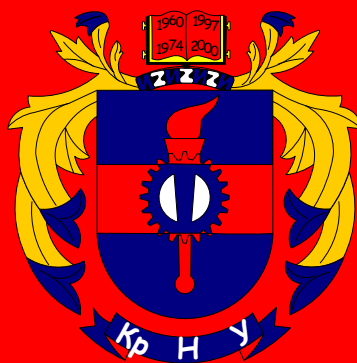


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ, ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ
І СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ



МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ЩОДО ВИКОНАННЯ КОНТРОЛЬНИХ РОБІТ
З НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ
«ТЕОРІЯ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ»
ДЛЯ СТУДЕНТІВ УСІХ ФОРМ НАВЧАННЯ
ЗІ СПЕЦІАЛЬНОСТІ 141 –
«ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА»

Методичні вказівки щодо виконання контрольних робіт з навчальної дисципліни «Теорія автоматичного управління» для студентів усіх форм навчання зі спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Укладачі: к. т. н., доц. С. А. Сергієнко,
старш. викл. Г. Г. Юдіна

Рецензент д. т. н., проф. О. П. Чорний

Кафедра систем автоматичного управління та електропривода

Затверджено методичною радою Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського

Протокол № _____ від _____ 2019 р.

Голова методичної ради _____ проф. В. В. Костін

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Завдання 1. Диференціальні рівняння та передавальні функції елементів систем автоматичного управління	5
2 Завдання 2. Часові та частотні характеристики динамічних ланок	6
3 Завдання 3. Дослідження стійкості лінійних систем автоматичного управління	13
4 Завдання 4. Синтез коректувальних пристроїв за логарифмічними частотними характеристиками	23
5 Загальні відомості про пакет програм MATLAB. Дослідження характеристик динамічних систем за допомогою пакета MATLAB	31
6 Критерії оцінювання знань студентів з контрольної роботи.....	40
Список літератури	41

ВСТУП

Навчальна дисципліна «Теорія автоматичного управління» покладена в основу всіх дисциплін, які вивчають прикладні питання автоматизації. Метою її вивчення є освоєння принципів побудови різних типів систем автоматичного управління (САУ); вивчення властивостей та особливостей лінійних, нелінійних і дискретних САУ; вивчення методів аналізу стійкості та якості перехідних процесів САУ; методів синтезу коректувальних пристроїв з метою отримання потрібних властивостей САУ.

Метою проведення контрольних робіт є закріплення студентами теоретичних знань і отримання навичок, необхідних для розв'язання задач з навчальної дисципліни «Теорія автоматичного управління», виконання курсової роботи, а також дипломного проекту.

У результаті виконання контрольних робіт студент повинен

– **знати:** методи аналізу і синтезу систем управління різними технологічними об'єктами і процесами, методи дослідження стійкості та якості перехідних процесів САУ, методи синтезу САУ;

– **уміти:** складати диференціальні рівняння та визначати передавальні функції як окремих ланок САУ, так і всієї системи в цілому; дослідити стійкість системи за допомогою алгебраїчних і частотних критеріїв стійкості; визначити схему та параметри коректувальних пристроїв, оцінювати якість регулювання.

Методичні вказівки містять завдання з різних тем курсу.

Кожен студент виконує завдання відповідно до свого варіанта, який визначається порядковим номером студента в журналі академічної групи. Номери задач, які необхідно розв'язати, визначає викладач.

Задачі виконують в окремому зошиті або на аркушах форматом А–4 з одного боку.

Усі необхідні розрахунки та графічні побудови можна виконувати за

допомогою пакетів прикладних програм MATLAB, Mathcad.

1 ЗАВДАННЯ 1. ДИФЕРЕНЦІАЛЬНІ РІВНЯННЯ ТА ПЕРЕДАВАЛЬНІ ФУНКЦІЇ ЕЛЕМЕНТІВ САУ

Скласти диференціальне рівняння елемента САУ, яке пов'язує вхідну та вихідну величини. Записати його передавальну функцію за Лапласом. Визначити, якою типовою динамічною ланкою описується цей елемент.

Таблиця 1 – Елементи систем автоматичного управління

№ варіанта	Елемент САУ	Вхідна величина	Вихідна величина
1, 14	Двигун постійного струму з незалежним збудженням (ДПС НЗ)	Напруга ланки якоря $U_d(t)$	Кутова швидкість вала двигуна $\omega(t)$
2, 15	Двигун постійного струму з незалежним збудженням (ДПС НЗ)	Напруга ланки якоря $U_d(t)$	Кут повороту вала двигуна $\beta(t)$
3, 16	Електромашинний підсилювач з поперечним полем (ЕМП)	Напруга обмотки управління $U_{вх}(t)$	Вихідна напруга $U_{вих}(t)$
4, 17	Тиристорний перетворювач (ТП)	Напруга $U_y(t)$	Вихідна напруга $U_{вих}(t)$
5, 18	Асинхронний трифазний двигун змінного струму	Напруга живлення статора $U(t)$	Кутова швидкість вала двигуна $\omega(t)$
6, 19	Асинхронний трифазний двигун змінного струму	Напруга живлення статора $U(t)$	Кут повороту вала двигуна $\beta(t)$
7, 20	Сельсинний вимірювальний пристрій (трансформаторна схема вмикання)	Кут розбігу $\theta(t)$	Напруга $U_\theta(t)$
8, 21	Тахогенератор постійного струму (ТГ)	Кут повороту вала α	Напруга $U_{тг}(t)$

		(t)	
--	--	-----	--

Продовження таблиці 1

9, 22	Тахогенератор постійного струму (ТГ)	Кутова швидкість вала $\omega(t)$	Напруга $U_{m\zeta}(t)$
10, 23	Асинхронний двофазний двигун	Напруга $U(t)$	Кут повороту вала двигуна $\beta(t)$
11, 24	Фазовий детектор (ФД) (амплітудний режим)	Напруга $U_{вх}(t)$	Напруга $U_{вих}(t)$
12, 25	Фазовий детектор (ФД) (фазовий режим)	Фаза вхідної напруги $\varphi(t)$	Напруга $U_{вих}(t)$
13	Генератор постійного струму	Кут повороту вала приводного двигуна $\alpha(t)$	Спад напруги $U_{\zeta}(t)$ на навантаженні

Рівняння, що описують динаміку САУ, як диференціальні, так і за Лапласом, потрібно записувати у стандартній формі: вихідна величина $y(t)$ та її похідні записують у лівій частині рівняння, вхідна величина $x(t)$ та її похідні – у правій. При цьому коефіцієнт біля вихідної змінної має дорівнювати одиниці.

Передавальною функцією за Лапласом $W(S)$ називається відношення зображення вихідної величини $Y(S)$ до зображення вхідної величини $X(S)$ за нульових початкових умов: $W(S) = \frac{Y(S)}{X(S)}$.

Література: [1, с. 105–110], [2, с. 15–48], [3, с. 35–50, 72–73, 92, 138–146, 179], [6, с. 40, 164, 191], [8, с. 157–166].

2 ЗАВДАННЯ 2. ЧАСОВІ ТА ЧАСТОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИНАМІЧНИХ ЛАНОК

За диференціальним рівнянням динамічної ланки (табл. 2) записати його передавальну функцію за Лапласом $W(S)$ і комплексну передавальну

функцію $W(j\omega)$.

Розрахувати і побудувати частотні характеристики ланки:

- амплітудно-частотну характеристику – АЧХ;
- фазо-частотну характеристику – ФЧХ;
- амплітудно-фазо-частотну характеристику – АФЧХ;
- асимптотичну логарифмічну амплітудно-частотну характеристику – ЛАЧХ.

За допомогою ПЕОМ побудувати перехідну характеристику $h(t)$ заданої ланки.

Таблиця 2 – Диференціальні рівняння ланок САУ

№ варіанта	Диференціальне рівняння ланки
1	$y(t) = k\left(\frac{dx(t)}{dt} + x(t)\right); \quad k=10 \text{ c}^{-1}; \quad T=0,5 \text{ c}$
2	$T\frac{dy(t)}{dt} + y(t) = T\frac{dx(t)}{dt}; \quad T=0,1 \text{ c}$
3, 25	$T^2\frac{d^2y(t)}{dt^2} + 2\xi T\frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t); \quad k=10 \text{ c}^{-1}; \quad T=0,02 \text{ c}; \quad \xi = 0,3$
4	$T\frac{d^2y(t)}{dt^2} + \frac{dy(t)}{dt} = kx(t); \quad k=100 \text{ c}^{-1}; \quad T=0,25 \text{ c}$
5	$T^2\frac{d^2y(t)}{dt^2} - 2\xi T\frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t); \quad k=30 \text{ c}^{-1}; \quad T=0,01 \text{ c}; \quad \xi = 0,2$
6	$T\frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t); \quad k=100 \text{ c}^{-1}; \quad T=0,04 \text{ c}$
7	$T^2\frac{d^2y(t)}{dt^2} + y(t) = kx(t); \quad k=10 \text{ c}^{-1}; \quad T=0,2 \text{ c}$
8	$y(t) = kx(t-\tau); \quad k=6 \text{ c}^{-1}; \quad \tau = 2 \text{ c}$
9	$T^2\frac{d^2y(t)}{dt^2} + 2\xi T\frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t); \quad k=20 \text{ c}^{-1}; \quad T=0,03 \text{ c}; \quad \xi = 1,1$
10	$T\frac{dy(t)}{dt} - y(t) = kx(t); \quad k=2 \text{ c}^{-1}; \quad T=0,1 \text{ c}$
11	$y(t) = k\left(T\frac{dx(t)}{dt} - x(t)\right); \quad k=10 \text{ c}^{-1}; \quad T=0,5 \text{ c}$
12	$y(t) = k\left(T^2\frac{d^2x(t)}{dt^2} + 2\xi T\frac{dx(t)}{dt} + x(t)\right); \quad k=50 \text{ c}^{-1}; \quad T=0,1 \text{ c}; \quad \xi = 0,25$

Продовження таблиці 2

13	$y(t) = k(T^2 \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + 2\xi T \frac{dx(t)}{dt} + x(t))$ $k=100 c^{-1}; T=0,01 c; \xi=1,2$
14	$y(t) = k(T \frac{dx(t)}{dt} + x(t));$ $k=20 c^{-1}; T=0,3 c$
15	$y(t) = k(T^2 \frac{d^2 x(t)}{dt^2} - x(t));$ $k=10 c^{-1}; T=0,15 c$
16	$T^2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 2\xi T \frac{dy(t)}{dt} - y(t) = kx(t);$ $k=10 c^{-1}; T=0,01 c; \xi=0,06$
17	$y(t) = k(T^2 \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + 2\xi T \frac{dx(t)}{dt} - x(t));$ $k=5 c^{-1}; T=0,025 c; \xi=0,04$
18	$T^2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} - y(t) = kx(t);$ $k=40 c^{-1}; T=0,2 c$
19	$T^2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 2\xi T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t);$ $k=1000 c^{-1}; T=0,5 c; \xi=0,7$
20	$\frac{dy(t)}{dt} = k(T \frac{dx(t)}{dt} + x(t));$ $k=20 c^{-1}; T=0,8 c$
21	$y(t) = T^2 \frac{d^2 x(t)}{dt^2};$ $T=2 c$
22	$\frac{dy(t)}{dt} = k \int_0^t x(t) dt;$ $k=40 c^{-1}$
23	$T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = k \frac{dx(t)}{dt};$ $k=100 c^{-1}; T=0,5 c$
24	$y(t) = kx(t+\tau);$ $k=50 c^{-1}; \tau=5 c$

Реальні САУ мають математичну модель у вигляді диференціальних рівнянь, розв'язок яких у загальному вигляді дуже складний. Для полегшення завдання розроблено декілька методів. Найбільш поширеним є метод перетворення Лапласа, побудований на тому, що функції часу замінюють їх зображеннями.

Перетворенням Лапласа називають співвідношення

$$X(s) = \int_0^{\infty} x(t)e^{-st} dt.$$

Це співвідношення ставить у відповідність функції $x(t)$ дійсної змінної t функцію $X(s)$ комплексної змінної s ($s = \sigma + j\omega$), $j = \sqrt{-1}$.

При цьому $x(t)$ називають оригіналом, а $X(s)$ – зображенням за Лапласом. Це записують так: $X(s) = L\{x(t)\}$, де L – оператор Лапласа.

