

**Методичні вказівки
до виконання курсових проєктів
з дисципліни «Теорія автоматичного управління»
зі спеціальностей «Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології» та «Автоматизація, комп'ютерно-
інтегровані технології та робототехніка»**

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

**Методичні вказівки
до виконання курсових проєктів
з дисципліни «Теорія автоматичного управління»
зі спеціальностей «Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології» та «Автоматизація, комп'ютерно-
інтегровані технології та робототехніка»**

Вінниця
ВНТУ
2025

Рекомендовано до видання Радою з якості освіти Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 11 від 19.06.2025 р.)

Рецензенти:

М. Г. Тарновський, кандидат технічних наук, доцент

К. В. Овчинников, кандидат технічних наук, доцент

Д. Х. Штофель, кандидат технічних наук, доцент

Методичні вказівки до виконання курсових проєктів з дисципліни «Теорія автоматичного управління» зі спеціальностей «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» [Електронний ресурс] / уклад.: В. В. Присяжнюк, М. В. Петричко. – Вінниця : ВНТУ, 2025. – (PDF, 38 с.)

У методичних вказівках наведені завдання, короткі теоретичні відомості, детальні приклади розрахунку та оформлення різноманітних методів синтезу лінійних систем управління, а також методи спрощення блоку корекції, які можуть бути використані при проектуванні більш складних систем автоматичного управління. Для полегшення самостійного виконання курсового проєкту наводиться список рекомендованої літератури, зразки оформлення.

ЗМІСТ

1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ КУРСОВОГО ПРОЄКТУВАННЯ.....	4
2 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ КП.....	4
3 ПОРЯДОК ПЕРЕВІРКИ КП.....	5
4 ПОРЯДОК ЗАХИСТУ КП.....	6
5 ОЦІНЮВАННЯ КУРСОВИХ ПРОЄКТІВ.....	7
6 ЗАВДАННЯ НА КУРСОВИЙ ПРОЄКТ.....	7
7 СИНТЕЗ КОРИГУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ЛАЧХ МЕТОДОМ ЛОГАРИФМІЧНИХ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	8
8 СИНТЕЗ ЛІНІЙНОЇ САУ ЗА ДОПОМОГОЮ СТАНДАРТНИХ ПЕРЕХІДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	18
9 СПРОЩЕННЯ КОРИГУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ.....	23
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	27
Додаток А Зразок оформлення титульного аркуша.....	28
Додаток Б Зразок оформлення індивідуального завдання.....	29
Додаток В Зразок оформлення анотації.....	31
Додаток Г Зразок оформлення змісту.....	32
Додаток Д Варіанти завдання.....	33
Додаток Е Параметри нормованої передатної функції.....	35

1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ КУРСОВОГО ПРОЄКТУВАННЯ

Курсовий проєкт (КП) – форма індивідуальної письмової навчальної роботи здобувачів вищої освіти з певної навчальної дисципліни, яка передбачає проєктну діяльність зі створення нового продукту (приладу або пристрою, матеріалу, механізму, споруди, технологічного процесу, технічних та програмних засобів або їх окремих частин тощо), виконується здобувачем освіти самостійно під керівництвом викладача протягом одного семестру відповідно до індивідуального завдання на основі знань та умінь, набутих при вивченні цієї навчальної дисципліни та її пререквізитів із можливим залученням матеріалів промислових і науково-дослідних підприємств, установ і організацій, містить проєктну документацію та виконується з дотриманням вимог чинних стандартів (зокрема ЄСКД).

Відповідно до «Положення про організацію освітнього процесу у ВНТУ», КП виконуються з метою закріплення, поглиблення і узагальнення знань, одержаних здобувачами вищої освіти за час навчання, та їх застосування до комплексного вирішення конкретного фахового завдання. Виконання КП сприяє розширенню і поглибленню теоретичних знань, розвитку навичок їх практичного використання, самостійного розв'язання конкретних завдань.

Вимоги до оформлення курсового проєкту, структура, об'єм пояснювальної записки, критерії оцінювання в повній мірі представлені в «Положенні про курсове проєктування у Вінницькому національному технічному університеті» (2024 р.) та в РПНД .

2 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ КП

На першому занятті з навчальної дисципліни керівник курсового проєкту повідомляє здобувачів вищої освіти про це та пропонує для ознайомлення орієнтовний перелік тем. Також здобувач вищої освіти може запропонувати власну тему КП, яка повинна бути узгоджена з керівником.

Здобувачі вищої освіти денної форми навчання обирають собі тему КП не пізніше першого тижня теоретичного семестру. Здобувачі вищої освіти заочної форми навчання обирають собі тему протягом сесії, під час якої проводяться лекційні заняття з відповідної навчальної дисципліни. Якщо здобувач вищої освіти не обрав собі тему, її призначає для нього керівник.

На основі визначених тем КП керівник формує індивідуальні завдання. Тема та індивідуальне завдання на виконання КП видається керівником здобувачам вищої освіти не пізніше другого тижня теоретичного семестру. Для здобувачів освіти заочної форми навчання індивідуальне завдання видається до завершення сесії, під час якої проводяться лекційні заняття з відповідної навчальної дисципліни. Індивідуальне завдання підписується керівником та здобувачем вищої освіти із зазначенням дати його отриман-

ня. При дистанційній формі навчання керівник надсилає здобувачам вищої освіти індивідуальні завдання через систему JetIQ, або розміщує завдання в навігаторі дисципліни, наприклад у формі методичних вказівок до виконання КП. Також в навігаторі дисципліни розміщується графік виконання КП.

Здобувачі вищої освіти повинні самостійно виконувати індивідуальне завдання, дотримуючись встановленого графіка.

КП виконується у вигляді комп'ютерного файлу за допомогою будь-якого програмного текстового редактора, який здатний забезпечити виконання вимог до оформлення КП (розділ 9 «Положення про курсове проектування у Вінницькому національному технічному університеті»).

3 ПОРЯДОК ПЕРЕВІРКИ КП

Здобувачі вищої освіти повинні надсилати на перевірку завершений етап або повний текст КП виключно через інструмент «Файл-Експрес» системи JetIQ у вигляді одного файлу у форматі Portable Document Format (*.pdf).

Керівник зобов'язаний дати відповідь на надісланий файл протягом семи діб з моменту отримання файлу. У відповіді керівник вказує, що він приймає етап чи повний текст КП до захисту або зазначити, що потрібно виправити / доопрацювати. Під час прийняття рішення враховується якість виконання завдань та оформлення КП, а також відповідність вимогам академічної доброчесності. Також керівник може провести процедуру перевірки КП на наявність ознак академічного плагіату відповідно до пп. 10.4–10.7 «Положення про курсове проектування у Вінницькому національному технічному університеті».

Повернення КП для виправлення / доопрацювання допускається тільки протягом теоретичного семестру. Файли, надіслані після завершення теоретичного семестру, вважаються остаточними, а їх заміна або виправлення не допускаються.

Якщо КП виконано в повному обсязі, відповідно до індивідуального завдання, не містить ознак академічної недоброчесності, не містить суттєвих помилок, оформлена згідно з встановленими вимогами (розділ 9 «Положення про курсове проектування у Вінницькому національному технічному університеті») та надіслана здобувачем вищої освіти у вигляді одного файлу у форматі Portable Document Format (*.pdf), керівник приймає КП до захисту, про що повідомляє здобувача вищої освіти у відповіді на файл, надісланий через інструмент «Файл-Експрес» системи JetIQ.

Якщо остаточний файл КП виконано не в повному обсязі, або не відповідно до індивідуального завдання, або він містить ознаки академічної недоброчесності (пп. 10.1, 10.2 «Положення про курсове проектування у Вінницькому національному технічному університеті»), або суттєві помилки, або не оформлено згідно з встановленими вимогами (розділ 9 «Положення про курсове проектування у Вінницькому національному технічно-

му університеті)), або файл не надійшов через інструмент «Файл-Експрес» системи JetIQ (станом на визначений у розкладі день захисту), такий КП визнається керівником недопущеною / недопущеним до захисту із виставленням незадовільної оцінки у відомість успішності (від 0 до 59 балів). Якщо оцінка за стобальною шкалою склала від 35 до 59 балів включно, то здобувач вищої освіти має право на доопрацювання і захист КП з виставленням оцінки у другу відомість. Якщо оцінка за стобальною шкалою склала від 0 до 34 балів включно, то здобувач вищої освіти вважається таким, що має академічну заборгованість. Для її ліквідації здобувач повинен виконати КП за новою темою (або зміненим індивідуальним завданням) відповідно до «Положення про порядок ліквідації академічної заборгованості, академічної різниці та надання платної послуги з проведення занять з вивчення окремої навчальної дисципліни понад обсяги, встановлені навчальним планом».

4 ПОРЯДОК ЗАХИСТУ КП

Захист КП відбувається під час заліково-екзаменаційної сесії згідно з розкладом контрольних заходів, визначених деканатом.

До захисту допускаються КП, які відповідають вимогам п. 11.1.15 «Положення про курсове проєктування у Вінницькому національному технічному університеті».

Готові курсові проєкти подаються здобувачами вищої освіти через інструмент «Файл-Експрес» системи JetIQ у вигляді одного файлу у форматі Portable Document Format (*.pdf).

Якщо здобувач вищої освіти не з'явився на захист КП, в такому випадку здобувачу вищої освіти надається можливість захистити КП відповідно до процедури, яка відображена в Наказі про проведення сесії.

Захист КП повинен мати публічний характер і прийматися комісією, до складу якої входять не менше 2-х осіб з-поміж викладачів кафедри, один з яких є керівником КП.

Процедура захисту включає коротку доповідь здобувача вищої освіти щодо основних результатів виконання КП та відповіді на запитання членів комісії або інших присутніх на захисті осіб.

Якщо здобувач вищої освіти під час навчального семестру виконував систематично, якісно та самостійно графік виконання КП і керівник прийняв КП до захисту, то такий здобувач вищої освіти звільняється від захисту КП з оцінкою керівника. Для отримання вищої оцінки або більшої кількості балів здобувачі вищої освіти мають право на участь у захисті КП. Кінцева оцінка, кількість балів не можуть бути менше оцінки керівника.

У разі незгоди з отриманою оцінкою здобувачі вищої освіти мають право оскаржити її відповідно до «Порядку організації та проведення заліків, диференційованих заліків, екзаменів у ВНТУ».

5 ОЦІНЮВАННЯ КУРСОВИХ ПРОЄКТІВ

Оцінювання КП здійснюється відповідно до «Положення про організацію освітнього процесу у ВНТУ», «Положення про рейтингову систему оцінювання навчальних досягнень здобувачів вищої освіти у ВНТУ» та «Порядку організації та проведення заліків, диференційованих заліків, екзаменів у ВНТУ».

