

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**ДИНАМІКА ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ
У ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНОМУ ОБЛАДНАННІ
ТЕС та АЕС**

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК
до виконання лабораторних робіт

*Рекомендовано Методичною радою КПІ імені Ігоря Сікорського
для студентів, які навчаються за спеціальностями
144 «Теплоенергетика» (освітньо-професійна програма «Теплоенергетика та
теплоенергетичні установки електростанцій»),
142 «Енергетичне машинобудування» (освітньо-професійна програма «Інженерія і
комп'ютерні технології теплоенергетичних систем»)*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2021

Вивчення динаміки перехідних процесів у теплоенергетичному обладнанні ТЕС та АЕС: Навчальний посібник до виконання лабораторних робіт для студентів, які навчаються за спеціальностями 144 «Теплоенергетика» (освітньо-професійна програма «Теплоенергетика та теплоенергетичні установки електростанцій»), 142 «Енергетичне машинобудування» (освітньо-професійна програма «Інженерія і комп'ютерні технології теплоенергетичних систем») / Укладачі: П.П. Меренгер, Т.В. Нікуленкова, Л. Майер. – КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,65 Мбайт). – 59 с.

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол №8 від 24.06.2021 р.) за поданням Вченої ради Теплоенергетичного факультету (протокол №12 від 31.05.2021 р.)

Електронне мережне навчальне видання

**ВИВЧЕННЯ ДИНАМІКИ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ
У ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНОМУ ОБЛАДНАННІ ТЕС ТА АЕС**
Навчальний посібник до виконання лабораторних робіт

Укладачі: *Меренгер Петро Петрович, ст. викл.
Нікуленкова Тетяна Володимирівна, канд. техн. наук, доц.
Майер Леонід, асист.*

Відповідальний редактор *Сірий О.А., канд. техн. наук., доц.*

Рецензенти: *Білоус І.Ю., канд. техн. наук, доц.*

За редакцією укладачів

Навчальний посібник до виконання лабораторних робіт розроблено на підставі робочих програм кредитних модулів: «Автоматизовані системи управління ТЕ процесами», «Автоматичне регулювання котельних установок».

Призначений для студентів, які навчаються за спеціальностями 144 «Теплоенергетика» (освітньо-професійна програма «Теплоенергетика та теплоенергетичні установки електростанцій»), 142 «Енергетичне машинобудування» (освітньо-професійна програма «Інженерія і комп'ютерні технології теплоенергетичних систем»)

Лабораторні роботи спрямовані на формування у студентів умінь з вивчення динаміки перехідних процесів у теплоенергетичному обладнанні ТЕС і АЕС та навичок з визначення математичного опису елементів системи регулювання шляхом визначення значень параметрів перехідних (передавальних) функцій ланок.

© П.П. Меренгер, Т.В. Нікуленкова, Л. Майер, 2021

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021

ЗМІСТ

Вступ	4
<i>Лабораторна робота 1</i>	5
Визначення параметрів типових динамічних ланок автоматичних систем регулювання за їхніми перехідними характеристиками	
<i>Лабораторна робота 2</i>	12
Дослідження характеристик послідовного з'єднання динамічних ланок	
<i>Лабораторна робота 3</i>	18
Дослідження характеристик з'єднання динамічних ланок зі зворотнім зв'язком	
<i>Лабораторна робота 4</i>	21
Дослідження характеристик коливальної ланки	
<i>Лабораторна робота 5</i>	24
Дослідження усталеності замкненої системи автоматичного керування	
<i>Перелік посилань</i>	28
<i>Додатки</i>	29

Вступ

В навчальному посібнику подано опис лабораторних робіт вивчення динаміки перехідних процесів у теплоенергетичному обладнанні ТЕС та АЕС.

Виконання лабораторних робіт сприяє засвоєнню і закріпленню знань, придбанню навичок експериментального і теоретичного дослідження динамічних властивостей систем керування.

До виконання лабораторних робіт студенти допускаються лише за умови, якщо вони засвоїли відповідний матеріал і мають складені конспекти-звіти. До конспектів мають бути включені: опис схеми досліджуваної системи, стислі теоретичні положення і форми таблиць, підготовлені для зняття дослідних залежностей. Студенти остаточно оформлюють звіти з попередньої роботи і здають їх викладачу на перевірку до того, як приступлять до наступної лабораторної роботи. Без зданих звітів студенти до виконання чергової роботи не допускаються. Захист звітів проводять після визначеного циклу робіт у вказані викладачем терміни.

Академічну групу для відроблення лабораторних робіт ділять на бригади (до 8 бригад) в кожній по 2–4 студенти.

Лабораторна робота 1

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТИПОВИХ ДИНАМІЧНИХ ЛАНОК АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ РЕГУЛЮВАННЯ ЗА ЇХНІМИ ПЕРЕХІДНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Мета роботи. 1. Засвоїти на практиці методику визначення параметрів заданих типових ланок систем авторегулювання. У даній роботі задають інерційну ланку першого порядку (аперіодичну), інтегруючу, диференціальну і статичну (безінерційну, підсилюючу) ланки.

2. Вивчити за конспектом лекцій і за технічною літературою розділи, що стосуються класифікації типових ланок автоматичних систем регулювання (АСР). Зокрема, необхідно знати диференціальні рівняння, графіки і рівняння перехідних функцій окремих ланок першого порядку.

Методичні вказівки до виконання роботи

Перехідна функція ланки – це залежність зміни вихідної величини ланки в часі при одиничній стрибкоподібній зміні вхідної величини на деяке постійне значення, при цьому до моменту нанесення збурення ланка має знаходитися в стані рівноваги.

Перехідна функція лінійної ланки цілком визначає усі параметри ланки, тобто постійні часу і передавальний коефіцієнт. Якщо ж ланка нелінійна, але близька до лінійної, тоді за експериментально знятими перехідними функціями ланки можна знайти середні значення їх параметрів, тобто лінеаризувати ланку засобом усереднення.

Передавальний коефіцієнт для всіх ланок знаходимо як відношення сталого відхилення вихідної величини до зміни вхідної величини:

$$K = \frac{X_{\text{вих}}^{\infty}}{X_{\text{вх}}^0}. \quad (1.1)$$

Для ланок різного типу сталі часу ланки за перехідними функціями знаходять різними способами.

1. *Інерційна ланка першого порядку (аперіодична).* Диференціальне рівняння ланки:

$$T \cdot X'_{\text{вих}}(t) + X_{\text{вих}}(t) = K \cdot X_{\text{вх}}(t). \quad (1.2)$$

Передатна функція ланки:

$$W(P) = \frac{K}{T P + 1}. \quad (1.3)$$

Після інтегрування рівняння (1.1) для $X_{\text{вх}} = X_{\text{вх}}^0 = \text{const}$ за нульових початкових умов (для $t=0$; $X_{\text{вих}}=0$; $X'_{\text{вих}}=0$) одержуємо рівняння перехідної функції інерційної ланки першого порядку у вигляді:

$$X_{\text{вих}}(t) = K \cdot X_{\text{вх}}^0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right). \quad (1.4)$$

Графічно – це експериментальна крива, що асимптотично наближається до значення $K \cdot X_{\text{вх}}^0$ тим швидше, чим менше значення має стала часу T (рис. 1.1).

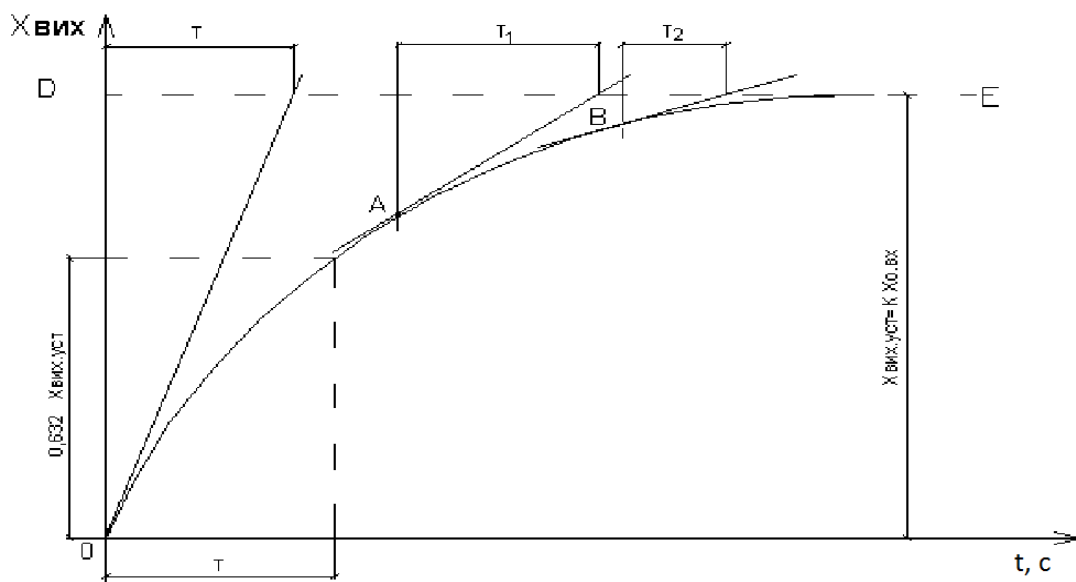


Рис. 1.1. Графічне зображення перехідної характеристики інерційної ланки I-го порядку

Для $t=4T$ одержуємо $e^{-\frac{t}{T}} = e^{-4} = 0,018$, тобто вихідна величина відрізняється від значення $K \cdot X_{\text{вх}}^0$ менше, ніж на 2% (інакше, після часу, що дорівнює $4T$, за який переходить процес в інерційній ланці першого порядку, можна вважати практично закінченим).

Маючи експериментально зняту криву перехідного процесу, наближену до експоненти, можна знайти її сталу часу, використовуючи один із наведених далі способів (рис. 1.1) [1–3]:

а) проводимо горизонтальну лінію на висоті $0,632 \cdot X_{\text{вих}}^{\infty}$ до перетину з кривою.

Абсциса цієї точки – це стала часу T ;

б) проводимо дотичну до кривої у момент часу $t=0$ і асимптоту DE до кривої.

Дотична відтинає на асимптоті значення T ;

в) проводимо дотичні в декількох (n) точках A, B, \dots .

Дотичні відтинають на асимптоті між перпендикуляром, опущеним на асимптоту, і точкою перетину дотичної з асимптотою значення T_1, T_2, \dots, T_n .

Сталу часу визначають як середнє арифметичне цих розмірів:

$$T = \frac{\sum T_n}{n}. \quad (1.5)$$

Розділивши вихідний розмір при $t \rightarrow \infty$ на розмір вхідного збурення (див. формулу 1.1).

Таким чином, при $X_{\text{вх}}^0 = 1$ розмір передавального коефіцієнта ланки $K = X_{\text{вих}}^{\infty}$.

2. Ланка підсилююча (статична, безінерційна, масштабуюча, пропорційна).

Передатна функція ланки:

$$W(P) = K. \quad (1.6)$$

Перехідна функція підсилюючої ланки має вигляді:

$$X_{\text{вих}}(t) = K \cdot X_{\text{вх}}^0. \quad (1.7)$$

Графічно – це лінія паралельна осі часу на відстані $K \cdot X_{\text{вх}}^0$ (рис. 1.2).

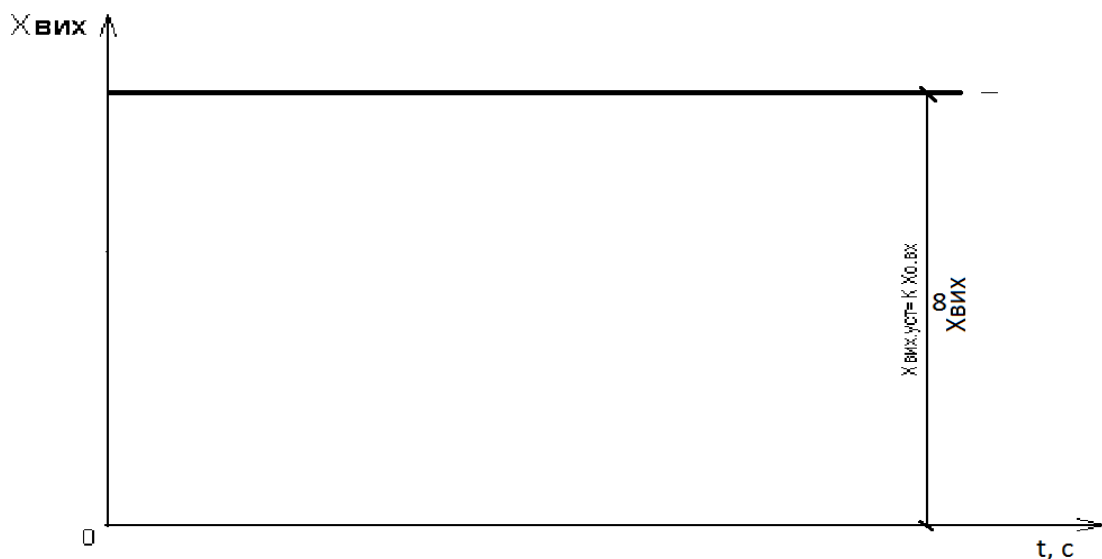


Рис. 1.2. Графічне зображення перехідної характеристики підсилюючої ланки

Передавальні властивості ланки визначаються лише одним параметром – передавальним коефіцієнтом K , який визначається за формулою (1.1).

