна функція приводу по керуючому сигналу для безрозмірних відхилень змінних прийме вигляд

$$W(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{Ts+1}{a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + (T + a_1)s + k} \quad . \qquad (1.24)$$

Рекомендується самостійно (поза рамками курсової роботи) провести чисельний експеримент, виконати розрахунки перехідних процесів для різних значень $T$ і $k$, зробити аналіз якості регулювання та прийняти оптимальні значення параметрів настроювань регулятора з урахуванням вимог до обладнання, для якого розробляється ЕГСП.

## 1.4 Висновки по курсовій роботі

У висновках по курсовій роботі стисло наводяться основні проведені етапи курсової роботи та отримані результати, а також надаються рекомендації щодо підвищення якості регулювання ЕГСП.

# 2 ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ

## 1 Завдання

Визначити основні параметри елементів та пристроїв ЕГСП технологічного обладнання, провести розрахунок статичних та динамічних характеристик ЕГСП, виконати оцінку якості регулювання та корекцію привода.

## 2 Вхідні дані

Максимальне навантаження $R_{max}$=10 *кН*; максимальна швидкість стеження без навантаження $V_{max}$=0,09 *м/с*; максимальна похибка стеження $\varepsilon_{max}$=5,0 *мм*; хід поршня $H$ =200 *мм*; приведена маса рухомих частин $m$=150 *кг*.

## 3 Проектний розрахунок ЕГСП технологічного обладнання

### 3.1 Побудова розрахункової схеми ЕГСП

Використовуємо розрахункову схему, що показана на рис. 1.1.

### 3.2 Вибір робочої рідини та номінального робочого тиску

В якості робочої рідини використовуємо гідравлічне масло ІГП-30. Приймаємо номінальний робочий тиск $P_{ном}$=10 *Мпа*.

### 3.3 Розрахунок конструктивних параметрів та вибір гідроциліндра

Оцінюємо ефективну площу гідроциліндра

$$F = (1{,}3...1{,}5)\frac{R_{\max}}{P_{ном}} = 1{,}4\frac{10\cdot 10^3}{10\cdot 10^6} = 1{,}4\cdot 10^{-3}\ м^2.$$

По значенню $F$ визначаємо діаметр поршня. Для циліндра з двостороннім штоком та співвідношенням діаметрів штоку і поршня $d_{шт} / D = 1/2$

$$D = 4\sqrt{\frac{F}{3\pi}} = 4\sqrt{\frac{1{,}4 \cdot 10^{-3}}{3\pi}} = 0{,}0488\ м.$$

Округляємо до стандартних значення діаметра поршня і штока

$$D=50\ мм,\ d_{шт}=25\ мм.$$

У подальшому для розробки обладнання з ЕГСП гідроциліндр слід підбирати по параметрам $P_{ном}$=10 *Мпа*, $D$=50 *мм*, $d_{шт}$ =25 *мм*. Для наступних розрахунків приймаємо уточнену ефективну площу

$$F = \frac{\pi}{4}\left(D^2 - d_{шт}^2\right) = \frac{\pi}{4}\left(0{,}05^2 - 0{,}025^2\right) = 1{,}47 \cdot 10^{-3}\ м^2.$$

3.4 Вибір ЕГП

При виборі ЕГП орієнтуємося на технічні дані дроселючих гідророзподільників типу D765 та УГ-176-04 (див. табл. 1.2), у яких паспортні значення витрати вказані при перепаді тиску $\Delta P_{ЕГП}$=7 *МПа* та максимальний робочий тиск перевищує прийнятий номінальний робочий тиск $P_{ном}$=10 *Мпа*.

Для розрахунку умовного значення витрати для вибору ЕГП оцінимо відповідно (1.7) підведений тиск

$$P_п = (0{,}75...0{,}85)P_{ном} = 0{,}8 \cdot 10 \cdot 10^6 = 8 \cdot 10^6\ Па = 8\ Мпа.$$

Підрахуємо умовне значення витрати для вибору ЕГП відповідно (1.6)

$$(1,1...1,2)FV_{\max}\sqrt{\frac{\Delta P_{ЕГП}}{P_n}} = 1,15\cdot 1,47\cdot 10^{-3}\cdot 0,09\sqrt{\frac{7\cdot 10^6}{8\cdot 10^6}} =$$
$$= 1,42\cdot 10^{-4}\ м^3/с = 1,42\cdot 10^{-4}\cdot 1000\cdot 60\ л/хв = 8,52\ л/хв.$$

У якості ЕГП вибираємо дроселюючий гідророзподільник Moog D765S10, для якого при $\Delta P_{ЕГП}$ = 7 *Мпа* витрата $Q_{ЕГП}$ = 10 *л/хв*, що більше вище отриманого значення.

