

КРАСНОЛИМАНСЬКИЙ ЗАОЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра автоматички та комп'ютерних систем

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**до лабораторних робіт та практичних занять
з дисципліни**

«ТЕОРІЯ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ»

Харків – 2014

Методичні вказівки розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри автоматики та комп'ютерних систем 17 грудня 2009 р., протокол № 4.

Рекомендуються для студентів спеціальностей «Електричний транспорт», «Електричні системи та комплекси транспортних засобів» та «Автоматика та автоматизація на транспорті».

Укладачі:

старш. викл. І.Б. Абрамська,
доц. О.Ф. Єнікєєв,
проф. Я.В. Щербак

Рецензент

проф. Ю.І. Гусевський

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторних робіт та практичних занять
з дисципліни

«ТЕОРІЯ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ»

Відповідальний за випуск Єнікєєв О.Ф.

Редактор Решетилова Н.В.

Підписано до друку 12.01.10 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 1,0. Тираж 75. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Українська державна академія залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.

Зміст

Загальні	вказівки.....	4
.....		
Лабораторная робота 1	Дослідження часових лінійних ланок.....	5
1.1	Методи дослідження часових характеристик лінійних ланок.....	5
1.2	Попереднє розрахункове завдання.....	8
1.3	Робоче завдання.....	8
1.4	Виконання робочого завдання.....	9
1.5	Обробка результатів досліджень.....	9
Контрольні	питання.....	9
.....		
Лабораторная робота 2	Дослідження частотних характеристик лінійних ланок.....	10
2.1	Методи дослідження частотних характеристик лінійних ланок.....	10
2.2	Попереднє розрахункове завдання.....	13
2.3	Робоче завдання.....	13
2.4	Виконання робочого завдання.....	13
2.5	Обробка результатів досліджень.....	15
Контрольні	питання.....	15
Лабораторная робота 3	Дослідження стійкості лінійної безперервної	15

системи.....			
3.1	Методи дослідження стійкості лінійної системи.....		15
3.2	Попереднє завдання.....	розрахункове	19
3.3	Робоче завдання.....		19
3.4	Виконання завдання.....	робочого	19
3.5	Обробка досліджень.....	результатів	20
	Контрольні питання.....		20
	Лабораторная робота 4 Дослідження імпульсного елемента..		20
...			
4.1	Методи дослідження розімкненої імпульсної системи.....	лінійної	20
4.2	Попереднє завдання.....	розрахункове	26
4.3	Робоче завдання.....		26
4.4	Виконання завдання.....	робочого	27
4.5	Обробка досліджень.....	результатів	28
	Контрольні питання.....		28
	Список літератури.....		29
	Додатки.....		30

Загальні вказівки

Лабораторний практикум за курсом "Теорія автоматичного керування" включає роботи з лінійних безперервних, лінійних імпульсних і нелінійних безперервних систем. Кожна з

лабораторних робіт містить теоретичний матеріал, необхідний для розуміння завдання дослідження, шляхів його розв'язання, й містить формули для виконання попереднього завдання й оформлення результатів роботи.

Лабораторні роботи виконуються на лабораторному стенді, у якому передатні функції досліджуваних ланок змодельовані на операційних підсилювачах. Передатні функції досліджуваних ланок відповідають реальним об'єктам.

Підготовку до лабораторної роботи рекомендується виконувати в такому порядку:

- вивчити літературу стосовно даного розділу;
- виконати попереднє розрахункове завдання, користуючись методичними вказівками;
- вивчити робоче завдання й методичні вказівки до його виконання.

Попереднє розрахункове завдання виконується в окремому зошиті, що служить лабораторним журналом протягом усього лабораторного практикуму, куди заносяться у вигляді таблиць результати експериментальних досліджень. Графіки й характеристики будуються на міліметровому папері й вкладаються в журнал. Кожний студент веде журнал індивідуально й представляє викладачеві у вигляді звіту про виконану роботу при захисті.

Лабораторная работа 1

Дослідження часових характеристик лінійних ланок

1.1 Методи дослідження часових характеристик лінійних ланок

Часовою характеристикою ланки називається закон зміни вихідної Y у функції часу t за певним законом і за умови, що до подання вхідного впливу вона перебувала в спокої. Часові характеристики ланки залежать від її властивостей і від характеру вхідного впливу. При дослідженні часових характеристик вважають, що вхідний вплив змінюється за законом дельта-функції $X(t) = \delta(t)$, або за законом одиничної східчастої функції $X(t) = I(t)$. Часові характеристики ланки при цих законах зміни вхідних впливів одержали назву функції ваги або перехідної функції ланки.

Перехідною функцією ланки $h(t)$ називається реакція ланки на вхідний вплив $X(t) = I(t)$ за умови, що до подання вхідного впливу вона перебувала в спокої (рисунок 1.1).

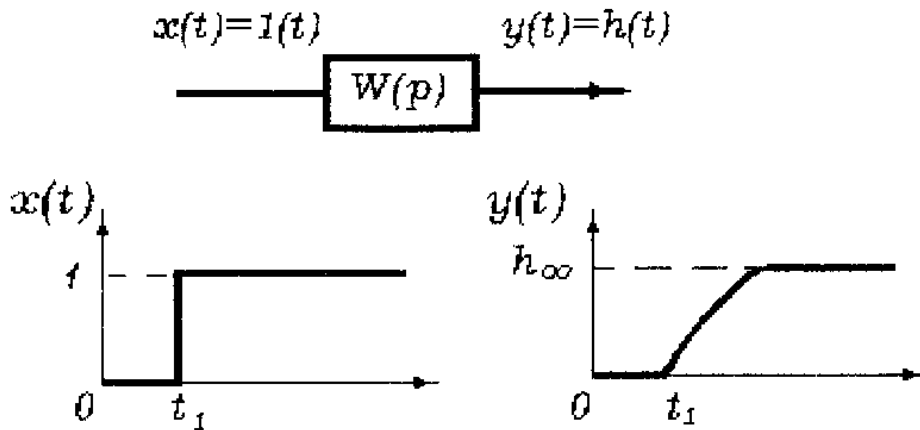


Рисунок 1.1 – Графіки вхідного й вихідного впливів ланки

Перехідна функція може бути визначена експериментально або обчислена теоретично. Якщо досліджувана ланка описується передатною функцією $W(p)$, то зображення перехідної функції дорівнює

$$H(p) = \frac{W(p)}{p}.$$

Звідси виходить, що

$$h(t) = L^{-1} \left\{ \frac{W(p)}{p} \right\},$$

або перехідна функція являє собою оборнене перетворення Лапласа від передатної функції ланки, поділеної на оператор p .

Оригінал перехідної функції можна визначити, як суму відрахувань в особливих точках

$$h(t) = \sum_{i=1}^n \frac{U(p_i)}{V'(p_i)} e^{p_i t},$$

де $U(p)$ - поліном чисельника $H(p)$; $V'(p)$ - похідна від полінома знаменника $H(p)$, p_i - полюси функції $H(p)$.

Результати обчислення перехідної функції подаються у вигляді графіка, побудованого в координатах (h, t) . Конкретні обриси функції $h(t)$ (монотонні, коливальні й ін.) залежать від властивостей ланки й можуть бути різноманітними. Початкове (при $t \rightarrow 0+$) і кінцеве (при $t \rightarrow \infty$) значення перехідної функції можна знайти, не обчислюючи саму функцію $h(t)$.

За теоремою про початкове значення

$$h(0+) = \lim_{p \rightarrow \infty} pH(p) = \lim_{p \rightarrow \infty} W(p).$$

За теоремою про кінцеве значення

$$h(\infty) = \lim_{p \rightarrow \infty} pH(p) = \lim_{p \rightarrow \infty} W(p).$$

Для лінійних ланок при стрибку вхідного впливу $X(t) = A \cdot l(t)$ вихідний сигнал ланки буде змінюватися за законом $Y(t) = A \cdot h(t)$, де $A = const$.