Обернене перетворення Лапласа можна записати так: $x(t) = L^{-1}\{X(s)\}$, де L^{-1} – обернений оператор Лапласа.

Основні властивості перетворення Лапласа.

Властивість лінійності: для будь-яких постійних α і β справедливо:

$$L\{\alpha x_1(t) + \beta x_2(t)\} = \alpha L\{x_1(t)\} + \beta L\{x_2(t)\}.$$

Диференціювання оригіналу:

$$L\left\{\frac{dx(t)}{dt}\right\} = sX(s); \quad L\left\{\frac{d^n x(t)}{dt^n}\right\} = s^n X(s).$$

Ця властивість справедлива тільки з урахуванням нульових початкових умов, тобто: $x(0) = x'(0) = x''(0) = \dots = X^{(n-1)}(0) = 0$.

Перетворення Фур'є є окремим випадком перетворення Лапласа за умови: $S = j\omega$.

Оскільки $W(S) = Y(S)/X(S)$, то можна записати:

$$W(j\omega) = Y(j\omega)/X(j\omega).$$

Цю передавальну функцію $W(j\omega)$ називають частотною передавальною функцією або комплексною передавальною функцією (КПФ) від змінної ω . Її можна записати в алгебраїчному та показниковому виглядах:

$$W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)},$$

де $U(\omega) = \text{Re}\{W(j\omega)\}$ – дійсна частина КПФ – дійсна частотна функція; її графік – дійсна частотна характеристика; $V(\omega) = \text{Im}\{W(j\omega)\}$ – уявна частина КПФ – уявна частотна функція, її графік – уявна частотна характеристика; $A(\omega) = |W(j\omega)|$ – модуль КПФ – амплітудна частотна функція, причому

$$A(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)},$$

її графік називають амплітудно-частотною характеристикою – АЧХ.

$\varphi(\omega) = \text{Arg}\{W(j\omega)\}$ – аргумент КПФ – фазова частотна функція:

$$\varphi(\omega) = \arctg(V(\omega)/U(\omega)),$$

її графік називають фазо-частотною характеристикою – ФЧХ.

ЛАЧХ називають АЧХ системи, виражену в децибелах і побудовану в логарифмічному масштабі частот. ЛАЧХ та АЧХ пов'язані співвідношенням

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega).$$

ЛФЧХ називають залежність фази $\varphi(\omega)$, виражену в градусах чи радіанах, від частоти ω у логарифмічному масштабі.

Саму частотну передавальну функцію $W(j\omega)$ називають також амплітудно-фазо-частотною функцією, а її графік на комплексній площині – амплітудно-фазо-частотною характеристикою – АФЧХ або АФХ.

На комплексній площині (рис. 2.1) $W(j\omega)$ визначає вектор \overline{OC} , довжина якого дорівнює $A(\omega)$, а аргумент (кут між вектором і дійсною додатною піввіссю) – $\varphi(\omega)$.

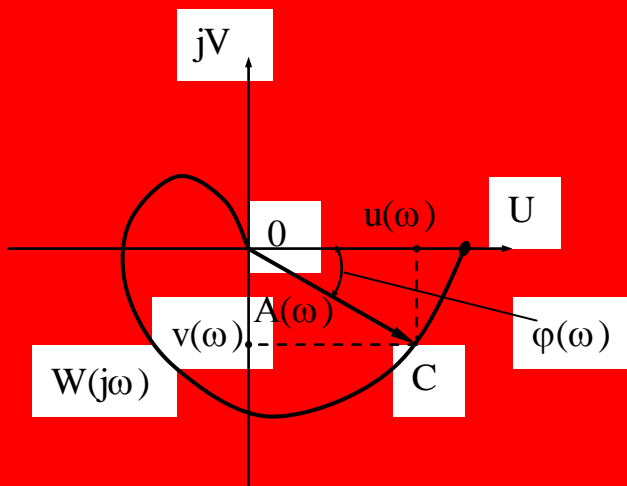


Рисунок 2.1 – АФЧХ

Крива, яку описує кінець вектора функції $W(j\omega)$ зі зміною частоти ω від 0 до ∞ , називається АФЧХ.

Реакція системи на одиничний ступінчастий вплив за нульових початкових умов називається перехідною функцією $h(t)$ системи. Графік цієї функції називається

перехідною характеристикою системи.

Приклад до завдання 2.

Розв'язати задачу, якщо рівняння ланки має вигляд:

$$T^2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} - y(t) = Kx(t), K=10 \text{ c}^{-1}; T=0,5 \text{ c.} \quad (2.1)$$

Записуємо рівняння в операційній формі, застосовуючи властивості перетворення за Лапласом:

$$T^2 S^2 y(S) - y(S) = Kx(S), \quad y(S)(T^2 S^2 - 1) = Kx(S). \quad (2.2)$$

Тоді передавальна функція за Лапласом:

$$W(S) = \frac{y(S)}{x(S)} = \frac{K}{T^2 S^2 - 1}. \quad (2.3)$$

Замінюємо змінну «S» на «j ω » і отримуємо комплексну передавальну функцію:

$$W(j\omega) = \frac{K}{T^2(j\omega)^2 - 1} = \frac{K}{-T^2\omega^2 - 1} = \frac{-K}{1+T^2\omega^2} = U(\omega) + jV(\omega). \quad (2.4)$$

Тобто дійсна частотна функція: $U(\omega) = \frac{-K}{1+T^2\omega^2}$,

уявна частотна функція у цьому випадку: $V(\omega) = 0$.

Амплітудна частотна функція:

$$A(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)} = \frac{K}{1+T^2\omega^2} = \frac{10}{1+0.25\omega^2}. \quad (2.5)$$

Фазова частотна функція

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{V(\omega)}{U(\omega)}; \quad (2.6)$$

з урахуванням знака дійсної функції, $U(\omega) < 0$, маємо: $\varphi(\omega) = -\pi$.

Логарифмічна амплітудна частотна функція:

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega) = 20 \lg \frac{K}{1+T^2\omega^2} = 20 \lg K - 20 \lg(1+T^2\omega^2). \quad (2.7)$$

Для побудови асимптотичної ЛАЧХ розглянемо два інтервали:

$$1. \quad \omega \ll \frac{1}{T}, L_1(\omega) = 20 \lg K - 20 \lg 1 = 20 \lg K = 20 \lg 10 = 20 \text{ дБ},$$

тобто нехтуємо дуже малою величиною $T^2\omega^2$.

$$2. \quad \omega \gg \frac{1}{T}, L_2(\omega) = 20 \lg K - 20 \lg(T^2\omega^2) = 20 \lg K - 40 \lg(T\omega),$$

тобто нехтуємо одиницею у зрівнянні з великою величиною $T^2\omega^2$.

Це пряма з нахилом «- 40 дБ/дек».

Частота спряження: $\omega = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,5} = 2\text{с}^{-1}$.

Частотні характеристики розглянутої ланки наведені на рис. 2.2.

Виконати моделювання ланки, структурна схема якої наведена на рис. 2.3, узявши при цьому $X_{вх}(t) = 1(t) = 1$.

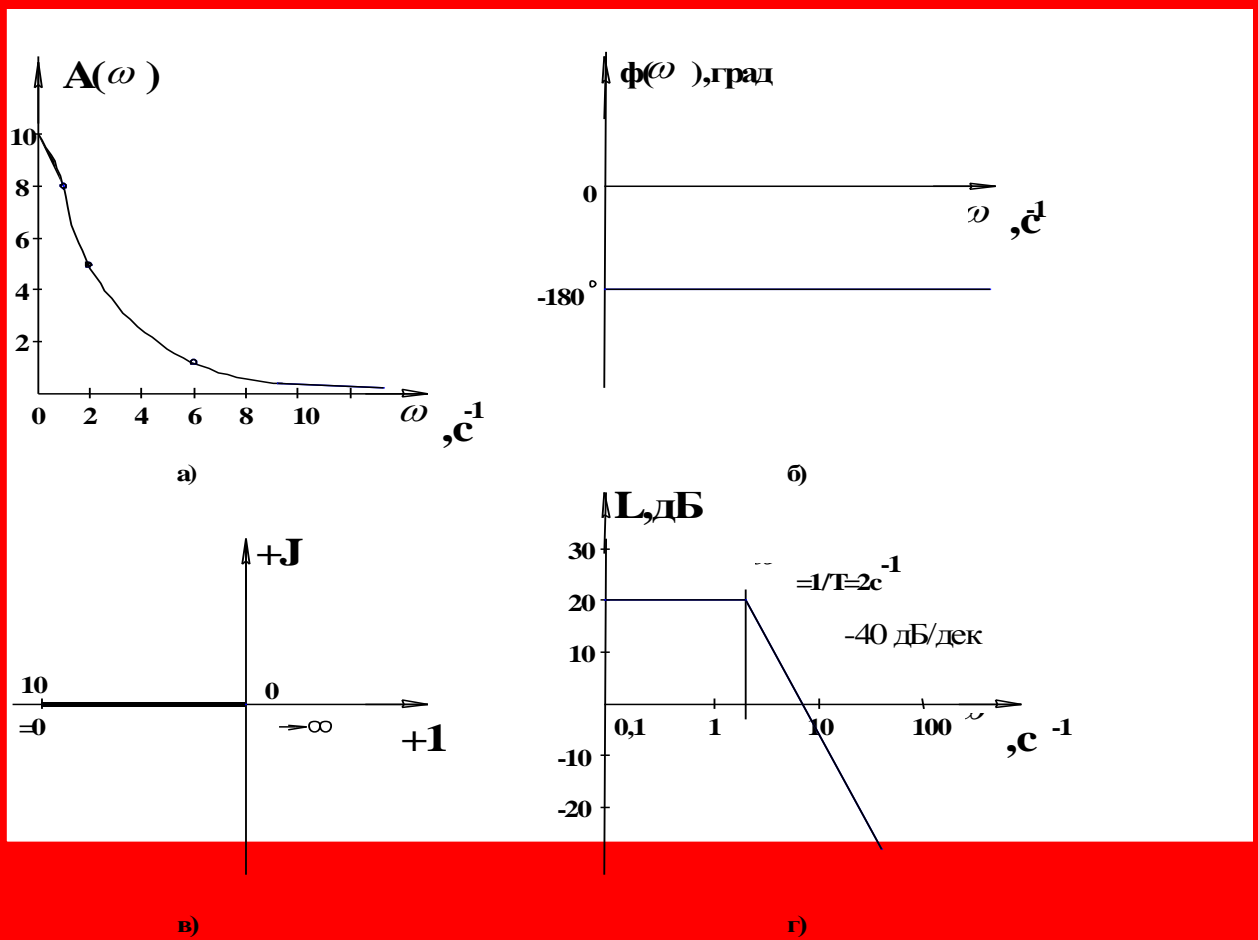


Рисунок 2.2 – Частотні характеристики розглянутої ланки:

АЧХ(а), ФЧХ (б), АФЧХ (в), ЛАЧХ (г)

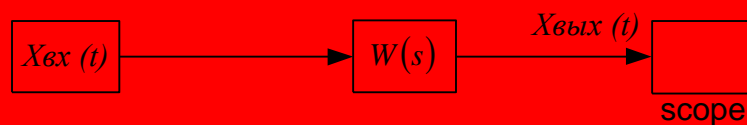


Рисунок 2.3 – Структурна схема для побудови перехідної характеристики $h(t)$ динамічної ланки

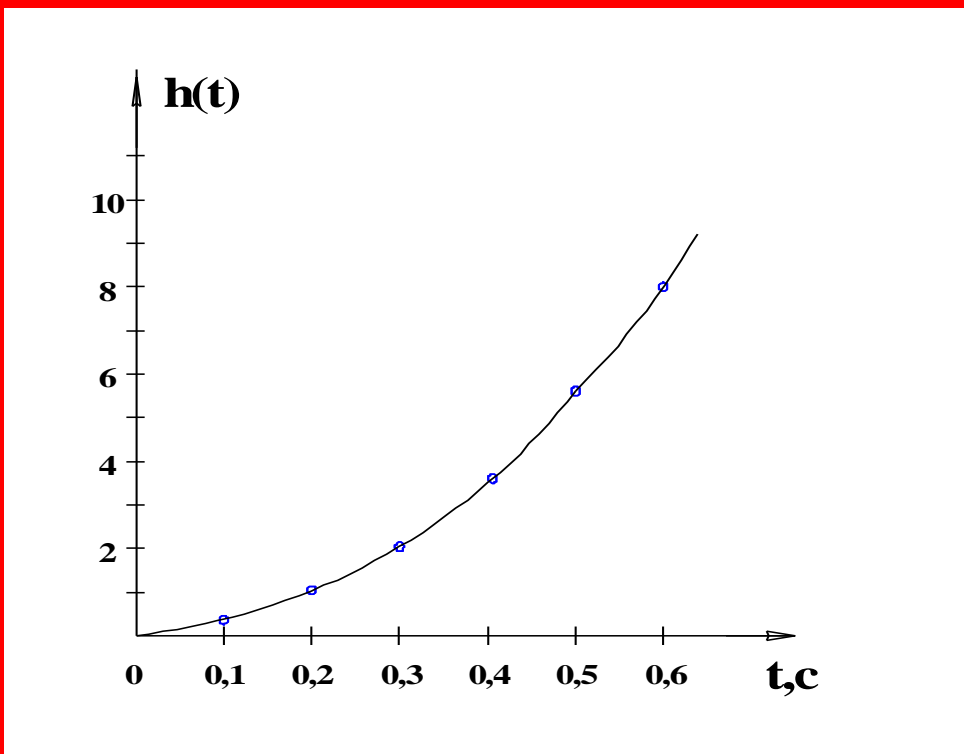


Рисунок 2.4 – Перехідна характеристика розглянутої ланки

Література: [1, с. 52–64], [3, с. 223–242], [12, с. 11–17].