Для обраного ЕГП відповідно (1.8) визначаємо коефіцієнт передачі для витрати по напрузі

$$K_{QU} = \frac{Q_{ЕГП}}{U_{ЕГП}}\sqrt{\frac{P_n}{\Delta P_{ЕГП}}} = \frac{10\cdot 10^{-3}/60}{10}\sqrt{\frac{8\cdot 10^6}{7\cdot 10^6}} = 1,78\cdot 10^{-5}\ м^3/(с\cdot В).$$

3.5 Визначення параметрів ЗЗ

Приймаємо

$$U_{ЕГП} = U_{ДЛП} = U_{max} = 10\ В.$$

Визначаємо коефіцієнт передачі ЗЗ

$$K_{ЗЗ} = \frac{2U_{ДЛП}}{H} = \frac{2\cdot 10}{0,2} = 100\ В/м.$$

3.6 Визначення добротності та розрахунок коефіцієнта передачі ПП

Оцінюємо добротність ЕГСП

$$D_П \geq (1,05...1,1)V_{\max} / \varepsilon_{\max} = 1,075 * 0,09 / \left(5,0 \cdot 10^{-3}\right) = 19,35 \approx 20 \quad ^{-1}.$$

Визначаємо коефіцієнт передачі ПП

$$K_{ПП} = \frac{D_П F}{K_{ЗЗ} K} = \frac{20 \cdot 1,47 \cdot 10^{-3}}{1,78 \cdot 10^{-5} \cdot 100} = 16,52.$$

3.7 Оцінка статичних характеристик ЕГСП

Відповідно (1.13) для побудови статичних характеристик маємо наступну залежність

$$V = U_\varepsilon \frac{D_П}{K_{ЗЗ}} \sqrt{1 - \frac{R}{P_n F} signU_\varepsilon} = U_\varepsilon \frac{20}{100} \sqrt{1 - \frac{R}{8 \cdot 10^6 \cdot 1,47 \cdot 10^{-3}} signU_\varepsilon} =$$
$$= 0,2U_\varepsilon \sqrt{1 - \frac{R}{11700} signU_\varepsilon}.$$

Звідси при $R$ =0 отримуємо вираз для розрахунку швидкісної характеристики

$$V\left(U_\varepsilon\right) = 0,2U_\varepsilon;$$

яку будуємо в діапазоні $-K_{ЗЗ}\varepsilon_{max} \leq U_\varepsilon \leq K_{ЗЗ}\varepsilon_{max}$, тобто

$$-100 \cdot 5,0 \cdot 10^{-3} \leq U_\varepsilon \leq 100 \cdot 5,0 \cdot 10^{-3} \Leftrightarrow -0,5 \leq U_\varepsilon \leq 0,5;$$

а також отримуємо вирази для розрахунку навантажувальної характеристики

$$V(R)=U_{\varepsilon}\frac{D_{П}}{K_{ЗЗ}}\sqrt{1-\frac{R}{P_nF}}$$ , при $U_{\varepsilon}=K_{ЗЗ}\varepsilon_{max}$;

$$V(R)=-U_{\varepsilon}\frac{D_{П}}{K_{ЗЗ}}\sqrt{1+\frac{R}{P_nF}}$$ , при $U_{\varepsilon}=-K_{ЗЗ}\varepsilon_{max}$;

тобто

$$V(R)=100\cdot 5,0\cdot 10^{-3}\frac{20}{100}\sqrt{1-\frac{R}{8\cdot 10^{6}\cdot 1,47\cdot 10^{-3}}}$$ , при $U_{\varepsilon}=100\cdot 5,0\cdot 10^{-3}$;

$$V(R)=-100\cdot 5,0\cdot 10^{-3}\frac{20}{100}\sqrt{1+\frac{R}{8\cdot 10^{-3}\cdot 1,47\cdot 10^{-3}}}$$ , при $U_{\varepsilon}=-100\cdot 5,0\cdot 10^{-3}$;

або

$$V(R)=0,1\sqrt{1-\frac{R}{11760}}$$ , при $U_{\varepsilon}=0,5$;

$$V(R)=-0,1\sqrt{1+\frac{R}{11760}}$$ , при $U_{\varepsilon}=-0,5$.

Навантажувальну характеристику за обома виразами будуємо в діапазоні $-P_nF \le R \le P_nF$, тобто

$$-8\cdot 10^{6}\cdot 1,47\cdot 10^{-3}\le R\le 8\cdot 10^{6}\cdot 1,47\cdot 10^{-3} \Leftrightarrow -11760\le R\le 11760.$$