Функцією ваги (або імпульсною перехідною функцією) ланки $w(t)$ називається її реакція на вхідний сигнал $X(t) = \delta(t)$ за умови, що до його подання вона перебувала в спокої (рисунок 1.2). Для ланки з передатною функцією $W(p)$ з урахуванням того, що $L\{\delta(t)\} = 1$, зображення функції ваги дорівнює $L\{w(t)\} = W(p)$. Звідси, функція ваги являє собою оборнене перетворення Лапласа від передатної функції ланки $w(t) = L^{-1}\{W(p)\}$. Функцію ваги обчислюють таким же способом, як і оригінал перехідної функції. Початкове й кінцеве значення функції ваги можуть бути визначені за такими формулами:

$$w(0+) = \lim_{p \rightarrow \infty} pW(p),$$

$$w(\infty) = \lim_{p \rightarrow \infty} pW(p).$$

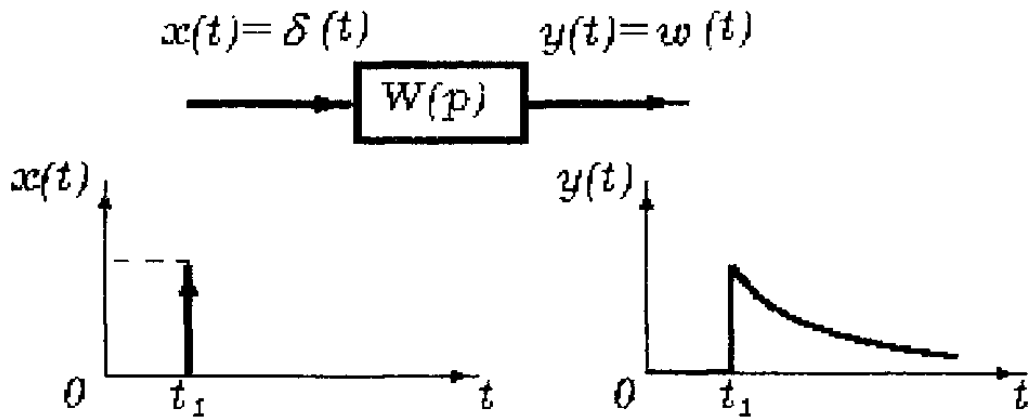


Рисунок 1.2 – Графіки вхідного й вихідного впливів ланки

У тому випадку, коли на вхід лінійної ланки надходить неодиначна дельта-функція $X(t) = A \cdot \delta(t)$, де $A = \text{const}$, реакція ланки на цей сигнал дорівнює $Y(t) = A \cdot w(t)$. Графік функції ваги ланки будується в координатах (w, t) . Характер графіка $w(t)$, так само, як і перехідної функції, залежить від властивостей ланки.

Зв'язок між перехідною функцією і функцією ваги ланки визначається на підставі теореми про зображення похідної і має вигляд

$$w(t) = \frac{dh(t)}{dt} + h(0+) \delta(t).$$

Якщо передатна функція ланки є правильним раціональним дробом, то $h(0+) = 0$ і зв'язок між двома функціями набуває простішого вигляду

$$w(t) = \frac{dh(t)}{dt}.$$

1.2 Попереднє розрахункове завдання

Записати передатні функції аперіодичних ланок першого й другого порядків, а також намалювати їхню схемну реалізацію.

Записати передатну функцію коливальної ланки. Записати вирази для перехідних функцій зазначених ланок. Записати вираз для функцій ваги зазначених ланок. На підставі теорем про початкові й кінцеві значення знайти початкове й кінцеве значення перехідної функції й функції ваги. Записати зв'язок між перехідною функцією і функцією ваги.

1.3 Робоче завдання

Зняти осцилограми перехідних функцій досліджуваних ланок. Зняти осцилограми функцій ваги досліджуваних ланок. Виміряти амплітудні й часові параметри вхідного й вихідного сигналів. Порівняти результати експериментальних досліджень із результатами розрахунків часових характеристик.

1.4 Виконання робочого завдання

1.4.1 Дослідження часових характеристик аперіодичних ланок першого й другого порядків здійснюється послідовним підключенням до гнізда X1 вхідних впливів $1(t)$ і $\delta(t)$. Осцилографування й вимір вихідних сигналів зазначених ланок здійснюється підключенням другого входу осцилографа до гнізд X2 і X3 (масштаб за віссю часу осцилографа 1 мс/под, масштаб за напругою осцилографа 5 В/под). Синхронізуючий вхід осцилографа підключити до гнізда "Синхр." на передній панелі стенда. Для зручності осцилографування перехідних процесів перемикачем полярності другого входу осцилографа встановлювати однакові знаки сигналів по обох каналах.

1.4.2 Для дослідження часових характеристик коливальної ланки вхідні впливи подавати на гніздо X5, а вихідні сигнали спостерігати на гнізді X6.

1.5 Обробка результатів досліджень

Побудувати часові характеристики досліджуваних ланок за результатами попереднього завдання та експерименту. Порівняти

між собою результати теоретичних і експериментальних досліджень. Пояснити отримані залежності.

Контрольні питання

- 1 Що таке передатна функція?
- 2 Що таке перехідна функція лінійної ланки?
- 3 Що таке імпульсна перехідна функція лінійної ланки?
- 4 Який зв'язок між часовими характеристиками лінійної ланки?

Лабораторна робота 2

Дослідження частотних характеристик лінійних ланок

2.1 Методи дослідження частотних характеристик лінійних ланок

Якщо на вхід лінійної ланки з передатною функцією $W(p)$ (рисунок 2.1) подається вхідний сигнал $X(t) = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$, у якого A_1 - амплітуда вхідного сигналу; ω - кругова частота ($0 < \omega < \infty$); φ_1 - початкова фаза, на його виході встановлюються гармонічні коливання тієї ж частоти ω , амплітуда яких $A_2 = A_1 |W(j\omega)|$, а фаза $\varphi_2 = \varphi_1 + \arg(j\omega)$. З формул для A_1 і φ_2 виходить, що при зміні частоти ω вхідного сигналу вихідний сигнал ланки змінює амплітуду й фазовий зсув.

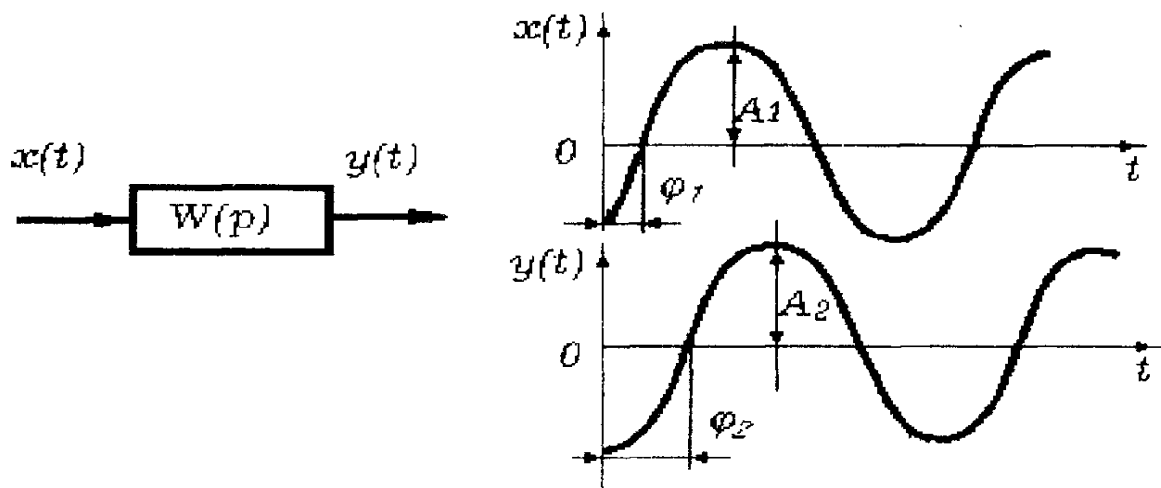


Рисунок 2.1 - Графіки вхідного й вихідного впливів ланки

Для визначення сталої реакції ланки на гармонічний вхідний сигнал досить знати комплексну функцію $W(j\omega)$ дійсного змінного ω . Функція

$$W(j\omega) = \frac{b_0(j\omega)^m + b_1(j\omega)^{m-1} + \dots + b_m}{c_0(j\omega)^n + c_1(j\omega)^{n-1} + \dots + c_n},$$

отримана при заміні в передатній функції p на $j\omega$, називається частотною передатною функцією ланки й може бути подана в декількох виглядах. Так, наприклад, у показовій та алгебраїчній формах

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

Функція $A(\omega)$ називається амплітудною частотною характеристикою (АЧХ). Функції $U(\omega)$ і $V(\omega)$ називаються дійсними й уявними частотними характеристиками ланки. Для кожного фіксованого значення $\omega = \omega_i$ частотна передатна функція на комплексній площині (U, j) може бути зображена вектором $A(j\omega_i)$, відхиленням від позитивного напрямку осі абсцис на кут $\varphi(\omega_i)$. Годограф цього вектора при зміні частоти від 0 до $+\infty$ називається амплітудно-фазовою частотною характеристикою (АФЧХ) ланки (рисунок 2.2).