3. Ланка інтегрування. Диференціальне рівняння ланки:

$$X'_{\text{вих}}(t) = \varepsilon \cdot X_{\text{вх}}(t). \quad (1.8)$$

Передатна функція ланки:

$$W(P) = \frac{\varepsilon}{P}. \quad (1.9)$$

Коефіцієнт ε називають *чутливістю* ланки. Він чисельно дорівнює швидкості зміни вихідного значення при одиничному значенні вхідного впливу.

Якщо вхідна і вихідна величини мають однакову розмірність, то з виразу (1.8) випливає, що коефіцієнт ε має розмірність с^{-1} . У цьому випадку диференціальне рівняння зручніше записати у вигляді:

$$X'_{\text{вих}}(t) = \frac{1}{T_i} X_{\text{вх}}(t), \quad (1.10)$$

а передатну функцію:

$$W(P) = \frac{1}{T_i \cdot P}, \quad (1.11)$$

де $T_i = \frac{1}{\varepsilon}$. Величину T_i називають сталою часу ланки інтегрування, або *часом інтегрування*.

Інтегруючи диференціальні рівняння ланки (1.8) і (1.10), одержуємо:

$$X_{\text{вих}}(t) = \varepsilon \int_0^t X_{\text{вх}} dt \quad (1.12)$$

і

$$X_{\text{вих}}(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t X_{\text{вх}} dt. \quad (1.13)$$

Таким чином, вихідна величина пропорційна інтегралу від вхідного впливу. Це дало підставу називати таку ланку *інтегруючою*.

Вважаючи $X_{\text{вх}} = X_{\text{вх}}^0 = \text{const}$, приходимо до рівняння перехідної функції:

$$X_{\text{вих}}(t) = \varepsilon \cdot X_{\text{вх}}^0 \cdot t, \quad (1.14)$$

або

$$X_{\text{вих}}(t) = \frac{1}{T_i} X_{\text{вх}}^0 \cdot t. \quad (1.15)$$

Із виразу (1.16) випливає, що час інтегрування T_i чисельно дорівнює часу, за який вихідна величина ланки в перехідному процесі при $X_{\text{вх}}^0 = \text{const}$ досягає значення вхідної $X_{\text{вх}}^0$ (рис. 1.3).

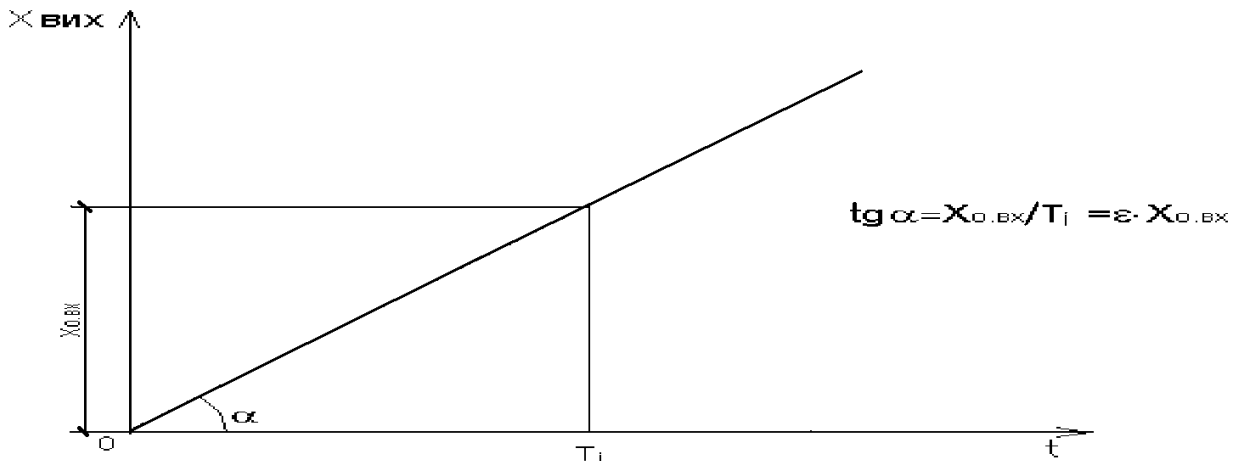


Рис. 1.3. Перехідна характеристика інтегруючої ланки

4. *Ланка диференціювання.* Ланки диференціювання бувають двох типів: ідеальні та реальні.

Диференціальне рівняння ідеальної ланки:

$$X_{\text{вих}}(t) = K \cdot X'_{\text{вх}}(t), \quad (1.16)$$

де $K = \frac{X_{\text{вих}}^{\text{max}}}{X_{\text{вх}}}$ – коефіцієнт передачі ідеальної ланки диференціювання.

Ідеальна ланка не може бути технічно реалізована через те, що порядок правої частини рівняння (1.17) більший за порядок лівої частини. Можна тільки наблизитися до цього рівняння, використовуючи реальну ланку диференціювання:

$$T_d \cdot X'_{\text{вих}}(t) + X_{\text{вих}}(t) = K_d \cdot X'_{\text{вх}}(t), \quad (1.17)$$

де T_d – стала часу диференціювання; $K_d = K \cdot T_d$ – коефіцієнт передачі диференціатора.

Зазначимо, що до розмірності коефіцієнта передачі K_d входить час.

Передатна функція ланки:

$$W(P) = \frac{K_d P}{T_d P + 1}. \quad (1.18)$$

Перехідну характеристику при одиничному стрибкоподібному збуренні на вході ланки зображено на рис. 1.4.

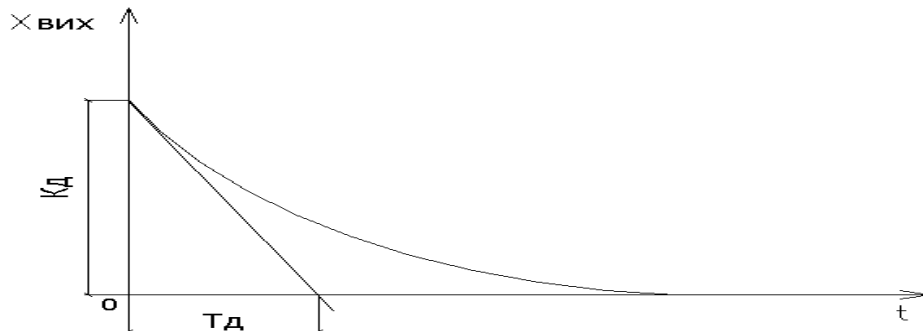


Рис. 1.4. Перехідна характеристика реальної ланки диференціювання

Аналітичний вираз перехідної характеристики (див. рис. 1.4) подають у вигляді виразу перехідної функції, інтегруючи диференціальне рівняння 1.17:

$$X_{\text{вих}}(t) = X_{\text{вх}}^0 \cdot K_d \cdot e^{-\frac{t}{T_d}}. \quad (1.19)$$

Порядок виконання лабораторної роботи

Моделюються перехідні характеристики за допомогою спеціальної програми на ПЕОМ, яка має інтуїтивний інтерфейс. Варіанти завдань наведені у Додатку А табл. А.1.

Якщо навчання проводиться дистанційно, – можна скористатись результатами експериментальних досліджень елементарних ланок, які надані за варіантами (по бригадах) в табличній формі у Додатку Б.1.

Зміст звіту

У змісті необхідно подати:

- 1) експериментальні перехідні характеристики ланок (побудувати і роздрукувати за допомогою ПЗ MathLab, Microsoft Excel і т.п.);
- 2) розрахунок параметрів ланок K і T наведеними вище способами;
- 3) висновки.

Контрольні запитання

1. Напишіть рівняння та наведіть графік перехідної функції інерційної ланки першого порядку.
2. Знайдіть приблизну тривалість перехідного процесу, якщо постійна часу $T=2, 10, 100$ с.
3. Покажіть на графіку перехідної функції, як знаходяться параметри цієї ланки.
4. Зведіть безрозмірне рівняння перехідної функції до розмірної форми.
5. Покажіть, як зміниться перехідна функція інерційної ланки при дворазовому зменшенні сталої часу.
6. Виведіть рівняння перехідної функції інерційної ланки першого порядку.
7. Наведіть рівняння та графік перехідної функції ланки інтегрування.
8. Покажіть на графіку перехідної функції ланки інтегрування, як знаходяться параметри цієї функції.

Лабораторна робота 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОСЛІДОВНОГО З'ЄДНАННЯ ДИНАМІЧНИХ ЛАНОК

Мета роботи. 1. Засвоїти методику розрахунку параметрів динамічної системи, що складається з послідовного з'єднання ланок, експериментального дослідження характеристики системи послідовно з'єднаних ланок.

2. Вивчити диференціальні рівняння і динамічні характеристики ланок інтегрування та інерційних ланок першого порядку.

3. Вивчити методику розрахунку передатних функцій при послідовному з'єднанні динамічних ланок.

Методичні вказівки до виконання роботи

Послідовне з'єднання двох інерційних ланок першого порядку. Систему, що складається з двох послідовно з'єднаних інерційних ланок, зображено на рис. 2.1.

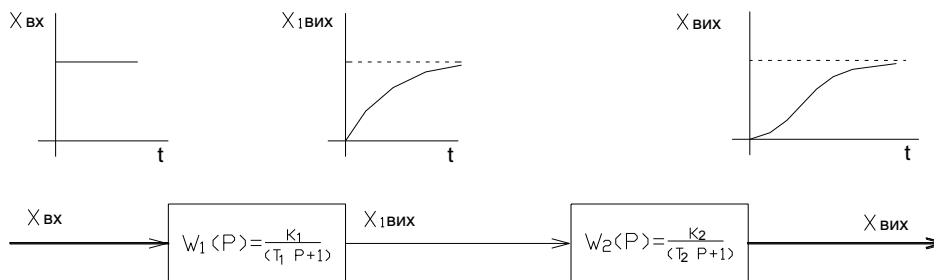


Рис. 2.1. Послідовне з'єднання інерційних ланок

Передатна функція вихідних ланок:

$$W_1(P) = \frac{K_1}{T_1 P + 1}; \quad W_2(P) = \frac{K_2}{T_2 P + 1}. \quad (2.1)$$

Визначаємо передатну функцію системи, що складається з послідовного з'єднання цих ланок:

$$W(P) = W_1(P) \cdot W_2(P) = \frac{K_1 \cdot K_2}{(T_1 P + 1)(T_2 P + 1)} = \frac{K_1 \cdot K_2}{T_1 \cdot T_2 P^2 + (T_1 + T_2) P + 1}. \quad (2.2)$$

Звідси випливає, що дві послідовно сполучені інерційні ланки першого порядку еквівалентні інерційній ланці другого порядку зі сталою часу:

$$T_1^* = T_1 \cdot T_2 \quad (2.3)$$

та

$$T_2^* = T_1 + T_2 \quad (2.4)$$

і передавальний коефіцієнт:

$$K^* = K_1 \cdot K_2. \quad (2.5)$$

Тоді передатну функцію системи записуємо у вигляді:

$$W(P) = \frac{K^*}{T_1^* P^2 + T_2^* P + 1}. \quad (2.6)$$

Ця ланка не може бути коливальною, тому що корені характеристичного рівняння дійсні та від'ємні:

$$P_1 = -\frac{1}{T_1}; \quad P_2 = -\frac{1}{T_2}. \quad (2.7)$$

Із передатної функції (2.6) можна визначити рівняння перехідної функції, користуючись таблицями перетворень Лапласа і беручи $X_{\text{вх}} = X_{\text{вх}}^0 = \text{const}$:

$$X_{\text{вих}}(t) = K_1 \cdot K_2 \cdot X_{\text{вх}}^0 \left(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} \right). \quad (2.8)$$

Тут передбачається, що $T_1^* > T_2^*$.

Графік перехідної функції (2.8) являє собою плавну криву з точкою перегину (рис. 2.2). Крива виходить із початку координат і асимптотично прагне до значення $K_1 \cdot K_2 \cdot X_{\text{вх}}^0 = X_{\text{вих}}^\infty$.

Маючи експериментально зняту перехідну характеристику системи двох послідовно з'єднаних інерційних ланок першого порядку, можна визначити всі параметри динаміки: K^* , T_1^* та T_2^* , що входять до передатної функції (2.6).

