

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Кафедра автоматизації виробничих процесів

Теорія автоматичного управління

Методичні вказівки для виконання курсової роботи для здобувачів спеціальності G7«Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» всіх форм навчання

Затверджено
на засіданні кафедри автоматизації
виробничих процесів,
протокол № 10 від 27 травня 2026 р.

м. Кропивницький
2026

Теорія автоматичного управління. Методичні вказівки для виконання курсової роботи для здобувачів спеціальності G7«Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» всіх форм навчання. /Укладачі: А.М. Мацуй, О.М. Сербул, М.О. Федотова. – Кропивницький: ЦНТУ, 2026. - 59 с.

Наведені завдання у вигляді принципів схем САК, дані математичні моделі динамічних ланок та значення їх параметрів. Виконання курсової роботи розраховане на використання навчальної та довідникової літератури. Бажані регулярні консультації з викладачем.

Укладачі: А.М. Мацуй – доктор технічних наук, професор
О.М. Сербул – кандидат технічних наук, доцент
М.О. Федотова – кандидат технічних наук, асистент.

Рецензент: О.К. Дідик – кандидат технічних наук, доцент.

Вступ

Метою курсової роботи є закріплення розрахункових методів розв'язання задач теорії автоматичного управління зі знаходженням стійкості, якості, оптимальних параметрів та структури САК.

Вихідні дані на курсову роботу видаються у вигляді регульованого об'єкта, принципової схеми системи автоматичного управління, її динамічних ланок та їх параметрів. Тема курсової роботи у всіх здобувачів однакова, вимоги до системи автоматичного регулювання також однакові, але різні варіанти систем і параметрів.

В процесі виконання курсової роботи здобувач повинен закріпити основні знання і методи розрахунків стосовно лінійних неперервних систем автоматичного управління. Кожна система розробляється методом аналізу та синтезу. Результати порівнюються. Після самостійного виконання курсової роботи студент повинен твердо закріпити підходи і методологію розробки лінійних систем автоматичного управління, які потім слугують базою для розробки інших типів САК. Чітка і сумлінна робота над проектом з використанням навчальної та довідникової літератури гарантує оволодіння основними методиками, прийомами та поняттями, що дозволяє в перспективі так же вільно працювати з іншими типами систем автоматичного управління.

1. Методичні вказівки для виконання курсової роботи

1.1. Мета і структура курсової роботи

Метою курсової роботи є закріплення розрахункових методів розв'язання задач теорії автоматичного управління з знаходженням стійкості, якості, оптимальних параметрів та структури САК.

Вихідні дані на курсову роботу задаються у вигляді принципової схеми, диференціальних рівнянь елементів і конкретних значень їх параметрів.

Курсова робота виконується в вигляді одного листа креслення і пояснювальної записки. На листі креслення подаються функціональна, принципова і структурна схеми САР, ЛАЧХ розімкнутої системи, АФЧХ розімкнутої системи, перехідна характеристика. Приводяться в порівнянні задані і отримані показники якості.

У пояснювальній записці виконується побудова характеристик регульованого об'єкта, отримання рівнянь динаміки системи, частотних характеристик, аналіз і синтез САР. Будується область стійкості, крива перехідного процесу. Визначаються показники якості і запаси стійкості системи.

1.2. Тема курсової роботи

Тема курсової роботи однакова для всіх здобувачів: “Аналіз та синтез типової лінійної системи автоматичного регулювання”.

1.3. Вимоги до САР

Вимоги до САР однакові для усіх варіантів систем:

- час регулювання приймається зменшеним на $n\%$ від отриманого для заданих параметрів системи.

- максимальне перерегулювання не повинно перевищувати 25%.

- запас стійкості за модулем не менше 15дБ; за фазою не менше 30°.

В процесі синтезу САР розробити систему, оптимальну за швидкодією.

1.4. Зміст пояснювальної записки повинен вміщувати наступні розділи:

1. Завдання на розробку курсової роботи, підписане керівником.