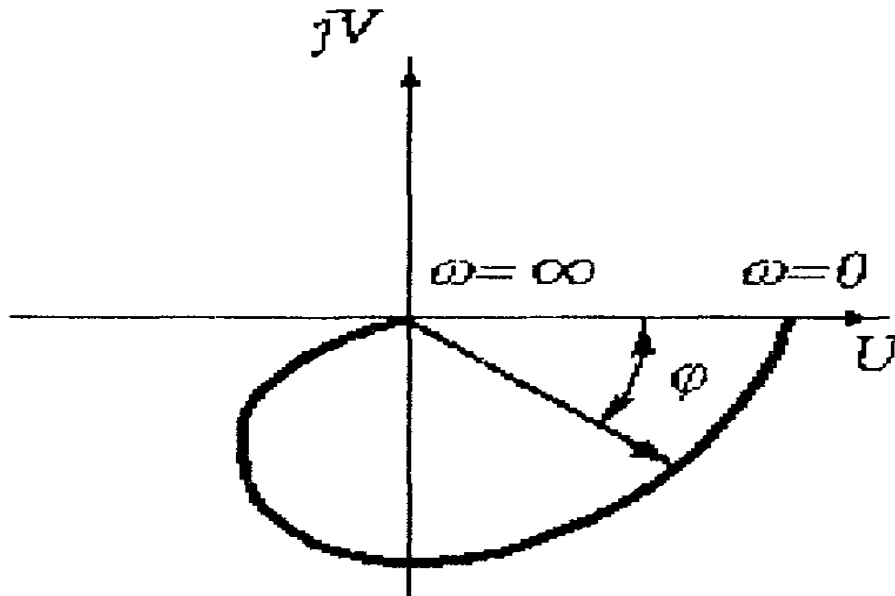


Рисунок 2.2 - Годограф АФЧХ ланки

Характеристики $A(\omega)$ і $\varphi(\omega)$ можна отримати теоретичним і експериментальним шляхом. Для другого випадку на вхід ланки подають гармонічний сигнал. Модуль вектора $W(j\omega)$ дорівнює відношенню амплітуд вихідного й вхідного сигналів. Фазову характеристику одержують шляхом виміру фазового зсуву між вхідним і вихідним сигналами. Результати вимірів подають у вигляді графічних залежностей $A(\omega)$ і $\varphi(\omega)$.

Частотні характеристики, які побудовано в логарифмічному масштабі, називають логарифмічними частотними характеристиками. Логарифмічні шкали по одній або обох осях можуть використовуватися при побудові будь-яких частотних характеристик. Найчастіше будуються характеристики $A(\omega)$, $\varphi(\omega)$ і $W(j\omega)$, які називаються відповідно логарифмічною амплітудною характеристикою (ЛАХ), логарифмічною фазовою характеристикою (ЛФХ) і логарифмічною амплітудно-фазовою характеристикою (ЛАФХ).

При побудові логарифмічних характеристик на шкалі частот замість ω відкладається $\lg \omega$. Одиницями виміру логарифмічних координат є декада (дек) і децибел (дб). Декадою називається інтервал частот, що відповідає зміні частоти в 10 разів. На логарифмічній шкалі декада подається відрізком одиничної довжини, тому що $\lg 10 \omega - \lg \omega = 1$. Тому щодо величини $\lg \omega$

логарифмічна шкала є рівномірною, а щодо частоти - нерівномірною. На рисунку 2.3 наведено приклад побудови логарифмічних частотних характеристик аперіодичної ланки першого порядку.

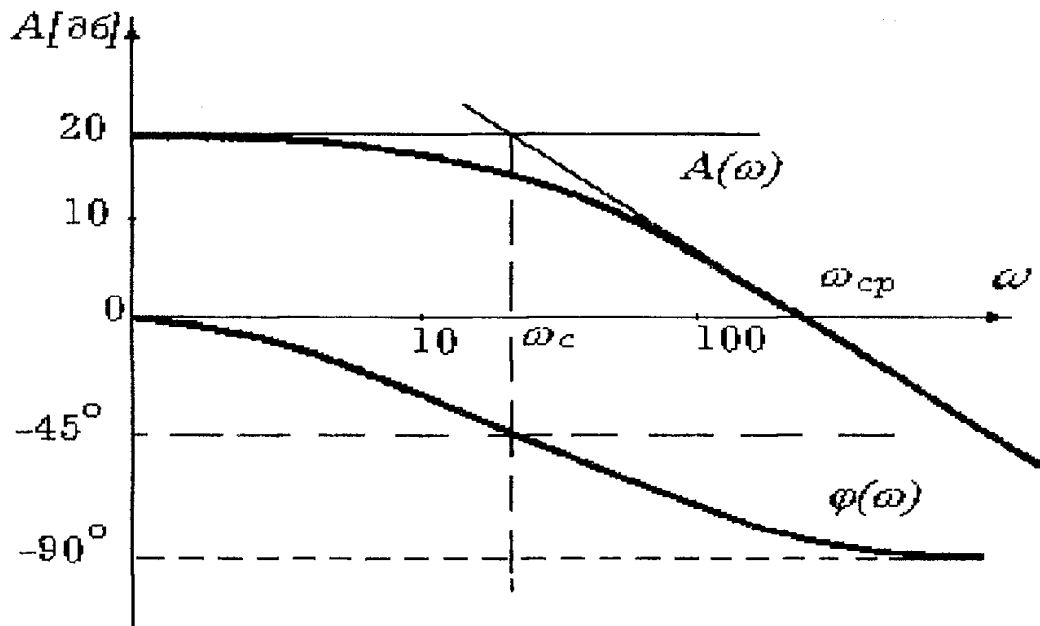


Рисунок 2.3 - ЛАЧХ аперіодичної ланки

Для послідовного з'єднання ланок результуючу ЛАХ одержують із умови

$$\lg A(\omega) = \sum_{i=1}^n \lg A_i(\omega).$$

2.2 Попереднє розрахункове завдання

Записати передатні функції ланок згідно з зазначеним варіантом завдання. Одержати формули для розрахунків частотних характеристик ланок $\{A(\omega), \varphi(\omega), U(\omega), V(\omega)\}$. Побудувати годографи АФХ ланок. Побудувати асимптотичні ЛАХ ланок. Визначити з'єднувальну частоту ω_c і частоту зрізу ω_{cp} за ЛАХ ланок.

2.3 Робоче завдання

Зняти залежності $A=f(\omega)$ і $\varphi=f(\omega)$ ланок. Побудувати годографи АФХ ланок. Побудувати ЛАХ ланок. Визначити з'єднувальну частоту ω_c і частоту ω_{cp} ланок. Порівняти результати теоретичних і експериментальних досліджень.

2.4 Виконання робочого завдання

2.4.1 Вхідним сигналом служить сигнал генератора синусоїдальних коливань. Регулюється частота коливань ручкою "f" при натиснутій одній із клавіш перемикача "кГц". Амплітуда сигналу встановлюється ручкою "Ег".

2.4.2 При знятті частотних характеристик встановити амплітуду коливань генератора $U_1 = 10$ В. Амплітуда вхідного й вихідного сигналів ланок вимірюється вольтметром.

2.4.3 Вимірювання значення частоти генератора синусоїдальних коливань виконується частотоміром, осцилографом або за допомогою вимірника "ИФ", до виходу "f" якого підключається вольтметр. Зміні частоти сигналу генератора в діапазоні $f = 20 - 2000$ Гц відповідають показання вольтметра в діапазоні $U = 20 - 2000$ мВ. Наприклад, показання вольтметра $U = 150$ мВ. Йому відповідає частота коливань $f = 150$ Гц.

2.4.4 Для вимірювання фазового зсуву між вхідним і вихідним сигналами ланки застосовують фазометр, осцилограф або функціональний вимірник лабораторного стенда. В останньому випадку вихід ланки приєднують до гнізда "Вых" вимірника. Фазовий зсув визначають за показаннями вольтметра, що підключають до виходу "φ" вимірника. Зсуву в діапазоні $\varphi = 0 \div 360^\circ$ відповідають показання вольтметра в діапазоні $U = 0 \div 3600$ мВ. Наприклад, зсуву $\varphi_1=45^\circ$, $\varphi_2=90^\circ$, $\varphi_3=180^\circ$ відповідають показання вольтметра $U_1 = 450$ мВ, $U_2 = 900$ мВ, $U_3 = 1800$ мВ. Фазовий зсув ланок $H_1(p)$, $H_4(p)$, $H_5(p)$, $Y(p)$ визначається таким чином: $\varphi = 180^\circ - \varphi_1$.