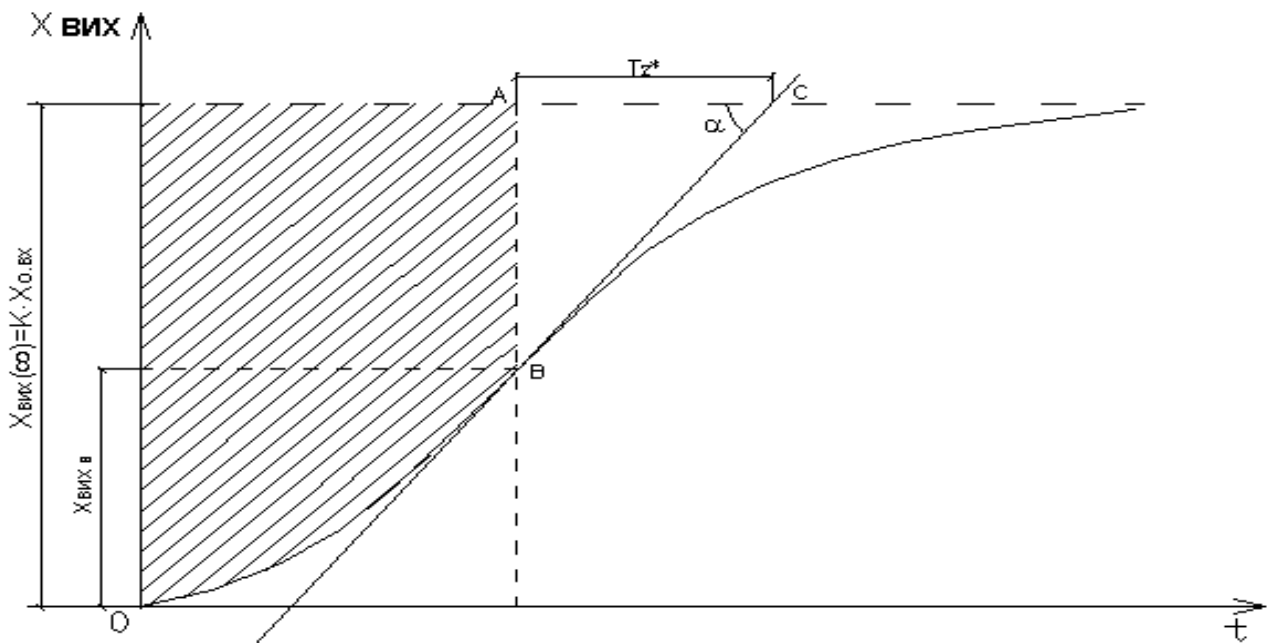


Рис. 2.2. Перехідна характеристика інерційної ланки другого порядку

Передавальний коефіцієнт системи K^* визначають з рис. 2.2 як сталие значення відхилення $X_{\text{вих}}^\infty$, поділене на амплітуду вхідного обурення:

$$K^* = \frac{X_{\text{вих}}^\infty}{X_{\text{вх}}^0}. \quad (2.9)$$

Сталу часу T_2^* знаходимо як піддотичну AC у точці перегину B кривої перехідної характеристики (див. рис. 2.2).

Сталу часу T_1^* визначаємо за формулою:

$$T_1^* = \frac{S - T_2^* \cdot X_{\text{вих}}^B}{X_{\text{вих}}^{B/}}. \quad (2.10)$$

Тут $S = \int_0^{t_6} [K \cdot X_{\text{вих}}^0 - X_{\text{вих}}(t)] dt$.

Стала часу подає розмір площі, заштрихованої на рис. 2.2 [4].

Площа S і відрізки T_2^* і $X_{\text{вих}}^B$, $X_{\text{вих}}^\infty$ беруться безпосередньо з графіка перехідного процесу (з огляду на масштаби координат). Величину $X_{\text{вих}}^{B/}$ розраховують за формулою:

$$X_{\text{вих}}^{B/} = \frac{X_{\text{вих}}^\infty - X_{\text{вих}}^B}{T_2^*}. \quad (2.11)$$

Послідовне з'єднання інерційної ланки першого порядку і ланки інтегрування. При послідовному з'єднанні ланок вихідна величина попередньої ланки є вхідною величиною наступної. Так, для двох послідовно з'єднаних ланок, зображених на рис. 2.3, вихідна координата інерційної ланки першого порядку $X_{1\text{вих}}$ є вхідною координатою для інтегруючої ланки.

Передатна функція системи:

$$W(P) = W_1(P) \cdot W_2(P) = \frac{\varepsilon}{(T P + 1) P}. \quad (2.12)$$

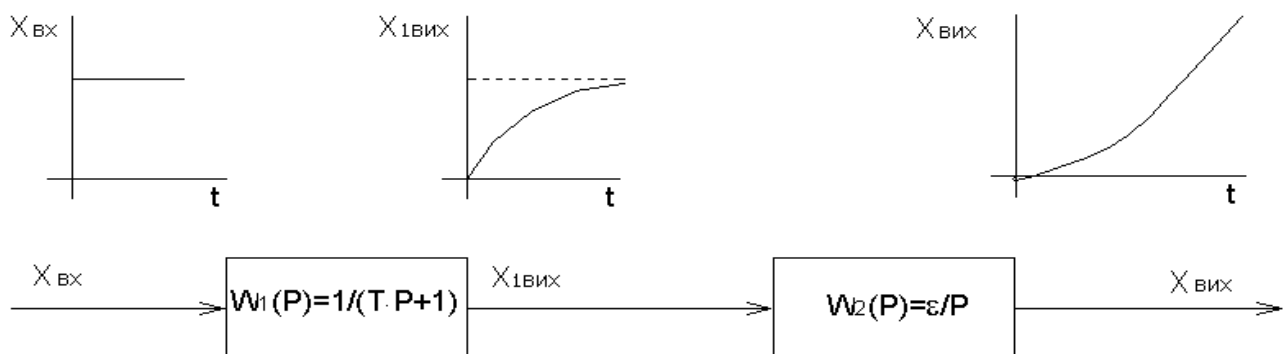


Рис. 2.3. Послідовне з'єднання ланок

Перехідна функція з'єднання ланок має вигляд:

$$\frac{X_{\text{вих}}(t)}{X_{\text{вх}}(t)} = \varepsilon \left[t - T \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \right]. \quad (2.13)$$

Її графік складається з двох складових (рис. 2.4):

прямої:

$$\frac{X_{1\text{вих}}}{X_{\text{вх}}} = \varepsilon \cdot t \quad (2.14)$$

та експоненти:

$$\frac{X_{\text{вих}}}{X_{1\text{вих}}} = -\varepsilon \cdot t \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right). \quad (2.15)$$

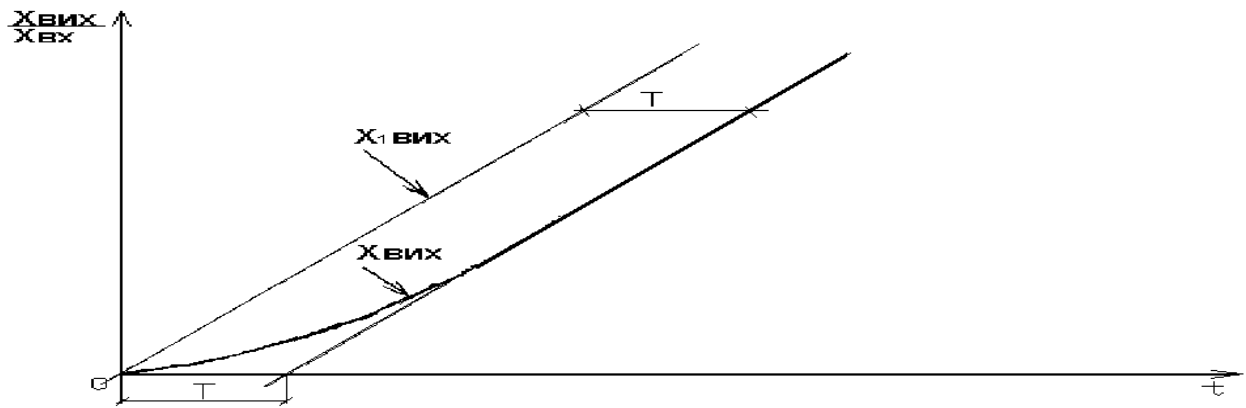


Рис. 2.4. Перехідна характеристика реальної інтегруючої ланки

Чутливість інтегруючої ланки визначають з графіка прямої (див. формулу 2.14) за рис.2.4:

$$\varepsilon = \operatorname{tg} \alpha. \quad (2.16)$$

Для визначення *сталого часу* T віднімемо від рівняння (2.14) рівняння (2.13):

$$(X_{1\text{вих}} - X_{\text{вих}}) \frac{1}{X_{\text{вх}}} = \varepsilon \cdot T \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right).$$

Якщо $t \rightarrow \infty$:

$$(X_{1\text{вих}} - X_{\text{вих}}) \frac{1}{X_{\text{вх}}} = \varepsilon \cdot T,$$

то

$$T = \frac{X_{1\text{вих}} - X_{\text{вих}}}{X_{\text{вх}} \cdot \varepsilon} \Bigg|_{t \rightarrow \infty} = \frac{X_{1\text{вих}} - X_{\text{вих}}}{X_{\text{вх}} \cdot \operatorname{tg} \alpha} \Bigg|_{t \rightarrow \infty}. \quad (2.17)$$

Таким чином, *сталу часу* T визначають як відстань між кривими $X_{1\text{вих}}$ і $X_{\text{вих}}$ по осі часу при $t \rightarrow \infty$ (див. рис. 2.4).

Порядок виконання роботи

Моделюються перехідні характеристики за допомогою спеціальної програми на ПЕОМ, яка має інтуїтивний інтерфейс. Варіанти завдань наведені у Додатку А табл. А.2.

Якщо навчання проводиться дистанційно, – можна скористатись результатами експериментальних досліджень елементарних ланок, які надані за варіантами (по

бригадах) в табличній формі у Додатку Б.2.

Зміст звіту

У звіті необхідно подати:

- 1) структурну схему досліджуваної системи;
- 2) стислий виклад послідовності виконання роботи;
- 3) експериментальні перехідні характеристики ланок (побудувати і роздрукувати графіки перехідних характеристик за допомогою програмного забезпечення MathLab, Microsoft Excel і т.п.);
- 4) розрахунок параметрів динаміки за експериментально знятими перехідними характеристиками системи (відповідно до розд. 2.2);
- 5) розрахунок параметрів динаміки системи послідовно сполучених ланок за характеристиками тих самих ланок, що були отримані під час виконання лабораторної роботи 1, з використанням формул (2.3) – (2.5);
- б) висновки.

Контрольні запитання

1. Напишіть рівняння та наведіть графік перехідної функції інерційної ланки другого порядку.
2. Як знаходять параметри цієї ланки з графіка перехідної функції?
3. Напишіть рівняння перехідної функції послідовного з'єднання інтегруючої ланки та інерційної ланки першого порядку.
4. Наведіть графік перехідної функції для п.3 і покажіть на ньому, як визначаються параметри цього з'єднання ланок.

Лабораторна робота 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК З'ЄДНАННЯ ДИНАМІЧНИХ ЛАНОК ЗІ ЗВОРОТНІМ ЗВ'ЯЗКОМ

Мета роботи. 1. Привити навички експериментального дослідження характеристик динамічної ланки, охопленої жорстким зворотним зв'язком.

2. Необхідно знати диференціальні рівняння і динамічні характеристики інтегруючої ланки та інерційної ланки першого порядку.

3. Вивчити розрахунок передатних функцій динамічних ланок, охоплених зворотнім зв'язком.

Методичні вказівки до виконання роботи

При охопленні ланки зворотним зв'язком на її вхід одночасно з вхідною величиною подається і вихідна величина, яка минула ланку зворотного зв'язку з передатною функцією $W_{3.3}$ (рис. 3.1).

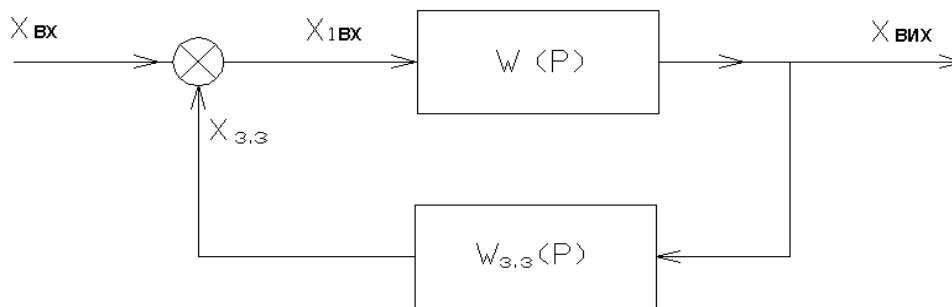


Рис. 3.1. З'єднання динамічної ланки зворотним зв'язком

Як показано на схемі $X_{1ВХ} = X_{ВХ} \pm X_{3.3}$.

При від'ємному зворотному зв'язку його вихідний сигнал віднімається від вхідної величини, при позитивному зворотному зв'язку – додається до вхідної величини.

У системах регулювання для забезпечення сталості їхньої роботи застосовується від'ємний зворотний зв'язок. У цьому випадку передатна функція системи має вигляд:

$$W_{3.3}(P) = \frac{W(P)}{1 + W(P) \cdot W_{3.3}(P)}. \quad (3.1)$$

При виконанні даної роботи ланка $W(P)$ задається інтегруючою або інерційною,

а $W_{3.3}(P)$ – безінерційною, тобто у вигляді жорсткого зворотного зв'язку.

Визначимо передатні функції системи за умов конкретного задання ланок.

Охоплення зворотним зв'язком інерційної ланки. Якщо задана ланка має передатну функцію $W(P) = \frac{K}{T P + 1}$, то відповідно до формули (3.1) знаходимо:

$$W_{3.3}(P) = \frac{\frac{K}{T P + 1}}{1 + \frac{K_{3.3} \cdot K}{T P + 1}} = \frac{\frac{K}{1 + K \cdot K_{3.3}}}{\frac{T}{1 + K \cdot K_{3.3}} P + 1}. \quad (3.2)$$

Із формули (3.2) випливає, що отримана система являє собою також інерційну ланку першого порядку, передавальний коефіцієнт якої та стала часу зменшені в $1 + K \cdot K_{3.3}$ разів.