2. Вихідні дані для розробки САР, взяті з методичних вказівок згідно заданому варіанту – схема, рівняння, значення параметрів.

3. Вступ.

4. Устрій, принцип регулювання, принцип дії.

5. Функціональна схема САР.

6. Структурна схема САР (з конкретними диференціальними рівняннями елементів і їх передаточними функціями).

7. Визначення передаточних функцій розімкнутої і замкнутої систем і характеристичного рівняння.

8. Побудова амплітудно-фазової і логарифмічних частотних характеристик розімкнутої системи.

9. Побудова дійсної частотної характеристики замкнутої системи.

10. Визначення стійкості замкнутої системи і запасів стійкості. Побудова області стійкості.

11. Оцінка якості регулювання замкнутої САР по ЛАЧХ розімкнутої системи.

12. Побудова перехідного процесу замкнутої системи (за допомогою персонального комп'ютера і наближеним способом).

13. Визначення прямих показників якості САР за перехідним процесом, визначення часу регулювання системи як вимоги до САР для її аналізу і синтезу (п.3).

14. Аналіз системи автоматичного регулювання.

15. Побудова перехідного процесу і визначення показників якості для системи, розробленої шляхом аналізу.

16. Побудова бажаної ЛАЧХ розімкнутої оптимальної за швидкодією системи по вимогам, які пред'явлені до неї.

17. Синтез коректуючого пристрою САР за логарифмічними частотними характеристиками.

18. Побудова кривої перехідного процесу синтезованої САР.

19. Визначення прямих показників якості синтезованої САР.

20. Висновки.

21. Список використаної літератури.

1.5. Вимоги до оформлення пояснювальної записки

Пояснювальна записка виконується друкованим шрифтом або пишеться від руки чорнилом темного кольору на одній стороні листа нелінованого паперу стандартного розміру (формат А4).

Поля мають передбачені стандартом розміри. Листи нумеруються і зшиваються. Титульний лист виконується з ватману і підписується тушшю. Схеми виконуються олівцем згідно стандартам з обов'язковим використанням інструментів для креслення.

В пояснювальній записці повинні бути: завдання (підписане керівником), текстова частина відповідно вказаному змісту з необхідним графічним матеріалом, висновок, список використаної літератури і зміст роботи. В висновках наводяться основні кількісні і якісні результати роботи і її оцінка. Зокрема дається порівняння прямих показників якості регулювання вихідної системи, вимог до якості регулювання і результатів, отриманих в наслідок аналізу і синтезу системи.

Список використаної літератури складається в алфавітному порядку. Літературні джерела вказуються відповідно стандарту. В пояснювальній записці обов'язково роблять вказівки на використану літературу (в квадратних дужках цифрами). Зміст забезпечується показником сторінок і розміщується спочатку пояснювальної записки.

Викладки в пояснювальній записці повинні бути логічними, чіткими і короткими. Терміни і визначення повинні бути єдиними і відповідати

прийнятим стандартам або загальноприйнятим в науково-технічній літературі.

Умовні буквенні позначення фізичних, математичних та інших величин, а також умовні графічні позначення повинні відповідати прийнятим стандартам. Якщо використовувані в формулах позначення раніше в пояснювальній записці не зустрічались, то необхідно давати їм пояснення.

Ілюстративним матеріалом до пояснювальної записки є: схеми (принципова, структурна, функціональна), ескізи і графіки. Кількість ілюстрацій повинна бути достатньо повною для пояснення тексту. Всі ілюстрації нумеруються, вони повинні мати тематичну назву, а при необхідності підрисуночний текст.

Усі графіки обов'язково будуються в масштабі, наприклад, логарифмічному. Логарифмічну амплітудну і фазову частотну характеристики будують на одному спеціальному листі один під одним. Для виготовлення такого листа доцільно використовувати шкалу кубів звичайної 25 міліметрової логарифмічної лінійки.

Для розрахунків використовувати сучасну обчислювальну техніку.