Оцінювання КП здійснюється за стобальною шкалою та за шкалою ЄКСТ. Розподіл бальної оцінки за виконання КП зафіксований в РПНД.

Оцінювання знань, умінь та навичок здобувачів вищої освіти за результатами виконання курсового проєкту (в балах):

Таблиця оцінювання КП :

Складові оцінювання	Бали
Рівень виконання та відповідність КП індивідуальному завданню	40
Відповідність оформлення КП встановленим вимогам	20
Рівень представлення результатів КП на захисті	40
Всього :	100

6 ЗАВДАННЯ НА КУРСОВИЙ ПРОЄКТ

Виконати синтез початкової лінійної системи автоматичного управління (САУ) відповідно до вказаних параметрів якості. Для синтезу САУ необхідно виконати наступні завдання:

– аналіз початкової системи: знайти математичний опис САУ (передатні функції розімкненої та замкненої систем); визначити стійкість частотним та кореневим способами; отримати аналітичний вираз перехідної характеристики; побудувати часові та частотні характеристики (АЧХ, ФЧХ (або логарифмовані характеристики на вибір студента) та АФЧХ); визначити прямі показники якості САУ

– синтез послідовного коригувального пристрою, який забезпечить для скорегованої САУ максимальне перерегулювання $\sigma_m \leq 10\%$, час регулювання $t_{рК}$ вдвічі менший за час регулювання $t_{рз}$ заданої системи ($t_{рК} \leq 0,5 t_{рз}$), похибку в усталеному режимі $\varepsilon_{уст}=0$, статичний коефіцієнт підсилення замкненої САУ $K=1$;

– синтез послідовного коригувального пристрою можна виконати за допомогою методу логарифмічних частотних характеристик та методом стандартних перехідних характеристик, або іншим методом за вибором студента;

– спростити передатну функцію $W_K(s)$ коригувального пристрою;

– порівняти часові характеристики початкової, синтезованої систем та САУ зі спрощеним блоком корекції;

– зробити висновки.

Варіанти завдання до КП представлені в Додатку Д.

Під час виконання завдання використовувати методи синтезу початкової системи та спрощення коригувального пристрою, до варіантів:

а) для парних номерів варіанта:

– синтез послідовного коригувального пристрою виконати за допомогою методу логарифмічних частотних характеристик;

– спрощення передатної функції коригувального пристрою виконати аналітичним методом;

б) для непарних номерів варіанта:

– синтез послідовного коригувального пристрою виконати за допомогою стандартних перехідних характеристик ;

– спрощення передатної функції коригувального пристрою виконати графічним методом;

або іншим способом за вибором студента.

7 СИНТЕЗ КОРИГУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ЛАЧХ МЕТОДОМ ЛОГАРИФМІЧНИХ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Виконати синтез послідовного коригувального пристрою, який забезпечить для скорегованої САУ максимальне перерегулювання $\sigma_m \leq 10\%$, $t_{pk} \leq 0,5t_{pz}$, (t_{pz} - час регулювання початкової САУ), похибку в усталеному режимі $\varepsilon_{уст} = 0$, статичний коефіцієнт підсилення замкненої САУ $K=1$. Спростити передатну функцію $W_K(s)$ коригувального пристрою.

САУ задана передатними функціями та структурою схемою:

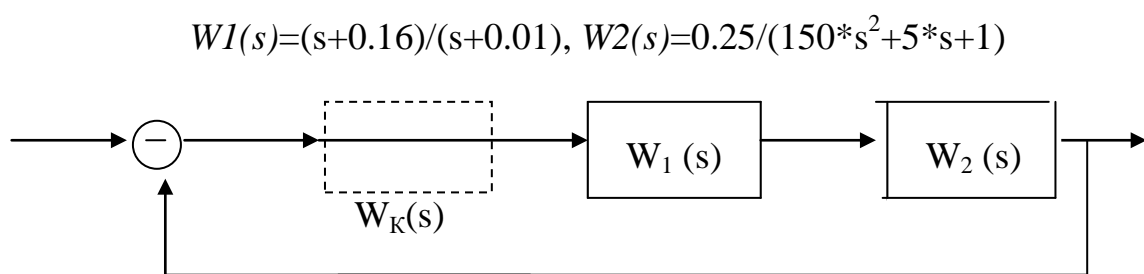


Рис.1 Структурна схема початкової САУ

Визначаємо передатні функції:

а) передатна функція розімкненої системи: $W_p(s) := W1(s) * W2(s)$;

$$W_p(s) = \frac{0.25(s + 0.16)}{(s + 0.01)(150s^2 + 5s + 1)} = \frac{(0,25s + 0.04)}{(150s^3 + 6.5s^2 + 1.05s + 0.01)}$$

б) передатна функція замкненої системи:

$$W_3(s) = \frac{W_p(s)}{1 + W_p(s)} = \frac{0,25s + 0,04}{150s^3 + 6,5s^2 + 1,3s + 0,05}$$

Для побудови перехідного процесу системи, визначимо перехідну характеристику методом зворотного перетворення Лапласа:

$$h(t) = L^{-1} \left\{ \frac{1}{s} W_p(s) \right\} = L^{-1} \left\{ \frac{0,25s + 0,04}{s(150s^3 + 6,5s^2 + 1,3s + 0,05)} \right\}$$

За таблицями зворотного перетворення Лапласа знайдемо:

$$h(t) = 0,807 - 0,526e^{-0,039t} - 0,282e^{-0,002t} \cos(0,092t) - 0,229e^{-0,002t} \sin(0,092t)$$

Будуємо графік перехідного процесу замкнутої системи:

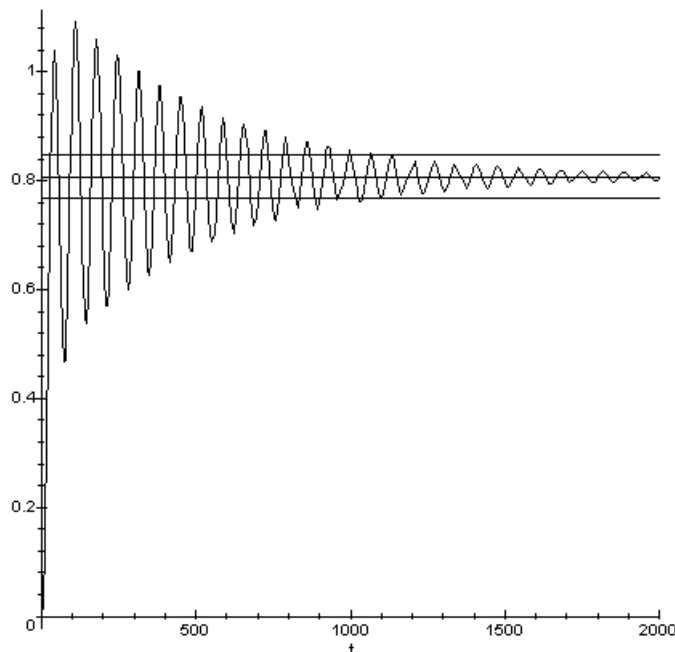


Рисунок 2 – Перехідна характеристика замкнутої САУ

За графіком перехідна характеристика замкнутої САУ (рис.2) визначаємо прямі параметри якості системи:

максимальний час для розрахунку визначимо за найменшим показником степені експоненти 0,002:

$$t_{max} \approx (4 \dots 6) \frac{1}{0,002} = 2000c.$$

– час регулювання $t_p=1070$ сек;

- максимальне перерегулювання σ_m :

$$\sigma_m = \frac{h(t)_{\text{mas}} - h(t)_{\text{уст}}}{h(t)_{\text{уст}}} 100\% = 35.192\%$$

- $h(t)_{\text{mas}} = 1.091$; $h(t)_{\text{уст}} = 0.807$

- час виходу на режим t_B – час від початку процесу до першого досягнення ним значення $h_{\text{уст}}$, $t_B = 30$ сек;

- час досягнення першого максимуму $t_m = 110$ сек;

- період коливань $T \approx 68$ сек;

- кількість коливань за час регулювання $N = 15$;

- декремент згасання χ характеризує інтенсивність зменшення амплітуди коливань :

$$\chi = \frac{h_1}{h_2} = \frac{0.275}{0.254} = 1.083$$

Відповідно необхідно провести корекцію САУ.

Визначимо коригувальний пристрій лінійної САУ за допомогою логарифмічних частотних характеристик. Метод логарифмічних частотних характеристик є наближеним, графоаналітичним, не трудомістким. Він ґрунтується на однозначному зв'язку частотних та часових характеристик стійкої лінійної системи.

Якщо відомо математичний опис незмінної частини САК з одиничним негативним зворотним зв'язком і необхідно визначити структуру та параметри послідовного коригувального пристрою (регулятора), який забезпечить задані показники якості перехідного процесу системи, то порядок синтезу полягає в такому.

1. Будують асимптотичну логарифмічну амплітудно-частотну характеристику заданої розімкненої системи $L_p(\omega)$.

2. Для заданих показників якості перехідного процесу (час регулювання t_p та максимальне перерегулювання σ_m) за номограмами визначають частоту зрізу ω_z бажаної ЛАЧХ $L_\delta(\omega)$.

3. Будують бажану ЛАЧХ згідно з вимогами до її низькочастотної, середньочастотної та високочастотної областей.

4. За $L_p(\omega)$ та $L_\delta(\omega)$ визначають ЛАЧХ $L_k(\omega)$ та передатну функцію $W_k(s)$ коригувального пристрою.

Для цього спочатку побудуємо асимптотичну ЛАЧХ розімкненої системи $L_p(\omega)$ без урахування невідомого коригувального пристрою, передатна функція якої

$$Wp(s) = \frac{(0,25s + 0.04)}{(150s^3 + 6.5s^2 + 1.05s + 0.01)}$$

Запишемо характеристичне рівняння:

$$D(s) = 150s^3 + 6.5s^2 + 1.05s + 0.01$$

розкладемо його на складові:

$$(150s^3 + 6.5s^2 + 1.05s + 0.01) = (s + 0.01)(150s^2 + 5s + 1)$$

тоді

$$\begin{aligned} Wp(s) &= \frac{(0,25s + 0.04)}{(150s^3 + 6.5s^2 + 1.05s + 0.01)} = \frac{0.04(6.25s + 1)}{(s + 0.01)(150s^2 + 5s + 1)} \\ &= \frac{0.04(6.25s + 1)}{0.01(100s + 1)(150s^2 + 5s + 1)} \\ &= 4(6.25s + 1) \left(\frac{1}{100s + 1} \right) \left(\frac{1}{150s^2 + 5s + 1} \right) \\ &= W1(s)W2(s)W3(s)W4(s) \end{aligned}$$

Передатна функція представляє собою добуток чотирьох найпростіших ланок: $W_1(s)$ – безінерційна ланка, $W_2(s)$ – форсуюча першого порядку, $W_3(s)$ – інерційна першого порядку, $W_4(s)$ – коливальна ланка.