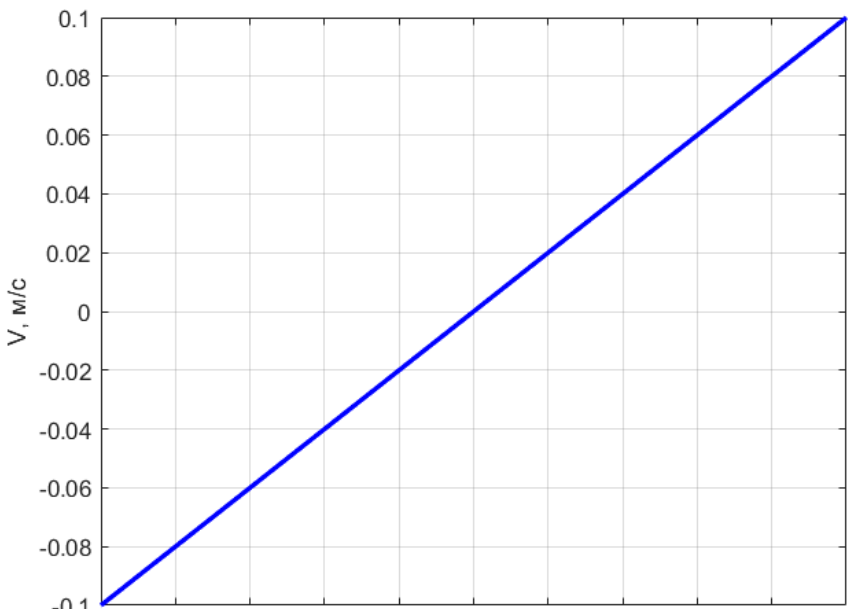


Рисунок 2.1 - Швидкісна характеристика ЕГСП

Розрахунок швидкісної та навантажувальної характеристик виконаний в середовищі пакету прикладних програм *MATLAB*.

Визначення та побудова швидкісної характеристики (рис. 2.1) проведено операторами:

```
>> ue=-0.5:0.001:0.5;vu=0.2*ue;
>> plot(ue,vu,'b','LineWidth' ,2),grid,xlabel('Ue, B'),ylabel('V, м/с')
```

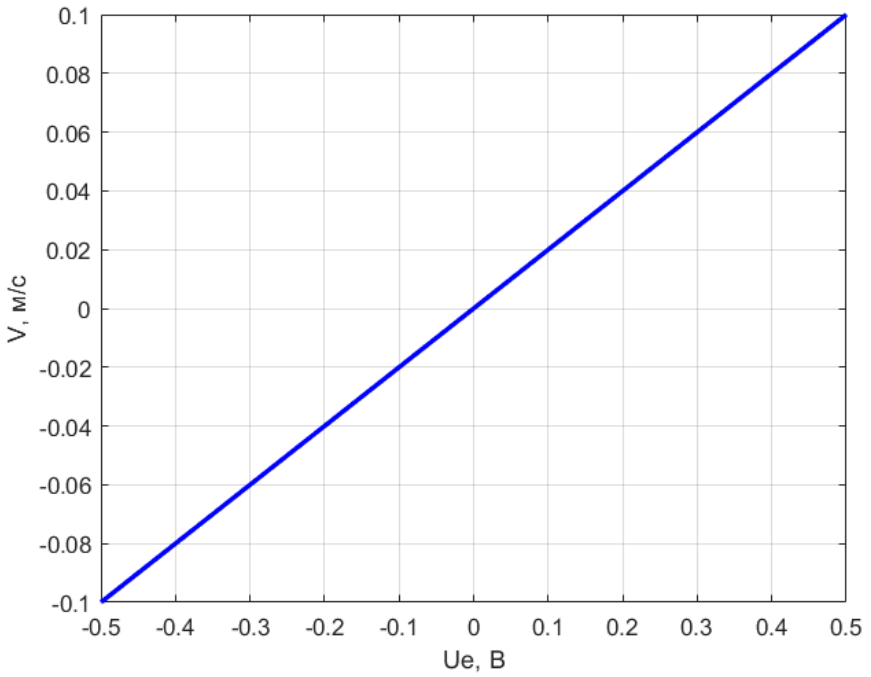



Рисунок 2.2 - Навантажувальна характеристика ЕГСП

Визначення та побудова навантажувальної характеристики (рис. 2.2) проведено операторами:

```
>> r=-11760:10:11760;v1=0.1*sqrt(1-r/11760);v2=-0.1*sqrt(1+r/11760);
>> plot(r,v1,'r',r,v2,'r','LineWidth',2),grid,xlabel('R, H'),ylabel('V, м/с')
```

3.8 Побудова лінійної моделі ЕГПС

Виконуємо розрахунок параметрів лінійної моделі відповідно структурній схемі, що приведена на рис. 1.3, для безрозмірних відхилень змінних від нульових значень (1.14)

$$y = \frac{2Y}{0,2}; \quad u = \frac{U}{10}; \quad u_{зз} = \frac{U_{зз}}{10}; \quad u_{\varepsilon} = \frac{U_{\varepsilon}}{10}$$

або

$$y = 0,1 \cdot Y; \quad u = 0,1 \cdot U; \quad u_{зз} = 0,1 \cdot U_{зз}; \quad u_{\varepsilon} = 0,1 \cdot U_{\varepsilon}.$$

Для обраного ЕГП D765S10 (Moog) частота при зсуві по фазі $90^0$ $\nu^*$=100 *Гц* (див. табл. 1.2). Тоді Постійна часу ЕГП

$$T_{ЕГП} = \frac{1}{2\pi\nu^*} = \frac{1}{2\pi \cdot 100} = 1,59 \cdot 10^{-3} \; c.$$

Постійна часу привода

$$T_п = \frac{1}{D_П} = \frac{1}{20} = 0,05 \; c.$$

Модуль пружності робочої рідини (для мінерального масла ІГП-30) Е=$1,4 \cdot 10^9$ *Па*. Приведений модуль пружності гідроциліндра $E_ц$ відповідно (1.18) приймаємо

$$E_ц = (0,85 \ldots 0,95)E = 0,9 \cdot 1,4 \cdot 10^9 = 1,26 \cdot 10^9 \; Па.$$

Механічна постійна часу гідроциліндра

$$T_ц = \sqrt{\frac{mH}{4E_ц F}} = \sqrt{\frac{150 \cdot 0{,}2}{4 \cdot 1{,}26 \cdot 10^9 \cdot 1{,}47 \cdot 10^{-3}}} = 2{,}02 \cdot 10^{-3} \; c.$$

Приймаємо згідно (1.19) коефіцієнт відносного демпфування $\zeta_ц$ =0,35.