2. Основні особливості виконання курсової роботи

Курсову роботу виконують відповідно змісту пояснювальної записки (п.1.4). Відмічені етапи роботи розглядались у теоретичній частині курсу і не викликають будь-яких несподіванок. Однак, в кожній з курсових робіт відповідно завданням можуть виникати певні особливості, неврахування яких буде приводити до помилкового результату. Основні з особливостей наступні.

2.1. Підготовка даних

Дані відповідно завданню необхідно проаналізувати, уяснити розміри параметрів системи автоматичного регулювання та привести їх в одній системі

одиниць, найкраще в міжнародній. Це стосується сталих часу та коефіцієнтів підсилення динамічних ланок.

2.2. Аналіз складу динамічних ланок

Необхідно проаналізувати склад динамічних ланок системи. Якщо до складу системи автоматичного регулювання входить інтегруюча ланка, необхідно її вичленувати і визначитись з передаточною функцією. Інтегруюча ланка звичайно має рівняння

$$X_{\text{вих}} = k \int X_{\text{вх}} dt$$

або в зображенні за Лапласом

$$p\bar{X}_{\text{вих}} = k \cdot \bar{X}_{\text{вх}},$$

де k - коефіцієнт, в який, наприклад, у випадку двигуна постійного струму входять стала двигуна по напрузі, передаточне відношення від двигуна до движка потенціометра (регулювального органа) та коефіцієнт пропорційності між положенням движка потенціометра і його вихідною напругою. В даному випадку і в більшості випадків коефіцієнт k має розмір $1/c$ або c^{-1} . Однак, інколи, враховуючи специфіку системи автоматичного регулювання коефіцієнт може бути у розчленованому вигляді. Тобто, у нашому прикладі будемо мати сталу часу двигуна, передаточне відношення та коефіцієнт пропорційності між положенням движка потенціометра і його вихідною напругою. Можуть бути задані і певні проміжні варіанти. В такому випадку потрібно відшукати в складі системи автоматичного регулювання подібні динамічні елементи і об'єднати їх в інтегруючу динамічну ланку.

Приклад 1. До складу системи автоматичного регулювання входять: задавач у вигляді потенціометра; електронний підсилювач з коефіцієнтом підсилення k_{Π} ; виконавчий двигун постійного струму з коефіцієнтом передачі $k_{\sigma} \left(\frac{\text{град}}{B \cdot c} \right)$; редуктор з передаточним відношенням k_p ; потенціометр, що виконує

функції регульовального органа, з передаточним коефіцієнтом $k_{po}(\frac{B}{град})$; електромашинний підсилювач з передаточним коефіцієнтом k_M ; електричний двигун постійного струму разом з тахогенератором, що мають передаточний коефіцієнт k_{dm} .

Необхідно з усієї сукупності динамічних ланок вичленувати інтегруючу ланку.

З аналізу пристроїв, що входять до складу системи, видно, що один неперервний ланцюг складають три елементи – виконавчий двигун постійного струму, редуктор і потенціометр (регульовальний орган). Вцілому вони складають інтегруючу ланку з передаточним коефіцієнтом $k = k_o \cdot k_p \cdot k_{po}$. Розмір цього коефіцієнта $1/c$.

2.3. Подання інтегруючої ланки.

При отриманні передаточних функцій динамічних елементів у вигляді інтегруючої ланки її необхідно приводити до виду

$$W(p) = \frac{1}{Tp}.$$

Сталу часу отримаємо з передаточного коефіцієнта k , що має розмір $1/c$. В такому вигляді інтегруючу ланку включаємо до складу структурної схеми системи автоматичного регулювання.

2.4. Перетворення виразів складних динамічних ланок.

У випадку отримання передаточних функцій динамічних елементів, що не відповідають виду типових ланок, необхідно здійснити перетворення виразів і звести їх до виду, що дозволяє трактувати даний динамічний елемент як поєднання простих динамічних ланок.

Приклад 2. Рівняння динаміки динамічного елемента має вигляд

$$T \frac{d^2 x_{BHX}}{dt^2} + \frac{dx_{BHX}}{dt} = kx_{BX},$$

де T – стала часу, с; k – передаточний коефіцієнт, $\frac{см}{B \cdot c}$.