Побудуємо асимптотичні ЛАЧХ для кожної ланки окремо, а результуючу $L_p(\omega)$ одержимо шляхом їх графічного додавання.

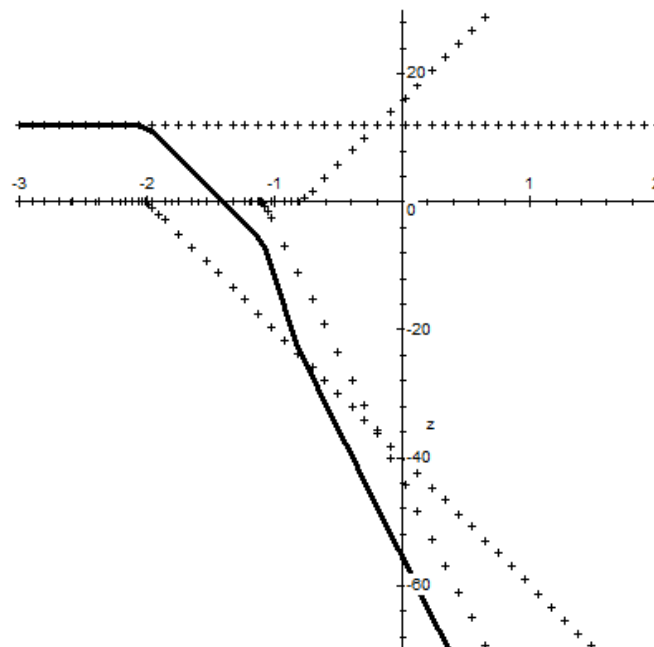


Рисунок 3 – Асимптотичні ЛАЧХ кожної ланки та розімкненої САУ

Визначимо частоту зрізу ω_3 для ЛАЧХ бажаної системи $L_B(\omega)$ за допомогою номограми В.В.Солодовнікова, при заданому значенні $\sigma_m \leq 10\%$. Задаємо значення $\sigma_m = 4\% < 10\%$, яке менше заданого обмеження, (рис.4а, точка А), знаходимо її проєкцію на криву σ_m (точка Б), далі – проєкцію точки Б на криву $\omega_3 t_p$ (точка В) і проєкцію точки В на вісь $\omega_3 t_p$ (точка Г) і знаходимо, що значення $\omega_3 t_p = 4$, при умові що, $t_{pk} \leq 0,5 t_{p3}$, $t_{p3} = 1070$ с, $t_{pk} = 535$ с, знаходимо $\omega_3 = 4/t_{pk} = 4/535 = 0.007$ с⁻¹.

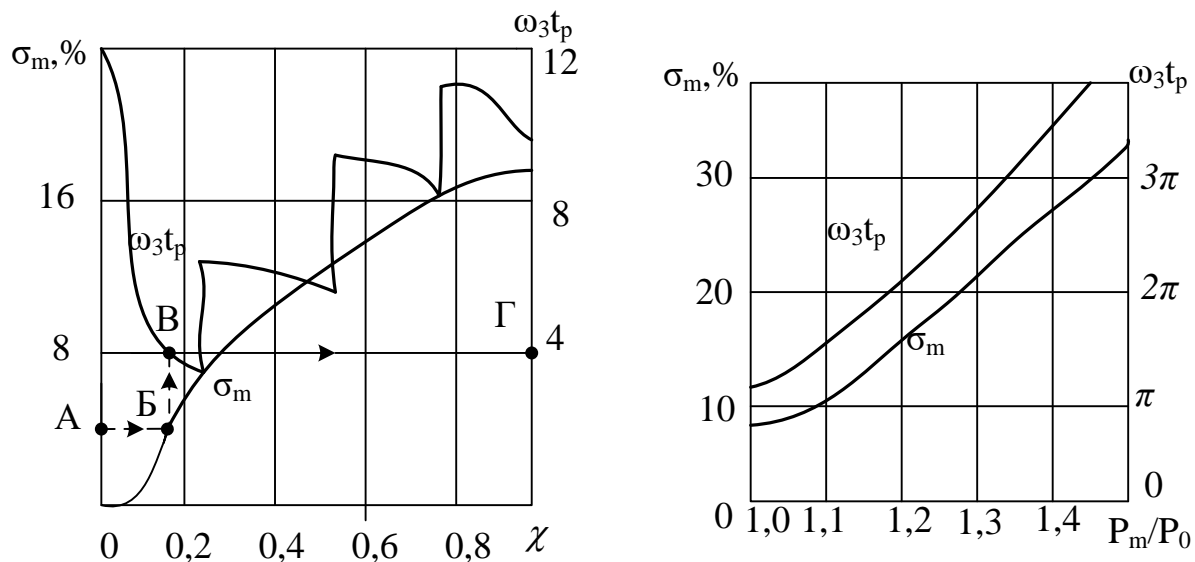


Рисунок 4 – Номограми В.В.Солодовнікова
для визначення частоти зрізу ЛАЧХ:

- а) для систем з монотонною частотною характеристикою,
- б) для систем з частотною характеристикою, що має максимум

Формуємо середньочастотну область бажаної ЛАЧХ, відповідно до наступних вимог : $L_B(\omega)$ перетинає вісь $\lg \omega$ на частоті $\omega_3 = 0,007$ с⁻¹; ширина середньочастотної зони повинна бути не меншою за 1,5 ... 2 декади; нахил характеристики має бути -20 дб/дек.

Високочастотна область $L_B(\omega)$ суттєво не впливає на динаміку САУ, тому для спрощення коригувального пристрою оберемо нахил $L_B(\omega)$ після $\omega = 0,1$ (ЛАЧХ початкової розімкнутої системи) такий же, як і $L_p(\omega)$, тобто -40 дб/дек.

ЛАЧХ низькочастотної області сформуємо із наступних міркувань. Якщо задається $\varepsilon_{уст} = 0$, то система повинна бути астатичною і нахил бажаної ЛАЧХ в низькочастотній області вибирають -20 дб/дек.

На цьому завершується побудова бажаної ЛАЧХ системи $L_B(\omega)$, яка наведена на рисунку 5.

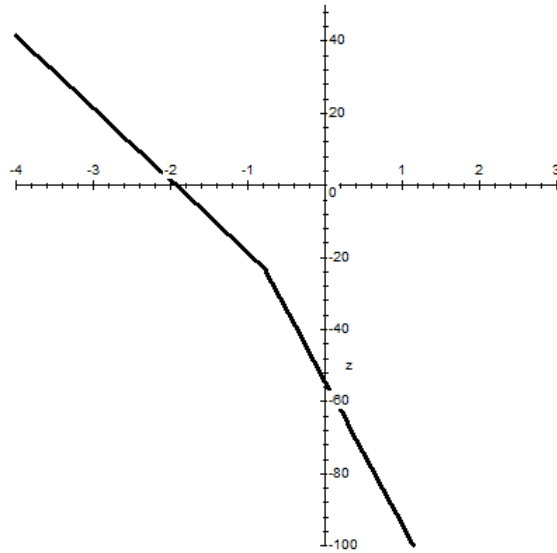


Рисунок 5 – Асимптотична ЛАЧХ бажаної САУ

За відомими $L_B(\omega)$ та $L_P(\omega)$ визначаємо ЛАЧХ коригувального пристрою $L_K(\omega)$ шляхом графічного віднімання:

$$L_K(\omega) = L_B(\omega) - L_P(\omega).$$

Одержана характеристика показана на рисунку 6.

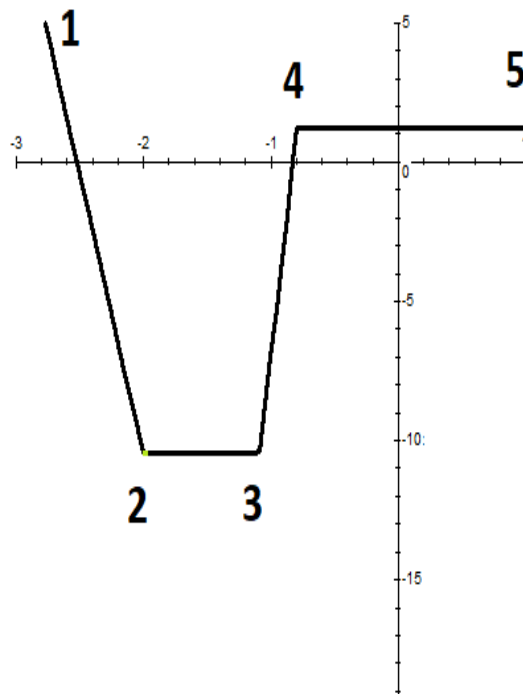


Рисунок 6 – Асимптотична ЛАЧХ корегуючого пристрою

Визначимо передатну функцію коригувального пристрою. Прослідкуємо за змінами $L_K(\omega)$ при збільшенні ω від мінімального значення до максимального. На частотах $\omega < \omega_1 = 10^{-2.5} = 0,003 \text{ с}^{-1}$ ЛАЧХ має такий же вигляд, як і ЛАЧХ ідеальної інтегрувальної ланки з передатною функцією $W_{k1}(s) = \frac{1}{T_{k1}s}$, $T_{k1} = 1/0.003 \approx 333 \text{ с}$.

Зміну нахилу результуючої характеристики з -20 дб/дек на 0 дб/дек на частоті $\omega_2 = 0,012 \text{ с}^{-1}$ може забезпечити форсуюча ланка першого порядку з $W_{k2}(s) = T_{k2}s + 1$, де $T_{k2} = 1/\omega_2 = 83 \text{ с}$.

При зростанні ω , на частоті $\omega_3 = 0,08 \text{ с}^{-1}$ знову спостерігається зміна нахилу характеристики від 0 дб/дек до $+40 \text{ дб/дек}$. Такий хід ЛАЧХ може забезпечити форсуюча ланка другого порядку із передатною функцією $W_{k3} = T_{k3}^2 s^2 + 2\xi T_{k3}s + 1$, де $T_{k3} = 1/\omega_3 = 12.5 \text{ с}$.

При частоті $\omega_4 = 0,16 \text{ с}^{-1}$ знову спостерігається зміна нахилу характеристики від $+40 \text{ дб/дек}$ до 0 дб/дек . Такий вигляд ЛАЧХ може забезпечити коливальна ланка із передатною функцією $W_{k4} = \frac{1}{T_{k4}^2 s^2 + 2\xi T_{k4}s + 1}$, де $T_{k4} = 1/\omega_4 = 6,25 \text{ с}$.