Охоплення зворотним зв'язком інтегруючої ланки. Нехай задана ланка має передатну функцію $W(P) = \frac{\varepsilon}{P}$, тоді:

$$W_{3.3}(P) = \frac{\frac{\varepsilon}{P}}{1 + \frac{K_{3.3} \cdot \varepsilon}{P}} = \frac{\frac{1}{K_{3.3}}}{\frac{1}{K_{3.3} \cdot \varepsilon} P + 1}. \quad (3.3)$$

Одержана передатна функція (3.3) є інерційною ланкою, передавальний коефіцієнт якої дорівнює $1/K_{3.3}$, і стала часу – $1/K_{3.3} \cdot \varepsilon$.

Порядок виконання роботи

Моделюються перехідні характеристики за допомогою спеціальної програми на ПЕОМ, яка має інтуїтивний інтерфейс. Варіанти завдань наведені у Додатку А табл. А.3.

Якщо навчання проводиться дистанційно, – можна скористатись результатами експериментальних досліджень елементарних ланок, які надані за варіантами (по бригадах) в табличній формі у Додатку Б.3.

Зміст звіту

У звіті необхідно подати:

- 1) структурну схему з'єднання ланок, висновок про передатну функцію з'єд-

- нання ланок, визначення розмірів K і T з'єднання;
- 2) експериментальні перехідні характеристики ланок (побудувати і роздрукувати графіки перехідних характеристик за допомогою програмного забезпечення MathLab, Microsoft Excel і т.п.);
 - 3) визначення величин K та T з'єднань ланок за кривими перехідних характеристик, отриманими експериментально;
 - 4) висновки.

Контрольні запитання

1. Як розраховують передатну функцію з'єднання ланок зі зворотним зв'язком?
2. Що таке позитивний та від'ємний зв'язки?
3. Який вид має передатна функція системи, якщо вихід системи подається на її вхід, не проходячи будь-якої ланки?

Лабораторна робота 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛИВАЛЬНОЇ ЛАНКИ

Мета роботи. 1. Привити навички експериментального дослідження характеристик елементарної динамічної системи, перехідні процеси в якій мають коливальний характер.

2. Вивчити математичний опис і динамічні характеристики типової коливальної ланки.

Методичні вказівки до виконання роботи

Основні поняття. У коливальній ланці зв'язок між вхідною і вихідною величинами визначається диференціальним рівнянням:

$$T_1^2 \cdot X_{\text{вих}}''(t) + T_2 \cdot X_{\text{вих}}'(t) + X_{\text{вих}}(t) = K \cdot X_{\text{вх}}(t). \quad (4.1)$$

Передатна функція ланки:

$$W(P) = \frac{K}{T_1^2 P^2 + T_2 P + 1}. \quad (4.2)$$

Якщо $T_2 < 2T_1$, то перехідний процес ланки характеризується рівнянням:

$$X_{\text{вих}}(t) = K \cdot X_{0\text{вх}} \left[1 - \sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\alpha}\right)^2} e^{-\alpha t} \cdot \sin\left(\omega t + \arctg \frac{\omega}{\alpha}\right) \right], \quad (4.3)$$

де $\alpha = \frac{T_2}{2T_1^2}$ – коефіцієнт загасання коливань; $\omega = \frac{2\pi}{t_n}$ – колова частота коливань; t_n

– період коливань.

Постійні часу T_1 і T_2 визначають через α і ω відповідно до формул:

$$T_1 = \frac{1}{\sqrt{\alpha^2 + \omega^2}}; \quad T_2 = \frac{2\alpha}{\alpha^2 + \omega^2}. \quad (4.4)$$

Графічно перехідний процес (рис. 4.1), показаний рівнянням (4.2), являє собою періодичну загасаючу криву, коливну навколо прямої $X_{\text{вих}} = K \cdot X_{\text{вх}}^0$. Амплітуда кривої спадає від напівперіоду до напівперіоду за експоненціальним законом.

Маючи експериментально зняту криву даного перехідного процесу, знаходимо

спочатку величини α і ω/T , а потім відповідно до (4.4) – сталі часу T_1 і T_2 .

Знята крива дозволяє безпосередньо знайти час періоду коливань t_n , а звідси – і колову частоту ω .

Позначивши дві сусідні амплітуди одного знака через y_1 і y_2 , знайдемо з (4.2) коефіцієнт загасання коливань:

$$\alpha = \frac{\ln y_1 - \ln y_2}{t_n} \quad (4.5)$$

Рекомендується визначити α і ω для декількох відповідних моментів часу і для подальших розрахунків брати їхні середні значення.

Моделювання коливальної ланки. Коливальні системи не можна задати у вигляді окремо взятих ланок W_1 , W_2 або W_3 . Практично коливальна ланка моделюється у вигляді замкненої системи з трьох ланок (рис. 4.2). Дві з них є інерційними (одна може бути інтегруючою), третя – підсилювальною. Третя ланка тут береться для того, щоб забезпечити одержання від’ємного зворотного зв’язку.

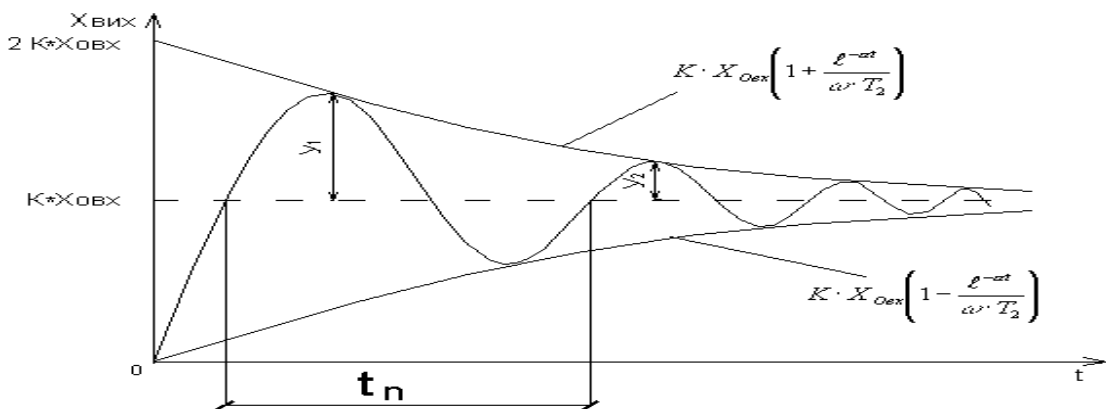


Рис. 4.1. Перехідна характеристика коливальної ланки

Щоб одержати систему з параметрами коливальної ланки, загальний коефіцієнт передачі повинен бути достатньо великим: $K=K_1 \cdot K_2 \cdot K_3$.

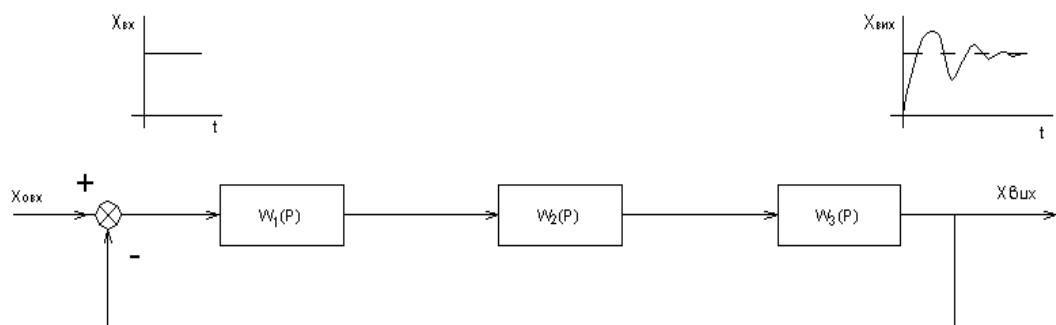


Рис. 4.2. Структурна схема моделі коливальної ланки

Передатні функції ланок:

$$W_1(P) = \frac{K_1}{T_1 P + 1}; \quad (4.6)$$

$$W_2(P) = \frac{K_2}{T_2 P + 1} \text{ або } W_2(P) = \frac{\varepsilon_1}{P}; \quad (4.7)$$

$$W_3(P) = K_3. \quad (4.8)$$

Порядок виконання роботи

Моделюються перехідні характеристики за допомогою спеціальної програми на ПЕОМ, яка має інтуїтивний інтерфейс. Варіанти завдань наведені у Додатку А табл. А.4.

Якщо навчання проводиться дистанційно, – можна скористатись результатами експериментальних досліджень елементарних ланок, які надані за варіантами (по бригадах) в табличній формі у Додатку Б.4.

Зміст звіту

У звіті необхідно подати:

- 1) структурну схему з'єднання (див. рис. 4.2);
- 2) графіки перехідних процесів варіантів розрахунку;
- 3) експериментально визначені величини K , α , ω , T_1 , T_2 ;
- 4) рівняння, що відповідає знятому перехідному процесу, із використанням визначених вище величин;
- 5) передатну функцію коливальної ланки;
- 6) висновок.

Контрольні запитання

1. Який вигляд має диференціальне рівняння коливальної ланки?
2. За якої умови ланка є коливальною?
3. Напишіть рівняння перехідного процесу коливальної ланки.
4. Які величини можна визначити з графіка перехідного процесу ланки?

Лабораторна робота 5

ДОСЛІДЖЕННЯ УСТАЛЕНОСТІ ЗАМКНЕНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

Мета роботи. 1. Привити навички теоретичного та експериментального дослідження впливу окремих параметрів динаміки системи автоматичного керування на її усталеність.

2. Вивчити диференціальні рівняння і динамічні характеристики інтегруючих та інерційних ланок першого порядку.

3. Вивчити типові з'єднання ланок (послідовне з'єднання та охоплення системи зворотним зв'язком).

4. Вивчити основні критерії усталеності лінійних систем Гурвіца, Михайлова, Найквіста.

Методичні вказівки до виконання роботи

Основні поняття. Потрібно досліджувати усталеність замкненої одноконтурної системи автоматичного керування, що складається з типових динамічних ланок першого порядку (рис. 5.1). Тип кожної ланки та числові характеристики задаються викладачем. Ланку зворотного зв'язку прийнято в усіх варіантах у вигляді безінерційної ланки. Передавальний коефіцієнт $K_{3,3}$ цієї ланки розраховують з умов усталеності системи за одним із відомих критеріїв (критерієм Гурвіца).

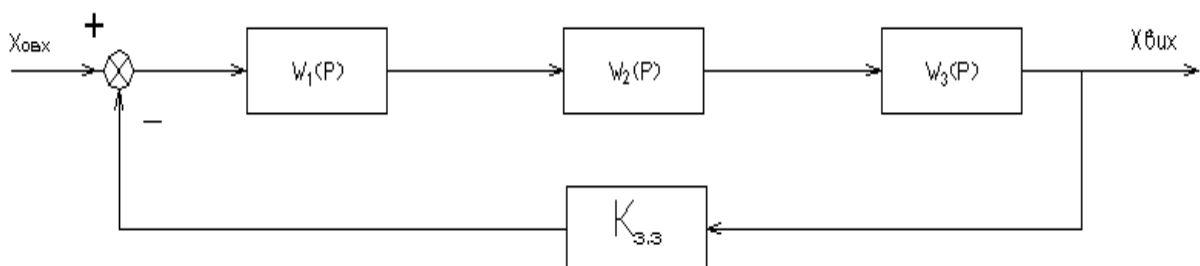


Рис. 5.1. Замкнена система автоматичного керування

Після розрахунку критичного значення $K_{3,3}$ замкнена схема збирається на цифровій моделі, і знімаються перехідні процеси при стрибкоподібному збуренні $X_{вх}$. Далі передавальний коефіцієнт системи зменшується на 50...70 % і потім збільшується на 20...30 %. При кожному значенні параметрів також знімається перехідний процес.

Приклад розрахунку. Як приклад виведемо формулу для розрахунку критичного значення передавального коефіцієнта $K_{3,3}$ для конкретного варіанта завдання.

Нехай W_1 , W_2 і W_3 задано у вигляді інерційних ланок першого порядку, і потрібно виконати розрахунок за допомогою критерію усталеності Гурвіца.

Передатна функція замкненої системи:

$$W_{3,3} = \frac{W_1 \cdot W_2 \cdot W_3}{1 + W_1 \cdot W_2 \cdot W_3 \cdot K_{3,3}}. \quad (5.1)$$

Характеристичне рівняння замкненої системи одержимо, якщо знаменник передатної функції (5.1) дорівнюємо до нуля:

$$1 + W_1 \cdot W_2 \cdot W_3 \cdot K_{3,3} = 0. \quad (5.2)$$

Підставимо в (5.2) задані передатні функції ланок:

$$1 + \frac{K_1}{T_1 P + 1} \cdot \frac{K_2}{T_2 P + 1} \cdot \frac{K_3}{T_3 P + 1} \cdot K_{3,3} = 0.$$

Звідси

$$T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot P^3 + (T_1 \cdot T_2 + T_2 \cdot T_3 + T_1 \cdot T_3) \cdot P^2 + (T_1 + T_2 + T_3) \cdot P + (1 + K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_{3,3}) = 0,$$

або

$$a_0 \cdot P^3 + a_1 \cdot P^2 + a_2 \cdot P + a_3 = 0,$$

де

$$a_0 = T_1 \cdot T_2 \cdot T_3;$$

$$a_1 = T_1 \cdot T_2 + T_2 \cdot T_3 + T_1 \cdot T_3; \quad (5.3)$$

$$a_2 = T_1 + T_2 + T_3;$$

$$a_3 = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_{3,3} + 1.$$

Умова усталеності за Гурвіцем:

$$a_0 > 0; \quad a_1 > 0; \quad a_2 > 0; \quad a_3 > 0.$$

$$\Delta_3 = \begin{bmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{bmatrix},$$

де визначники Гурвіца:

$$\Delta_1 = a_1 > 0;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 \cdot a_2 - a_0 \cdot a_3 > 0. \quad (5.4)$$

Зауважимо, що перший визначник буде додатним, оскільки всі постійні часу є принципово додатними величинами. З цієї причини можна не обчислювати старший визначник Δ_3 , тому що при позитивному значенні Δ_2 визначник $\Delta_3 = a_3 \cdot \Delta_2$ буде також більший за нуль.