3 ЗАВДАННЯ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ЛІНІЙНИХ САУ

У табл. 3.1 задані передавальні функції $W(S)$ розімкнених САУ.

Дослідити стійкість замкнутої системи з одиничним від'ємним зв'язком:

- за алгебраїчним критерієм Гурвіца та визначити граничний коефіцієнт підсилення $K_{гр}$;
- за частотним критерієм Найквіста;
- за логарифмічними частотними характеристиками. У разі стійкої системи визначити запаси стійкості за амплітудою $A_{зап}$ та за фазою $\varphi_{зап}$.

Правила, які дозволяють визначати стійкість системи без обчислення

коренів характеристичного рівняння, називають критеріями стійкості.

Усі критерії можуть бути розподілені на алгебраїчні та частотні.

Таблиця 3.1 – Передавальні функції $W(S)$ розімкнутої САУ

№ варіанта	$W(S)$
1	$W(S) = \frac{100}{S(0,1S + 1)(0,05S + 1)}$
2	$W(S) = \frac{40}{(2S + 1)(0,02S + 1)(0,08S + 1)}$
3	$W(S) = \frac{250}{S(0,2S + 1)(0,09S^2 + 0,06S + 1)}$
4	$W(S) = \frac{150(0,1S + 1)}{S(0,5S + 1)(0,01S + 1)}$
5	$W(S) = \frac{75}{(5S + 1)(0,2S + 1)(0,04S + 1)}$
6	$W(S) = \frac{100(0,1S + 1)}{(S + 1)(0,5S + 1)(0,01S + 1)}$
7	$W(S) = \frac{20}{(0,5S + 1)(0,025S + 1)(0,01S + 1)}$
8	$W(S) = \frac{10}{S(0,1S + 1)(0,05S + 1)}$
9	$W(S) = \frac{150}{S(0,1S + 1)(0,16S^2 + 0,4S + 1)}$
10	$W(S) = \frac{60(2S + 1)}{S(10S + 1)(0,5S + 1)}$
11	$W(S) = \frac{50}{(S + 1)(0,5S + 1)(0,01S + 1)}$
12	$W(S) = \frac{100(0,5S + 1)}{S(S + 1)(0,1S + 1)}$
13	$W(S) = \frac{100}{(0,05S + 1)(0,01S + 1)(0,001S + 1)}$
14	$W(S) = \frac{300}{S(0,5S + 1)(0,01S^2 + 0,08S + 1)}$
15	$W(S) = \frac{80(S + 1)}{S(2S + 1)(0,05S + 1)}$
16	$W(S) = \frac{20(2S + 1)}{S^2(0,05S + 1)}$

17	$W(S) = \frac{200}{(S+1)(0,5S+1)(0,05S+1)}$
----	---

Продовження таблиці 3.1

18	$W(S) = \frac{100(S+1)}{S^2(0,2S+1)(0,1S+1)}$
19	$W(S) = \frac{10(0,5S+1)}{(0,2S+1)(0,02S+1)S}$
20	$W(S) = \frac{60}{(0,5S+1)(0,025S+1)(0,01S+1)}$
21	$W(S) = \frac{50}{S(S+1)(0,4S+1)}$
22	$W(S) = \frac{25}{S(4S+1)(0,2S+1)}$
23	$W(S) = \frac{100}{S(0,05S+1)(0,001S+1)}$
24	$W(S) = \frac{200}{(5S+1)(0,2S+1)(0,01S+1)}$
25	$W(S) = \frac{40(S+1)}{S(2S+1)(0,2S+1)}$

До алгебраїчних належать критерії стійкості Рауса, Гурвіца, Лъенара-Шипара. До частотних – критерії стійкості Михайлова, Найквіста та логарифмічний критерій – за логарифмічними частотними характеристиками.

Алгебраїчні критерії дозволяють оцінювати стійкість САУ за коефіцієнтами характеристичного рівняння.

Необхідною умовою стійкості системи будь-якого порядку є додатність усіх коефіцієнтів характеристичного рівняння. Для систем першого та другого порядків необхідна умова є і достатньою умовою стійкості.

Критерій стійкості Гурвіца був запропонований німецьким математиком Гурвіцем у вигляді визначників, що складаються за коефіцієнтами характеристичного рівняння замкнутої системи.

Спочатку будують головний визначник Гурвіца за таким правилом: по головній діагоналі визначника зліва направо виписують усі коефіцієнти характеристичного рівняння від a_{n-1} до a_0 зі зменшенням індексів. Стовпці вгору від головної діагоналі доповнюють коефіцієнтами з індексами, що послідовно зменшуються, а стовпці вниз – коефіцієнтами з індексами, що послідовно збільшуються. Місця у визначнику, що залишилися, заповнюють нулями. Тобто, визначник має вигляд:

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & \dots & 0 \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & \dots & 0 \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_0 \end{vmatrix}$$

Відкреслюючи в головному визначникові Гурвіца, як показано пунктиром, діагональні мінори, отримуємо визначники Гурвіца нижчого порядку:

$$\Delta_1 = a_{n-1}; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} \\ a_n & a_{n-2} \end{vmatrix}; \quad \Delta_3 = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} \end{vmatrix}.$$

Критерій стійкості Гурвіца формулюється так: для того, щоб система автоматичного управління була стійкою, необхідно та достатньо, щоб усі визначники Гурвіца були додатними.

В останньому стовпці головного визначника Гурвіца від нуля відрізняється лише один коефіцієнт a_0 , тому

$$\Delta_n = a_0 \Delta_{n-1}.$$

Отже, при $a_0 > 0$ для перевірки стійкості системи достатньо знайти лише визначники Гурвіца від Δ_1 до Δ_{n-1} (головний визначник Δ_n обчислювати непотрібно).

Коли головний визначник дорівнює нулю, а всі визначники нижчого порядку додатні, то система знаходиться на межі стійкості, тобто

$$\Delta_n = a_0 \Delta_{n-1} = 0.$$

Використовуючи критерій Гурвіца, можна за заданими параметрами системи прийняти за невідомий будь-який один параметр (наприклад, коефіцієнт підсилення) та визначити його граничне (критичне) значення, за яким система буде знаходитися на межі стійкості.

Частотні критерії стійкості дозволяють судити про стійкість САУ за виглядом їх частотних характеристик.

Частотний критерій стійкості Найквіста, дозволяє судити про стійкість замкнутої САК за виглядом АФЧХ розімкнутої системи.

Формулювання критерію стійкості Найквіста.

Якщо розімкнута САУ стійка, то замкнута САУ буде стійкою, якщо АФЧХ $W(j\omega)$ розімкнутої САУ не охоплює точку з координатами $(-1; j0)$.

Якщо розімкнута САУ нестійка, то для того, щоб замкнута САУ була стійкою, необхідно та достатньо, щоб АФЧХ розімкнутої системи $W(j\omega)$ зі зміною частоти ω від 0 до $+\infty$ охоплювала точку $(-1; j0)$ у додатному напрямку (проти руху часової стрілки) $k/2$ раз, де k – кількість правих коренів характеристичного рівняння розімкнутої САУ.

Аналіз стійкості за логарифмічними частотними характеристиками розімкнутої системи – логарифмічний критерій стійкості.

Відповідно до критерію Найквіста стійкість пов'язана з кількістю переходів АФЧХ $W(j\omega)$ через відрізок $(-\infty; -1)$ від'ємної дійсної півосі. Коли $W(j\omega)$ перетинає від'ємну дійсну піввісь, ЛФЧХ перетинає пряму $(-\pi)$.

Додатному переходу (зверху вниз) через відрізок $(-\infty; -1)$ характеристики $W(j\omega)$ відповідає перетин ЛФЧХ при $L(\omega) > 0$ прямої $(-\pi)$ знизу вверху, а від'ємному переходу – зверху вниз.

Тоді логарифмічний критерій стійкості можна сформулювати так.

Для того, щоб САУ була стійкою, необхідно та достатньо, щоб різниця між числом додатних і від'ємних переходів ЛФЧХ через пряму $(-\pi)$ на всіх

ділянках, де ЛАЧХ додатна, тобто $L(\omega) > 0$, дорівнювала $k/2$ (k – кількість правих коренів характеристичного рівняння розімкнутої системи).

Приклад до завдання 3

Розв'язати задачу 3, якщо передавальна функція розімкнутої САУ:

$$W(S) = \frac{200(0,5S + 1)}{S^2(0,2S + 1)(0,05S + 1)}.$$

Записуємо передавальну функцію замкнутої САУ:

$$W_3(S) = \frac{W(S)}{1 + W(S)} = \frac{200(0,5S + 1)}{S^2(0,2S + 1)(0,05S + 1) + 200(0,5S + 1)}. \quad (3.1)$$

Дорівнюємо знаменник $W_3(S)$ до нуля й отримуємо характеристичне рівняння замкнутої САУ:

$$S^2(0,2S + 1)(0,05S + 1) + 200(0,5S + 1) = 0. \quad (3.2)$$

Після математичних перетворень записуємо характеристичне рівняння в остаточному вигляді:

$$\begin{aligned} a_4 S^4 + a_3 S^3 + a_2 S^2 + a_1 S + a_0 &= 0 \\ a_4 &= 0,2 \cdot 0,05 = 0,01 \\ a_3 &= 0,2 + 0,05 = 0,25 \\ a_2 &= 1 \\ a_1 &= 200 \cdot 0,5 = 100 \\ a_0 &= 200 \end{aligned} \quad (3.3)$$

Усі коефіцієнти рівняння додатні, тобто необхідні умови стійкості САУ виконані. Складаємо визначник Гурвіца:

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} a_3 & a_1 & 0 & 0 \\ a_4 & a_2 & a_0 & 0 \\ 0 & a_3 & a_1 & 0 \\ 0 & a_4 & a_2 & a_0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,25 & 100 & 0 & 0 \\ 0,01 & 1 & 200 & 0 \\ 0 & 0,25 & 100 & 0 \\ 0 & 0,01 & 1 & 200 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 0,25 & 100 \\ 0,01 & 1 \end{vmatrix} = 0,25 \cdot 1 - 0,01 \cdot 100 = -0,75 < 0$$

Тобто за критерієм Гурвіца система нестійка.

Визначимо граничний коефіцієнт підсилення K_{ep} , узявши його за невідомий параметр, оскільки розглянута система астатична. Тоді:

$$a_4=0,01 \quad a_3=0,25 \quad a_2=1 \quad a_1=0,5 K_{ep} \quad a_0=K_{ep}$$

$$\Delta_4 = a_0 \Delta_3 = a_0 \begin{vmatrix} a_3 & a_1 & 0 \\ a_4 & a_2 & a_0 \\ 0 & a_3 & a_1 \end{vmatrix} = K_{ep} \begin{vmatrix} 0,25 & 0,5 K_{ep} & 0 \\ 0,01 & 1 & K_{ep} \\ 0 & 0,25 & 0,5 K_{ep} \end{vmatrix} = 0$$

$$K_{ep}(0,25 \cdot 1 \cdot 0,5 K_{ep} - 0,01 \cdot 0,5^2 K_{ep}^2 - 0,25 K_{ep}) = 0; \quad (3.4)$$

Звідси $K_{ep}=25 \text{ c}^{-1}$. Тобто при $K > 25$ система стає нестійкою.