2.4.5 Зняття частотних характеристик виконувати в діапазоні зміни частоти генератора: для ланок першого порядку $f = 50 - 1000$ Гц; для ланок другого й третього порядків $f = 50 - 500$ Гц.

2.4.6 Результати вимірювань частоти вхідного сигналу f , амплітуду його вихідного сигналу U_2 і величину фазового зсуву заносять до таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Результати вимірювань

f , Гц										
U_2 , В										
φ , град										
A										
L , дБ										

Примітка – При всіх вимірюваннях синхронізуючий вхід осцилографа підключити до гнізда "Синхронізація" на бічній панелі стенда.

2.5 Обробка результатів досліджень

Обчислити величини коефіцієнта передачі ланок як $A = \frac{U_2}{U_1}$ і $L = 20 \lg A$ для відповідних значень частоти. Доповнити таблицю результатами обчислень коефіцієнта передачі. Побудувати за результатами експериментів ЛАХ і ФЧХ ланок, порівнявши їх з попередньо побудованими за результатами попереднього завдання відповідними характеристиками. Визначити величину помилки. Пояснити отримані теоретичні й експериментальні залежності.

Контрольні питання

- 1 Що таке частотна передатна функція ланки?
- 2 Форми подання частотної передатної функції ланки.
- 3 Що таке ЛАХ ланки?

4 Що таке ФЧХ ланки?

Лабораторна робота 3

Дослідження стійкості лінійної безперервної системи

3.1 Методи дослідження стійкості лінійної системи

Щодо стійкості системи можна визначитись на підставі розв'язання лінеаризованого диференціального рівняння замкненої системи, яке записано в такому вигляді:

$$Y(t) = Y_n(t) + Y_{ycm}(t) .$$

Система автоматичного регулювання називається стійкою, якщо перехідна складова з часом загасає, тобто $\lim_{t \rightarrow \infty} Y_n(t) = 0$. Якщо з часом перехідний процес розходиться, тобто $\lim_{t \rightarrow \infty} Y_n(t) = \infty$, то система називається нестійкою. Система, у якій перехідний процес із часом не розходиться й не загасає, називається стійкою, що перебуває на границі.

Визначення стійкості системи полягає у визначенні коренів характеристичного рівняння, від вигляду яких залежить розв'язання однорідного диференціального рівняння. Для того, щоб лінійна САР була стійкою, необхідно й досить, щоб дійсні частини коренів характеристичного рівняння

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n = 0$$

були негативними, тобто $\text{Re } p_k < 0$, $k = 1, 2, \dots, n$. Іншими словами, всі корені характеристичного рівняння САР повинні розташовуватися в лівій півплощині (рисунок 3.1).

Система з коренями $p_1; p_2; p_3$ - стійка. Якщо хоча б один дійсний корінь (p_5) або пари комплексних коренів (p_4, p_6) перебувають на уявній осі, а всі інші розташовуються в лівій півплощині, САР перебуває на границі стійкості. Причому, для кореня p_5 - аперіодична границя стійкості. Система з коренями

p_7, p_8 - нестійка. Визначити стійкість за розташуванням коренів характеристичного рівняння досить важко коли його порядок $n > 3$. Тому користуються критеріями стійкості, за якими можна судити про стійкість САУ.

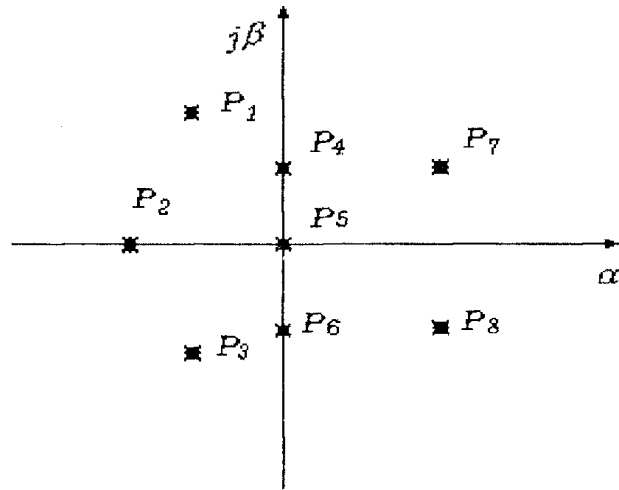


Рисунок 3.1 - Розташування коренів САУ

Критерій Рауса-Гурвіца накладає обмеження на коефіцієнти характеристичного рівняння. Якщо характеристичне рівняння системи має вигляд

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n = 0,$$

то для стійкості лінійної САУ необхідно й досить, щоб були позитивними n визначників Гурвіца - $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \dots, \Delta_n$.

Визначники Гурвіца являють собою діагональні визначники квадратної матриці n -го порядку

$$G = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \dots & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & \dots & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & \dots & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_n \end{vmatrix},$$

складеної з коефіцієнтів характеристичного рівняння так, щоб

$$\Delta_1 = a_1; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix}; \quad \Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix}; \quad \Delta_n = |G|.$$

Для рівняння першого й другого ступеня умови стійкості такі:

$$a_0 > 0; a_1 > 0; a_2 > 0.$$

Для рівняння третього ступеня

$$\Delta_1 = a_1 > 0; \Delta_2 = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0; \Delta_3 = a_3 \Delta_2 > 0.$$

Критерій Найквіста заснований на розгляді АФХ розімкненої системи. Для стійкості замкнутої системи потрібно, щоб годограф АФХ розімкненої системи не охоплював точку $(-1; j0)$. На рисунку 3.2 показано годограф $W(j\omega)$, що відповідає стійкій замкненій системі.

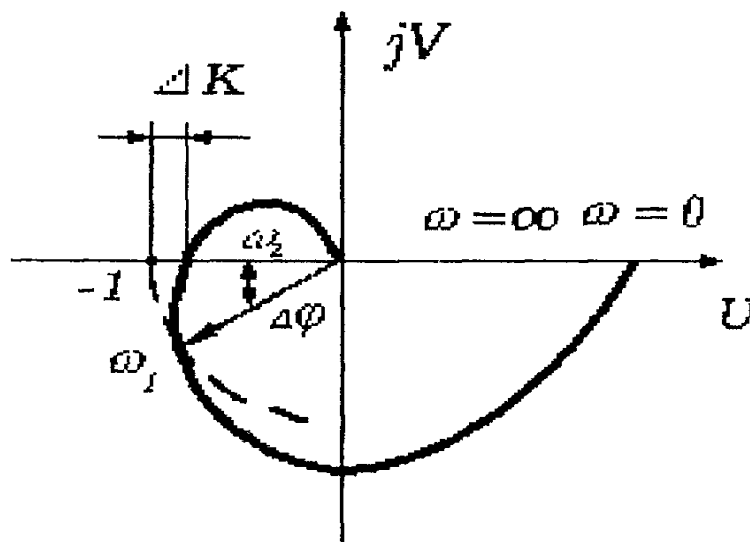


Рисунок 3.2 - Годограф Найквіста

Запас стійкості замкненої САР визначається відстанню годографа від точки $(-1, j0)$. Проходження АФХ через цю точку відповідає знаходженню САР на коливальній границі стійкості. Відстань АФХ характеризують двома позитивними числами ΔK і $\Delta \varphi$, які називаються запасами стійкості САР за коефіцієнтом посилення й по фазі. Запас за коефіцієнтом посилення вказує, на яку величину повинен змінитися модуль АФХ (рисунок 3.2) розімкненої системи на частоті ω_2 , при якій фазовий зсув складає

$\varphi = -180^\circ$. При цьому замкнена САР знаходиться на коливальній границі стійкості

$$\Delta K = 1 - |W(j\omega_2)|.$$

Запас стійкості по фазі вказує, на яку величину повинний збільшитися фазовий зсув у розімкненій системі на частоті ω_1 , при якій маємо таке $|W(j\omega)| = 1$. При цьому замкнена САР знаходиться на коливальній границі стійкості, тобто

$$\Delta\varphi = 180^\circ - \varphi(\omega_1).$$

Достатніми запасами стійкості за коефіцієнтом посилення та фазою вважаються значення $\Delta K \geq 6 \div 12 \text{ дб}; \Delta\varphi \geq 30^\circ$. Аналогічно запаси стійкості визначаються й за логарифмічними амплітудно-частотними і фазочастотними характеристиками.