Тоді для безрозмірних відхилень змінних від нульових значень маємо структурну схему лінійної моделі ЕГСП, що показана на рис. 2.3.

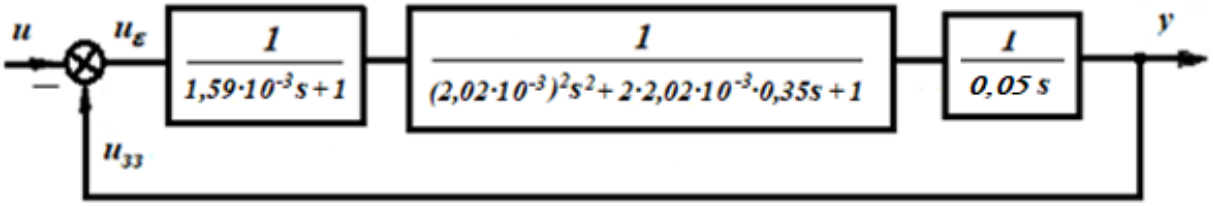



Рисунок 2.3 - Структурна схема

Визначаємо відповідно (1.21) коефіцієнти передавальної функції ЕГСП по керуючому сигналу

$$a_1 = T_п = 0{,}05 \; c;$$

$$a_2 = \left(T_{ЕГП} + 2T_ц \zeta_ц\right) T_п =$$
$$= \left(1{,}59 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 2{,}02 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}35\right) \cdot 0{,}05 = 1{,}502 \cdot 10^{-4} \; c^2;$$

$$a_3 = \left(2T_{ЕГП} T_ц \zeta_ц + T_ц^2\right) T_п =$$
$$= \left(2 \cdot 1{,}59 \cdot 10^{-3} \cdot 2{,}02 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}35 + \left(2{,}02 \cdot 10^{-3}\right)^2\right) \cdot 0{,}05 = 3{,}164 \cdot 10^{-7} \; c^3;$$

$$a_4 = T_{ЕГП} T_ц^2 T_п = 1,59 \cdot 10^{-3} \cdot \left(2,02 \cdot 10^{-3}\right)^2 \cdot 0,05 = 3,244 \cdot 10^{-10}\, c^4.$$

Маємо наступну передавальну функцію ЕГСП по керуючому сигналу для безрозмірних відхилень змінних

$$W(s) = \frac{1}{3,244 \cdot 10^{-10} s^4 + 3,164 \cdot 10^{-7} s^3 + 1,502 \cdot 10^{-4} s^2 + 0,05 s + 1}.$$

3.9 Оцінка стійкості

Маємо додатні коефіцієнти знаменника $a_1 ... a_4$ передавальної функції, перевіряємо нерівності відповідно (1.22)

$$a_1 a_2 - a_3 = 0,05 \cdot 1,502 \cdot 10^{-4} - 3,164 \cdot 10^{-7} = 7,194 \cdot 10^{-6} > 0;$$

$$a_1 \left(a_2 a_3 - a_1 a_4\right) - a_3^2 = 0,05(1,502 \cdot 10^{-4} \cdot 3,164 \cdot 10^{-7} -$$
$$-0,05 \cdot 3,244 \cdot 10^{-10}) - \left(3,164 \cdot 10^{-7}\right)^2 = 1,465 \cdot 10^{-12} > 0.$$

Отже, система стійка.

3.10 Дослідження динамічних характеристик та якості регулювання

Проводимо дослідження динамічних характеристик по структурній схемі відповідно рис. 7. Наведені нижче розрахунки отримані в пакеті прикладних програм *MATLAB* з використанням розроблених кафедрою машинобудування та прикладної механіки програм *taupp* для розрахунку перехідного процесу, *tauuv* для розрахунку амплітудно-фазової характеристики, *taucc* для розрахунку амплітудно-частотних характеристик.

На рис. 2.4 наведена перехідна характеристика, на рис. 2.5 представлена амплітудно-фазова характеристика, на рис. 2.6, 2.7 показані відповідно амплітудно-частотні та логарифмічні амплітудно-частотні характеристики. Відзначимо, що тривалість (час) перехідного процесу складає $t_p$=0,15 с, перехідний процес не має перерегулювання.