Із формул (5.3) і (5.4) одержуємо:

$$a_3 < \frac{a_1 \cdot a_2}{a_0}; \quad K_{3.3} < \frac{a_1 \cdot a_2 - a_0}{a_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3}.$$

Таким чином, в *розглянутому варіанті* системи обчислюється критичне значення передавального коефіцієнта зворотного зв'язку, коли має місце режим автоколивань:

$$K_{3.3} = \frac{a_1 \cdot a_2 - a_0}{a_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3}. \quad (5.5)$$

Тут коефіцієнти a_0 , a_1 та a_2 визначаються за формулами (5.3).

Порядок виконання роботи

Варіанти завдань наведені у Додатку А, табл. А.4.

Роботу виконують у два етапи. На першому етапі студенти за заданими викладачем параметрами ланок, що входять у замкнену систему, визначають критичне значення передавального коефіцієнта ланки зворотного зв'язку, тобто значення $K_{3.3}$, при якому замкнена система знаходиться на межі усталеності, на другому – роблять розрахунок на комп'ютері перехідних процесів системи та аналіз усталеності.

Роботу необхідно виконувати у такій послідовності.

1. Скласти розрахункові формули для визначення критичного передавального коефіцієнта ланки зворотного зв'язку $K_{3.3}$ за аналогією з виведенням формул (5.3), (5.4). При цьому варто користуватися заданими викладачем параметрами інерційних ланок $W_1(P)$, $W_2(P)$ і $W_3(P)$. Якщо за завданням усі ланки є інерційними, то варто користуватися формулами (5.5) і (5.3). Розрахувати критичний коефіцієнт ланки

зворотного зв'язку $K_{з.з.}$.

2. Зняти перехідний процес системи при розрахованому критичному коефіцієнті зворотного зв'язку за спеціальною програмою за умови, що на вхід системи подається одиничне стрибкоподібне збурення.

Процедура розрахунку перехідного процесу, одержання даних і виходу з програми для даної роботи аналогічна процедурі лабораторної роботи 4.

3. Зменшити передавальний коефіцієнт зворотного зв'язку до 50...70% від розрахункового критичного значення. Зняти перехідний процес.

4. Збільшити передавальний коефіцієнт зворотного зв'язку на 120...130% від розрахункового значення. Зняти перехідний процес.

Варіантні розрахунки для студентських бригад задає викладач.

Зміст звіту

Звіт повинен містити:

- 1) структурну схему замкненої системи керування із зазначенням передатних функцій ланок (див. рис.4.2);
- 2) графіки перехідних характеристик першої та другої ланок з обробкою кривих з метою визначення параметрів динаміки;
- 3) порядок виконання роботи;
- 4) розрахунок критичного передавального коефіцієнта зворотного зв'язку;
- 5) графіки перехідних процесів у замкненій системі при різних значеннях передавальних коефіцієнтів;
- 6) висновок.

Контрольні запитання

1. Сформулювати заданий критерій усталеності. Визначте розрахункову формулу критичного передавального коефіцієнта.
2. Розповісти порядок виконання експериментальної частини роботи.
3. Як впливає зменшення передавального коефіцієнта ланки зворотного зв'язку на затухання перехідного процесу і статистичну похибку регулювання?

Перелік посилань

1. *Ротач В.Я.* Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами (для студентов вузов). – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 296 с.
2. *Стефани Е.П.* Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. – М.: Энергия, 1972. – 336 с.
3. *Клюев А.С.* Автоматическое регулирование. – М.: Энергия, 1973. – 287 с.
4. *Воронов А.А.* Основы автоматического управления. – М.: Энергия, 1965. – 189 с.

Таблиця А.1 – Варіанти завдання для лабораторної роботи №1

№ бригади	Варіанти для групи Т*_*1				Варіанти для групи Т*_*2			
	I	1; 9	17; 32	33; 48	49; 64	8; 9	17; 18	40; 48
II	2; 10	18; 31	34; 47	50; 63	7; 10	19; 20	39; 47	51; 52
III	3; 11	19; 30	35; 46	51; 62	6; 11	21; 22	38; 46	53; 54
IV	4; 12	20; 29	36; 45	52; 61	5; 12	23; 24	37; 45	55; 56
V	5; 13	21; 28	37; 44	53; 60	4; 13	25; 26	36; 44	57; 58
VI	6; 14	22; 27	38; 43	54; 59	3; 14	27; 28	35; 43	59; 60
VII	7; 15	23; 26	39; 42	55; 58	2; 15	29; 30	34; 42	61; 62
VIII	8; 16	24; 25	40; 41	56; 57	1; 16	31; 32	33; 41	63; 64

Примітка:

- 1) Інтервал часу тривалості перехідного процесу задати 1300 с.

Таблиця А.2 – Варіанти завдання для лабораторної роботи №2

№ бригади	Варіанти для групи Т*_*1					Варіанти для групи Т*_*2				
	І ланка		Варіанти ІІ ланки			І ланка		Варіанти ІІ ланки		
	інерційна 1-го порядку		інерційна 1-го порядку		інтегруюча	інерційна 1-го порядку		інерційна 1-го порядку		інтегруюча
	К	Т, с	К	Т, с	Ті, с	К	Т, с	К	Т, с	Ті, с
I	1,97	105	0,7	75	80	0,45	106	1,225	90	85
			0,9	100	36			0,95	80	55
II	0,45	105	1,25	90	75	0,5	91	1,95	85	90
			0,95	80	34			0,8	65	38
III	0,9	85	1,97	102	85	0,8	105	1,46	105	80
			0,5	70	55			0,7	70	30
IV	0,7	75	1,46	106	76	0,9	80	0,5	51	75
			1,99	67	30			1,97	91	50
V	0,5	91	1,5	110	88	0,7	72	1,5	80	86
			1,8	60	43			1,8	105	40
VI	0,9	106	0,7	62,5	80	0,76	70	0,6	60	26
			1,7	116	62			1,2	90	80
VII	0,5	90	0,9	40	70	0,8	116	1,7	105	80
			1,95	85	30			0,5	55	36
VIII	2,5	75	0,45	106	90	0,9	98	0,76	85	85
			0,8	90	35			0,87	41	55

Примітка:

1) Інтервал часу тривалості перехідного процесу задати 1500 с.

Таблиця А.3 – Варіанти завдання для лабораторної роботи №3

№ бри- гади	Варіанти для групи Т*_*1				Варіанти для групи Т*_*2			
	варіанти ланок			коэф. зворотного зв'язку	варіанти ланок			коэф. зворотного зв'язку
	інерційна 1-го порядку		інтегруюча		інерційна 1-го порядку		інтегруюча	
К	Т, с	Ті, с	Кзз	К	Т, с	Ті, с	Кзз	
I	0,45	105	80	0,4; 0,6; 0,8; 1	1,4	106	85	0,3; 0,5; 0,75; 1
II	0,9	85	36	0,3; 0,5; 0,75; 1	0,5	91	65	0,4; 0,6; 0,8; 1
III	0,7	105	85	0,4; 0,6; 0,8; 1	0,7	72	90	0,3; 0,5; 0,75; 1
IV	0,5	91	55	0,3; 0,5; 0,75; 1	0,8	105	75	0,4; 0,6; 0,8; 1
V	1,2	110	88	0,4; 0,6; 0,8; 1	0,45	80	51	0,3; 0,5; 0,75; 1
VI	0,9	106	80	0,3; 0,5; 0,75; 1	0,76	70	60	0,4; 0,6; 0,8; 1
VII	0,5	90	70	0,4; 0,6; 0,8; 1	0,6	80	90	0,3; 0,5; 0,75; 1
VIII	1,2	75	90	0,3; 0,5; 0,75; 1	0,8	116	85	0,4; 0,6; 0,8; 1

Примітка:

- 1) Інтервал часу тривалості перехідного процесу задати 2000 с.
- 2) Провести дослідження з вхідним збуренням $X^0_{вх}=1$.
- 3) Повторити дослід з $X^0_{вх}=0,5$ з жорстким зворотнім зв'язком $K_{зз}=1$ для обох варіантів ланок.

Таблиця А.4 – Варіанти завдання для лабораторної роботи №4

№ бригади	Варіанти для групи Т*_*1						Варіанти для групи Т*_*2					
	I ланка		Варіанти II ланки			III ланка	I ланка		Варіанти II ланки			III ланка
	інерційна 1-го порядку		інерційна 1-го порядку		інтегруюча	пропорційна	інерційна 1-го порядку		інерційна 1-го порядку		інтегруюча	пропорційна
	К	Т, с	К	Т, с	Ті, с	К	К	Т, с	К	Т, с	Ті, с	К
I	0,9	85	1,2	75	90	10	0,9	85	1,4	110	90	10
II	0,95	70	1,4	60	80	4,5	0,8	90	1,6	100	80	8
III	1,85	90	1,5	105	75	10	1,5	105	0,85	50	75	10
IV	1,65	90	1,4	120	70	4,5	1,25	110	1,4	60	70	15
V	0,85	60	1,5	80	85	5	0,7	50	1,5	85	85	8
VI	0,75	60	1,6	90	95	5,5	1,35	102	0,9	75	60	12
VII	1,5	100	1,2	50	70	8	1,2	115	1,3	96	95	14
VIII	1,9	95	1,7	70	75	7	1,7	125	0,85	85	70	10

Примітка:

- 1) Інтервал часу тривалості перехідного процесу задати 1600 с.
- 2) Провести дослідження з вхідним збуренням $X_{вх}^0=1$ та 0,5.
- 3) Повторити дослід з $X_{вх}^0=1$ збільшивши значення сталої часу Т (часу інтегрування T_i) в два рази.

Таблиця А.5 – Варіанти завдання для лабораторної роботи №5

№ бригади	Варіанти для групи Т*-*1							Варіанти для групи Т*-*2						
	Характеристики інерційних ланок 1-го порядку						Коеф. зворотного зв'язку	Характеристики інерційних ланок 1-го порядку						Коеф. зворотного зв'язку
	К ₁	Т ₁	К ₂	Т ₂	К ₃	Т ₃		К ₃₃	К ₁	Т ₁	К ₂	Т ₂	К ₃	
I	0,9	85	1,2	75	0,8	90	0,25	0,9	85	1,4	95	0,6	90	0,25
II	0,95	70	1,4	60	0,7	80	0,5	0,8	90	1,6	55	1	80	0,5
III	1,85	90	1,5	95	0,3	75	0,75	1,5	105	0,85	50	0,9	75	0,75
IV	1,65	90	1,4	85	0,4	70	1	1,25	110	1,4	60	0,4	70	1
V	0,85	60	1,5	80	0,6	85	0,25	0,7	50	1,5	85	0,8	85	0,25
VI	0,75	60	1,6	90	1,1	95	0,5	1,35	102	0,9	75	1	60	0,5
VII	1,5	100	1,2	50	1	70	0,75	1,2	115	1,3	96	1,1	95	0,75
VIII	1,9	95	1,7	70	0,3	75	1	1,7	125	0,85	85	1,2	70	1

Експериментальні дані до 1-ї лабораторної роботи

1 бригада

 $X^0_{вх} = 1,00$

Аперіодична ланка		Підсилююча ланка		Інтегруюча ланка		Диференціююча ланка	
t, с	X _{вих}	t, с	X _{вих}	t, с	X _{вих}	t, с	X _{вих}
0	0,000	0	2,5	0	0,000	0	2,500
10	0,249	10	2,5	10	0,128	10	2,047
20	0,449	20	2,5	20	0,256	20	1,676
30	0,608	30	2,5	30	0,385	30	1,372
40	0,736	40	2,5	40	0,513	40	1,123
50	0,839	50	2,5	50	0,641	50	0,920
60	0,921	60	2,5	60	0,769	60	0,753
70	0,986	70	2,5	70	0,897	70	0,616
80	1,039	80	2,5	80	1,026	80	0,505
90	1,081	90	2,5	90	1,154	90	0,413
100	1,115	100	2,5	100	1,282	100	0,338
110	1,142	110	2,5	110	1,410	110	0,277
120	1,163			120	1,538	120	0,227
130	1,180			130	1,667	130	0,186
140	1,194			140	1,795	140	0,152
150	1,205			150	1,923	150	0,124
160	1,214			160	2,051	160	0,102
170	1,221			170	2,179	170	0,083
180	1,227			180	2,308	180	0,068
190	1,232			190	2,436	190	0,056
200	1,235			200	2,564	200	0,046
210	1,238			210	2,692	210	0,037
220	1,241			220	2,821	220	0,031
230	1,242					230	0,025
240	1,244					240	0,021
250	1,245					250	0,017