3.2 Попереднє розрахункове завдання

3.2.1 Нарисувати замкнену САР з ланок, наведених у зазначеному варіанті завдання (таблиці А.1 і Б.1). При складанні структурної схеми в її склад у ролі регулятора (коригувальної ланки) включити ланку $Y(p)$. Складена структурна схема повинна мати негативний зворотний зв'язок, для цього використати знаки передатних функцій необхідних ланок і, при необхідності, інвертуючу ланку $K = -1$ (гнізда Х17, Х18).

3.2.2 Записати передатну функцію розімкненої системи згідно з зазначеним варіантом завдання. Побудувати АФХ або логарифмічні АЧХ і ФЧХ розімкненої системи. Визначити значення коефіцієнта підсилення, що відповідає коливальній границі стійкості.

3.2.3 Визначити частоту зрізу системи й частоту коливань у замкненій системі.

3.3 Робоче завдання

Скласти замкнуту САР з ланок $H_1(p)$, $H_2(p)$, $H_3(p)$, $Y(p)$. Збільшенням контурного коефіцієнта посилення домогтися автоколивального режиму роботи замкненої системи. Виміряти величину коефіцієнта посилення, що відповідає границі стійкості. Виміряти частоту автоколивань. Результати вимірювань порівняти з розрахунковими значеннями вимірюваних величин.

3.4 Виконання робочого завдання

3.4.1 Натиснути клавіші S_2 і S_5 перемикачів. До виходу ланки підключити один із входів осцилографа.

3.4.2 Збільшення контурного коефіцієнта посилення здійснюється зміною величини резистора R_y ланки $Y(p)$ плавним обертанням ручки UBХ. При цьому треба фіксувати момент виникнення коливань.

3.4.3 Вимірювання частоти коливань виконувати за допомогою осцилографа. Для визначення контурного коефіцієнта передачі САР, що відповідає границі стійкості, виключити ланку $Y(p)$ зі складу системи й за допомогою вбудованого генератора й вольтметра виміряти її коефіцієнт підсилення.

3.5 Обробка результатів досліджень

Порівняти частоту коливань у системі з результатом розрахунків. Порівняти величину коефіцієнта передачі системи з розрахунковим. Визначити величини помилок.

Контрольні питання

- 1 Що означає термін «стійкість» лінійної САУ?
- 2 Які відомі критерії визначення стійкості?
- 3 Критерій Гурвіца.
- 4 Критерій Михайлова.
- 5 Критерій Найквіста.

Лабораторна робота 4

Дослідження імпульсного елемента

4.1 Методи дослідження розімкненої лінійної імпульсної системи

Загальним для імпульсних і цифрових систем є наявність ефекту квантування сигналів за часом. Імпульсні й цифрові системи регулювання відрізняються від безперервних наявністю в каналі управління імпульсного елемента (ІЕ), що перетворює безперервну величину в послідовність імпульсів тієї або іншої форми (рисунок 4.1, а).

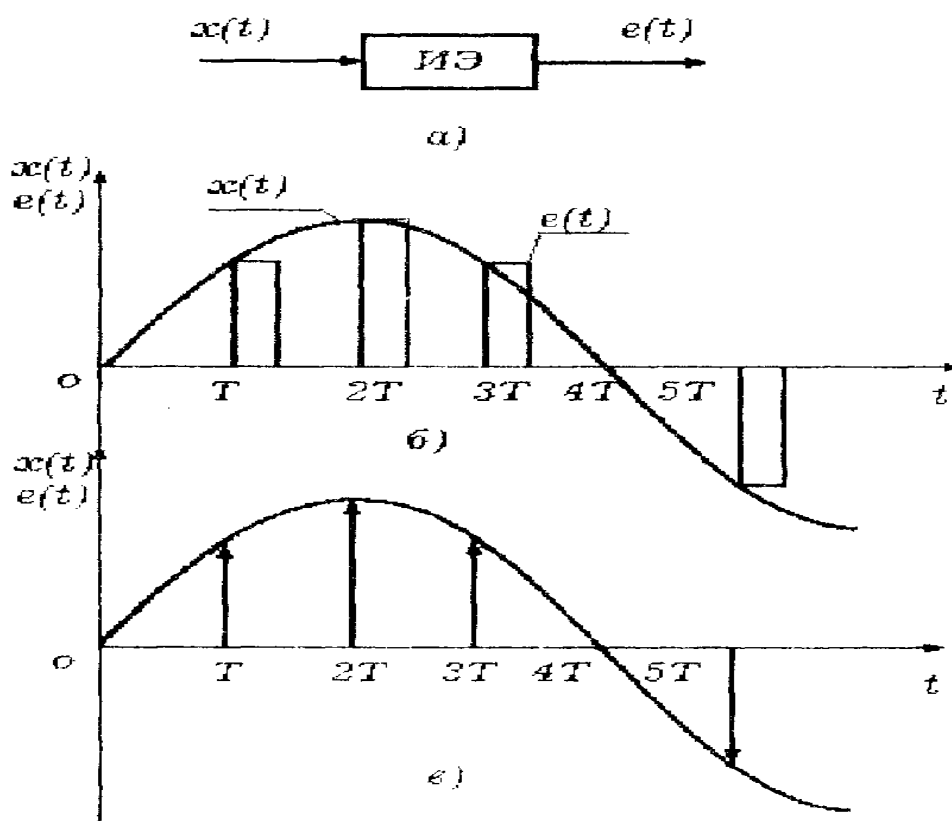


Рисунок 4.1 - Квантування сигналів за часом

Форма імпульсів може бути найрізноманітнішою й характеризуватися функцією форми $w_{\phi}(t)$. Функція форми

дозволяє записати аналітичний вираз для вихідної величини імпульсного елемента. Так, при довільному вхідному впливі $X(t)$ вихідний сигнал імпульсного елемента для моментів часу $\gamma T_0 \leq t < (n+1)T_0, n = 0, 1, 2, \dots$, описується таким рівнянням (рисунок 4.1, б):

$$e(t) = \sum_{n=0}^{\infty} X[nT_0] w_{\phi}[e - nT_0].$$

Тут T_0 - період повторення, γT_0 - тривалість імпульсів ($0 < \gamma < 1$).

Імпульсний елемент реагує не на весь вхідний сигнал, а тільки на його значення в дискретні моменти часу nT_0 . Інформація про поведінку сигналу $X(t)$ у проміжках між моментами часу $t = nT_0$ після проходження через імпульсний елемент губиться. Вихідна величина $X(t)$ імпульсного елемента буде однією й тією ж для різних сигналів $X(t)$, якщо значення цих сигналів у моменти часу $t = nT_0$ однакові.

Імпульсний елемент, у якого функція форми являє одиничну δ -функцію називають ідеальним. Вихідна величина ідеального імпульсного елемента являє собою послідовність модульованих по "площі" δ -функцій (рисунок 4.1, в)

$$X(t) = \sum_{n=0}^{\infty} X[nT_0] \delta[t - nT_0].$$

Реального фізичного змісту ідеальний імпульсний елемент не має і являє собою математичну абстракцію. Подавши

$$\delta_T(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \delta[t - nT_0],$$

одержимо вираз для вихідного сигналу імпульсного елемента, що здійснює амплітудно - імпульсну модуляцію

$$e^*(t) = X(t) \delta_T(t).$$

Основними параметрами імпульсного елемента є коефіцієнт передачі $K_{и}$, період повторення T , тривалість імпульсу і їхня форма. Залежно від виду й роду імпульсної модуляції імпульсні елементи підрозділяються на амплітудні, широтні й часові.

Залежність величини модульованого параметра вихідної послідовності від відповідних дискретних значень вхідної величини називається характеристикою імпульсного елемента.

Ця характеристика може бути лінійною й нелінійною. Крутість лінійної характеристики дорівнює коефіцієнту передачі імпульсного елемента

$$K_{II} = \frac{e[nT]}{X[nT]},$$

де $X[n]$ – значення вхідної величини в дискретний момент часу; $e[nT]$ - відповідна йому амплітуда імпульсу.

Крутість характеристики широтного імпульсного елемента

$$\lambda = \frac{\gamma T}{\{X[nT]\}}.$$

Реальний імпульсний елемент залежно від параметрів вихідного сигналу здійснює амплітудну імпульсну модуляцію першого або другого роду. Якщо вихідний сигнал імпульсного елемента визначається вхідним у тактові моменти часу й не змінюється протягом існування імпульсу, то здійснюється амплітудно - імпульсна модуляція першого роду. Коли вихідний сигнал імпульсного елемента змінюється відповідно до поточного значення функції, що модулює, то здійснюється амплітудно - імпульсна модуляція другого роду.