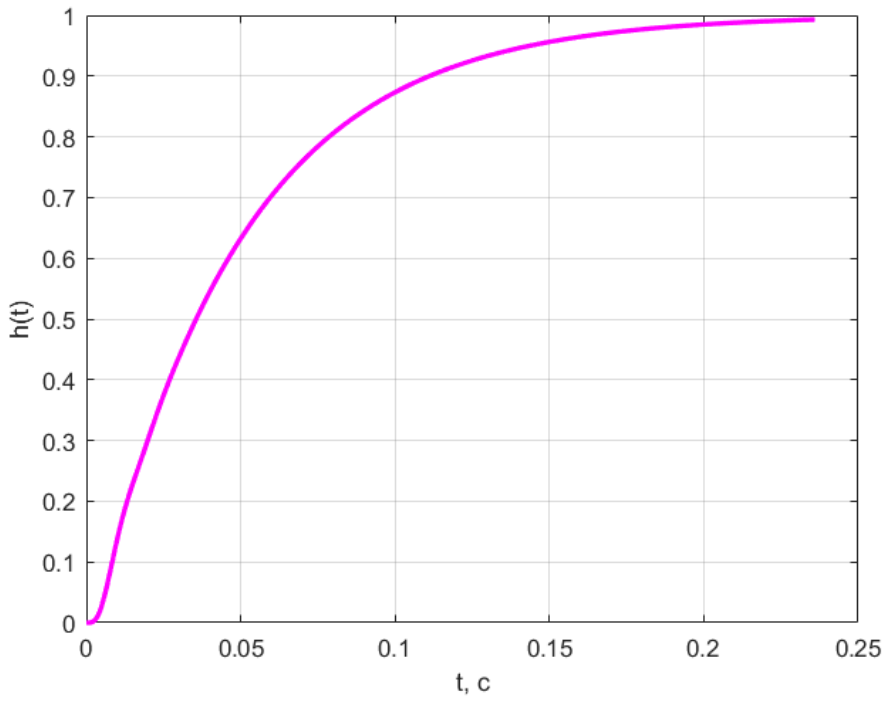



Рисунок 2.4 - Перехідна характеристика

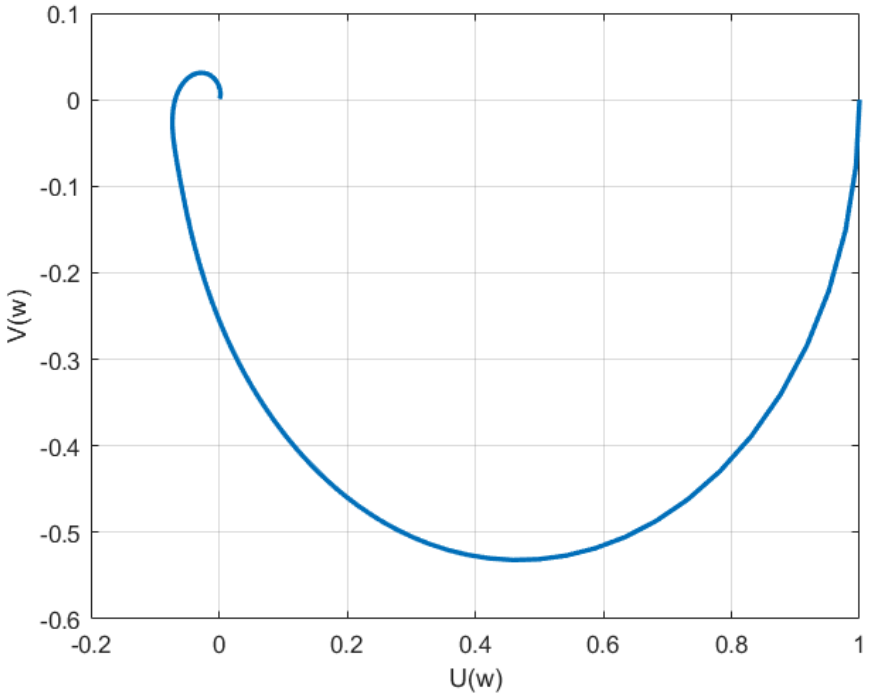


Рисунок 2.5 - Амплітудно-фазова характеристика

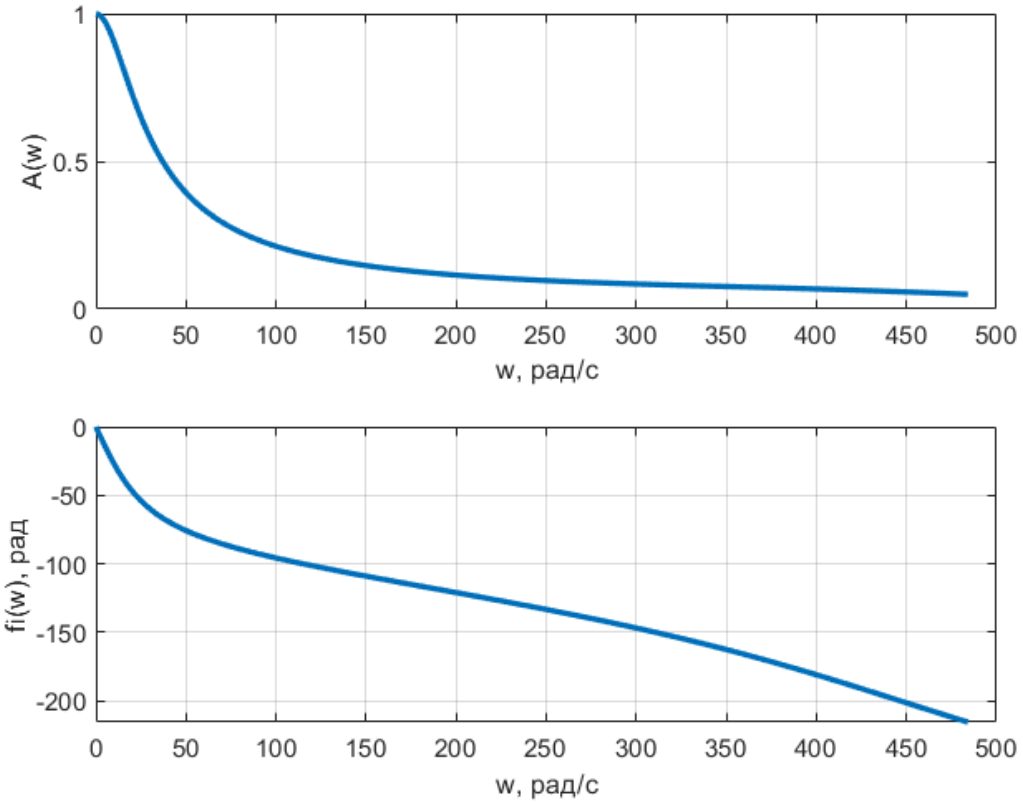



Рисунок 2.6 - Амплітудно-частотні характеристики

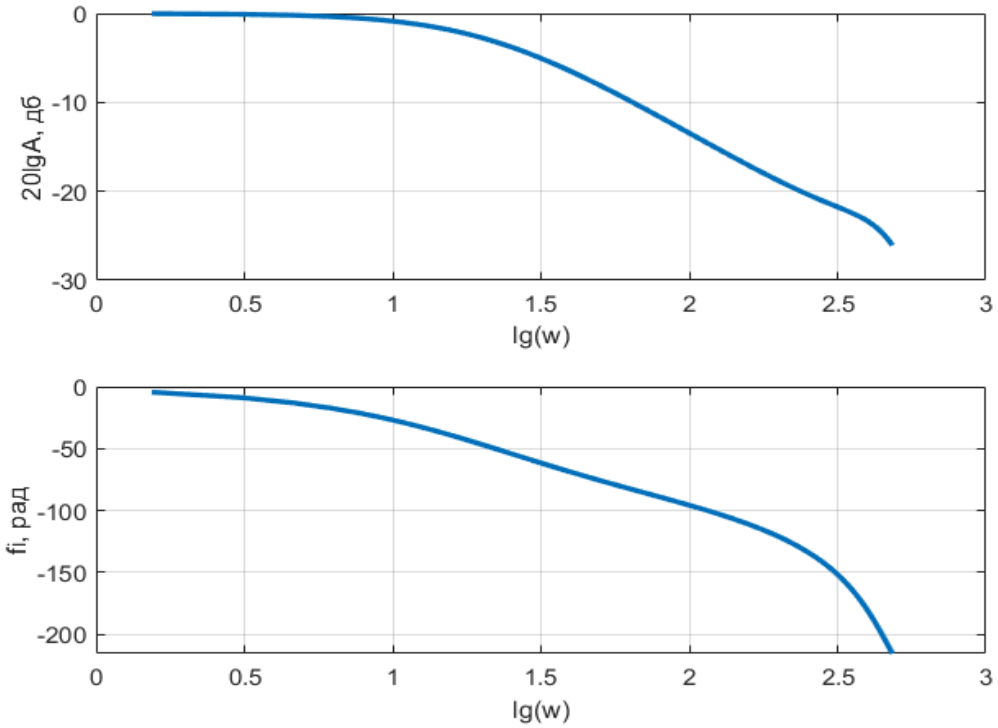


Рисунок 2.7 - Логарифмічні амплітудно-частотні характеристики

Як було відмічене у пп.1.3.10, для дослідження динамічних характеристик можна використати процедури підсистеми Simulink пакета прикладних програм MATLAB, зокрема, процедури Linear Analysis Tool.

На рис. 2.8 показана перехідна характеристика, що отримана таким чином. Не дивлячись на деяку різницю у представлені результатів у порівнянні з рис. 2.4, чисельні значення повністю збігаються.