Розрахуємо АФЧХ розімкнутої системи за ланками:

$$W_1(S) = \frac{200}{S}; W_2(S) = \frac{1}{S}; W_3(S) = 0,5S + 1;$$

$$W_4(S) = \frac{1}{0,2S + 1}; W_5(S) = \frac{1}{0,05S + 1}.$$

Тобто маємо дві інтегрувальні ланки, дві аперіодичні й одну форсувальну. Розрахунок АЧХ та ФЧХ кожної ланки виконуємо за відомими формулами. Результати розрахунків зводимо до табл. 3.2.

Будуємо АФЧХ розімкнутої САУ (рис. 3.1) та визначаємо за критерієм Найквіста, що замкнута САУ нестійка, оскільки АФЧХ охоплює точку $(-1; j0)$ за рухом часової стрілки.

Для дослідження стійкості системи за логарифмічними частотними характеристиками будуємо асимптотичну ЛАЧХ та ЛФЧХ розімкнутої САУ.

Коефіцієнт підсилення, виражений у дБ:

$$20 \lg K = 20 \lg 200 = 46 \text{ дБ}.$$

Визначаємо частоти спряження:

$$\omega_1 = \frac{1}{0,5} = 2 \text{ c}^{-1}; \omega_2 = \frac{1}{0,2} = 5 \text{ c}^{-1}; \omega_3 = \frac{1}{0,05} = 20 \text{ c}^{-1},$$

де ω_1 – частота спряження форсувальної ланки; ω_2, ω_3 – частоти спряження аперіодичних ланок.

Таблиця 3.2 – Розрахунок АФЧХ розімкнутої САУ

ω, c^{-1}		0	1	2	5	10	20	50	100	200
$W_1(j\omega)$	$A_1(\omega)$	∞	200	100	40	20	10	4	2	1
	$\varphi_1(\omega)$	-90^0	-90^0	-90^0	-90^0	-90^0	-90^0	-90^0	-90^0	-90^0
$W_2(j\omega)$	$A_2(\omega)$	∞	1	0,5	0,2	0,2	0,05	0,02	0,01	0,005
	$\varphi_2(\omega)$	-90^0	-90^0	-90^0	-90^0	-90^0	-90^0	-90^0	-90^0	-90^0
$W_3(j\omega)$	$A_3(\omega)$	1	1,12	1,42	2,7	5,1	10,1	25,02	50	100
	$\varphi_3(\omega)$	0	26^0	45^0	68^0	77^0	84^0	88^0	89^0	$89,5^0$
$W_4(j\omega)$	$A_4(\omega)$	1	0,98	0,93	0,71	0,45	0,24	0,1	0,05	0,025
	$\varphi_4(\omega)$	0	-11^0	-22^0	-45^0	-63^0	-76^0	-84^0	-87^0	-89^0
$W_5(j\omega)$	$A_5(\omega)$	1	1	0,99	0,96	0,9	0,7	0,36	0,2	0,1
	$\varphi_5(\omega)$	0	-3^0	-6^0	-14^0	-26^0	-45^0	-68^0	-79^0	-84^0
$A(\omega) = A_1A_2A_3A_4A_5$		∞	219,5	65,4	14,7	4,1	0,85	0,07	0,01	0,001
$\varphi(\omega) = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 + \varphi_5$		-180^0	-168^0	-163^0	-171^0	-192^0	-217^0	-244^0	-257^0	-263^0

Логарифмічні частотні характеристики розімкнутої САУ побудовані на рис. 3.2.

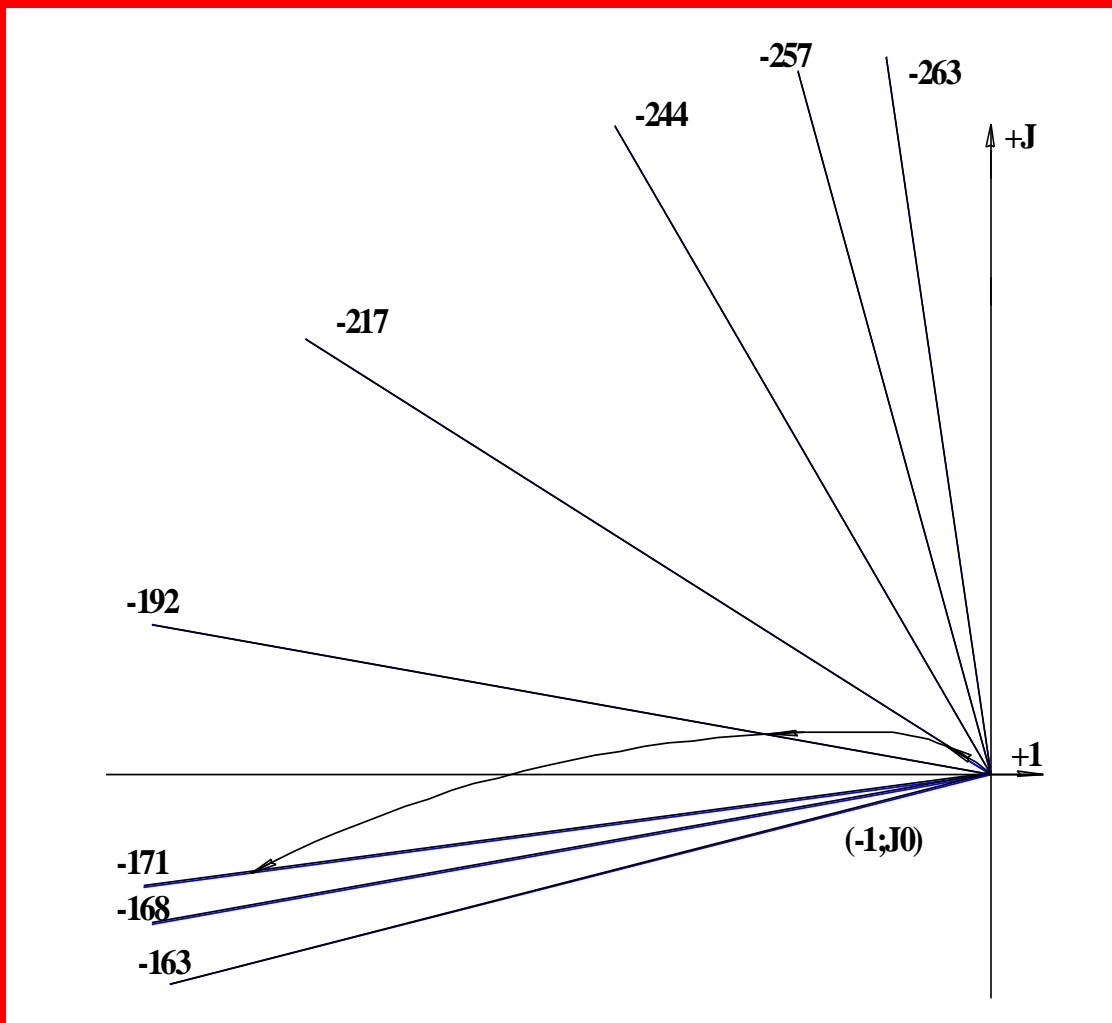


Рисунок 3.1 – АФЧХ розімкнутої САУ

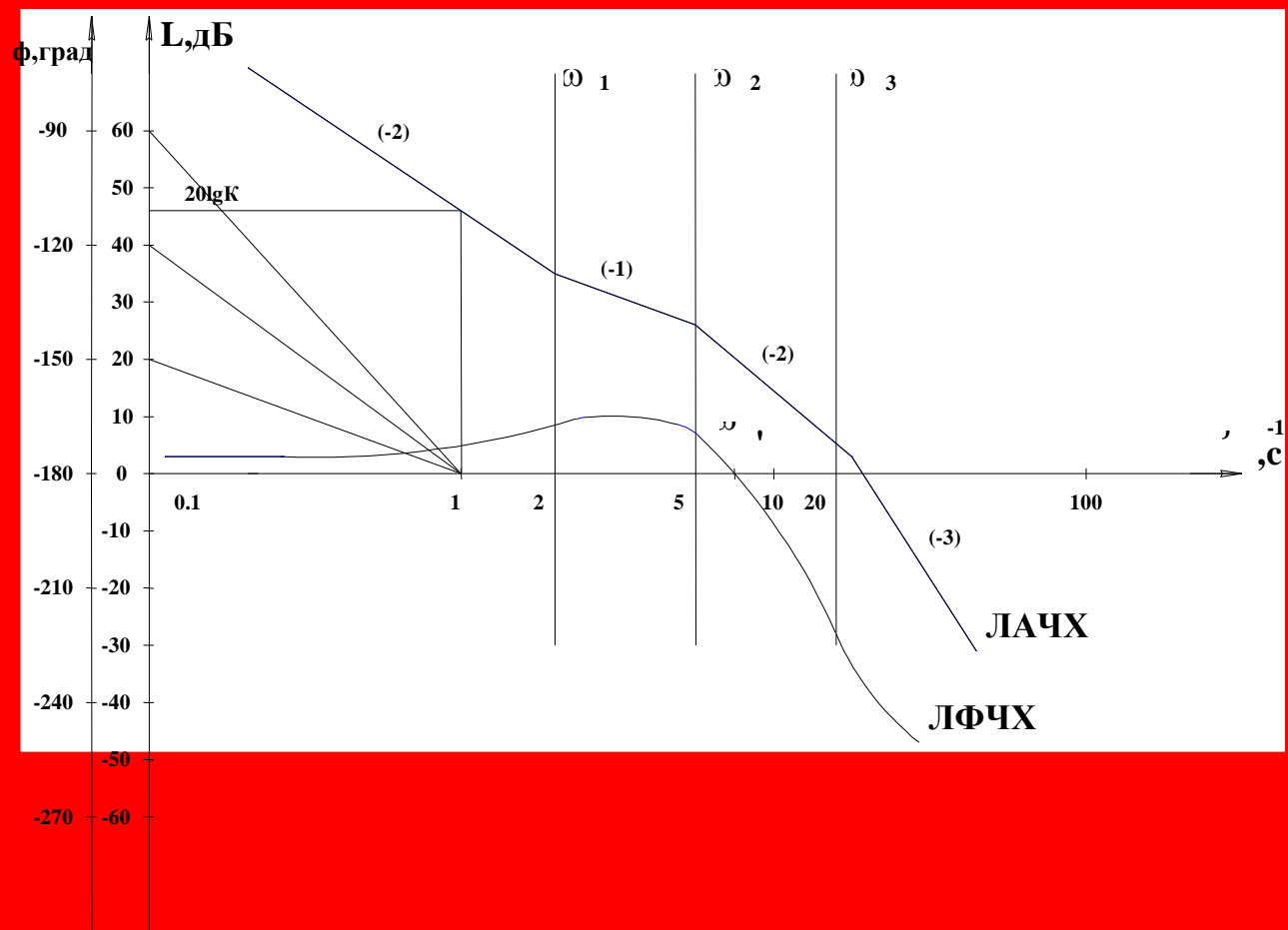


Рисунок 3.2 – Логарифмічні частотні характеристики розімкненої САУ

Оскільки на частоті ω' , де ЛФЧХ набуває значення « -180^0 », $L(\omega') > 0$, замкнена лінійна САУ нестійка.

Отже, стійкість замкненої лінійної САУ досліджена за трьома критеріями стійкості. Висновок: розглянута система нестійка.

Література: [1, с. 131–137, 145–154], [3, с. 264–284], [4, с. 114–132], [10, с. 20–30], [12, с. 11–17].

4 ЗАВДАННЯ 4. СИНТЕЗ КОРЕКТУВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ ЗА ЛОГАРИФМІЧНИМИ ЧАСТОТНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

У табл. 4 задана передавальна функція $W(S)$ незмінної частини САУ, а також вимоги до системи, що синтезується, – бажаної системи:

- коефіцієнти помилок C_1, C_2, C_3 ($C_0=0$) або
- час регулювання $t_{рег}$;
- перерегулювання σ ;
- коефіцієнт підсилення (добротність) $K_{ск}$.