Реальний імпульсний елемент, котрий здійснює амплітудно - імпульсну модуляцію першого роду, може бути замінений еквівалентною йому в сенсі проходження сигналу структурною схемою, що складається з послідовного з'єднання ідеального імпульсного й формуючого елементів. Як формуючий елемент застосовують динамічну ланку з передатною функцією

$$W_{\phi}(p) = L\{w_{\phi}(t)\} = \int_0^{\infty} w_{\phi}(t) e^{-pt} dt,$$

де $w_{\phi}(t)$ - у цьому випадку являє функцію ваги формуючої ланки. Структурна схема системи автоматичного регулювання, що містить такий імпульсний елемент, зображена на рисунку 4.2, де $W_H(p)$ - передатна функція безперервної частини. Формуючий

елемент і безперервна частина спільно утворюють так звану наведену безперервну частину.

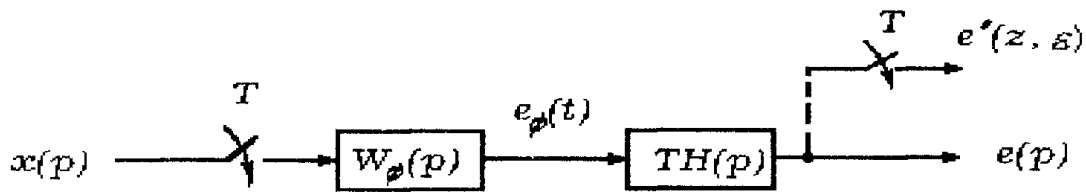


Рисунок 4.2 - Структурна схема САУ

Коли в системі здійснюється амплітудно - імпульсна модуляція першого роду (рисунок 4.1, б), передатна функція формуючого елемента має вигляд

$$W_{\phi}(p) = \frac{1 - e^{-\gamma pT}}{p}.$$

Дана передатна функція формуючого елемента справедлива й для широтно-імпульсної модуляції другого роду, коли тривалість реального імпульсу мала. Передатна функція формуючого елемента з фіксацією на період виходить при $\gamma = 1$ в такому вигляді:

$$W_{\phi}(p) = \frac{1 - e^{-pT}}{p}.$$

Дану динамічну ланку називають екстраполятором нульового порядку. Реакцію наведеної безперервної частини $H(p)$ на вихідний сигнал імпульсного елемента визначаємо, скориставшись структурною схемою розімкненої системи (рисунок 4.2) і застосувавши математичний апарат Z-перетворень. Для ідеального імпульсного елемента ($W_{\phi}(p)=1$) зв'язок між вхідним і вихідним сигналами має такий вигляд:

$$e^*(z, \varepsilon) = TX^*(z)H^*(z, \varepsilon),$$

де $X^*(z)$ - являє Z-перетворення вхідного сигналу імпульсного елемента; $H^*(z, \varepsilon)$ - модифіковане Z-перетворення передатної функції наведеної безперервної частини.

Розглянемо процес у системі для випадку, коли вхідний сигнал $X(p) = p^{-1}$, тобто являє собою одиничну східчасту функцію.

У цьому випадку при $\varepsilon = 0$ одержуємо значення реакції безперервної частини системи на вихідний сигнал $\delta T(t)$ імпульсного елемента. Коли наведена безперервна частина системи подана у вигляді аперіодичної ланки, вихідний сигнал дорівнює

$$e^*(z,0) = \frac{T}{T_1} \frac{z}{z-1} \frac{z}{z - e^{-\frac{T}{T_1}}}.$$

Коли $\varepsilon = 1$, маємо реакцію ланки $H(p)$ на послідовність $\delta(t)$ у такому вигляді:

$$e^*(z,1) = \frac{T}{T_1} \frac{z}{z-1} \frac{z e^{-\frac{T}{T_1}}}{z - e^{-\frac{T}{T_1}}},$$

з якої слідує, щоб

$$e^*(z,1) = e^*(z,0) e^{-\frac{T}{T_1}}.$$

Значення реакції безперервної частини системи $e[пт]$ може бути отримано у вигляді коефіцієнтів при z -п розкладанні в ступеневий ряд функцій $e^*(z,0)$ і $e^*(z,1)$

$$e^*(z) = C_0 + C_1 z^{-1} + C_2 z^{-2} + C_3 z^{-3} + \dots + C_n z^{-n}.$$

Коефіцієнти $C_0, C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ чисельно рівні при $\varepsilon = 0$ правобічним значенням реакції ланки $H(p)$ у тактові моменти часу $пт$, а лівостороннім - зрушеним на один такт вправо значенням при $\varepsilon = 1$. Значення коефіцієнтів ступеневого ряду одержують шляхом простого розподілу чисельника функції $e^*(z,0)$ або $e^*(z,1)$ на її знаменник.

Початкове й кінцеве значення реакції безперервної наведеної частини на вихідний сигнал імпульсного елемента можна одержати на підставі відповідних теорем Z -перетворення

$$\lim_{n \rightarrow 0} e(nT) = \lim_{z \rightarrow \infty} e^*(z), \quad \lim_{n \rightarrow 0} e(nT) = \lim_{z \rightarrow 1} (z-1)e^*(z).$$

4.2 Попереднє завдання

Накреслити структурну схему розімкненої імпульсної системи. Одержати аналітичний вираз для реакції безперервної частини з передатною функцією зазначеного варіанта на вихідні сигнали ідеального й реального імпульсного елемента $T = \frac{1}{f_{и.э.}}$. В лабораторному макеті частота модуляції імпульсного елемента $f_{иэ} = 400$ Гц. Побудувати графіки часових залежностей вихідних сигналів безперервної частини.

4.3 Робоче завдання

4.3.1 Виміряти параметри вихідного сигналу реального імпульсного елемента при входньому $X(t) = 1(t)$.

4.3.2 Дослідити реакцію безперервної частини імпульсної системи на вихідний сигнал реального імпульсного елемента.

4.3.3 Дослідити вихідний сигнал імпульсного елемента при входньому синусоїдальному сигналі.

4.3.4 Дослідити вихідний сигнал формуючого елемента й за його виглядом записати передатну функцію.

4.3.5 Обчислити коефіцієнт передачі імпульсного елемента при амплітудній модуляції.

4.4 Виконання робочого завдання

4.4.1 Контроль форми сигналів і вимірювання їхніх параметрів у даній роботі здійснюється за допомогою осцилографа, синхронізуючий вхід якого підключений до виходу "синхронізація", розташованого на передній панелі стенда. Масштаб по осі часу осцилографа 1 мВ/под.

4.4.2 Подати на вхід X_{13} імпульсного елемента ІЭ входний сигнал $1(t)$. Вхідний сигнал $1(t)$ контролювати першим каналом осцилографа, домігшись органами його управління стійкого зображення східчастого сигналу.

4.4.3 Підключити вхід X_{14} широтно-імпульсного модулятора ШИМ до виходу джерела живлення Е1.

4.4.4 Вихідний сигнал імпульсного елемента контролювати на виході X_{16} другим виходом осцилографа.

4.4.5 Зміною величини й знака напруги джерела живлення Е1 шляхом обертання ручки "Е1" стенда одержати на виході X_{16} імпульсного елемента послідовність прямокутних імпульсів. Встановити відносну тривалість імпульсів імпульсного елемента $\gamma = \frac{t_u}{T} = 0,1$, де t_u - тривалість, T - період проходження імпульсів. За допомогою осцилографа виміряти параметри імпульсів (t_u , U_u). Результати вимірів занести в робочий журнал.

4.4.6 Підключити вихідний сигнал імпульсного елемента (вихід X_{16}) до входу зазначеної у варіанті завдання ланки наведеної безперервної частини системи. Контролювати реакцію обраної ланки на вихідний сигнал імпульсного елемента другим входом осцилографа. Для зручності осцилографування реакцій ланок перемикачі полярності другого входу осцилографа встановлювати по обох каналах одного знака.

4.4.7 Зарисувати в робочий журнал осцилограми сигналів для кожних їхніх зазначених ланок, вимірявши їхні величини на початку й наприкінці тактового інтервалу. Для підвищення точності вимірів змінювати коефіцієнт вхідного подільника осцилографа. При вимірюванні користуватися результатами виконання розрахунків попереднього завдання.

4.4.8 Підключити до входу X_{13} імпульсного елемента вихід генератора синусоїдальних коливань, встановити на його виході сигнал мінімальної частоти й з амплітудою $U = 5$ В. Зняти осцилограму вихідного сигналу на гнізді X_{16} імпульсного елемента. Зняти осцилограму вихідного сигналу формуючого елемента ФЭ (вихід X_{15}).