Таким чином $L_K(\omega)$ представляє собою суму ЛАЧХ чотирьох ланок: ідеальна інтегрувальна ланка, форсуюча першого порядку, форсуюча ланка другого порядку, коливальна ланка. Тоді передатна функція коригувального пристрою знаходиться як добуток:

$$W_k(s) = W_{k1}(s)W_{k2}(s)W_{k3}(s)W_{k4}(s) = \frac{1}{333s} \cdot (83s + 1) * \\ * (12.5^2 s^2 + 25\xi s + 1) \frac{1}{6.25^2 s^2 + 12.5\xi s + 1}.$$

Передатна функція коригувального пристрою вийшла надзвичайно громіздкою, тому необхідно її спростити.

Спрощення коригувального пристрою

Для спрощення передатної функція коригувального пристрою побудуємо логарифмічну амплітудно-частотну характеристику пристрою $L_K(\omega)$. Виконаємо заміну $s = j\omega$ у $W_K(s)$ і за відомими правилами виділимо дійсну $P(\omega)$ та уявну $Q(\omega)$ частини одержаного виразу і знайдемо формулу для побудови ЛАЧХ, при умові, що $0 < \xi < 1$, задаємо значення $\xi = 0,5$.

$$L_k(\omega) = 20 \lg A(\omega) \\ = 20 \lg \left(0.002 \sqrt{\frac{0.84 * 10^{11} \omega^6 - 0.53 * 10^9 \omega^4 + 0.34 * 10^7 \omega^2 + 500}{\omega^2 (390625 \omega^4 - 10000 \omega^2 + 256)}} \right)$$

Графік логарифмічної амплітудно-частотної характеристики пристрою $L_k(\omega)$ зображено на рис. 7

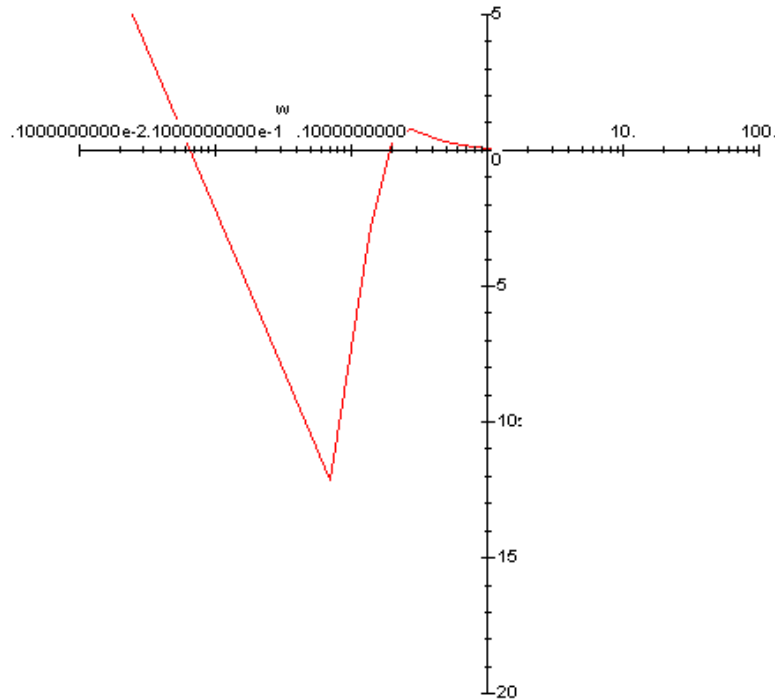


Рисунок 7 – ЛАЧХ корегуючого пристрою

Виконаємо апроксимацію одержаної характеристики лініями стандартного нахилу (-20 дб/дек та +20 дб/дек) і одержимо апроксимовану ЛАЧХ $L_a(\omega)$. Вона розкладається на суму ЛАЧХ трьох ланок – ідеальної інтегруючої, форсуючої другого порядку та інерційної першого порядку. Тоді $L_a(\omega)$ відповідає передатна функція

$$W_a(s) = \frac{1}{T_1 s} (T_2^2 s^2 + 2\xi T_2 s + 1) \frac{1}{(T_3 s + 1)},$$

де T_1 і T_2 T_3 визначаються із графіка, коефіцієнт приймемо рівним $\xi=0,5$.

Знайдемо постійні часу $\omega_1=0.003$ $T_1=1/\omega_1 \approx 333$, $\omega_2=0.04$, $T_2=25$, $\omega_3=0.8$ $T_3=1.25$.

Побудуємо спільно ЛАЧХ коригувального пристрою і ЛАЧХ апроксимованого керуючого пристрою:

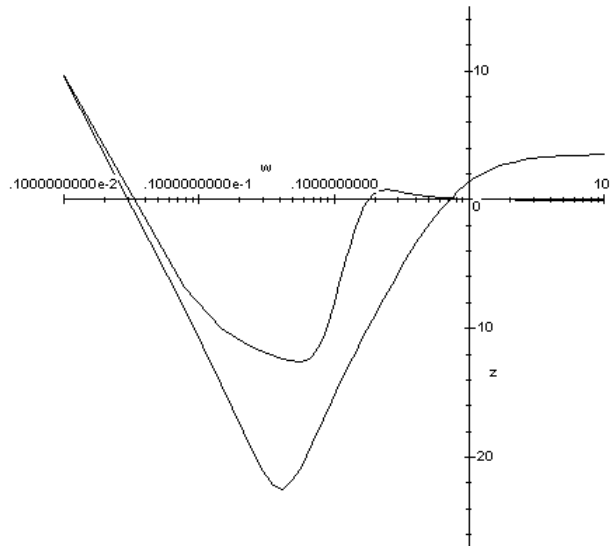


Рисунок 8 – ЛАЧХ корегуючого пристрою і апроксимованого керуючого пристрою

Максимальне відхилення $L_a(\omega)$ від $L_3(\omega)$ складає приблизно 10 дБ і ширина піку складає близько 0.5 декади. В цьому випадку досягти більшої точності апроксимації можна підбором коефіцієнта коливальності ξ , прийmemo $\xi=0,95$.

тоді

$$W_k(s) = \frac{1}{333s} (25^2 s^2 + 2 \cdot 0.95 \cdot 25s + 1) \frac{1}{1.25s+1} = \frac{625s^2 + 47.5s + 1}{333s(1.25s+1)}$$

На рисунку 8 побудована ЛАЧХ $L_c(\omega)$ для спрощеного коригувально-го пристрою, яка мало відрізняється від заданої $L_3(\omega)$.

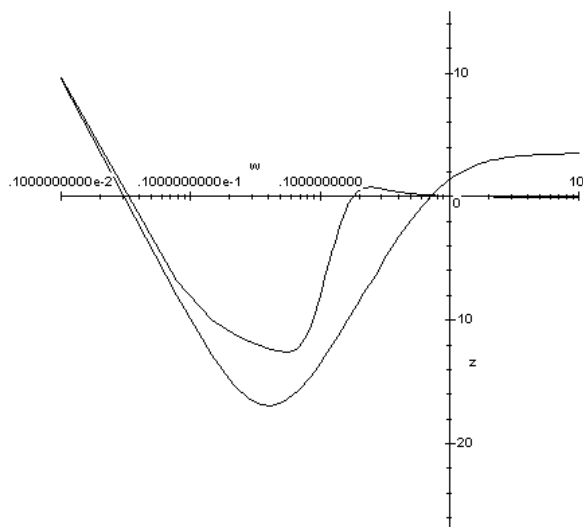


Рисунок 9 – ЛАЧХ корегуючого пристрою і апроксимованого керуючого пристрою при $\xi=0,95$.

Побудуємо перехідний процес для системи із спрощеним коригувальним пристроєм.

Запишемо передатну функцію САУ, з врахуванням коригувального пристрою.

Передатна функція розімкненої системи без врахування коригувального пристрою

$$W_p(s) = \frac{(0,25s + 0.04)}{(150s^3 + 6.5s^2 + 1.05s + 0.01)}$$

Передатна функція коригувального пристрою

$$W_k(s) = \frac{625s^2 + 47.5s + 1}{333s(1.25s + 1)}$$

Передатна функція замкненої системи з врахуванням коригувального пристрою:

$$\begin{aligned} W(s) &= \frac{W_p(s)W_k(s)}{1 + W_p(s)W_k(s)} = \\ &= \frac{0.47s^3 + 0.11s^2 + 0.006s + 0.00012}{187.5s^5 + 158.125s^4 + 8.28s^3 + 1.17s^2 + 0.016s + 0.00012} \end{aligned}$$

Для побудови перехідного процесу системи визначимо перехідну характеристику методом зворотного перетворення Лапласа:

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

Після математичних перетворень та спрощень за таблицями зворотного перетворення Лапласа знайдемо:

$$\begin{aligned} h(t) &= 1 - 0.003e^{-0.8t} - 0.07e^{-0.016t} \cos(0.08t) \\ &\quad - 0.033e^{-0.016t} \sin(0.08t) - 0.93e^{-0.007t} \cos(0.008t) \\ &\quad - 0.33e^{-0.007t} \sin(0.008t) \end{aligned}$$

Оцінимо межі зміни одержаних функцій. Перехідна характеристика: $h(0) \rightarrow 0; h(\infty) \rightarrow 0,1$.

За графіком перехідної характеристики визнаємо прямі показники якості САУ з коригувальним пристроєм.

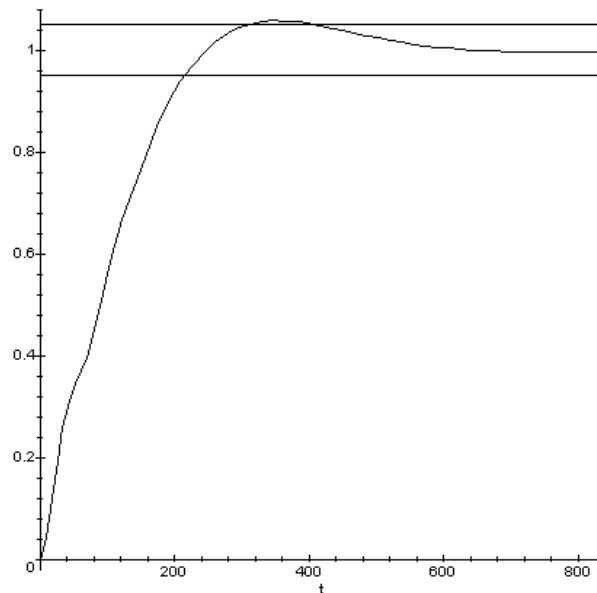


Рисунок 10 – Перехідна характеристика САУ із спрощеним коригувальним пристроєм

- час регулювання $t_p=420$ сек;
- максимальне перерегулювання σ_m :

$$\sigma_m = \frac{h(t)_{mas} - h(t)_{уст}}{h(t)_{уст}} 100\% = 6\%$$

$$h(t)_{mas}:=1.06; h(t)_{уст}:=1$$

В результаті роботи створена САУ з наступними параметрами: час регулювання $t_p=420$ сек < 535 сек, перерегулювання менше 10 %, статичний коефіцієнт підсилення замкненої САУ $K=1$. Дані параметри задовольняють умови моделювання і тому можна вважати, що САУ розроблена вірно і на цьому зупинити розрахунки.