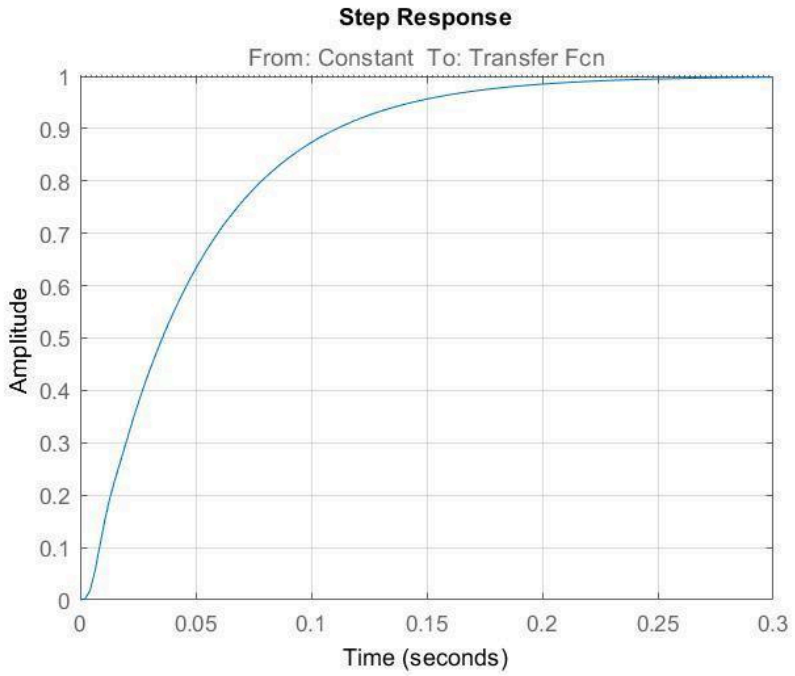



Рисунок 2.8 - Розрахунок перехідного процесу в підсистеми Simulink.

3.11 Корекція динамічних характеристик ЕГСП

Аналіз динамічних характеристик показує, що бажаним для ЕГСП підвищення його швидкодії (зменшення часу перехідного процесу). Використовуємо для корекції ПД-регулятор (рис. 2.9).

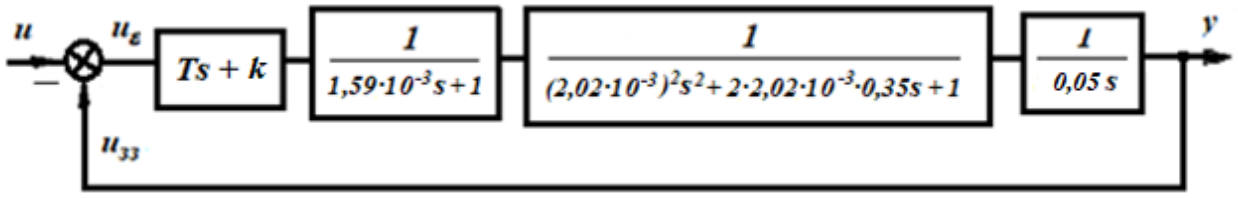


Рисунок 2.9 - Структурна схема ЕГСП з регулятором

На підставі (1.24) маємо наступну передавальну функцію ЕГСП з регулятором

$$W(s)=\frac{Ts+k}{3,244\cdot 10^{-10}s^4+3,164\cdot 10^{-7}s^3+1,502\cdot 10^{-4}s^2+(T+0,05)s+k}.$$

Висновки по курсовій роботі

Отже, у ході виконання курсової роботи проведено попередній розрахунок ЕГСП технологічного обладнання. Для заданих значень вхідних даних визначені основні параметри гідродвигуна, обрано гідропідсилювач. Виконана оцінка статичних характеристик привода, побудована лінійна математична модель динамічних характеристик приводу.

Проведено дослідження динамічних характеристик привода, встановлений час перехідного процесу $t_p$=0,15 *с*, відзначено, що перехідний процес не має перерегулювання. Надана рекомендація щодо підвищення швидкодії ЕГСП шляхом застосування ПД-регулятора.

Список використаних джерел

1. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Динаміка та регулювання технологічних систем» (для здобувачів вищої освіти спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування»). Тема «Проектний розрахунок електрогідравлічного слідкуючого приводу технологічного обладнання» (електронне видання) / укладачі: В.І. Соколов, О.В. Браславська. Сєвєродонецьк: СНУ ім. В. Даля, 2021. 36 с.

2. Sokolov V., Porkuian O., Krol O., Baturin Y. Design Calculation of Electrohydraulic Servo Drive for Technological Equipment. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020. Vol. 1. P. 75-84. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_8.

## 3 ПОРЯДОК ОФОРМЛЕННЯ ТА ЗАХИСТУ КУРСОВОЇ РОБОТИ, КРИТЕРІЇ ОЦІНКИ

Курсова робота виконується на основі виданого індивідуального завдання з усіма необхідними вихідними даними.

Загальний обсяг курсової роботи, що рекомендується, включаючи список використаної літератури (без додатків) та табличний і графічний матеріал становить 15-20 аркушів формату А4.

Курсову роботу студент захищає перед комісією, яку призначає кафедра. При виконанні курсової роботи слід керуватися методичними вказівками до виконання курсових робіт з дисципліни «Динаміка та регулювання технологічних систем».

У процесі визначення оцінки враховується низка важливих показників якості курсової роботи:

*Змістовні аспекти роботи:*

- відповідність логічної побудови роботи поставленій меті та завданням;
- наочність представлення отриманих результатів;
- ступінь самостійності проведення розрахунків;
- загальне оформлення роботи.

*Якість захисту роботи:*

- уміння стисло, послідовно й чітко викласти сутність і результати дослідження;
- здатність аргументовано захищати свої пропозиції, думки, погляди;
- загальний рівень підготовки студента.