4.5 Обробка результатів досліджень

Зарисувати осцилограми сигналів. За осцилограмою вихідного сигналу формуючого елемента записати його передатну функцію. За осцилограмою вихідного сигналу імпульсного елемента при гармонійному вхідному сигналі визначити рід амплітудно - імпульсної модуляції. Порівняти

результати теоретичних і експериментальних досліджень реакції лінійних ланок на вихідний сигнал реального імпульсного елемента.

Контрольні питання

- 1 Види модуляції сигналів.
- 2 Математичний апарат досліджень імпульсних систем.
- 3 Процедура одержання передатної функції імпульсної системи.

Список літератури

- 1 Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. - М.: Наука, 1975. – 768 с.
- 2 Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. - М.: Наука, 1989. – 304 с.
- 3 Попов Е.П. Теория нелинейных систем автоматического регулирования и управления. - М.: Наука, 1979. – 256 с.
- 4 Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления. - М.: Наука, 1986. – 616 с.

5 Воронов А.А. Основы теории автоматического управления. Особые линейные и нелинейные системы. - М.: Энергоиздат, 1981. - 304 с.

6 Коновалов Г.Ф. Радиоавтоматика. - М.: Высшая школа, 1990. – 335 с.

7 Топчеев Ю.И. Атлас для проектирования систем автоматического регулирования. - М.: Машиностроение, 1989. - 752 с.

8 Куропаткин П.В. Теория автоматического управления. - М.: Высшая школа, 1973. - 507 с.

9 Теория управления. Терминология / Под ред. Б.Г. Волика. - М.: Наука, 1988. - 56 с.

10 Расчет автоматических систем / Под ред. А.В.Фатеева. - М.: Высшая школа, 1973. - 336 с.

11 Сборник задач по теории автоматического регулирования и управления / Под ред. В.А. Бесекерского. - М.: Наука, 1978. - 512 с.

12 Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. – М.: Машиностроение, 1978. - 609 с.

Додатки

Додаток А

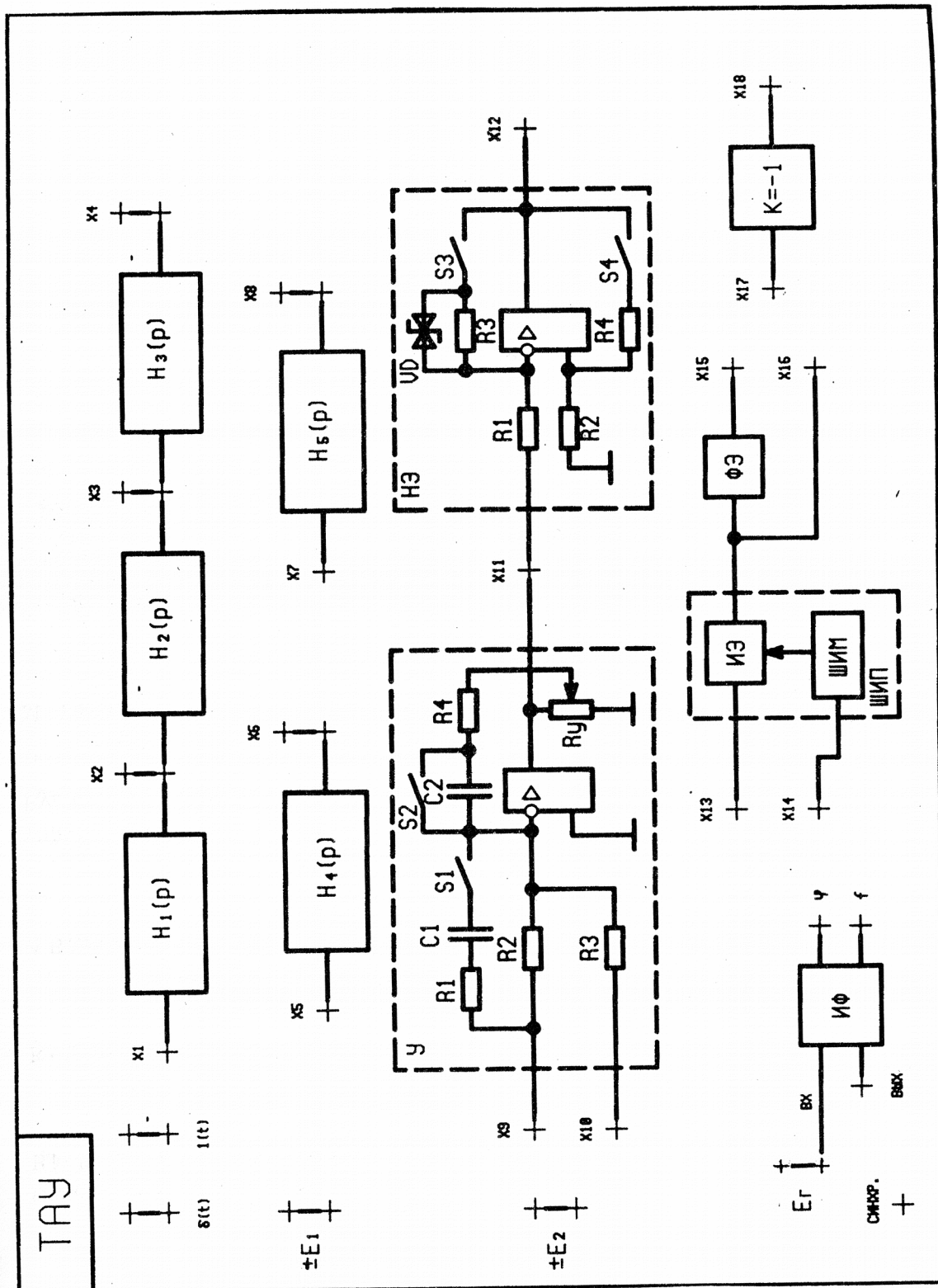


Рисунок А1.1 – Загальний вигляд накладної панелі стенду

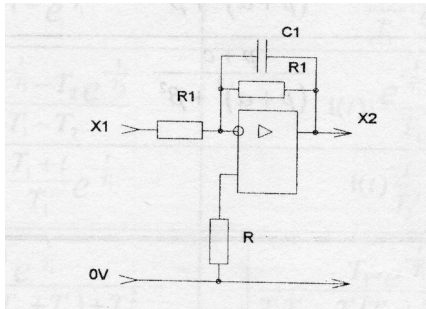
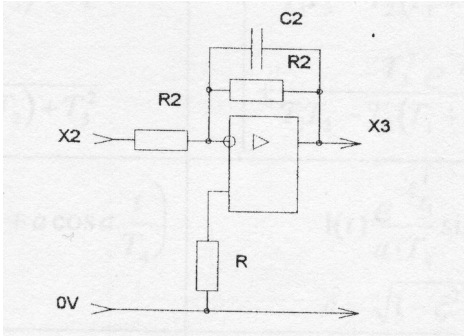
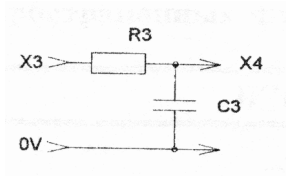
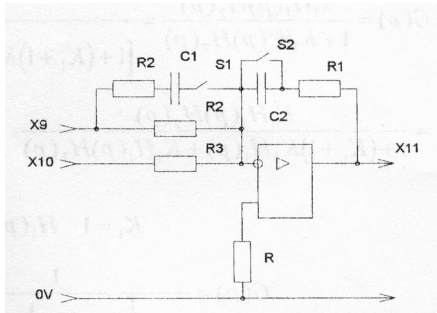
Додаток Б