8 СИНТЕЗ ЛІНІЙНОЇ САУ ЗА ДОПОМОГОЮ СТАНДАРТНИХ ПЕРЕХІДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для заданої САУ знайти передатну функцію коригувального пристрою $W_k(s)$.

Система автоматичного керування задана передатними функцій:

$$W_1(s) = s + 1, W_2(s) = \frac{125}{(s + 0.3)(0.03s^2 + 0.07s + 1)}$$

і структурною схемою (рис.1).

Визначаємо передатну функцію розімкненої системи:

$$W_p(s) = W_1(s)W_2(s) = \frac{125(s + 1)}{(s + 0.3)(0.03s^2 + 0.07s + 1)}$$

$$= \frac{125s + 125}{0.03s^3 + 0.079s^2 + 1.021s + 0.3}$$

передатна функцію замкненої системи:

$$W(s) = \frac{W_p(s)}{1 + W_p(s)} = \frac{125s + 125}{0.03s^3 + 0.079s^2 + 126.021s + 125.3}$$

Визначаємо і будуємо перехідну функцію САУ без коригувального пристрою:

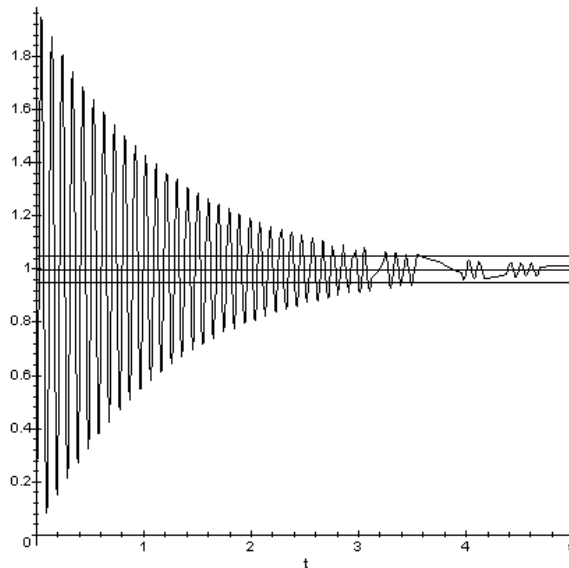


Рисунок 11 – Графік перехідної характеристики САУ

По графіку перехідної характеристики визнаємо прямі показники якості САУ.

- час регулювання $t_p=4$ сек;
- максимальне перерегулювання $\sigma_m > 10\%$

Відповідно необхідно провести корекцію САУ.

Метод стандартних перехідних характеристик ґрунтується на використанні стандартних перехідних характеристик, побудованих за нормованими передатними функціями замкнених САУ. Ці передатні функції сформовано відповідно до обраних за певними правилами коренів характеристичного рівняння та вимог до порядку астатизму системи.

Знайдемо передатну функцію замкнутої системи з врахуванням невідомого коригувального пристрою:

$$W_3(s) = \frac{W_k(s)W_1(s)W_2(s)}{1 + W_k(s)W_1(s)W_2(s)}$$

або

$$W_3(s) = \frac{(125s + 125)W_K(s)}{0.03s^3 + 0.079s^2 + 1.021s + 0.3 + (125s + 125)W_K(s)}$$

Визначимо бажану передатну функцію САУ $W_6(s)$. Порядок заданої системи без урахування коригувального пристрою $n_3=3$, порядок бажаної системи прийемо на 1 більшим ($n_6 = 4$). Відповідно до умови бажана САУ повинна мати $\varepsilon_{ycm} = 0$, тобто бути астатичною. Тоді $W_6(s)$ можна вибрати із Додатку Е у вигляді :

$$W_6(s) = \frac{1}{s_*^4 + 2,6 s_*^3 + 3,8 s_*^2 + 2,8 s_* + 1}$$

Із відповідної стандартної перехідної характеристики (по номограмі) визначаємо тривалість перехідного процесу в одиницях нормованого часу $\tau_p=5$ та максимальне перерегулювання $\sigma_m=0$ (що менше заданого значення 10%), $t_{p\delta} < 0.5t_p$. Визначимо бажаний час тривалості перехідного процесу $0,4*4=1,6$. Обчислимо масштабний коефіцієнт Ω_0 :

$$\Omega_0 = \frac{\tau_p}{t_p} = \frac{5}{1.6} = 3.125.$$

Визначаємо зв'язок між нормованим s_* та істинним s операторами Лапласа:

$$s_* = \frac{s}{3.125} = 0.32s.$$

Підставляємо значення s_* у формулу стандартної перехідної характеристики і одержуємо бажану передатну функцію САУ:

$$W_6(s) = \frac{1}{(0.32s)^4 + 2,6(0.32s)^3 + 3,8(0.32s)^2 + 2,8(0.32s) + 1}$$

Із виразу $W_6(s) = W_3(s)$

$$W_6(s) = \frac{1}{(0.32s)^4 + 2,6(0.32s)^3 + 3,8(0.32s)^2 + 2,8(0.32s) + 1} =$$

$$= \frac{(125s + 125)W_K(s)}{0.03s^3 + 0.079s^2 + 1.021s + 0.3 + (125s + 125)W_K(s)}$$

знаходимо невідому $W_k(s)$

$$W_k(s) = \frac{0.195(30s^3 + 79s^2 + 1021s + 300)}{s(256s^4 + 2336s^3 + 11580s^2 + 31375s + 21875)}$$

Спрощення коригувального пристрою

Побудуємо логарифмічну амплітудно-частотну характеристику коригувального пристрою $L_k(\omega)$. Для цього у $W_k(s)$ виконаємо заміну $s=j\omega$, за відомими правилами виділимо дійсну $P(\omega)$ та уявну $Q(\omega)$ частини одержаного виразу і побудуємо ЛАЧХ.

На підставі рисунка ЛАЧХ можна зробити спрощення коригувального пристрою. Нова передатна функція спрощеного коригувального пристрою має вигляд :

$$W_k(s) = \frac{1}{250s} \frac{1}{(0.2s + 1)}$$

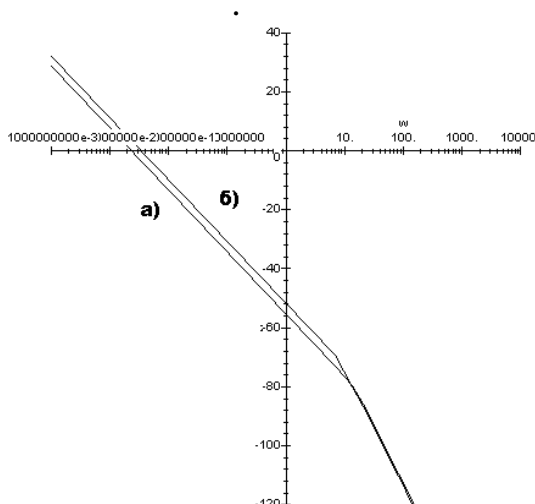


Рисунок 12 – Логарифмічні амплітудно-частотні характеристики коригувального пристрою, до спрощення (а) і після спрощення (б)

Визначаємо параметри якості САУ зі спрощеним коригувальним пристроєм.

Передатна функція розімкненої системи без врахування коригувального пристрою :

$$W_p(s) = \frac{125s + 125}{0.03s^3 + 0.079s^2 + 1.021s + 0.3}$$

Передатна функція коригувального пристрою :

$$W_k(s) = \frac{1}{250s(0.2s + 1)}$$

Передатна функція замкненої системи з врахуванням коригувального пристрою:

$$W(s) = \frac{W_p(s)W_k(s)}{1 + W_p(s)W_k(s)} =$$

$$= \frac{0.5(s + 1)}{0.006s^5 + 0.0458s^4 + 0.2832s^3 + 1.081s^2 + 0.8s + 0.5}$$

Будуємо перехідну характеристику системи. По графіку перехідної характеристики визнаємо прямі показники якості САУ з коригувальним пристроєм:

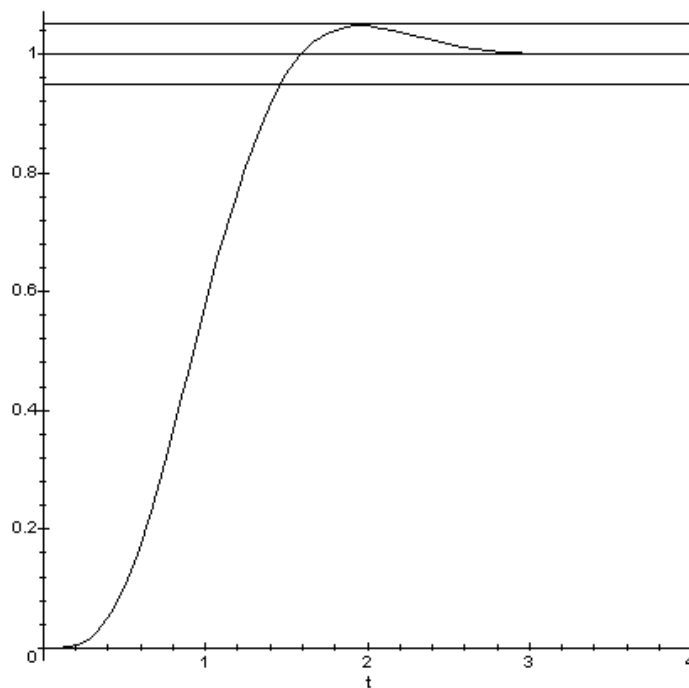


Рисунок 13 – Перехідна характеристика САУ з спрощеним коригувальним пристроєм

- час регулювання $t_p=1,5$ сек;
- максимальне перерегулювання $\sigma_m < 5\%$

В результаті роботи створена САУ з наступними параметрами: час регулювання $t_p=1,5\text{сек} < 4 \cdot 0.5$ сек, перерегулювання менше 10 %, статичний коефіцієнт підсилення замкненої САУ $K=1$. Дані параметри забезпечують вимоги завдання.

9 СПРОЩЕННЯ КОРИГУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

В результаті синтезу коригувального пристрою точними методами його передатна функція здебільшого є громіздкою і складною для практичної реалізації. Тому вдаються до спрощення коригувального пристрою. Воно виправдане і тим, що математичний опис об'єктів та елементів систем керування теж є наближеним. Розглянемо два найбільш зручних методи спрощення коригувальних пристроїв – аналітичний і графічний.