Виконати синтез послідовного коректувального пристрою методом логарифмічних частотних характеристик:

- побудувати ЛАЧХ незмінної частини системи;
- розрахувати та побудувати бажану ЛАЧХ – БЛАЧХ;
- побудувати ЛАЧХ коректувального пристрою;
- записати передавальну функцію коректувального пристрою $W_{кп}(S)$;
- вибрати схему пасивного чотириполюсника, яка реалізує отриману передавальну функцію $W_{кп}(S)$, і розрахувати його параметри.

Таблиця 4 – Передавальна функція розімкнутої $W(S)$ початкової САУ

та вимоги до системи, що синтезується

№ вар	$W(S)$	$t_{пер},$ с	$\sigma,$ %	$K_{СК},$ $с^{-1}$	$C_1,$ с	$C_2,$ $с^2$	$C_3,$ $с^3$
1	2	3	4	5	6	7	8
1	$W(S) = \frac{500}{S(0,1S + 1)(0,006S + 1)}$	0,1	30	400			
2	$W(S) = \frac{200}{S(0,2S + 1)(0,025S + 1)}$	0,4	20	200			
3	$W(S) = \frac{150}{S(0,04S + 1)(0,0125S + 1)}$	0,2	30	100			
4	$W(S) = \frac{100}{S(0,025S + 1)(0,0125S + 1)}$				0,02	0,025	-0,01875
5	$W(S) = \frac{100}{S(0,033S + 1)(0,0125S + 1)}$				0,01	0,025	-0,01875
6	$W(S) = \frac{100}{S(0,3125S + 1)(0,01S + 1)(0,003S + 1)}$				0,04	0,025	-0,01875
7	$W(S) = \frac{200}{S(0,8S + 1)(0,02S + 1)(0,005S + 1)}$				0,04	0,1	-0,15
8	$W(S) = \frac{150}{S(0,003S + 1)(0,01S + 1)}$	0,1	30	100			
9	$W(S) = \frac{200}{S(0,05S + 1)(0,01S + 1)}$	0,5	30	200			
10	$W(S) = \frac{350}{S(0,00018S^2 + 0,016S + 1)(0,007S + 1)}$				0,003	0,1	-0,15
11	$W(S) = \frac{150}{S(0,035S + 1)(0,018S + 1)}$				0,02	0,066	-0,066
12	$W(S) = \frac{270}{S(0,05S + 1)(0,018S + 1)}$				0,008	0,066	-0,066
13	$W(S) = \frac{400}{S(0,01S + 1)(0,02S + 1)}$	0,3	25	300			
14	$W(S) = \frac{100}{S(0,15S + 1)(0,05S + 1)}$				0,01	0,016	-0,008
15	$W(S) = \frac{200}{S(0,125S + 1)(0,005S + 1)}$				0,008	0,016	-0,008
16	$W(S) = \frac{250}{S(5 \cdot 10^{-5} S^2 + 0,01S + 1)(0,0125S + 1)}$				0,04	0,016	-0,008
17	$W(S) = \frac{1000}{S(0,025S + 1)(0,013S + 1)(0,003S + 1)}$				0,04	0,025	-0,0187

Продовження таблиці 4

18	$W(S) = \frac{500}{S(0,033S + 1)(0,0125S + 1)}$	0,2	20	200			
19	$W(S) = \frac{100}{S(0,3125S + 1)(0,013S + 1)(0,003S + 1)}$	0,1	30	100			
20	$W(S) = \frac{200}{S(0,025S + 1)(0,0125S + 1)}$	0,5	30	50			
21	$W(S) = \frac{50}{S(0,035S + 1)(0,0185S + 1)}$				0,02	0,1	-0,15
22	$W(S) = \frac{350}{S(1,84 \cdot 10^{-4} S^2 + 0,02S + 1)(0,006S + 1)}$				0,003	0,1	-0,15
23	$W(S) = \frac{100}{S(0,03S + 1)(0,025S + 1)}$				0,01	0,1	-0,15
24	$W(S) = \frac{200}{S(0,02S + 1)(0,005S + 1)}$	0,4	20	50			
25	$W(S) = \frac{50}{S(0,01S + 1)(0,0125S + 1)}$	0,2	30	50			

Під час побудови бажаної логарифмічної амплітудної частотної характеристики (БЛАЧХ) виділяють чотири основних зони (рис. 4.1):

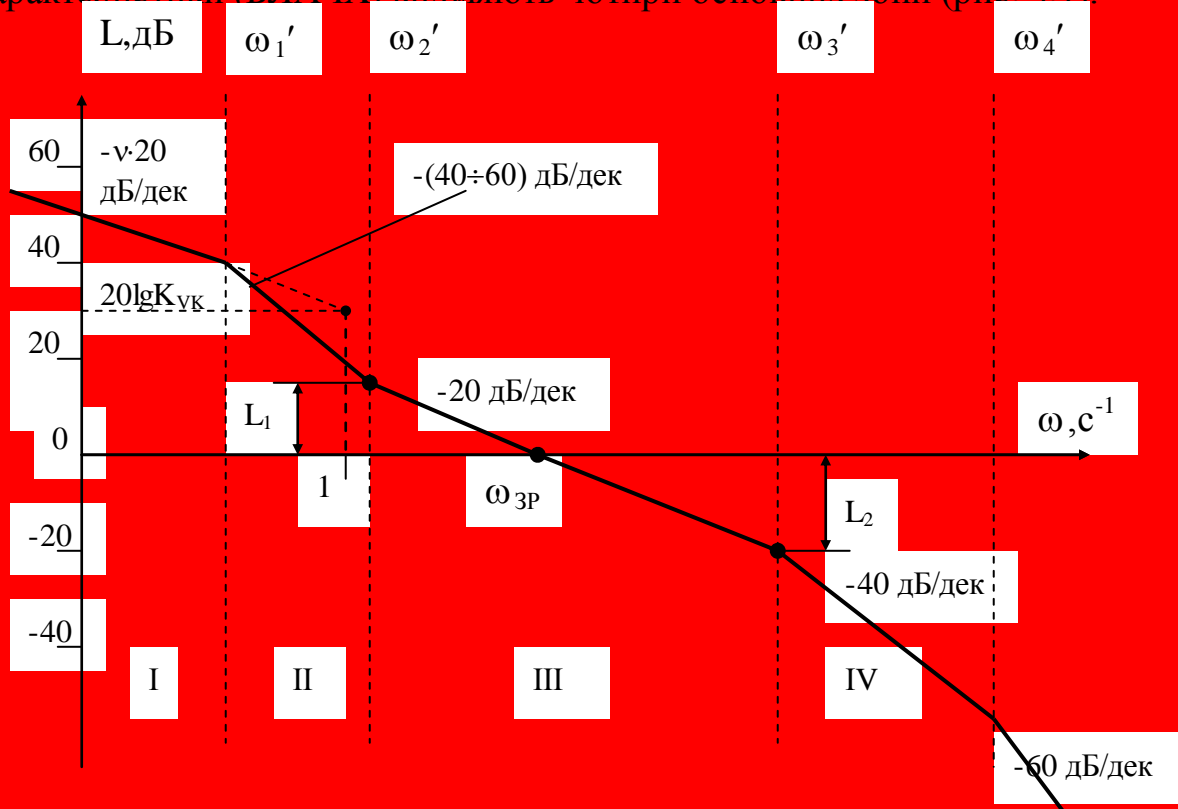


Рисунок 4.1 – Приклад побудови ЛАЧХ бажаної системи – БЛАЧХ

– **Зона I** – зона дуже низьких частот ($0 \div \omega'_1$), що характеризує ступінь астатизму ν системи за керувальним впливом; нахил БЛАЧХ у цій зоні дорівнює « $-\nu \cdot 20$ дБ/дек», де ν – ступінь астатизму САУ, що визначається як різниця між числом інтегровальних і диференціювальних ланок, її проводять до першої частоти спряження ω_1 : спочатку треба відкласти величину $20 \lg K_{ск}$ на частоті $\omega = 1 \text{ с}^{-1}$ та через точку з координатами ($\omega = 1 \text{ с}^{-1}$; $L = 20 \lg K_{ск}$) провести першу асимптоту з нахилом « $-\nu \cdot 20$ дБ/дек».

– **Зона II** – зона низьких частот ($\omega'_1 \div \omega'_2$); нахил БЛАЧХ у цій зоні визначається кількістю аперіодичних (коливальних) ланок, що мають постійну часу $T=1/\omega'_1$, і складає « -40 дБ/дек» або « -60 дБ/дек».

Ці дві зони частот визначають статичну точність системи.

– **Зона III** – зона середніх частот ($\omega'_2 \div \omega'_3$), визначає запаси стійкості за фазою й амплітудою, а також якість системи у перехідному режимі. Для забезпечення необхідних показників якості нахил БЛАЧХ у цій зоні обов'язково має дорівнювати « -20 дБ/дек», а ширина зони має бути не менше однієї декади (чим більша ширина, тим більші запаси стійкості й менша коливальність системи); $\omega_{зр}$ – частота зрізу.

– **Зона IV** – зона високих частот ($\omega'_3 \div \infty$), нахил у якій визначається кількістю аперіодичних чи коливальних ланок. Хід БЛАЧХ у ній суттєво не впливає на якість системи. Його слід вибирати найбільш крутим, що дозволяє зменшити величину флуктуаційних помилок. З іншого боку, хід БЛАЧХ у цій зоні слід вибирати за умови отримання найбільш простого коректувального пристрою, тобто направляти БЛАЧХ за ЛАЧХ початкової системи або паралельно їй.

Розрахунок БЛАЧХ можна виконати за заданими коефіцієнтами помилок S_i . Для цього використовують приблизні співвідношення, що пов'язують показники якості САК з параметрами обмеженої кількості типових ЛАЧХ і

дозволяють достатньо просто розв'язати задачу синтезу коректувального пристрою:

$$\begin{aligned} K_{ск} &= \frac{1}{C_1}; \frac{C_2}{2!} = \frac{1}{K_{ск} \omega'_1}; \\ \frac{C_3}{3!} &= -\frac{1}{\omega'_1 \omega'_2 K_{ск}}; \\ K_{ск} &= \frac{\omega_{ср} \omega'_2}{\omega'_1} \end{aligned} \quad (4.2)$$

За обчисленими значеннями $K_{ск}$, $\omega_{зр}$, ω'_2 , ω'_1 і з урахуванням вимог до БЛАЧХ будують цю характеристику. Побудову слід починати з асимптот зони І і Ш.

Середньочастотну та високочастотну асимптоти БЛАЧХ будують з урахуванням вимог, поставлених до бажаної ЛАЧХ так, щоб отримати найбільш простий коректувальний пристрій.

ЛАЧХ коректувального пристрою (ЛАЧХ_{кп}) будують як різницю між БЛАЧХ і ЛАЧХ незмінної частини системи.

За видом ЛАЧХ_{кп} записують передавальну функцію послідовного коректувального пристрою.

В іншому випадку розрахунок БЛАЧХ виконують за заданими величинами: $K_{ск}$, ν , $t_{рег}$, σ . Побудову БЛАЧХ починають з визначення частоти зрізу $\omega_{зр}$. Для цього використовують номограму (рис. 4.2), яка визначає залежність перерегулювання σ і часу регулювання $t_{рег}$ від максимуму P_{max} дійсної частотної характеристики замкненої системи, причому час регулювання подано у вигляді функції частоти зрізу $\omega_{зр}$.