Оцінювання курсової роботи здійснюється комісією, що затверджується кафедрою для захисту курсових робіт. Підсумкова оцінка за курсову роботу виставляється за 100-бальною шкалою оцінювання на основі таких критеріїв.

Науковим керівником дається відгук на виконану курсову роботу з попередніми балами 0-60 балів. На захисті відповідно студент має можливість отримати 0-40 балів. Критерії оцінювання курсової роботи наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Критерії оцінювання курсової роботи

| № з/п | Критерій оцінювання | Оцінка в балах |
|---|---|---|
| 1. | Оформлення курсової роботи відповідно до визначених вимог | 0-10 |
| 2. | Наочність представлення отриманих результатів та якість їхньої інтерпретації | 0-30 |
| 3. | Ґрунтовність розроблених висновків та пропозицій в курсовій роботі | 0-10 |
| 4. | Вчасність виконання завдань з виконання курсової роботи | 0-10 |
| 5. | Логічність та обґрунтованість викладення змісту та розрахунків курсової роботи в доповіді студента на її захисті | 0-20 |
| 6. | Аргументація відповідей на поставлені запитання під час захисту курсової роботи | 0-20 |
| | Разом | 0-100 |

Зауваження, що мали місце до змісту курсової роботи та її захисту, враховуються комісією за їх значимістю в оцінці за 100-бальною шкалою та оцінкою за шкалою ECTS.

# 4 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ ЩОДО ЗАХИСТУ КУРСОВОЇ РОБОТИ

1. Принцип дії ЕГСП.
2. Вхідні дані для проектного розрахунку.
3. Швидкісна характеристика приводу.
4. Навантажувальна характеристика приводу.
5. Добротність ЕГСП, постійна часу приводу.
6. Механічна постійна часу гідроциліндра.
7. Постійна часу ЕГП.
8. Передавальна функція ЕГСП.
9. Перехідна характеристика ЕГСП.
10. Розрахунок динамічних характеристик ЕГСП у пакеті прикладних програм MATLAB.

# РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА


1. Петраков Ю.В. Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням: навчальний посібник. Київ: УкрНДІАТ, 2003. 383 с.

1. Свешников В.К. Станочные гидроприводы: справочник. Москва: Машиностроение, 2008. 640 с.

2. Лещенко В.А. Гидравлические следящие приводы станков с программным управлением. Москва: Машиностроение, 1975. 288 с.

3. Юревич Е.И. Теория автоматического управления. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2007. 560 с.

4. Лазарев Ю.Ф. Начала программирования в среде MatLAB: Учебное пособие. Киев: НТУУ «КПИ», 2003. 424 с.

5. http://matlab.exponenta.ru/matlab/default.php

6. Sokolov V., Krol O., Stepanova O. Nonlinear simulation of electrohydraulic drive for technological equipment. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. 1278: 012003. DOI: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1278/1/012003.

7. Sokolov V., Krol O. Determination of Transfer Functions for Electrohydraulic Servo Drive of Technological Equipment. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering,* 2019. P. 364-373. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-93587-4_38.

8. Sokolov V., Krol O., Stepanova O. Choice of Correcting Link for Electrohydraulic Servo Drive of Technological Equipment. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering.* P. 702-710. 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_70.

9. Sokolov V., Porkuian O., Krol O., Baturin Y. Design Calculation of Electrohydraulic Servo Drive for Technological Equipment. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020. Vol. 1. P. 75-84. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_8.

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання курсової роботи з дисципліни
«ДИНАМІКА ТА РЕГУЛЮВАННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ»
*(для здобувачів вищої освіти спеціальностей*
*131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування»*)
Тема «Проектний розрахунок електрогідравлічного
слідкуючого приводу технологічного обладнання»

Укладачі:
Соколов Володимир Ілліч
Браславська Олена Вікторівна

Оригінал-макет О.В. Браславська

Підписано до друку_____
Формат 60х841/16. Папір типограф. Гарнітура Times.
Друк офсетний. Умов. друк. арк. ____. Облік. видавн. арк. ___
Тираж ___ екз. Вид. №_____. Замовл. №_____. Ціна договірна.

Видавництво Східноукраїнського національного університету
імені Володимира Даля

Адреса видавництва: м. Сєвєродонецьк, просп. Центральний, 59-а.
Телефон: +38 (050) 218 04 78, факс (06452) 4 03 42
E-mail: vidavnictvosnu.ua@gmail.com

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

# МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання курсової роботи з дисципліни
«ДИНАМІКА ТА РЕГУЛЮВАННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ»
(для здобувачів вищої освіти спеціальностей
131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування»)
Тема «Проектний розрахунок електрогідравлічного
слідкуючого приводу технологічного обладнання»

Укладачі: В.І. Соколов, проф., д.т.н.; О.В. Браславська

«До друку, у світ дозволяю»:
Перший проректор_____Д.М. Марченко
Укладач_____В.І. Соколов
(підпис укладача або керівника колективу укладачів)

*Весь цифровий і фактичний матеріал,*
*бібліографічні відомості перевірені.*
*Написання одиниць відповідає стандартам*

_____
(підпис автора чи керівника авторського колективу)

Сєвєродонецьк

2021