260	1,246
270	1,247
280	1,248
290	1,248
300	1,248
310	1,249
320	1,249
330	1,249
340	1,249
350	1,249
360	1,250
370	1,250
380	1,250

260	0,014
270	0,011
280	0,009
290	0,008
300	0,006
310	0,005
320	0,004
330	0,003
340	0,003
350	0,002
360	0,002
370	0,002
380	0,001

2 бригада

$X^0_{вх} = 1,00$

Аперіодична ланка

Підсилююча ланка

Інтегруюча ланка

Диференціююча ланка

t, с	X _{вих}
0	0,000
10	0,236
20	0,429
30	0,587
40	0,716
50	0,822
60	0,908
70	0,979
80	1,038
90	1,085
100	1,124
110	1,156

t, с	X _{вих}
0	1,45
10	1,45
20	1,45
30	1,45
40	1,45
50	1,45
60	1,45
70	1,45
80	1,45
90	1,45
100	1,45
110	1,45

t, с	X _{вих}
0	0,000
10	0,143
20	0,286
30	0,429
40	0,571
50	0,714
60	0,857
70	1,000
80	1,143
90	1,286
100	1,429
110	1,571

t, с	X _{вих}
0	2,000
10	1,693
20	1,433
30	1,213
40	1,027
50	0,869
60	0,736
70	0,623
80	0,527
90	0,446
100	0,378
110	0,320

120	1,182
130	1,203
140	1,221
150	1,235
160	1,247
170	1,257
180	1,264
190	1,271
200	1,276
210	1,281
220	1,284
230	1,287
240	1,289
250	1,291
260	1,293
270	1,294
280	1,295
290	1,296
300	1,297
310	1,297
320	1,298
330	1,298
340	1,299
350	1,299
360	1,299
370	1,299
380	1,299
390	1,299
400	1,300
410	1,300
420	1,300

120	1,714	120	0,271
130	1,857	130	0,229
140	2,000	140	0,194
150	2,143	150	0,164
160	2,286	160	0,139
170	2,429	170	0,118
180	2,571	180	0,100
190	2,714	190	0,084
200	2,857	200	0,071
210	3,000	210	0,060
220	3,143	220	0,051
		230	0,043
		240	0,037
		250	0,031
		260	0,026
		270	0,022
		280	0,019
		290	0,016
		300	0,013
		310	0,011
		320	0,010
		330	0,008
		340	0,007
		350	0,006
		360	0,005
		370	0,004
		380	0,004
		390	0,003
		400	0,003
		410	0,002
		420	0,002

3 бригада

$$X^0_{вх} = 1,00$$

Аперіодична ланка		Підсилююча ланка		Інтегруюча ланка		Диференціююча ланка	
t, с	X _{вих}	t, с	X _{вих}	t, с	X _{вих}	t, с	X _{вих}
0	0,000	0	3	0	0,000	0	3,000
20	0,453	10	3	10	0,109	10	2,572
40	0,824	20	3	20	0,217	20	2,205
60	1,128	30	3	30	0,326	30	1,891
80	1,377	40	3	40	0,435	40	1,621
100	1,580	50	3	50	0,543	50	1,390
120	1,747	60	3	60	0,652	60	1,192
140	1,884	70	3	70	0,761	70	1,022
160	1,995	80	3	80	0,870	80	0,876
180	2,087	90	3	90	0,978	90	0,751
200	2,162	100	3	100	1,087	100	0,644
220	2,223	110	3	110	1,196	110	0,552
240	2,273			120	1,304	120	0,474
260	2,314			130	1,413	130	0,406
280	2,348			140	1,522	140	0,348
300	2,376			150	1,630	150	0,298
320	2,398			160	1,739	160	0,256
340	2,417			170	1,848	170	0,219
360	2,432			180	1,957	180	0,188
380	2,444			190	2,065	190	0,161
400	2,454			200	2,174	200	0,138
420	2,463			210	2,283	210	0,119
440	2,469			220	2,391	220	0,102
460	2,475					230	0,087
480	2,479					240	0,075

500	2,483	250	0,064
520	2,486	260	0,055
540	2,489	270	0,047
560	2,491	280	0,040
580	2,492	290	0,035
600	2,494	300	0,030
620	2,495	310	0,025
640	2,496	320	0,022
660	2,497	330	0,019
680	2,497	340	0,016
700	2,498	350	0,014
720	2,498	360	0,012
740	2,498	370	0,010
760	2,499	380	0,009
780	2,499	390	0,007
800	2,499	400	0,006
820	2,499	410	0,005
840	2,499	420	0,005

4 бригада

$X^0_{вх} = 1,00$

Аперіодична ланка

Підсилююча ланка

Інтегруюча ланка

Диференціююча ланка

t, с	X _{вих}	t, с	X _{вих}	t, с	X _{вих}	t, с	X _{вих}
0	0,000	0	17	0	0,000	0	0,750
10	0,250	10	17	10	0,069	10	0,656
20	0,468	20	17	20	0,138	20	0,574
30	0,659	30	17	30	0,207	30	0,503
40	0,827	40	17	40	0,276	40	0,440
50	0,973	50	17	50	0,345	50	0,385
60	1,101	60	17	60	0,414	60	0,337
70	1,214	70	17	70	0,483	70	0,295
80	1,312	80	17	80	0,552	80	0,258
90	1,398	90	17	90	0,621	90	0,226
100	1,473	100	17	100	0,690	100	0,198
110	1,539	110	17	110	0,759	110	0,173
120	1,596			120	0,828	120	0,151
130	1,647			130	0,897	130	0,133
140	1,691			140	0,966	140	0,116
150	1,729			150	1,034	150	0,102
160	1,763			160	1,103	160	0,089
170	1,793			170	1,172	170	0,078
180	1,819			180	1,241	180	0,068
190	1,841			190	1,310	190	0,060
200	1,861			200	1,379	200	0,052
210	1,878			210	1,448	210	0,046
220	1,894			220	1,517	220	0,040
230	1,907					230	0,035
240	1,918					240	0,031

250	1,929	250	0,027
260	1,938	260	0,023
270	1,945	270	0,020
280	1,952	280	0,018
290	1,958	290	0,016
300	1,963	300	0,014
310	1,968	310	0,012
320	1,972	320	0,011
330	1,975	330	0,009
340	1,979	340	0,008
350	1,981	350	0,007
360	1,984	360	0,006
370	1,986	370	0,005
380	1,987	380	0,005
390	1,989	390	0,004
400	1,990	400	0,004
410	1,992	410	0,003
420	1,993	420	0,003
430	1,993	430	0,002
440	1,994	440	0,002
450	1,994		
460	1,994		

Експериментальні дані до 2-ї лабораторної роботи

1 брига-
да $X_{вх} = 1,00$

Послідовне з'єднання двох інерційних ланок першого порядку

$K_1 =$	1,55	$T_1 =$	110	с
$K_2 =$	1,05	$T_2 =$	100	с

t, с	$X_{вих1}$	t, с	$X_{вих1}$
0	0,000	520	1,559
10	0,007	530	1,564
20	0,026	540	1,569
30	0,055	550	1,573
40	0,092	560	1,578
50	0,135	570	1,581
60	0,184	580	1,585
70	0,235	590	1,588
80	0,289	600	1,591
90	0,345	610	1,594
100	0,402	620	1,597
110	0,459	630	1,599
120	0,516	640	1,601
130	0,572	650	1,603
140	0,627	660	1,605
150	0,681	670	1,607
160	0,733	680	1,609
170	0,784	690	1,610
180	0,832	700	1,611
190	0,879	710	1,613
200	0,924	720	1,614
210	0,967	730	1,615

Послідовне з'єднання інерційної ланки першого порядку з інтегруючою

$K =$	1,55	$T =$	110	с
		$T_i =$	100	с

t, с	$X_{вих2}$
0	0,000
30	0,037
60	0,138
90	0,285
120	0,470
150	0,681
180	0,914
210	1,163
240	1,424
270	1,694
300	1,972
330	2,255
360	2,542
390	2,832
420	3,124
450	3,418
480	3,714
510	4,011
540	4,308
570	4,606
600	4,905
630	5,204

220	1,008	740	1,616	660	5,503
230	1,047	750	1,617	690	5,802
240	1,084	760	1,618	720	6,102
250	1,119	770	1,619	750	6,401
260	1,152	780	1,619	780	6,701
270	1,183	790	1,620	810	7,001
280	1,213	800	1,621	840	7,301
290	1,241	810	1,621	870	7,600
300	1,267	820	1,622	900	7,900
310	1,292	830	1,622	930	8,200
320	1,315	840	1,623	960	8,500
330	1,336	850	1,623	990	8,800
340	1,357	860	1,623	1020	9,100
350	1,376	870	1,624	1050	9,400
360	1,394	880	1,624	1080	9,700
370	1,410	890	1,624	1110	10,000
380	1,426	900	1,625	1140	10,300
390	1,440	910	1,625	1170	10,600
400	1,454	920	1,625	1200	10,900
410	1,467	930	1,625	1230	11,200
420	1,478			1260	11,500
430	1,489			1290	11,800
440	1,499			1320	12,100
450	1,509			1350	12,400
460	1,518			1380	12,700
470	1,526			1410	13,000
480	1,534			1440	13,300
490	1,541			1470	13,600
500	1,547			1500	13,900
510	1,553				

**2 брига-
да**

$X_{вх} = 1,00$

Послідовне з'єднання двох інерційних ланок першого порядку

$K_1 = 1,50$ $T_1 = 105$ с
 $K_2 = 1,05$ $T_2 = 95$ с

t, с	$X_{вих1}$	t, с	$X_{вих1}$
0	0,000	520	1,521
10	0,007	530	1,525
20	0,028	540	1,529
30	0,058	550	1,533
40	0,097	560	1,536
50	0,142	570	1,539
60	0,192	580	1,542
70	0,246	590	1,545
80	0,302	600	1,547
90	0,359	610	1,550
100	0,417	620	1,552
110	0,475	630	1,554
120	0,532	640	1,555
130	0,588	650	1,557
140	0,643	660	1,559
150	0,697	670	1,560
160	0,749	680	1,561
170	0,799	690	1,562
180	0,846	700	1,563
190	0,892	710	1,564
200	0,936	720	1,565
210	0,977	730	1,566
220	1,017	740	1,567
230	1,054	750	1,568

Послідовне з'єднання інерційної ланки першого порядку з інтегруючою

$K = 1,55$ $T = 100$ с
 $T_i = 110$ с

t, с	$X_{вих2}$
0	0,000
30	0,037
60	0,135
90	0,279
120	0,456
150	0,657
180	0,878
210	1,111
240	1,355
270	1,607
300	1,863
330	2,124
360	2,388
390	2,655
420	2,923
450	3,192
480	3,462
510	3,733
540	4,004
570	4,276
600	4,548
630	4,820
660	5,092
690	5,365

240	1,089	760	1,568	720	5,637
250	1,123	770	1,569	750	5,910
260	1,154	780	1,569	780	6,182
270	1,183	790	1,570	810	6,455
280	1,211	800	1,570	840	6,727
290	1,237	810	1,571	870	7,000
300	1,261	820	1,571	900	7,273
310	1,284	830	1,571	930	7,546
320	1,305			960	7,818
330	1,325			990	8,091
340	1,344			1020	8,364
350	1,361			1050	8,636
360	1,377			1080	8,909
370	1,392			1110	9,182
380	1,406			1140	9,455
390	1,419			1170	9,727
400	1,431			1200	10,000
410	1,442			1230	10,273
420	1,452			1260	10,545
430	1,462			1290	10,818
440	1,470			1320	11,091
450	1,479			1350	11,364
460	1,486			1380	11,636
470	1,493			1410	11,909
480	1,500			1440	12,182
490	1,506			1470	12,455
500	1,511			1500	12,727
510	1,516				

**3 брига-
да**

$X_{вх} = 1,00$

Послідовне з'єднання двох інерційних ланок першого порядку

$K_1 = 1,25$ $T_1 = 100$ с
 $K_2 = 1,05$ $T_2 = 95$ с

t, с	$X_{вих1}$	t, с	$X_{вих1}$
0	0,000	520	1,272
10	0,006	530	1,276
20	0,024	540	1,279
30	0,051	550	1,282
40	0,084	560	1,284
50	0,124	570	1,286
60	0,167	580	1,289
70	0,213	590	1,291
80	0,261	600	1,293
90	0,310	610	1,294
100	0,359	620	1,296
110	0,409	630	1,297
120	0,457	640	1,298
130	0,505	650	1,300
140	0,552	660	1,301
150	0,597	670	1,302
160	0,641	680	1,303
170	0,683	690	1,304
180	0,723	700	1,304
190	0,761	710	1,305
200	0,798	720	1,306
210	0,832	730	1,306
220	0,865	740	1,307
230	0,896	750	1,307