Номограму (рис 4.2) використовують так. За заданим значенням перерегулювання σ визначають величину P_{max} . Потім за P_{max} визначають співвідношення між $t_{рег}$ і $\omega_{зр}$, тобто

$$t_{рег} = c \pi / \omega_{зр} \quad . \quad (4.3)$$

На рис. 4.2 стрілками показано, як для значення $\sigma = 25\%$ визначено

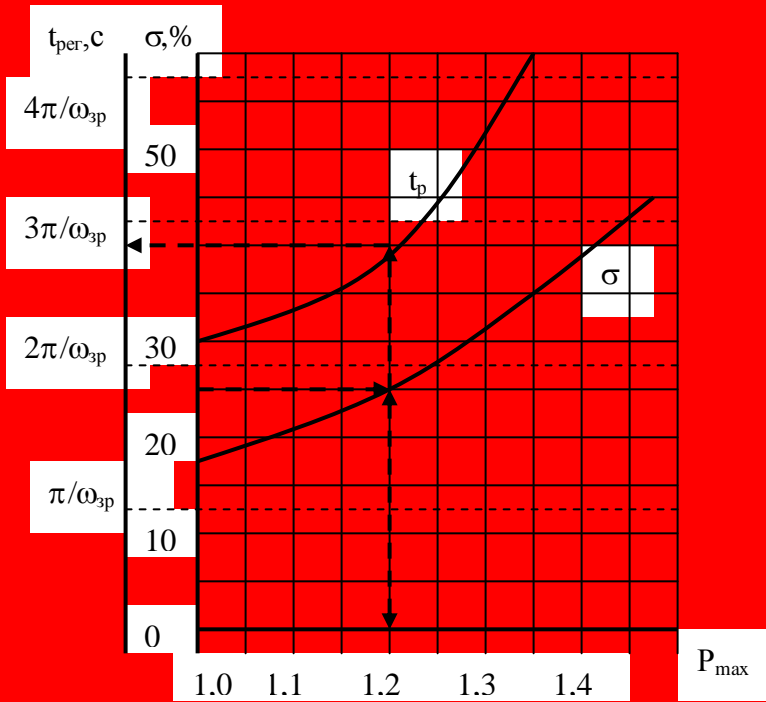


Рисунок. 4.2 – Номограма для визначення частоти

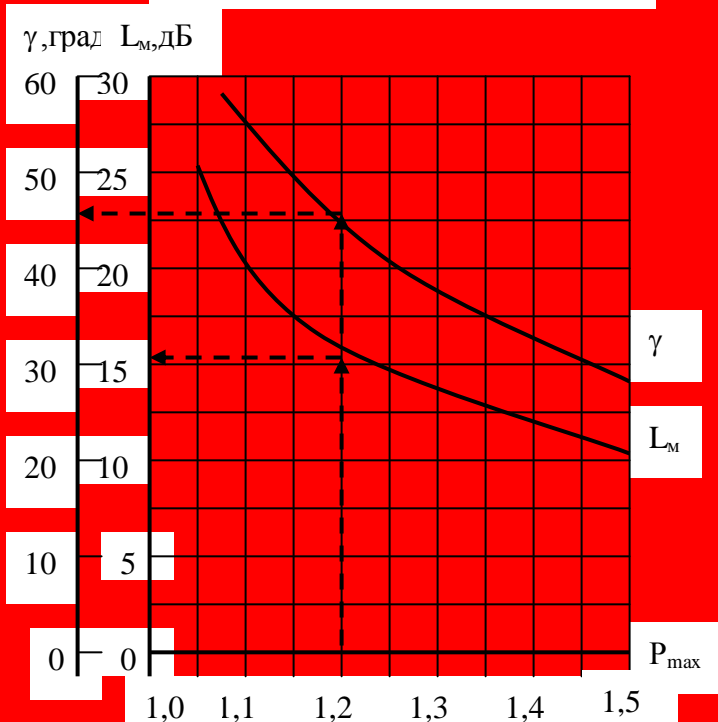


Рисунок 4.3 – Номограма для визначення надлишку фази γ та граничних значень амплітуд L_m

$P_{\max} = 1,2$ і потім $t_{\text{рег}} = 2,8\pi/\omega_{\text{зр}}$, звідки визначають частоту зрізу, за якої час регулювання не перевищує заданого значення.

Середньочастотна асимптота БЛАЧХ проводиться через точку $\omega_{\text{зр}}$ з нахилом « -20 дБ/дек».

Довжина цієї асимптоти встановлюється такою, щоб забезпечити необхідний запас стійкості. Для цього за раніше визначеним P_{\max} знаходять надлишок фази γ та граничні значення L_m логарифмічних амплітуд (рис. 4.3). Надлишок фази γ має бути забезпечений на ділянці БЛАЧХ, де виконується співвідношення

$$L_m \geq L_{\text{б}}(\omega) \geq -L_m \quad (4.4)$$

Спочатку проводять горизонтальну пунктирну пряму з ординатою L_m . Потім

з точки перетину цієї прямої із середньочастотною асимптотою будують спрягаючу асимптоту, нахил якої складає « -40 дБ/дек» чи « -60 дБ/дек». Проводять її до точки перетину з низькочастотною асимптотою.

Після цього перевіряють надлишок фази γ_a на частоті ω_a , де ордината

$L_{\delta}(\omega)$ дорівнює L_M . Значення γ_a обчислюють за формулою

$$\gamma_a = \pi - \nu \pi/2 - (k\pi/2 - \sum \omega_i/\omega_a) + (m\pi/2 - \sum \omega_j/\omega_a), \quad (4.5)$$

де ν – ступінь астатизму; ω_i – частоти спряження, менші за ω_a , на яких нахил $L_{\text{баз}}(\omega)$ змінюється на «–20 дБ/дек»; k – кількість частот ω_i ; ω_j – частоти спряження, менші за ω_a , на яких нахил $L_{\text{баз}}(\omega)$ змінюється на «+20 дБ/дек»; m – кількість частот спряження ω_j ; $i = 1 \dots k$; $j = 1 \dots m$.

Приклад до завдання 4

Розв'язати завдання 4 за умови:

$$W(S) = \frac{100}{S(0,05S + 1)(0,0125S + 1)}, \quad (4.1)$$

$C_1 = 0,01 \text{ с}; \quad C_2 = 0,025 \text{ с}^2; \quad C_3 = -0,01875 \text{ с}^3.$

Для побудови ЛАЧХ незмінної частини системи визначимо коефіцієнт підсилення, виражений у дБ: $20 \lg K = 20 \lg 100 = 20 \cdot 2 = 40 \text{ дБ}$, частоти спряження аперіодичних ланок ω_i :

$$\omega_1 = \frac{1}{0,05} = 20 \text{ с}^{-1}; \quad \omega_2 = \frac{1}{0,0125} = 80 \text{ с}^{-1}.$$

Асимптотична ЛАЧХ незмінної частини системи наведена на рис. 4.4.

Розрахунок БЛАЧХ виконуємо за заданими значеннями коефіцієнтів помилок C_i . Розрахуємо коефіцієнт підсилення $K_{\text{ск}}$ скоректованої розімкнутої системи, частоти спряження бажаної ЛАЧХ ω'_1 та ω'_2 і частоту зрізу $\omega_{\text{зр}}$.

Для нашого прикладу отримуємо:

$$K_{\text{ск}} = 100 \text{ с}^{-1}; \quad 20 \lg K_{\text{ск}} = 40 \text{ дБ}; \quad \omega'_1 = 0,8 \text{ с}^{-1}; \quad \omega'_2 = 4 \text{ с}^{-1}; \quad \omega_{\text{зр}} = 20 \text{ с}^{-1}.$$

Коефіцієнт підсилення і порядок астатизму початкової системи та системи, що синтезується, співпадають, тому в діапазоні низьких частот (ліворуч від ω'_1) ЛАЧХ і БЛАЧХ також співпадають.

ЛАЧХ коректувального пристрою (ЛАЧХ_{кп}) будуємо як різницю між БЛАЧХ і ЛАЧХ незмінної частини системи (рис. 4.4).

За виглядом ЛАЧХ_{кп} запишемо передавальну функцію послідовного коректувального пристрою:

$$W_{ky}(S) = \frac{(T_2 S + 1)(T_3 S + 1)}{(T_1 S + 1)(T_4 S + 1)};$$

де $T_1 = \frac{1}{\omega'_1} = \frac{1}{0,8} = 1,25c; T_2 = \frac{1}{\omega'_2} = \frac{1}{4} = 0,25c;$

$T_3 = \frac{1}{\omega_1} = \frac{1}{20} = 0,05c; T_4 = \frac{1}{\omega_2} = \frac{1}{80} = 0,0125c.$

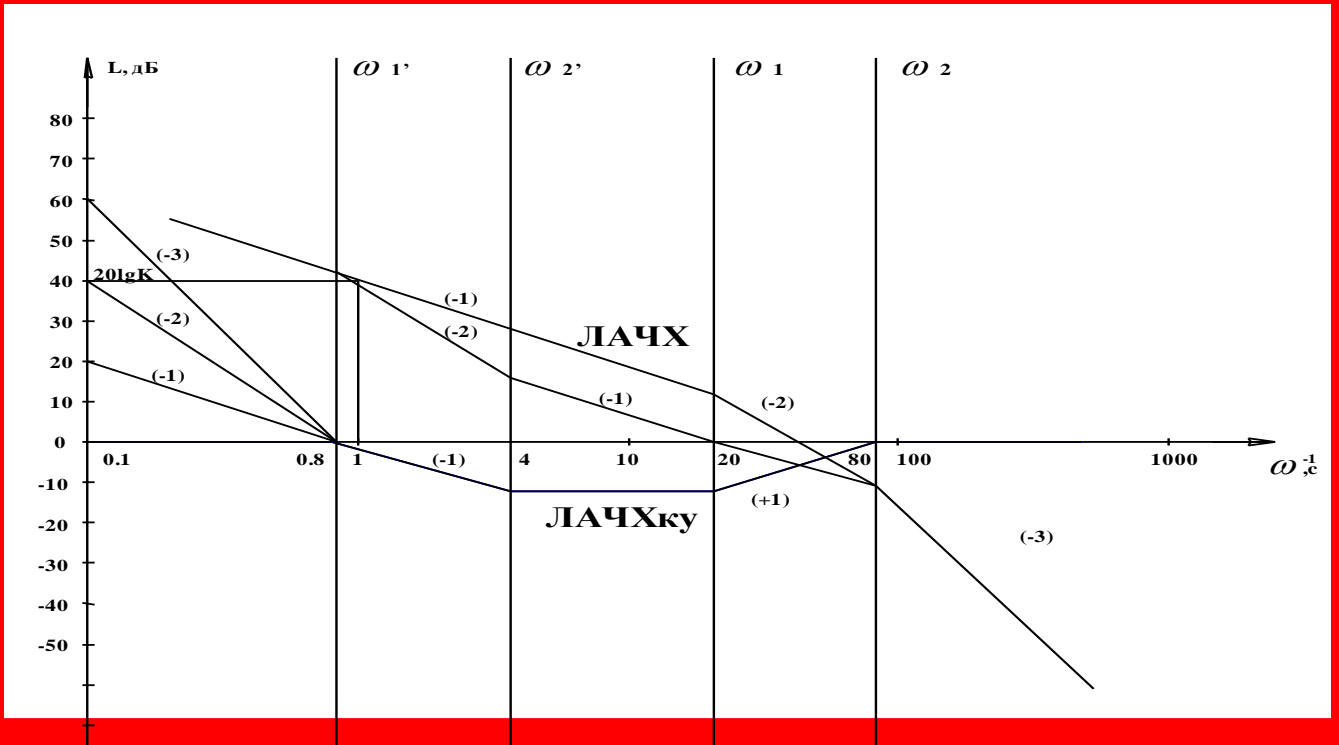


Рисунок 4.4 – Логарифмічні амплітудно-частотні характеристики розімкнута початкової САУ, бажаної САУ та коректувального пристрою

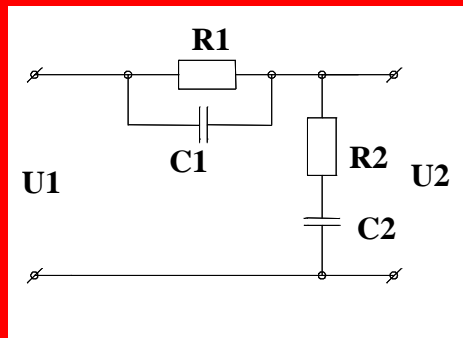


Рисунок 4.5 – Схема пасивного чотириполюсника постійного струму

Література: [1, с. 268–282], [4, с. 228–238], [7, с. 265–274],

[8, с. 109–113], [10, с. 40–44], [11, с. 18–25].

5 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПАКЕТ ПРОГРАМ MATLAB. ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ ЗА ДОПОМОГОЮ ПАКЕТА MATLAB

MATLAB – це високопродуктивна мова для технічних розрахунків. Вона містить у собі обчислення, візуалізацію та програмування в зручному середовищі.

Simulink – це інтерактивна система для моделювання динамічних систем. Simulink працює з лінійними, нелінійними, безперервними, дискретними, багатомірними системами.