Аналітичний метод полягає в тому, що передатну функцію коригувального пристрою представляють як добуток найпростіших (типових) ланок і попарно видаляють складові, амплітудні та фазові характеристики яких приблизно компенсують одні одних. Така компенсація відбувається, коли, наприклад, до складу передатної функції входять інерційна ланка першого порядку з $W_1(s)=1/(T_1s+1)$ та форсуюча ланка першого порядку з $W_2(s)=1/(T_2s+1)$.

Чим точніше виконується приблизна рівність $T_1 \cong T_2$, тим краща компенсація. Якщо ж T_1 і T_2 відрізняються більш ніж в 1,5 рази, то видаляти (скорочувати) таку пару ланок не рекомендується. При видаленні пари ланок «коливальна» – «форсуюча другого порядку» необхідно звертати увагу і на ступінь близькості коефіцієнтів коливальності ξ .

Графічний метод спрощення передатної функції коригувального пристрою полягає в тому, що будують його точну логарифмічну амплітудно-частотну характеристику, з певними наближеннями апроксимують її лініями стандартного нахилу ($0, \pm 20, \pm 40, \dots$ дб/дек) і за одержаною ЛАЧХ визначають спрощену передатну функцію. Якщо точна АЧХ має вузький пік амплітудою більшою за 3 дб і шириною меншою за 0,5 декади, то при апроксимації він не враховується, а в спрощеній передатній функції забезпечується підбором відповідного коефіцієнта коливальності ξ для ланки другого порядку (коливальної чи форсуючої).

Максимальне відхилення $L_a(\omega)$ від $L_3(\omega)$ складає більше 10 дб і ширина піка складає близько 0,5 декади. В цьому випадку досягти більшої точності апроксимації можна підбором коефіцієнта коливальності ξ .

Приклад 1. Виконати спрощення передатної функції коригувального пристрою

$$W_K(s) = \frac{5s^3 + 4s^2 + 1.2s + 0.1}{102s^4 + 117,8s^3 + 45,9s^2 + 7,85s + 0,5}$$

Приведемо чисельник і знаменник дробу до виду з одиничним коефіцієнтом при старшому члені поліному

$$W_K(s) = \frac{5}{102} \cdot \frac{s^3 + 0,8s^2 + 0,24s + 0,02}{s^4 + 1,155s^3 + 0,45s^2 + 0,077s + 0,0049}$$

Знайдемо корені поліному чисельника $s_1^0 = -0,5$; $s_2^0 = -0,2$; $s_3^0 = -0,2$.

Корені поліному знаменника: $s_1^\infty = -0,588$; $s_2^\infty = -0,1667$; $s_{3,4}^\infty = -0,2 \pm j0,1$.

Тоді передатна функція запишеться як добуток простих ланок:

$$\begin{aligned} W_K(s) &= 0,049 \frac{(s - s_1^0)(s - s_2^0)(s - s_3^0)}{(s - s_1^\infty)(s - s_2^\infty)(s - s_3^\infty)(s - s_4^\infty)} = \\ &= 0,049 \frac{(s + 0,5)(s + 0,2)(s + 0,2)}{(s + 0,588)(s + 0,1667) [(s + 0,2)^2 + 0,1^2]} \end{aligned}$$

Представимо поліноми чисельника і знаменника у стандартному вигляді:

$$\begin{aligned} W_K(s) &= 0,049 \frac{0,5(2s + 1)0,2(5s + 1)0,2(5s + 1)}{0,588(1,7s + 1)0,1667(6s + 1)0,05(20s^2 + 8s + 1)} = \\ &= 0,2 \frac{(2s + 1)(5s + 1)(5s + 1)}{(1,7s + 1)(6s + 1)(20s^2 + 8s + 1)} \end{aligned}$$

У останньому виразі можна видалити (скоротити) поліноми $(2s+1)$ із чисельника і $(1,7s+1)$ із знаменника. Близькі значення мають також постійні часу у виразах $(5s+1)$ і $(6s+1)$; якщо їх видалити, то в чисельнику залишиться поліном першого, а в знаменнику – другого порядків. Та коли знайти добуток $(5s+1)(5s+1)=25s^2+10s+1$, то видно, що його можна скоротити з поліномом у знаменнику $(20s^2+8s+1)$. Таким чином, одержимо дуже просту передатну функцію:

$$W_K'(s) = 0,2/(6s+1).$$

Можна зробити перевірку ступеня розбіжності заданого та спрощеного коригувальних пристроїв за їх частотними характеристиками. На рисунку 14 наведені ЛАЧХ заданого $L_3(\omega)$ та спрощеного $L_C(\omega)$ коригувальних пристроїв. Як бачимо, розбіжність несуттєва і вона може бути зменшена за рахунок деякої зміни постійної часу у передатній функції спрощеного коригувального пристрою.

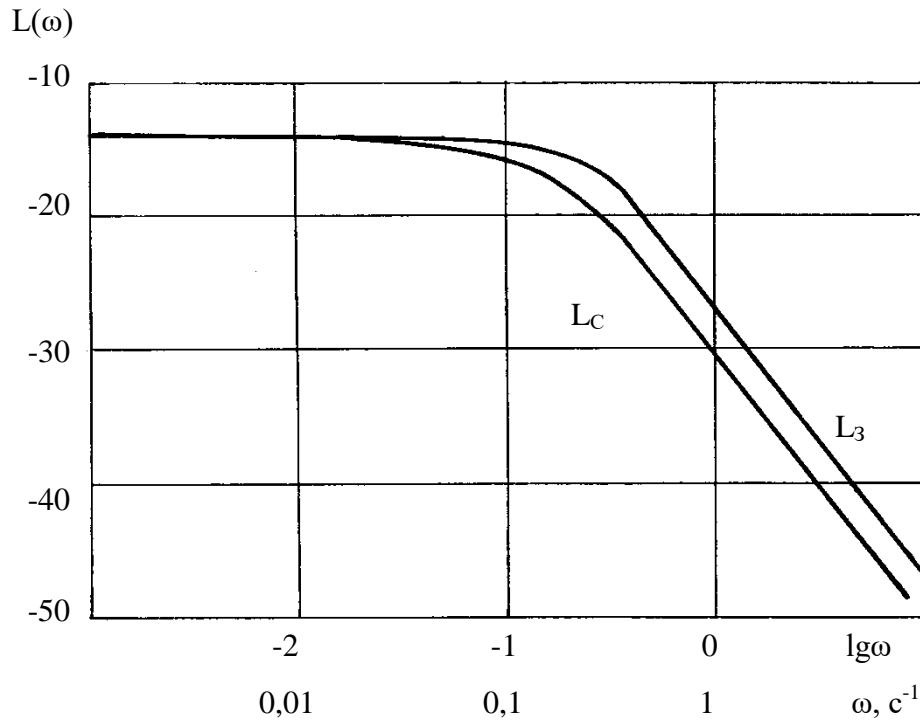


Рисунок 14 – ЛАЧХ коригувальних пристроїв до прикладу 1

Приклад 2. Виконати спрощення передатної функції коригувального пристрою

$$W_K(s) = \frac{0,0016s^4 + 0,012s^3 + 0,1025s^2 + 0,3s + 1}{0,5s^3 + 6s^2 + 10s}$$

Побудуємо логарифмічну амплітудно-частотну характеристику пристрою $L_3(\omega)$. Для цього у $W_K(s)$ виконаємо заміну $s=j\omega$, за відомими правилами виділимо дійсну $P(\omega)$ та уявну $Q(\omega)$ частини одержаного виразу і знайдемо формулу для побудови ЛАЧХ:

$$\begin{aligned} L_3(\omega) &= 20 \lg A(\omega) = 20 \lg \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)} = \\ &= 20 \lg \left(\frac{0,0016\omega^4 - 0,0575\omega^2 + 1}{10\omega\sqrt{0,0025\omega^4 + 0,26\omega^2 + 1}} \right). \end{aligned}$$

ЛАЧХ для заданого коригувального пристрою $L_3(\omega)$ наведена на рисунку 15. Виконаємо апроксимацію одержаної характеристики лініями стандартного нахилу (-20 дБ/дек та +20 дБ/дек) і одержимо апроксимовану ЛАЧХ $L_a(\omega)$. Вона розкладається на суму ЛАЧХ двох ланок – ідеальної інтегрувальної та форсуючої другого порядку. Тоді $L_a(\omega)$ відповідає передатна функція

$$W_a(s) = \frac{1}{T_1 s} (T_2^2 s^2 + 2\xi T_2 s + 1),$$

де T_1 і T_2 визначаються із $L_a(\omega)$ як показано на рисунку 5.

Максимальне відхилення $L_a(\omega)$ від $L_3(\omega)$ складає більше 10 дБ і ширина піка складає близько 0,5 декади. В цьому випадку досягти більшої точності апроксимації можна підбором коефіцієнта коливальності ξ . Прийемо для передатної функції $W_c(s)$ спрощеного коригувального пристрою $\xi=0,15$, знайдемо постійні часу

$$\frac{1}{T_1} = 0,1 ; T_1 = 10 ; \frac{1}{T_2} = 5,62 ; T_2 = 0,178,$$

і тоді

$$W_c(s) = \frac{1}{10s} (0,178^2 s^2 + 2 \cdot 0,15 \cdot 0,178s + 1) = \frac{0,032s^2 + 0,053s + 1}{10s}.$$

На рисунку 15 побудована ЛАЧХ $L_c(\omega)$ для спрощеного коригувального пристрою, яка мало відрізняється від заданої $L_3(\omega)$.