Таблиця Б.1 – Параметри передатних функцій ланцюгів стенду

Номер варианта	Контр. точки вход	Контр. точки выход	Передаточная функция звеньев	
1	X1	X2	$H_1(p) = -\frac{1}{T_1 p + 1}$	$T_1 = R_1 C_1;$ $R_1 = 22 \text{ кОм}$ $C_1 = 0,047 \text{ мкФ}$
2	X2	X3	$H_2(p) = -\frac{1}{T_2 p + 1}$	$T_2 = R_2 C_2;$ $R_2 = 22 \text{ кОм}$ $C_2 = 0,047 \text{ мкФ}$
3	X3	X4	$H_3(p) = -\frac{1}{T_3 p + 1}$	$T_3 = R_3 C_3;$ $R_3 = 5,6 \text{ кОм}$ $C_3 = 0,1 \text{ мкФ}$
4	X5	X6	$H_4(p) = -\frac{1}{T_4^2 p^2 + 2\xi T_4 p + 1}$	$T_4 = RC;$ $R = 20 \text{ кОм};$ $C = 0,047 \text{ мкФ}$ $\xi = \frac{R_2}{R_2 + R_4};$ $R_2 = 2 \text{ кОм}$ $R_1 = 5,6 \text{ кОм}$
5	X7	X8	$H_5(p) = -\frac{K\xi T_5 p}{T_5^2 p^2 + 2\xi T_5 p + 1}$	$T_5 = T_4;$ $K = \frac{R_4}{R_2}$
	X9	X11	S1 - разомкнут, S2 - разомкнут, $H_6(p) = -\frac{T_6 p + 1}{T_7 p};$ S1 - замкнут, S2 - замкнут, $H_7(p) = -\frac{T_8 p + 1}{T_9 p + 1}$ S1 - замкнут, S2 - разомкнут, $H_8(p) = -\frac{(T_6 p + 1)(T_8 p + 1)}{T_7 p(T_9 p + 1)}$ S1 - разомкнут, S2 - замкнут, $K = -\frac{R_4}{R_2} \cdot n$, где $n = f(R)$	$T_6 = R_4 C_2;$ $T_7 = R_2 C_2;$ $R_1 = 2 \text{ кОм}$ $R_2 = 22 \text{ кОм}$ $R_3 = 110 \text{ кОм}$ $R_4 = 22 \text{ кОм}$ $C_1 = 0,047 \text{ мкФ}$ $C_2 = 0,047 \text{ мкФ}$ $T_8 = (R_1 + R_2) C_1;$ $T_9 = R_1 C_1$

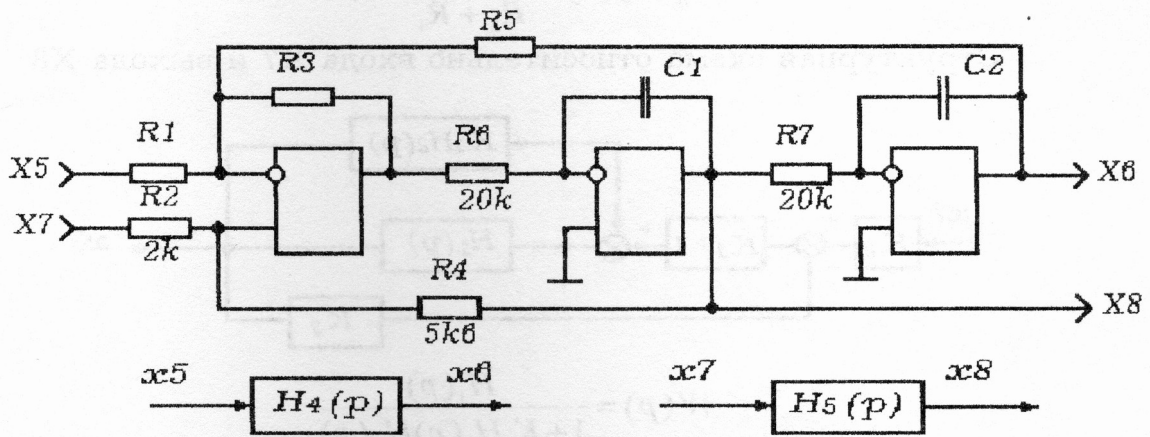
Додаток В

Таблица В.1 – Схеми ланцюгів стенду

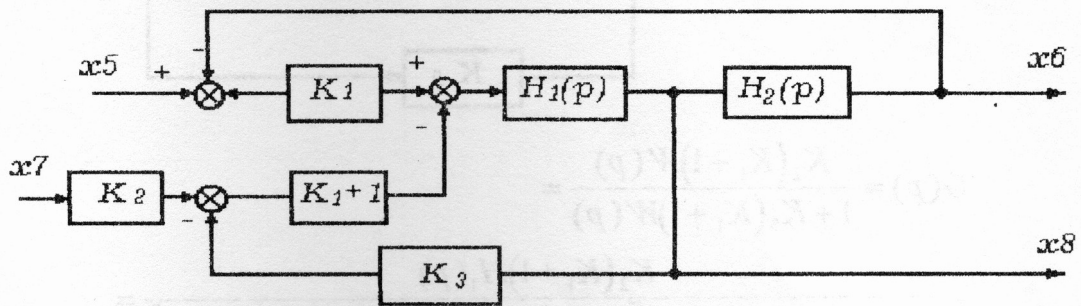
Передатна функція	Схема ланцюга
$H_1(p)$	
$H_2(p)$	
$H_3(p)$	
$H_4(p)$	

Додаток Г

Колебательное звено

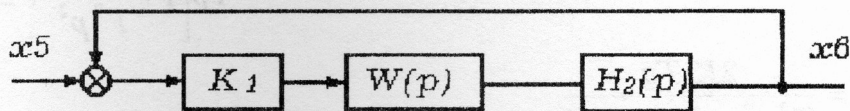


Обобщенная структурная схема



$$K_2 = \frac{R_4}{R_2 + R_4}; \quad K_3 = \frac{R_2}{R_2 + R_4}$$

Структурная схема относительно входа X5 и выхода X6.



$$W(p) = \frac{H_1(p)}{1 + (K_1 + 1)K_3 H_1(p)}$$

$$G(p) = \frac{x_1 H_1(p) H_2(p)}{1 + K_1 W(p) H_2(p)} = \frac{K_1 H_2(p) H_1(p)}{[1 + (K_1 + 1)K_3 H_1(p)] \left[1 + K_1 H_2(p) \frac{H_1(p)}{1 + (K_1 + 1)K_3 H_1(p)} \right]} = \frac{K_1 H_1(p) H_2(p)}{1 + (K_1 + 1)K_3 H_1(p) + K_1 H_1(p) H_2(p)}$$

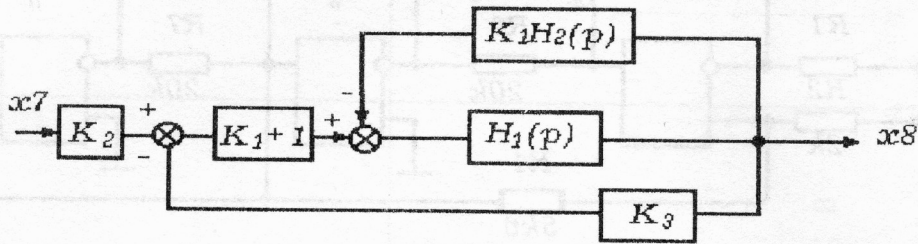
Продовження додатка Г

$$K_1 = 1 \quad H_1(p) = H_2(p) = \frac{1}{Tp}$$

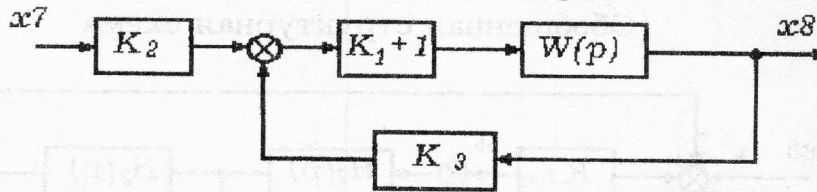
$$G(p) = \frac{1}{T^2 p^2 \left[1 + 2K_3 \frac{1}{Tp} + \frac{1}{T^2 p^2} \right]} = \frac{1}{T^2 p^2 + 2K_3 Tp + 1}$$

$$K_3 = \xi \quad \xi = \frac{R_2}{R_3 + R_4} = 0,26$$

Структурная схема относительно входа X7 и выхода X8



$$W(p) = \frac{H_1(p)}{1 + K_1 H_1(p) H_2(p)}$$



$$G(p) = \frac{K_2 (K_1 + 1) W(p)}{1 + K_3 (K_1 + 1) W(p)}$$

$$= \frac{K_2 (K_1 + 1) H_1(p)}{[1 + K_1 H_1(p) H_2(p)] \left[1 + K_3 (K_1 + 1) \frac{H_1(p)}{1 + K_1 H_1(p) H_2(p)} \right]}$$

$$= \frac{K_2 (K_1 + 1) H_1(p)}{1 + K_1 H_1(p) H_2(p) + K_3 (K_1 + 1) H_2(p)} = \frac{2K_2}{Tp \left[1 + \frac{1}{T^2 p^2} + 2K_3 \frac{1}{Tp} \right]}$$

$$= \frac{2K_2 Tp}{T^2 p^2 + 2K_3 Tp + 1}$$