Основним для розробки моделей у Simulink є бібліотеки блоків, з яких складаються структурні схеми систем, відповідних операцій Simulink-меню або у програмному режимі, використовуючи функції пакета MATLAB.

Під час завантаження Simulink на екрані відкривається вікно з піктограмами бібліотек блоків Simulink (рис. 5.1).

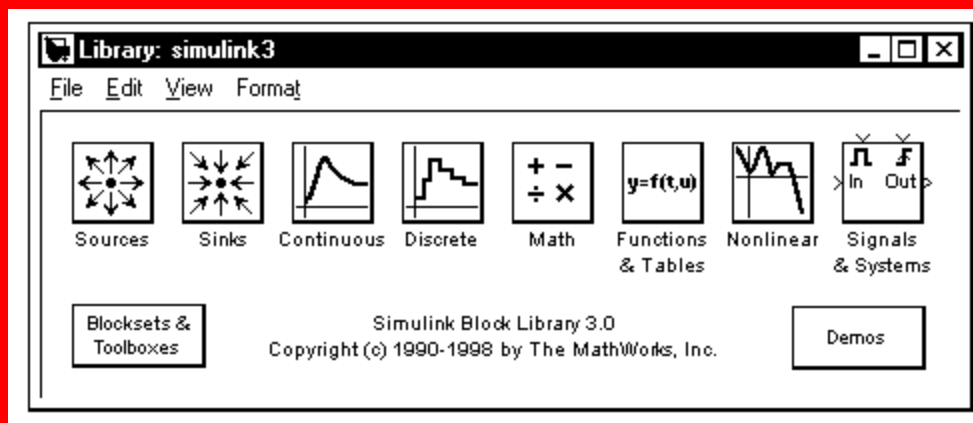
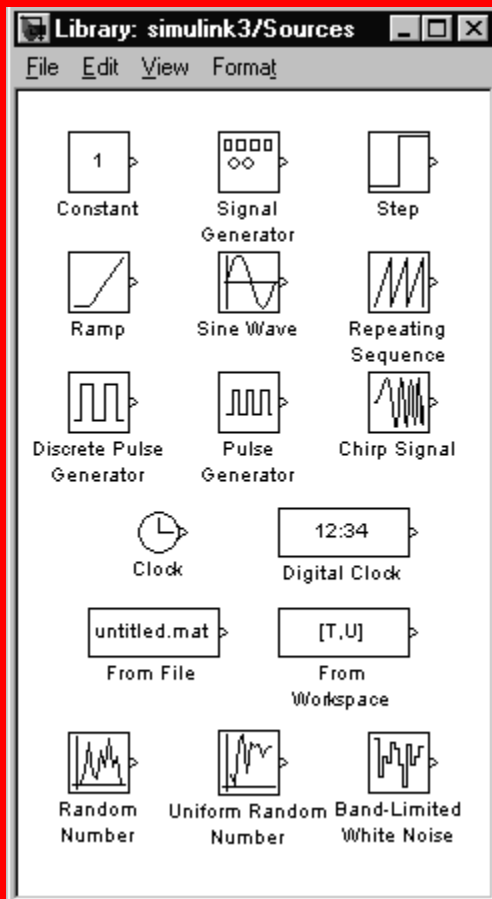


Рисунок 5.1 – Вікно бібліотечних блоків Simulink

Simulink містить такі бібліотеки блоків:

- Sources – джерела вхідних сигналів;
- Sinks – вихідні блоки;
- Discrete – дискретні блоки;

- Continuous – лінійні динамічні блоки;
- Nonlinear – нелінійні блоки;
- Math – математичні блоки та функції.



Параметри блоків можуть бути константами, змінними, функціями та виразами. Будь-які змінні, від яких залежить параметр, мають бути визначені в робочій зоні до початку процесу моделювання, інакше Simulink сигналізує про помилку в цьому блоці.

Кожну бібліотеку можна розкрити подвійним натисканням на ліву кнопку миші. Розглянемо деякі бібліотеки Simulink, блоки яких будуть необхідні для моделювання лінійних систем.

Бібліотека Sources (рис. 5.2) містить джерела вхідних сигналів, тобто блоки, які не мають входів, а мають тільки виходи.

Рисунок 5.2 – Вікно бібліотеки Sources

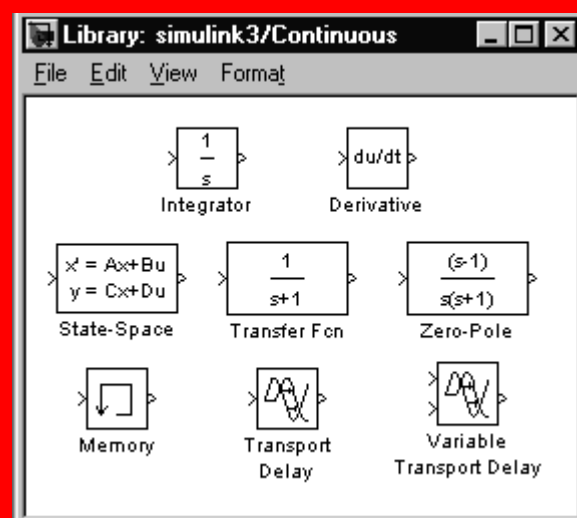
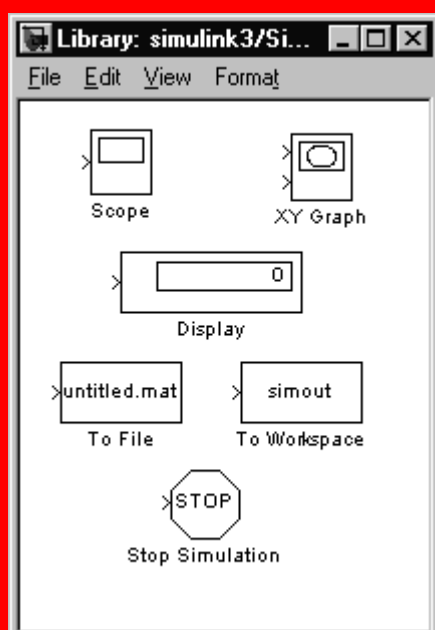


Рисунок 5.3 – Вікно бібліотеки

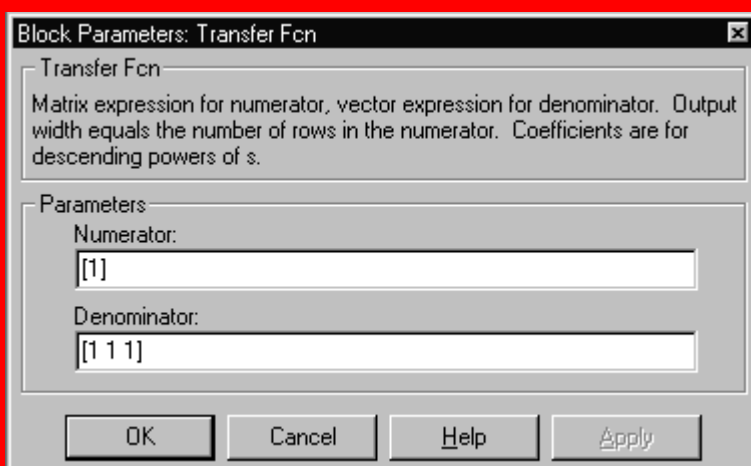
Рисунок 5.4 – Вікно бібліотеки

Sinks

Continuous

Бібліотека Sinks (рис. 5.3) містить блоки, які використовуються для запам'ятовування результатів моделювання (To File, To Workspace) та для їх графічного відображення (Scope, XY Graph).

Бібліотека Continuous (рис. 5.4) містить лінійні безперервні ланки, такі, як інтегрувальна (Integrator), диференціальна (Derivative), аперіодична (Transfer Fcn). Можна також одержати коливальну ланку. При цьому варто надходити в такий спосіб: викликавши аперіодичну ланку, заходимо в її блок параметрів (двічі клацнувши на ланці), де в пункті Denominator резервуємо місце ще під один елемент, утворивши тим самим коливальну ланку (рис. 5.5).



Причому у такий спосіб можна реалізувати ланку з будь-якою передавальною функцією за умови, що порядок полінома чисельника буде менше порядку полінома знаменника.

Рисунок 5.5 – Блок параметрів коливальної ланки

Перед початком формування структурної схеми необхідно відкрити для неї вікно (Simulink → File → New). При цьому відкривається вікно із заголовком Untitled. Після запису у файл (File → Save / Save As) як заголовок вікна буде фігурувати ім'я файла, що за замовчуванням одержить розширення m.

Уже наявну модель можна завантажити з меню Simulink (File → Open), з меню MATLAB (File → Run M-File) та з командного рядка MATLAB введенням

у нього імені файла, у якому збережена модель, без розширення за аналогією із завантаженням файла Simulink.m.

Копіювання блоків з бібліотек чи з будь-якої вже наявної моделі у вікно створеного файла після їхнього відкриття виконується мишею за допомогою операції drag (тягти у разі натиснутої лівої клавiшi мишi). Аналогічно здійснюється переміщення блоків у середині вікна. Копіювання блоків у середині вікна виконується за допомогою операції drag right (тягти у разі натиснутої правої клавiшi мишi). При цьому до імені нового блока додається цифра, яка відображає порядковий номер копіювання в середині цього вікна, чим забезпечується унікальність імені кожного блока, що належить цій моделі.

Перемістити блок у межах одного вікна без ліній зв'язку (витягти блок із моделі) можна операцією < Shift > + drag.

Зв'язки встановлюються між вхідними та вихідними портами блоків. Стрілка на лінії зв'язку показує напрямок потоку даних. Зв'язки встановлюються так:

- довільно безперервно (drag від порту з перериванням цієї операції в місцях зламу);
- автоматично (drag right).

Усі лінії проводяться під кутом 45 °. Провести лінію під довільним кутом можна у разі натиснутої клавiшi < Shift >. Під час проведення ліній зв'язку не треба намагатися попасти точно в порт; лінія приєднується до порту, якщо ви відпустите клавiшу мишi у разі знаходження графічного курсору в середині блока або в безпосередній близькості від порту.

Побудова характеристик САУ з використанням пакета MATLAB можлива декількома методами:

- аналітичний метод побудови перехідної характеристики з використанням функції зворотного перетворення Лапласа;
- побудова перехідних і частотних характеристик за допомогою функцій тулбоксу Control System ;

– побудова перехідної характеристики методом моделювання в Simulink .

Аналітичний метод побудови перехідної характеристики заснований на одержанні зворотного перетворення Лапласа від передавальної функції САУ $W(s)$, поділеної на s : $h(t) = L^{-1}\{W(s)/s\}$. Для побудови перехідної характеристики аналітичним методом використовується тулбокс Symbolic Math.

Перехідна характеристика САУ може бути побудована за допомогою Simulink. Для цього необхідно побудувати модель системи, до входу підключити блок одиничного стрибка Step або блок Constant з параметром 1, а до виходу – блок осцилографа Scope. Під час аналізу параметрів перехідного процесу необхідно враховувати, що за замовчуванням у блоці Step час стрибка дорівнює – 1 с, а не 0 с.

Побудова частотних характеристик у пакеті програм MATLAB здійснюється з використанням функцій тулбоксу Control System. Вихідними даними для побудови є будь-який опис системи, застосовуваний у MATLAB.

Можливе перетворення структурної схеми в Simulink на модель Control System, тому що зображення схеми в Simulink є більш простим і наочним зображенням системи, ніж у вигляді передаточних функцій у тулбоксі Control System. У той самий час тулбокс Control System надає широкі можливості аналізу САУ. Тому часто виникає завдання перетворення структурної схеми Simulink на модель Control System.

Розглянемо алгоритм цього перетворення.

Спочатку створюється схема для моделювання, потім вона перетворюється на схему для аналізу. До входу системи необхідно підключити вхідний порт (блок in), а до виходу – вихідний порт (блок out).

У меню Tools пакета Simulink вибрати команду Linear Analysis. У результаті з'являється вікно утиліти LTIView (рис. 5.6) та бібліотека блоків Control System.

У вікні утиліти LTIView (рис. 5.6) у меню Simulink вибрати команду Get Linearized Model. У результаті у верхній частині вікна виводяться графіки характеристик системи (рис. 5.7).