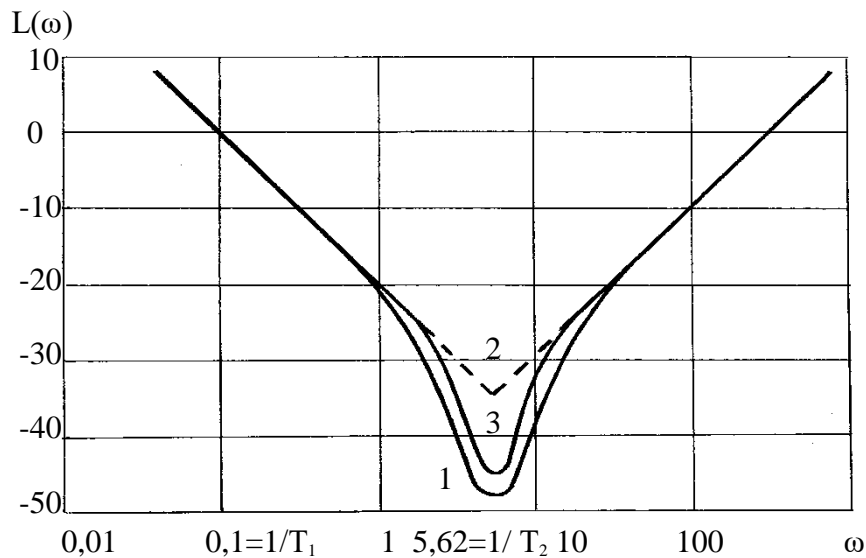


Рисунок 15 – ЛАЧХ до прикладу 2:
 1 – задана $L_3(\omega)$; 2 – апроксимована $L_a(\omega)$;
 3 – спрощена $L_c(\omega)$

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Положення про курсове проєктування у Вінницькому національному технічному університеті / розроб. Д. Х. Штофель. Вінниця : ВНТУ, 2024. 52 с.
2. Положення про організацію освітнього процесу у Вінницькому національному технічному університеті / розроб. О. Петров. Вінниця : ВНТУ, 2024. 43 с.
3. Положення про порядок організації та проведення заліків, диференційованих заліків, екзаменів у Вінницькому національному технічному університеті / розроб.: О. Войтович, С. Тужанський, О. Петров. Вінниця : ВНТУ, 2024. 22 с.
4. Положення про рейтингову систему оцінювання навчальних досягнень здобувачів вищої освіти у Вінницькому національному технічному університеті / розроб.: О. Войтович, О. Петров, С. Тужанський. Вінниця : ВНТУ, 2024. 14 с.
5. Кулік А. С., Пасічник С. М. Теорія автоматичного управління : навч. посіб. до лаб. робіт / Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т». Харків : ХАІ, 2021. 87 с. : рис., табл.
6. Невлюдов І. Ш., Токарева О. В. Теорія автоматичного управління (збірник задач) : навч. посіб. для студ. спец. 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. Харків : Панов А. М., 2020. 345 с. : рис., табл.
7. Теорія автоматичного управління [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спец. 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем» / уклад.: О. Й. Штіфзон, П. В. Новіков, В. П. Бунь. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 144 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/6b8b7a9b-479a-4aaf-879a-4c324cc1eb4e/content> (дата звернення: 18.05.2025).
8. Теорія автоматичного управління. Оптимальні системи управління : навч. посіб. для викон. практ. завдань та курсової роботи для студ. спец. 151 «Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології» / уклад.: С. О. Бобріков, Є. Д. Пічугін, С. А. Положаєнко ; Одес. нац. політехн. ун-т. Одеса : Екологія, 2020. 45, [2] с. : рис.

Додаток А
Зразок оформлення титульного аркуша

Вінницький національний технічний університет

Факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації

Кафедра комп'ютерних систем управління

КУРСОВИЙ ПРОЄКТ

з дисципліни «Теорії автоматичного управління»
на тему: «Синтез послідовного коригувального пристрою»

08-33.ТАУ.**XXX**.00.000 ПЗ

Виконав студент 4-го курсу групи
спеціальності 151(174) «Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології»

Ім'я ПРІЗВИЩЕ

Керівник _____

Кількість балів: _____

Оцінка ЄКТС _____

Члени комісії:

Вінниця – 2024 рік

Додаток Б
Зразок оформлення індивідуального завдання

Вінницький національний технічний університет
Факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації
Кафедра комп'ютерних систем управління
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
Освітньо-професійна програма «Інтелектуальні комп'ютерні системи управління»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав.кафедри КСУ

« ____ » _____ 2024 року

ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

на курсовий проєкт з дисципліни «Теорія автоматичного управління»

Тема проєкту: Синтез послідовного коригувального пристрою.

Завдання: виконати синтез послідовного коригувального пристрою САУ.

Вхідні дані до виконання проєкту:

Структурна схема початкової САУ.

Передатна функція першого блоку $W_1(s) = \frac{s+b}{s^2+d}$.

Параметри першого блоку $b=1,11$, $d=11,1$.

Передатна функція другого блоку $W_2(s) = \frac{K}{as^2+cs+1}$.

Параметри другого блоку $a=1,11$, $c=11,1$.

Методи виконання завдання:

Для непарних номерів варіанта: синтез послідовного коригувального пристрою виконати за допомогою метода логарифмічних частотних харак-

теристик; спрощення передатної функції коригувального пристрою виконати аналітичним методом.

Для парних номерів варіанта: синтез послідовного коригувального пристрою виконати за допомогою стандартних перехідних характеристик, спрощення передатної функції коригувального пристрою виконати графічним методом.

Також студент може виконати завдання іншими методами.

Орієнтовний зміст пояснювальної записки:

Анотація

Зміст

Вступ

1 Огляд сучасних конструкторських рішень

2 Розроблення функціональної схеми пристрою

3 Конструкторський розділ

4 Моделювання роботи пристрою

Висновки

Список використаних джерел

Дата видачі завдання: _____.

Строк подання завершеного проєкту: _____.

Керівник _____ Ім'я ПРІЗВИЩЕ

Завдання отримав _____ Ім'я ПРІЗВИЩЕ

Додаток В **Зразок оформлення анотації**

АНОТАЦІЯ

Романенко В. С. Розроблення цифрового аналізатора спектру фонограм : курсовий проєкт з дисципліни «Аналогова та цифрова схемотехніка»

У курсовому проєкті розроблена конструкторська документація на портативний електронний цифровий аналізатор спектру фонограм у вигляді WAV файлів. Досліджено сучасний рівень розвитку аналізаторів спектру звукових сигналів, розроблено функціональну схему аналізатора спектру фонограм, проведено конструкторські розрахунки та моделювання роботи пристрою. Розроблений аналізатор спектру відповідає вимогам технічного завдання, оснащений LCD дисплеєм, портом USB, електроживлення від елемента напругою 9 В, напрацювання на відмову 9600 год, споживана потужність 15 Вт, габаритні розміри 95 мм × 72 мм × 35 мм, маса 160 г.

Ключові слова: аналізатор спектру, цифрова схемотехніка, WAV файл, функціональна схема, конструкторська документація, моделювання роботи пристрою.

Додаток Г
Зразок оформлення змісту

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Сучасні аналізатори звукового спектру	7
2 Розроблення функціональної схеми пристрою	12
2.1 Частотний аналіз звукового сигналу.....	12
2.2 Розроблення структурної схеми пристрою	17
2.3 Вибір та аналіз роботи мікроконтролера.....	20
2.4 Схема електрична принципова пристрою	24
3 Конструкторський розділ	28
3.1 Аналіз елементної бази.....	28
3.2 Розроблення конструкції приладу	32
3.3 Розрахунки друкованих провідників.....	35
3.4 Розрахунки електромагнітної сумісності приладу	36
3.5 Розрахунки надійності приладу	38
4 Моделювання роботи пристрою	41
4.1 Вибір середовища і процедура моделювання	41
4.2 Аналіз результатів моделювання.....	43
Висновки	45
Список використаних джерел	47

					08-33.ТАУ.008.00.000 ПЗ			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>					Синтез послідовного коригувального пристрою	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Перевір.</i>							3	48
<i>Реценз.</i>						ВНТУ гр.		
<i>Н. Контр.</i>								
<i>Затверд.</i>								

Додаток Д
Варіанти завдання

Варіант	a	b	c	d	K	$W_1(s)$	$W_2(s)$
1.	22	14	2,5	1,3	0,4	$(s+b)/(s+d)$	$K/(as^2+cs+1)$
2.	13	2,8	2	6	100	$(s+b)$	$K/[(s+d)(as^2+cs+1)]$
3.	0,2	0,9	0,06	2	65	$(s+b)/(s+d)$	$K/(as^2+cs+1)$
4.	0,03	0,5	0,07	0,3	125	$(s+b)$	$K/((s+d)(as^2+cs+1))$
5.	0,5	0,42	0,2	10	200	$K/(s+d)$	$(s+b)/(as^2+cs+1)$
6.	0,1	40	0,04	0,8	0,04	$(s+b)/(s+d)$	$K/(as^2+cs+1)$
7.	0,03	6	0,01	1,5	180	$(s+b)$	$K/((s+d)(as^2+cs+1))$
8.	0,25	1,7	0,02	80	80	$K/(s+d)$	$(s+b)/(as^2+cs+1)$
9.	0,3	60	0,03	6	0,12	$(s+b)/(s+d)$	$K/(as^2+cs+1)$
10.	0,25	100	0,09	20	0,4	$(s+b)$	$K/((s+d)(as^2+cs+1))$
11.	0,4	60	0,08	180	25	$K/(s+d)$	$(s+b)/(as^2+cs+1)$
12.	0,21	9	0,004	30	75	$(s+b)/(s+d)$	$K/(as^2+cs+1)$
13.	0,021	40	0,003	20	3	$(s+b)$	$K/((s+d)(as^2+cs+1))$
14.	0,04	30	0,012	250	10	$K/(s+d)$	$(s+b)/(as^2+cs+1)$
15.	20	6	7	0,03	0,02	$(s+b)/(s+d)$	$K/(as^2+cs+1)$
16.	31	3	1,4	2,5	2	$(s+b)$	$K/((s+d)(as^2+cs+1))$
17.	33	15	0,7	75	100	$K/(s+d)$	$(s+b)/(as^2+cs+1)$
18.	13	0,1	0,5	0,25	125	$(s+b)/(s+d)$	$K/(as^2+cs+1)$
19.	0,1	0,12	0,03	0,4	4	$(s+b)$	$K/((s+d)(as^2+cs+1))$
20.	0,025	120	0,09	20	0,4	$(s+b)$	$K/((s+d)(as^2+cs+1))$
21.	0,04	90	0,08	180	25	$K/(s+d)$	$(s+b)/(as^2+cs+1)$
22.	0,03	6	0,004	30	75	$(s+b)/(s+d)$	$K/(as^2+cs+1)$
23.	0,05	60	0,003	20	3	$(s+b)$	$K/((s+d)(as^2+cs+1))$
24.	0,007	10	0,012	250	10	$K/(s+d)$	$(s+b)/(as^2+cs+1)$
25.	13	0,7	0,6	0,2	0,08	$K/(s+d)$	$(s+b)/(as^2+cs+1)$
26.	3	10	0,7	75	100	$K/(s+d)$	$(s+b)/(as^2+cs+1)$
27.	1	0,01	0,5	0,25	125	$(s+b)/(s+d)$	$K/(as^2+cs+1)$
28.	0,01	4	0,03	0,4	4	$(s+b)$	$K/((s+d)(as^2+cs+1))$
29.	0,005	2	0,04	75	25	$K/(s+d)$	$(s+b)/(as^2+cs+1)$
30.	0,01	5	0,004	30	75	$(s+b)/(s+d)$	$K/(as^2+cs+1)$
31.	0,01	50	0,003	20	3	$(s+b)$	$K/((s+d)(as^2+cs+1))$
32.	0,07	20	0,012	250	10	$K/(s+d)$	$(s+b)/(as^2+cs+1)$