Послідовне з'єднання інерційної ланки першого порядку з інтегруючою

$K = 1,00$ $T = 110$ с
 $T_i = 110$ с

t, с	$X_{вих2}$
0	0,000
30	0,034
60	0,125
90	0,259
120	0,427
150	0,619
180	0,831
210	1,057
240	1,295
270	1,540
300	1,793
330	2,050
360	2,311
390	2,574
420	2,840
450	3,108
480	3,376
510	3,646
540	3,916
570	4,187
600	4,459
630	4,731
660	5,002
690	5,275

240	0,925	760	1,308	720	5,547
250	0,952	770	1,308	750	5,819
260	0,978	780	1,309	780	6,092
270	1,002	790	1,309	810	6,364
280	1,025	800	1,309	840	6,637
290	1,046	810	1,309	870	6,909
300	1,066	820	1,310	900	7,182
310	1,084	830	1,310	930	7,455
320	1,101	840	1,310	960	7,727
330	1,117	850	1,310	990	8,000
340	1,132			1020	8,273
350	1,146			1050	8,546
360	1,159			1080	8,818
370	1,171			1110	9,091
380	1,182			1140	9,364
390	1,192			1170	9,636
400	1,202			1200	9,909
410	1,211			1230	10,182
420	1,219			1260	10,455
430	1,226			1290	10,727
440	1,233			1320	11,000
450	1,239			1350	11,273
460	1,245			1380	11,545
470	1,251			1410	11,818
480	1,256			1440	12,091
490	1,261			1470	12,364
500	1,265			1500	12,636
510	1,269				

**4 брига-
да**

$X_{вх} = 1,00$

Послідовне з'єднання двох інерційних ланок першого порядку

$K_1 = 2,25$ $T_1 = 100$ с
 $K_2 = 1,33$ $T_2 = 75$ с

t, с	X _{вих1}	t, с	X _{вих1}
0	0,000	520	2,935
10	0,018	530	2,940
20	0,068	540	2,945
30	0,143	550	2,949
40	0,235	560	2,953
50	0,342	570	2,957
60	0,457	580	2,960
70	0,579	590	2,963
80	0,704	600	2,966
90	0,830	610	2,968
100	0,955	620	2,971
110	1,079	630	2,973
120	1,200	640	2,974
130	1,317	650	2,976
140	1,429	660	2,978
150	1,537	670	2,979
160	1,639	680	2,980
170	1,736	690	2,981
180	1,828	700	2,982
190	1,915	710	2,983
200	1,996	720	2,984
210	2,073	730	2,985
220	2,144	740	2,986
230	2,211	750	2,986

Послідовне з'єднання інерційної ланки першого порядку з інтегруючою

$K = 1,55$ $T = 150$ с
 $T_i = 50$ с

t, с	X _{вих1}
0	0,000
30	0,056
60	0,211
90	0,446
120	0,748
150	1,104
180	1,504
210	1,940
240	2,406
270	2,896
300	3,406
330	3,932
360	4,472
390	5,023
420	5,582
450	6,149
480	6,722
510	7,300
540	7,882
570	8,467
600	9,055
630	9,645
660	10,237
690	10,830

240	2,273	760	2,987	720	11,425
250	2,330	770	2,987	750	12,020
260	2,384	780	2,988	780	12,617
270	2,433	790	2,988	810	13,214
280	2,479	800	2,989	840	13,811
290	2,522	810	2,989	870	14,409
300	2,561	820	2,989	900	15,007
310	2,597	830	2,990	930	15,606
320	2,631	840	2,990	960	16,205
330	2,661	850	2,990	990	16,804
340	2,689			1020	17,403
350	2,715			1050	18,003
360	2,739			1080	18,602
370	2,761			1110	19,202
380	2,781			1140	19,802
390	2,800			1170	20,401
400	2,817			1200	21,001
410	2,832			1230	21,601
420	2,846			1260	22,201
430	2,859			1290	22,801
440	2,871			1320	23,400
450	2,882			1350	24,000
460	2,892			1380	24,600
470	2,901			1410	25,200
480	2,909			1440	25,800
490	2,916			1470	26,400
500	2,923			1500	27,000
510	2,930				

Експериментальні дані до 3-ї лабораторної роботи

Бригада 1

 $X_{вх} = 1,00 \quad K = 1,55 \quad T = 112 \quad c$

Інерційна ланка першого порядку зі зворотнім зв'язком

 $K_{зз1} = 1,00$ $K_{зз2} = 0,75$ $K_{зз3} = 0,45$

t, c	X _{вих1}	X _{вих2}	X _{вих3}
0	0,000	0,000	0,000
10	0,124	0,126	0,128
20	0,222	0,230	0,239
30	0,301	0,315	0,334
40	0,363	0,386	0,415
50	0,413	0,444	0,485
60	0,453	0,492	0,545
70	0,484	0,531	0,597
80	0,509	0,564	0,642
90	0,530	0,591	0,680
100	0,545	0,613	0,713
110	0,558	0,631	0,741
120	0,568	0,646	0,765
130	0,576	0,659	0,786
140	0,583	0,669	0,804
150	0,588	0,677	0,819
160	0,592	0,684	0,832
170	0,595	0,690	0,844
180	0,598	0,695	0,853
190	0,600	0,698	0,862
200	0,601	0,702	0,869
210	0,603	0,704	0,875
220	0,604	0,707	0,881
230	0,605	0,708	0,885
240	0,605	0,710	0,889
250	0,606	0,711	0,892
260	0,606	0,712	0,895
270	0,607	0,713	0,898
280	0,607	0,714	0,900
290	0,607	0,714	0,902
300	0,607	0,715	0,903
310	0,607	0,715	0,905
320	0,607	0,715	0,906
330	0,608	0,716	0,907
340	0,608	0,716	0,908
350	0,608	0,716	0,909
360	0,608	0,716	0,909
370	0,608	0,716	0,910

 $X_{вх} = 1,00 \quad T = 110 \quad c$

Інтегруюча ланка зі зворотнім зв'язком

 $K_{зз1} = 1,00$ $K_{зз2} = 0,75$ $K_{зз3} = 0,50$

t, c	X _{вих1}	X _{вих2}	X _{вих3}
0	0,000	0,000	0,000
30	0,239	0,247	0,255
60	0,420	0,448	0,477
90	0,559	0,611	0,671
120	0,664	0,745	0,841
150	0,744	0,854	0,989
180	0,805	0,943	1,118
210	0,852	1,015	1,230
240	0,887	1,074	1,328
270	0,914	1,122	1,414
300	0,935	1,161	1,489
330	0,950	1,193	1,554
360	0,962	1,219	1,611
390	0,971	1,240	1,660
420	0,978	1,257	1,704
450	0,983	1,271	1,741
480	0,987	1,283	1,774
510	0,990	1,292	1,803
540	0,993	1,300	1,828
570	0,994	1,306	1,850
600	0,996	1,311	1,869
630	0,997	1,315	1,886
660	0,998	1,319	1,900
690	0,998	1,321	1,913
720	0,999	1,323	1,924
750	0,999	1,325	1,934
780	0,999	1,327	1,942
810	0,999	1,328	1,950
840	1,000	1,329	1,956
870	1,000	1,330	1,962
900	1,000	1,330	1,967
930	1,000	1,331	1,971
960	1,000	1,331	1,975
990	1,000	1,332	1,978
1020	1,000	1,332	1,981
1050	1,000	1,332	1,983
1080	1,000	1,332	1,985
1110	1,000	1,333	1,987

380	0,608	0,716	0,910	1140	1,000	1,333	1,989
390	0,608	0,716	0,911	1170	1,000	1,333	1,990
400	0,608	0,716	0,911	1200	1,000	1,333	1,991
410	0,608	0,717	0,911	1230	1,000	1,333	1,993
420	0,608	0,717	0,912	1260	1,000	1,333	1,993
430	0,608	0,717	0,912	1290	1,000	1,333	1,994
440	0,608	0,717	0,912	1320	1,000	1,333	1,995
450	0,608	0,717	0,912	1350	1,000	1,333	1,996
460	0,608	0,717	0,912	1380	1,000	1,333	1,996
470	0,608	0,717	0,912	1410	1,000	1,333	1,997
480	0,608	0,717	0,912	1440	1,000	1,333	1,997
490	0,608	0,717	0,913	1470	1,000	1,333	1,997
500	0,608	0,717	0,913	1500	1,000	1,333	1,998
510	0,608	0,717	0,913	1530	1,000	1,333	1,998

Бригада 2

$X_{вх} = 1,00$ $K = 1,35$ $T = 100$ с

Інерційна ланка першого порядку зі зворотнім зв'язком

$$K_{331} = 1,00$$

$$K_{332} = 0,75$$

$$K_{333} = 0,45$$

$X_{вх} = 0,95$ $T = 85$ с

Інтегруюча ланка зі зворотнім зв'язком

$$K_{331} = 1,00$$

$$K_{332} = 0,75$$

$$K_{333} = 0,55$$

t, с	$X_{вих1}$	$X_{вих2}$	$X_{вих3}$
0	0,000	0,000	0,000
10	0,120	0,122	0,125
20	0,215	0,222	0,231
30	0,291	0,304	0,321
40	0,350	0,371	0,398
50	0,397	0,426	0,464
60	0,434	0,470	0,520
70	0,464	0,507	0,567
80	0,487	0,537	0,608
90	0,505	0,561	0,642
100	0,520	0,581	0,672
110	0,531	0,597	0,697
120	0,540	0,611	0,718
130	0,547	0,622	0,736
140	0,553	0,631	0,751
150	0,558	0,638	0,764
160	0,561	0,644	0,776
170	0,564	0,649	0,785
180	0,566	0,653	0,793
190	0,568	0,656	0,800
200	0,569	0,659	0,806
210	0,570	0,661	0,811

t, с	$X_{вих1}$	$X_{вих2}$	$X_{вих3}$
0	0,000	0,000	0,000
30	0,283	0,295	0,305
60	0,481	0,521	0,556
90	0,620	0,694	0,762
120	0,718	0,827	0,933
150	0,787	0,929	1,073
180	0,836	1,008	1,188
210	0,870	1,068	1,283
240	0,894	1,114	1,362
270	0,910	1,150	1,426
300	0,922	1,177	1,479
330	0,930	1,198	1,523
360	0,936	1,214	1,559
390	0,940	1,226	1,589
420	0,943	1,236	1,613
450	0,945	1,243	1,633
480	0,947	1,248	1,650
510	0,948	1,253	1,664
540	0,948	1,256	1,675
570	0,949	1,258	1,684
600	0,949	1,260	1,692
630	0,949	1,262	1,698

220	0,571	0,663	0,815	660	0,950	1,263	1,703
230	0,572	0,664	0,819	690	0,950	1,264	1,707
240	0,572	0,665	0,822	720	0,950	1,264	1,711
250	0,573	0,666	0,825	750	0,950	1,265	1,714
260	0,573	0,667	0,827	780	0,950	1,265	1,716
270	0,573	0,668	0,829	810	0,950	1,266	1,718
280	0,574	0,668	0,830	840	0,950	1,266	1,720
290	0,574	0,669	0,832	870	0,950	1,266	1,721
300	0,574	0,669	0,833	900	0,950	1,266	1,722
310	0,574	0,669	0,834	930	0,950	1,266	1,723
320	0,574	0,670	0,835	960	0,950	1,266	1,724
330	0,574	0,670	0,836	990	0,950	1,266	1,724
340	0,574	0,670	0,836	1020	0,950	1,267	1,725
350	0,574	0,670	0,837	1050	0,950	1,267	1,725
360	0,574	0,670	0,837	1080	0,950	1,267	1,726
370	0,574	0,670	0,838	1110	0,950	1,267	1,726
380	0,574	0,670	0,838	1140	0,950	1,267	1,726
390	0,574	0,671	0,838	1170	0,950	1,267	1,726
400	0,574	0,671	0,838	1200	0,950	1,267	1,727
				1230	0,950	1,267	1,727
				1260	0,950	1,267	1,727
				1290	0,950	1,267	1,727
				1320	0,950	1,267	1,727
				1350	0,950	1,267	1,727
				1380	0,950	1,267	1,727
				1410	0,950	1,267	1,727
				1440	0,950	1,267	1,727
				1470	0,950	1,267	1,727

Бригада 3

$X_{вх} = 1,00$ $K = 2,55$ $T = 76$ с
Інерційна ланка першого порядку зі зворотнім зв'язком

$K_{зз1} = 1,00$
 $K_{зз2} = 0,75$
 $K_{зз3} = 0,45$

$X_{вх} = 1,00$ $T = 66$ с
Інтегруюча ланка зі зворотнім зв'язком

$K_{зз1} = 1,00$
 $K_{зз2} = 0,75$
 $K_{зз3} = 0,55$

t, с	$X_{вих1}$	$X_{вих2}$	$X_{вих3}$
0	0,000	0,000	0,000
10	0,268	0,279	0,292
20	0,436	0,469	0,513
30	0,541	0,598	0,679
40	0,607	0,686	0,804
50	0,649	0,747	0,898
60	0,675	0,788	0,970
70	0,691	0,816	1,023

t, с	$X_{вих1}$	$X_{вих2}$	$X_{вих3}$
0	0,000	0,000	0,000
20	0,261	0,271	0,279
40	0,455	0,487	0,515
60	0,597	0,659	0,715
80	0,702	0,796	0,885
100	0,780	0,905	1,028
120	0,838	0,992	1,149
140	0,880	1,062	1,252