Меню File містить команди роботи з моделями:

- New Viewer... – відкрити нове вікно LTIView;
- Import... – завантаження нової моделі в LTIView. На екран виводиться список моделей, доступних для завантаження. Модель, що завантажується, необхідно виділити та натиснути кнопку Apply, потім кнопку ОК;
- Export... – запис завантаженої моделі на диск чи експорт у робочий простір MATLAB (Workspace);
- Delete Systems... – видалення моделі з LTIView. На екран виводиться список моделей, доступних для видалення. Модель, що видаляється, необхідно виділити та натиснути кнопку Apply, потім кнопку ОК;
- Refresh Systems – оновити параметри моделей. Цей пункт меню необхідно виконувати кожного разу після зміни параметрів моделі для активізації змін у LTIView;
- Print... – друкування графіків;
- Close Viewer – закрити вікно утиліти LTIView;

Вибір конфігурації утиліти здійснюється через меню в заголовку вікна та меню, що виводиться на екран у разі натискання правої кнопки миші.

Меню Tools містить команди настроювання утиліти LTIView:

- Viewer configuration – настроювання вікна перегляду графіків.

Під час виконанні цієї команди меню на екран виводиться вікно, у якому можна задати розбивку вікна перегляду LTIView на частини та задати характеристики, що виводяться в кожній частині вікна.

- Response References – параметри графіків.
- Unestyle References – параметри ліній. У цьому меню задається порядок проходження кольору, маркування та стилю лінії для виділення моделей, входів, виходів і зв'язків.

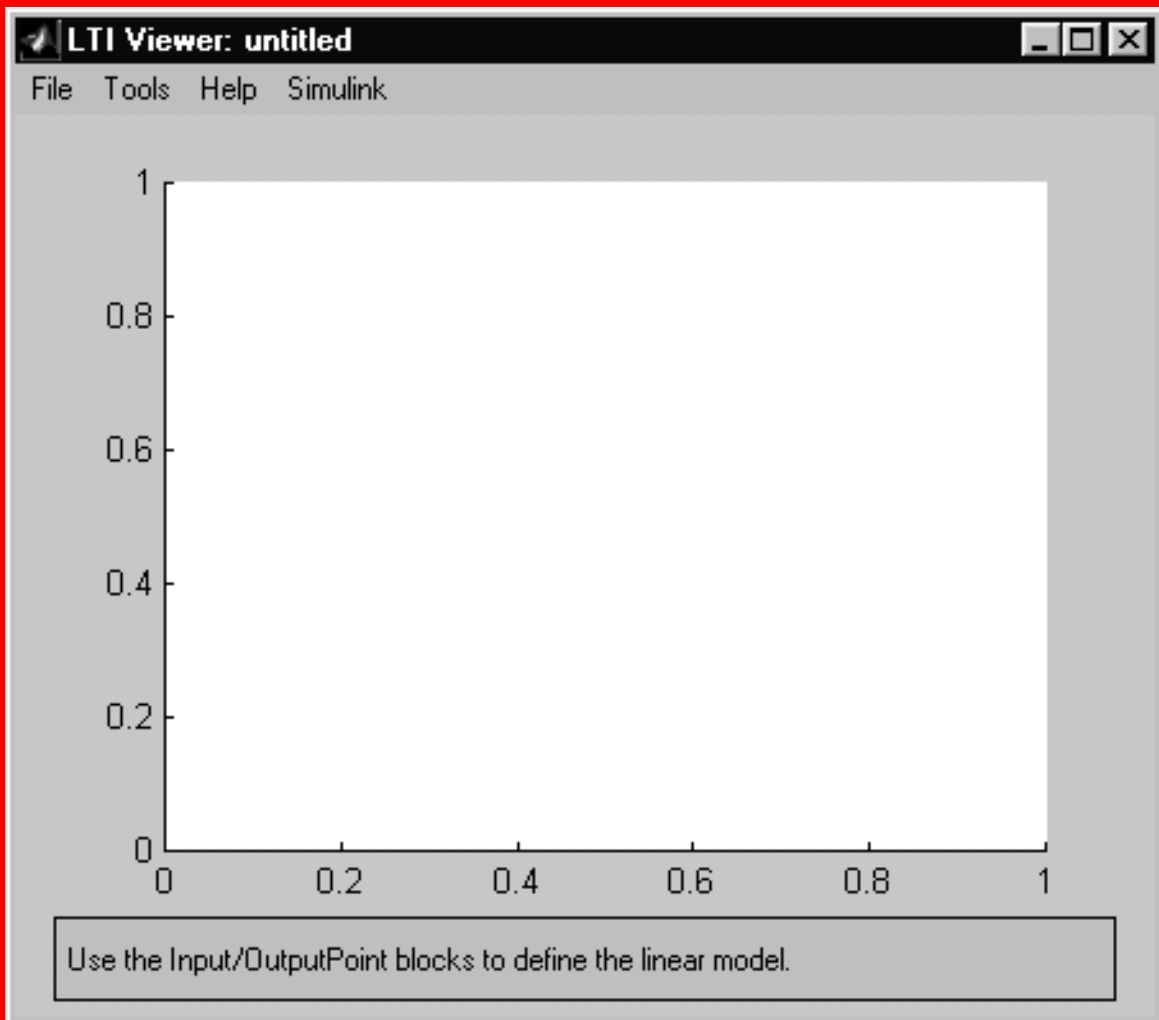


Рисунок 5.6 – Вікно утиліти LTIViewer

Побудова необхідної характеристики й аналіз параметрів графіка здійснюється в такому порядку. Для вибору характеристики необхідно установити курсор у вікно LTIView, натиснути праву кнопку миші. На екран виводиться меню, що містить команди:

- Plot type – виведена характеристика;
- Systems – системи, для яких будуються характеристики;

- Characteristics – відображення параметрів графіка;
- Zoom – масштабування;
- Grid – вивід сітки на графік.

Розглянемо характеристики, які можна побудувати за допомогою утиліти LTIView (Plot type).

1. Step – перехідна характеристика.

Параметри графіка (задаються в меню Characteristics, що виводиться після натискання правою кнопкою миші):

- Peak Response – максимальне значення перехідного процесу;
- Setting Time – час регулювання – інтервал часу, із закінченням якого відхилення вихідної координати не перевищує $\pm\Delta$ % від усталеного значення. Значення Δ задається в меню Tools-Response Preferences-Calculate setting time for i за замовчуванням дорівнює 2 %;

– Rise Time – час наростання – інтервал часу, протягом якого перехідний процес від значення p % перший раз досягає значення u % від усталеного значення. Значення p та u задаються в меню Tools-Response Preferences-Calculate rise time from _ to _ і за замовчуванням дорівнюють 10 і 90 % відповідно;

- Steady State – усталене значення перехідного процесу.

Числові значення параметрів графіка можна отримати, указавши курсором відповідну точку на графіку та натиснувши ліву кнопку миші.

Для організації розмітки (сітки) графіка необхідно виконати команду меню Grid, що виводиться після натискання правою кнопкою миші.

2. Impulse – імпульсна перехідна характеристика.

Параметри графіка (задаються в меню Characteristics, що виводиться після натискання правою кнопкою миші):

- Peak Response – максимальне значення імпульсної характеристики;
- Setting Time – час установлення – інтервал часу, протягом якого закінчується перехідний процес.

3. Bode – логарифмічні амплітудна та фазова частотні характеристики.

Параметри графіка (задаються в меню Characteristics, що виводиться після натискання правою кнопкою миші):

– Gain/Phase Margin – запаси стійкості за амплітудою й фазою. Відображаються точки, у яких логарифмічна частотна характеристика дорівнює 0 дБ і фазова характеристика дорівнює « -180° »;

– Peak Response – максимальне значення логарифмічної частотної характеристики.

4. Nyquist – амплітудно-фазова частотна характеристика (крива Найквіста).

Параметри графіка (задаються в меню Characteristics, що виводиться після натискання правою кнопкою миші):

– Gain/Phase Margin – запаси стійкості за амплітудою та фазою.

5. Pole-zero Map – розташування нулів і полюсів.

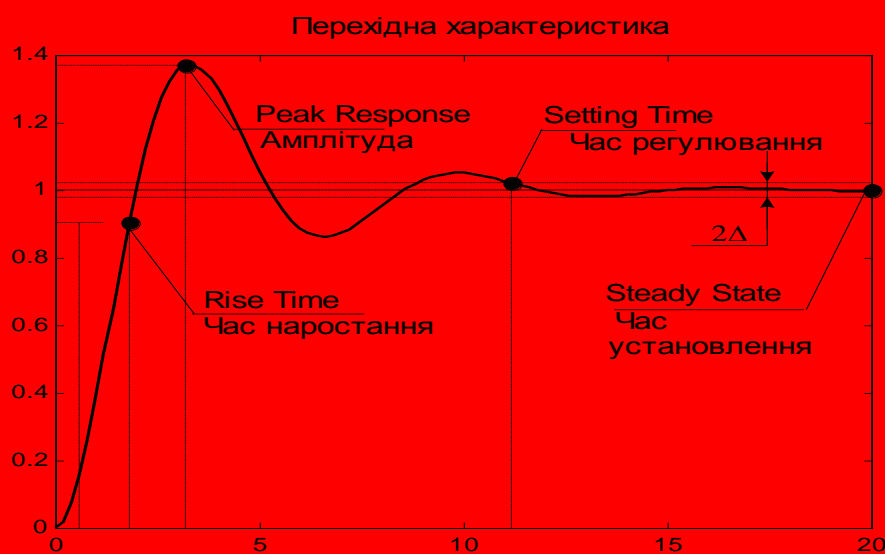


Рисунок 5.7 – Параметри перехідної характеристики

Координати нуля чи полюса можна отримати, указавши курсором відповідну точку на графіку та натиснувши ліву кнопку миші.

КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЗНАНЬ СТУДЕНТІВ З КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

Контрольна робота	Максимальна сума балів
Завдання 1	5
Завдання 2	5
Завдання 3	5
Завдання 4	5
Усього	20

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Воронов А. А. Теория автоматического управления. Часть 1 / А. А. Воронов. – М. : Высшая школа, 1986. – 367 с.
2. Топчеев Ю. И. Задачник по теории автоматического управления / Ю. И. Топчеев, А. П. Цыпляков. – М. : Машиностроение, 1977. – 591 с.
3. Иващенко Н. Н. Автоматическое регулирование / Н. Н. Иващенко. – М. : Машиностроение, 1973. – 607 с.
4. Зайцев Г. Ф. Теория автоматического управления и регулирования / Г. Ф. Зайцев. – Киев : Высшая школа, 1975. – 421 с.
5. Яшугин Е. А. Теория линейных непрерывных систем автоматического управления в вопросах и ответах / Е. А. Яшугин. – Минск : Высшая школа. 1986. – 223 с.
6. Терехов В. М. Элементы автоматизированного электропривода / В. М. Терехов. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 222 с.
7. Попович М. Г. Теорія автоматичного керування / М. Г. Попович, О. В. Ковальчук. – Київ : Либідь, 1997. – 544 с.
8. Євстіфєєв В. О. Теорія автоматичного керування. Частина 1. Безперервні лінійні та нелінійні системи. Навчальний посібник / В. О. Євстіфєєв. – Кременчук, 2006. – 286 с.
9. Дьяконов В. П. MATLAB 6.5 SP1/7.0 + Simulink 5/6. Основы применения / В. П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 735 с.
10. Юдіна Г. Г. Методичні вказівки щодо практичних занять з навчальної дисципліни «Теорія автоматичного управління» для студентів усіх форм навчання зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Частина 1. – Кременчук, 2016. – 52 с.
11. Сергієнко С. А. Методичні вказівки щодо виконання курсової роботи з навчальної дисципліни «Теорія автоматичного управління» для студентів усіх форм навчання зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / С. А. Сергієнко, Г. Г. Юдіна. – Кременчук, 2016. – 36 с.

12. Юдіна Г. Г. Методичні вказівки щодо виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Теорія автоматичного управління» / Г. Г. Юдіна, А. В. Нікітіна. – Кременчук, 2016. – 58 с.

Методичні вказівки щодо виконання контрольних робіт з навчальної дисципліни «Теорія автоматичного управління» для студентів усіх форм навчання зі спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Укладачі: к. т. н., доц. С. А. Сергієнко,
старш. викл. Г. Г. Юдіна

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

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

Ум. друк. арк. _____ . Наклад __10__ прим. Зам. № _____ .

Безкоштовно.

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