33.	0,4	0,41	0,5	0,25	125	$(s+b)/(s+d)$	$K/(as^2+cs+1)$
34.	0,1	2	0,3	0,4	4	$(s+b)$	$K/((s+d)(as^2+cs+1))$
35.	0,3	4	0,04	75	25	$K/(s+d)$	$(s+b)/(as^2+cs+1)$
36.	0,2	50	0,04	0,8	0,04	$(s+b)/(s+d)$	$K/(as^2+cs+1)$
37.	1,5	30	0,8	8	0,8	$(s+b)$	$K/((s+d)(as^2+cs+1))$
38.	0,2	18	0,3	70	50	$K/(s+d)$	$(s+b)/(as^2+cs+1)$
39.	0,01	5	0,004	30	75	$(s+b)/(s+d)$	$K/(as^2+cs+1)$
40.	0,01	50	0,1	20	3	$(s+b)$	$K/((s+d)(as^2+cs+1))$
41.	0,07	20	0,012	250	10	$K/(s+d)$	$(s+b)/(as^2+cs+1)$
42.	0,4	0,41	0,5	0,25	125	$(s+b)/(s+d)$	$K/(as^2+cs+1)$
43.	0,1	2	0,3	0,4	4	$(s+b)$	$K/((s+d)(as^2+cs+1))$
44.	0,025	120	0,09	20	0,4	$(s+b)$	$K/((s+d)(as^2+cs+1))$
45.	0,04	90	0,08	180	25	$K/(s+d)$	$(s+b)/(as^2+cs+1)$
46.	0,25	100	0,09	20	0,4	$(s+b)$	$K/((s+d)(as^2+cs+1))$
47.	0,4	60	0,08	180	25	$K/(s+d)$	$(s+b)/(as^2+cs+1)$
48.	0,21	9	0,004	30	75	$(s+b)/(s+d)$	$K/(as^2+cs+1)$
49.	0,01	5	0,004	30	75	$(s+b)/(s+d)$	$K/(as^2+cs+1)$
50.	0,01	50	0,003	20	3	$(s+b)$	$K/((s+d)(as^2+cs+1))$
51.	0,07	20	0,012	250	10	$K/(s+d)$	$(s+b)/(as^2+cs+1)$
52.	0,4	0,41	0,5	0,25	125	$(s+b)/(s+d)$	$K/(as^2+cs+1)$

Додаток Е

Параметри нормованої передатної функції

Для систем з монотонними перехідними процесами

Нормовані передатні функції мають вигляд :

– для статичних систем

$$W_3(s_*) = \frac{K_p / (K_p + 1)}{s_*^n + A_{n-1}s_*^{n-1} + A_{n-2}s_*^{n-2} + \dots + A_1s + 1} \quad (1)$$

– для систем з астатизмом першого порядку

$$W_3(s_*) = \frac{1}{s_*^n + A_{n-1}s_*^{n-1} + A_{n-2}s_*^{n-2} + \dots + A_1s + 1}, \quad (2)$$

де K_p – коефіцієнт підсилення розімкненої САУ, який визначається через допустиму усталену похибку $\varepsilon_{уст}$ статичної системи

$$\varepsilon_{уст} = 1 - \frac{K_p}{K_p + 1}; \quad (4)$$

s_* – нормована змінна,

$$s_* = \frac{s}{\Omega_0}, \quad (5)$$

Ω_0 – коефіцієнт нормування, що визначається через істинний t і нормований τ час

$$\tau = t \Omega_0. \quad (6)$$

Таблиця 1 – Коефіцієнти A_i нормованих передатних функцій виду (1) і (2) для систем з монотонними перехідними процесами

Порядок n передатної функції	Значення коефіцієнтів				
	A_5	A_4	A_3	A_2	A_1
2					2
3				3	3
4			4	6	4
5		5	10	10	5
6	6	15	20	15	6

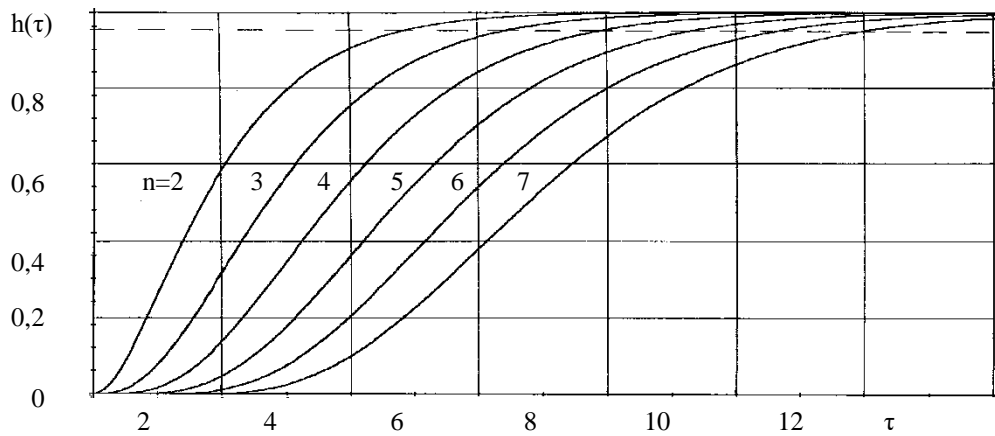


Рисунок 1 – Стандартні перехідні характеристики для нормованих передатних функцій виду (1) і (2) з коефіцієнтами A_i відповідно до таблиці 1

Таблиця 2 – Коефіцієнти A_i нормованих передатних функцій виду (1) і (2) для систем з коливальними перехідними процесами

Порядок n передатної функції	Значення коефіцієнтів					
	A_6	A_5	A_4	A_3	A_2	A_1
2						1,38
3					2,05	2,39
4				2,6	3,8	2,8
5			2,5	5,3	5,46	3,64
6		3,73	8	10,3	8,56	4,18
7	2,76	8,12	11,74	14,35	11,5	4,86

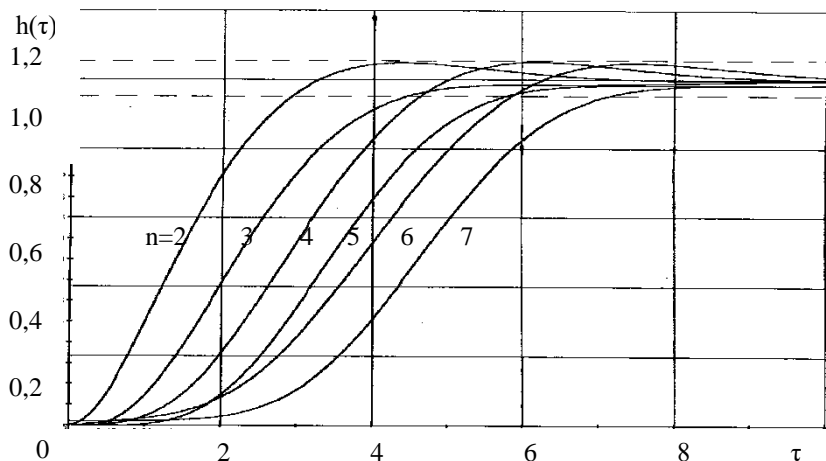


Рисунок 2 – Стандартні перехідні характеристики для нормованих передатних функцій виду (1) і (2) з коефіцієнтами A_i відповідно до таблиці 2

Для систем з астатизмом другого порядку

Нормовані передатні функції мають вигляд:

– для систем з астатизмом другого порядку

$$W_3(s_*) = \frac{A_1 s_* + 1}{s_*^n + A_{n-1} s_*^{n-1} + A_{n-2} s_*^{n-2} + \dots + A_1 s + 1}$$

Таблиця 3– Коефіцієнти A_i нормованих передатних функцій виду (3)

Порядок n передатної функції	Значення коефіцієнтів				
	A_5	A_4	A_3	A_2	A_1
2					2,5
3				5,1	6,35
4			7,22	16,3	11,83
5		9	29	38	18
6	11	45,8	92,3	82,3	27,7

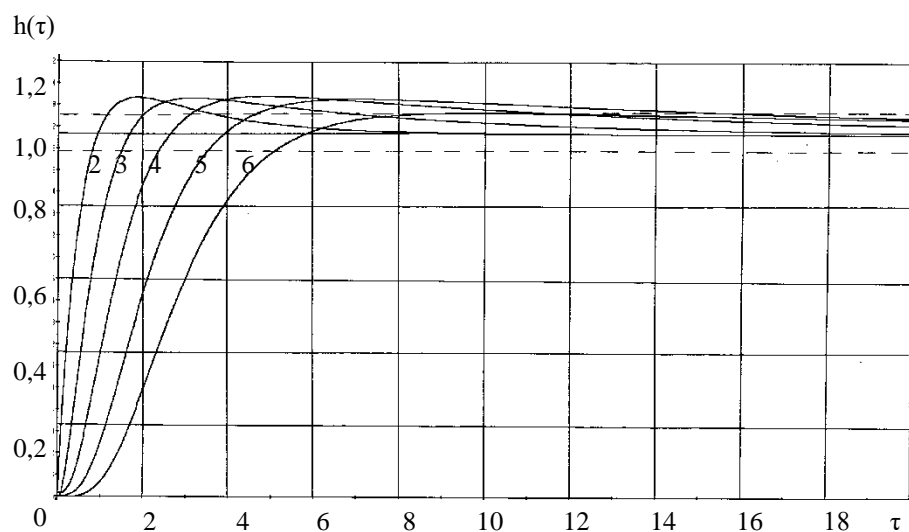


Рисунок 3 – Стандартні перехідні характеристики для нормованих передатних функцій виду (3) з коефіцієнтами A_i відповідно до таблиці 3

Електронне навчальне видання

**Василь Васильович Присяжнюк
Микола Володимирович Петричко**

Методичні вказівки до виконання курсових проєктів з дисципліни «Теорія автоматичного управління» зі спеціальностей «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» та «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Рукопис оформив *В. Присяжнюк*

Редактор *Н. Кравчук*

Оригінал-макет виготовлено в *РВВ ВНТУ*

Підписано до видання 01.10.2025 р.

Гарнітура Times New Roman.

Зам. № P2025-138

Видавець та виготовлювач
Вінницький національний технічний університет,
Редакційно-видавничий відділ.

ВНТУ, ГНК, к. 114.

Хмельницьке шосе, 95,

м. Вінниця, 21021.

press.vntu.edu.ua;

Email: rvv.vntu@gmail.com

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК No 3516 від 01.07.2009 р.