80	0,701	0,835	1,064	160	0,911	1,117	1,339
90	0,708	0,848	1,094	180	0,935	1,161	1,412
100	0,712	0,857	1,117	200	0,952	1,196	1,475
110	0,714	0,863	1,134	220	0,964	1,224	1,527
120	0,716	0,867	1,147	240	0,974	1,246	1,572
130	0,717	0,870	1,157	260	0,981	1,264	1,610
140	0,717	0,871	1,165	280	0,986	1,278	1,642
150	0,718	0,873	1,170	300	0,989	1,289	1,669
160	0,718	0,874	1,175	320	0,992	1,298	1,692
170	0,718	0,874	1,178	340	0,994	1,305	1,711
180	0,718	0,875	1,180	360	0,996	1,311	1,728
190	0,718	0,875	1,182	380	0,997	1,316	1,742
200	0,718	0,875	1,183	400	0,998	1,319	1,753
210	0,718	0,875	1,184	420	0,998	1,322	1,763
220	0,718	0,875	1,185	440	0,999	1,324	1,772
230	0,718	0,875	1,186	460	0,999	1,326	1,779
240	0,718	0,875	1,186	480	0,999	1,328	1,785
250	0,718	0,875	1,186	500	0,999	1,329	1,790
260	0,718	0,875	1,187	520	1,000	1,330	1,794
270	0,718	0,876	1,187	540	1,000	1,330	1,798
280	0,718	0,876	1,187	560	1,000	1,331	1,801
290	0,718	0,876	1,187	580	1,000	1,332	1,804
300	0,718	0,876	1,187	600	1,000	1,332	1,806
310	0,718	0,876	1,187	620	1,000	1,332	1,808
320	0,718	0,876	1,187	640	1,000	1,332	1,809
330	0,718	0,876	1,187	660	1,000	1,333	1,811
340	0,718	0,876	1,187	680	1,000	1,333	1,812
350	0,718	0,876	1,187	700	1,000	1,333	1,813
360	0,718	0,876	1,187	720	1,000	1,333	1,814
370	0,718	0,876	1,187	740	1,000	1,333	1,814
380	0,718	0,876	1,187	760	1,000	1,333	1,815

Бригада 4

Хвх= 1,00 К= 2,85 Т= 33 с

Інерційна ланка першого порядку зі зворотнім зв'язком

Кзз1= 1,00

Кзз2= 0,75

Кзз3= 0,45

Хвх= 1,00 Т= 35 с

Інтегруюча ланка зі зворотнім зв'язком

Кзз1= 1,00

Кзз2= 0,75

Кзз3= 0,50

t, с	Хвих1	Хвих2	Хвих3
0	0,000	0,000	0,000
10	0,510	0,557	0,623
20	0,668	0,773	0,936
30	0,718	0,856	1,092
40	0,733	0,888	1,170
50	0,738	0,901	1,209
60	0,740	0,905	1,229
70	0,740	0,907	1,239
80	0,740	0,908	1,244
90	0,740	0,908	1,246
100	0,740	0,908	1,247
110	0,740	0,908	1,248
120	0,740	0,908	1,248
130	0,740	0,908	1,248
140	0,740	0,908	1,249
150	0,740	0,908	1,249
160	0,740	0,908	1,249
170	0,740	0,908	1,249
180	0,740	0,908	1,249
190	0,740	0,908	1,249
200	0,740	0,908	1,249
210	0,740	0,908	1,249
220	0,740	0,908	1,249

t, с	Хвих1	Хвих2	Хвих3
0	0,000	0,000	0,000
20	0,435	0,465	0,497
40	0,681	0,768	0,871
60	0,820	0,965	1,151
80	0,898	1,093	1,362
100	0,943	1,177	1,521
120	0,968	1,231	1,640
140	0,982	1,267	1,729
160	0,990	1,290	1,797
180	0,994	1,305	1,847
200	0,997	1,315	1,885
220	0,998	1,321	1,914
240	0,999	1,326	1,935
260	0,999	1,328	1,951
280	1,000	1,330	1,963
300	1,000	1,331	1,972
320	1,000	1,332	1,979
340	1,000	1,332	1,984
360	1,000	1,333	1,988
380	1,000	1,333	1,991
400	1,000	1,333	1,993
420	1,000	1,333	1,995
440	1,000	1,333	1,996
460	1,000	1,333	1,997
480	1,000	1,333	1,998
500	1,000	1,333	1,998
520	1,000	1,333	1,999
540	1,000	1,333	1,999
560	1,000	1,333	1,999
580	1,000	1,333	1,999
600	1,000	1,333	2,000
620	1,000	1,333	2,000
640	1,000	1,333	2,000

Експериментальні дані до 4-ї лабораторної роботи

Бригада №1

Коливальна система ланок

$X_{вх} =$	1,00			
$K_1 =$	1,90	$T_1 =$	20	20
$K_2 =$	0,80	$T_2 =$	60	80
$K_3 =$	1,00			

t, c	$X_{вих1}$	$X_{вих2}$
0	1,494736833	1,50109406
1	1,505852315	1,50930957
2	1,527559782	1,52502506
3	1,53975644	1,53366642
4	1,533300985	1,52924977
5	1,516331003	1,51785592
6	1,50487321	1,5103303
7	1,50799186	1,51229975
8	1,520980422	1,52038706
9	1,531318471	1,52668293
10	1,530504008	1,52621811
11	1,52078939	1,52060896
12	1,511750556	1,51550453
13	1,511049698	1,51510545
14	1,518126815	1,51889436
15	1,525825547	1,52292615
16	1,527452941	1,52376661
17	1,522458203	1,52128751
18	1,516049781	1,51817517
19	1,513923727	1,51716144
20	1,517307932	1,51871831
21	1,522530837	1,52107069
22	1,524854494	1,52209635
23	1,52268879	1,52117335
24	1,518517471	1,51943103
25	1,516199358	1,51848297
26	1,517465511	1,51898238
27	1,520730172	1,52024695
28	1,522913523	1,52107464
29	1,522292625	1,52084867
30	1,519790886	1,51995005
31	1,517817063	1,51925632
32	1,51799138	1,51931368
33	1,519865034	1,51993774
34	1,52159352	1,52050103

35	1,521713824	1,52054092
36	1,52034672	1,52011873
37	1,518872518	1,51967324
38	1,518571166	1,51958326
39	1,519537887	1,51986001
40	1,520766496	1,52020431
41	1,521166231	1,5203144
42	1,52050953	1,52014016
43	1,519507069	1,51987966
44	1,519067232	1,51976756
45	1,519489079	1,51987124
46	1,520290593	1,52006439
47	1,520731101	1,52016839
48	1,520482884	1,52011194
49	1,519854874	1,5199716
50	1,519438874	1,51988058
51	1,519562328	1,51990647
52	1,520044157	1,52000632
53	1,520420979	1,52008275

Бригада №2

Коливальна система ланок

$X_{вх} =$	1,00			
$K_1 =$	2,00	$T_1 =$	35	20
$K_2 =$	1,00	$T_2 =$	60	80
$K_3 =$	2,00			

t, c	X_{вих1}	X_{вих2}
0	3,933352995	3,95024752
1	3,963520755	3,9718673
2	4,02499503	4,01322385
3	4,061092078	4,03596428
4	4,04061951	4,02434149
5	3,984660162	3,99435767
6	3,945146674	3,97455343
7	3,956765391	3,97973619
8	4,006641751	4,00101859
9	4,048171549	4,01758665
10	4,044471196	4,01636344
11	4,001024586	4,00160254
12	3,958734898	3,98816981
13	3,955511558	3,98711961
14	3,992380906	3,99709043
15	4,03432781	4,0077004
16	4,043452567	4,00991212
17	4,013132488	4,00338818

18	3,972472262	3,99519783
19	3,958468051	3,99253011
20	3,982417715	3,99662713
21	4,021006745	4,00281761
22	4,038892853	4,00551672
23	4,021008731	4,00308775
24	3,985119289	3,9985027
25	3,964304205	3,9960078
26	3,97652926	3,99732205
27	4,009240355	4,00064986
28	4,032092533	4,00282799
29	4,025041956	4,00223334
30	3,995847475	3,99986855
31	3,97177632	3,99804295
32	3,974193	3,99819389
33	3,999661885	3,99983616
34	4,024216907	4,00131851
35	4,025857966	4,00142346
36	4,004207109	4,00031245
37	3,979814302	3,99914011
38	3,974708766	3,99890332
39	3,992551975	3,99963162
40	4,016228604	4,00053765
41	4,024204598	4,00082736
42	4,010070147	4,00036885
43	3,987571041	3,9996833
44	3,97730523	3,99938832
45	3,987903898	3,99966115
46	4,00885499	4,00016945
47	4,020855241	4,00044313
48	4,013559508	4,00029459
49	3,994439729	3,99992526
50	3,981225487	3,99968573
51	3,985497324	3,99975388
52	4,002584459	4,00001662
53	4,016534691	4,00021777

Бригада №3

Колливална система ланок

$X_{вх} =$	1,00			
$K_1 =$	2,50	$T_1 =$	35	25
$K_2 =$	1,00	$T_2 =$	75	85
$K_3 =$	2,00			
t, с	$X_{вих1}$	$X_{вих2}$		
0	4,933364161	4,94131103		

1	4,963416094	4,9672289
2	5,024337213	5,01814024
3	5,059917545	5,04691856
4	5,039903884	5,03153582
5	4,985461553	4,99088633
6	4,947229105	4,96327295
7	4,958369227	4,97087484
8	5,00600638	5,00265192
9	5,045453311	5,02809908
10	5,041987045	5,02605438
11	5,001250014	5,00177866
12	4,961816539	4,97905438
13	4,95880657	4,97730062
14	4,992743615	4,99536474
15	5,031142082	5,01513318
16	5,039463475	5,01932445
17	5,012066535	5,00630125
18	4,975526346	4,9894946
19	4,963000794	4,98389365
20	4,984243704	4,99290845
21	5,01828873	5,00689862
22	5,033987814	5,01315471
23	5,018417862	5,00725971
24	4,98733324	4,99584747
25	4,969400713	4,98947099
26	4,979845345	4,99299432
27	5,007659249	5,00211717
28	5,026984882	5,00825237
29	5,021076754	5,00648371
30	4,996706897	4,99934299
31	4,97672366	4,99367742
32	4,978703084	4,99419013
33	4,999574066	4,99965292
34	5,019585742	5,00472069
35	5,020927207	5,00506899
36	5,003509887	5,00099728
37	4,983994106	4,99658243
38	4,9799238	4,99567912
39	4,994014752	4,9986206
40	5,012611158	5,00237879
41	5,018846748	5,00360565
42	5,007889868	5,00156398
43	4,990541389	4,99843185
44	4,982665728	4,99705167
45	4,990729938	4,99839209
46	5,006589463	5,00095007
47	5,015625529	5,00236265

48	5,010177993	5,00155609
49	4,995969344	4,99950882
50	4,986202184	4,99814588
51	4,989330672	4,99855678
52	5,001796549	5,00016127
53	5,011918547	5,00142252

Бригада №4

Коливальна система ланок

X _{вх} =	1,00			
K ₁ =	1,00	T ₁ =	35	40
K ₂ =	2,00	T ₂ =	100	125
K ₃ =	3,00			

t, с	X _{вих1}	X _{вих2}
0	5,940049501	5,95203634
1	5,96692535	5,97356035
2	6,020939373	6,0168826
3	6,052204443	6,04199736
4	6,034858932	6,02803053
5	5,988050488	5,9902886
6	5,955477223	5,96398374
7	5,964824877	5,97155287
8	6,004541992	6,00374684
9	6,037129622	6,03020308
10	6,034332314	6,0279223
11	6,001397287	6,00108405
12	5,969808526	5,97530266
13	5,967391617	5,97333152
14	5,99399685	5,99512696
15	6,023824559	6,01960017
16	6,030248159	6,02487566
17	6,00942247	6,00772402
18	5,981897849	5,98502071
19	5,972536986	5,97728972
20	5,988193008	5,99025266
21	6,013061629	6,01087398
22	6,024431579	6,02031524
23	6,01330758	6,01105516
24	5,991288882	5,99270019
25	5,978698684	5,98218956
26	5,985930277	5,98824231
27	6,005035588	6,00425317
28	6,018190722	6,01529406
29	6,0142302	6,01196031
30	5,997997647	5,99828467

31	5,984808058	5,98715592
32	5,986085273	5,98823864
33	5,999565917	5,99965622
34	6,012373641	6,01052022
35	6,013236467	6,01125074
36	6,002327831	6,00196235
37	5,990216025	5,99163407
38	5,987704753	5,98949111
39	5,996261927	5,9968162
40	6,007453552	6,00641047
41	6,01117736	6,00960641
42	6,004726119	6,00405443
43	5,994601703	5,99532895
44	5,990044167	5,99139604
45	5,994646948	5,99537863
46	6,003622145	6,00315475
47	6,008691041	6,00755255
48	6,005677877	6,00493107
49	5,997880474	5,99813948
50	5,992568414	5,99350603
51	5,994243851	5,99497205
52	6,0008776	6,00078081
53	6,006215349	6,00546152
54	6,005638996	6,00495358
55	6,000121763	6,00009676
56	5,994929359	5,99551924
57	5,9946275	5,99525403
58	5,999099726	5,99921193
59	6,004017408	6,00357033
60	6,00499736	6,00443919