Подати даний динамічний елемент у вигляді складеного з типових динамічних ланок.

Перейшовши до зображення за Лапласом, отримаємо

$$p(Tp + 1)\bar{x}_{ВИХ} = k\bar{x}_{ВХ}.$$

Передаточна функція динамічного елемента буде

$$W(p) = \frac{\bar{x}_{ВИХ}}{\bar{x}_{ВХ}} = \frac{k}{p(Tp + 1)}.$$

У даному виразі k має розмір $\frac{см}{В \cdot с}$, що не дозволяє виділити інтегруючу динамічну ланку. Для цього необхідно розглянути і приєднати до даного динамічного елемента інші, щоб отримати коефіцієнт з розміром $1/с$.

Тоді поєднання елементів дозволить виділити два послідовно з'єднаних динамічних елемента з передаточною функцією

$$W(p) = \frac{1}{Tp} \cdot \frac{1}{(Tp + 1)}.$$

Один з елементів буде ідеальною інтегруючою ланкою, інший аперіодичною ланкою.

Приклад 3. Рівняння динамічного елемента має вигляд

$$T_1 \cdot \frac{d^2 X_{ВИХ}}{dt^2} + \frac{dX_{ВИХ}}{dt} = k_1 \cdot \frac{dX_{ВХ}}{dt} + \frac{k_2}{T_2} \cdot X_{ВХ},$$

де T_1, T_2 – сталі часу, с; k_1 – коефіцієнт підсилення, см/В; k_2 – коефіцієнт підсилення, см/В.

Необхідно подати даний динамічний елемент у вигляді складеного з типових динамічних ланок.

Перейдемо до зображення за Лапласом і виконаємо перетворення отриманого виразу

$$p(T_1 p + 1) \cdot \bar{X}_{ВИХ} = (k_1 p + \frac{k_2}{T_2}) \cdot \bar{X}_{ВХ}.$$

Звільнимось від знаменника в правій частині рівняння, отримавши

$$T_2 p(T_1 p + 1) \bar{X}_{ВИХ} = (T_2 k_1 p + k_2) \bar{X}_{ВХ}.$$

Поділимо на k_2 праву і ліву частини отриманого рівняння і одержимо

$$\frac{T_2}{k_2} p(T_1 p + 1) \bar{X}_{ВИХ} = (k_1 \frac{T_2}{k_2} p + 1) \cdot \bar{X}_{ВХ}.$$

З врахуванням розмірів k_1 і k_2 та позначення $\frac{k_1}{k_2} \cdot T_2 = T_2'$ перепишемо рівняння у вигляді

$$\frac{T_2}{k_2} p(T_1 p + 1) \bar{X}_{ВИХ} = (T_2' p + 1) \cdot \bar{X}_{ВХ}.$$

Передаточна функція динамічного елемента дорівнює

$$W(p) = \frac{\bar{X}_{ВИХ}}{\bar{X}_{ВХ}} = \frac{T_2' p + 1}{\frac{T_2}{k_2} p(T_1 p + 1)},$$

або

$$W(p) = (T_2' p + 1) \cdot \frac{1}{T_2 p} \cdot \frac{k_2}{(T_1 p + 1)}.$$

Отже, можна стверджувати, що даний динамічний елемент є послідовним з'єднанням форсуючої ланки з передаточною функцією $(T_2' p + 1)$, ідеальної інтегруючої ланки з передаточною функцією $\frac{1}{T_2 p}$ та аперіодичної ланки з передаточною функцією $\frac{k_2}{(T_1 p + 1)}$.

2.5. Загальний етап роботи з заданою САР

Розробку курсової роботи відповідно отриманому завданню виконують включно до п.12 розділу 1.4. "Побудова перехідного процесу замкненої системи". Перехідний процес будуємо за допомогою персонального комп'ютера і наближено методом трапецоїдних або трикутних частотних характеристик. Порівнюємо результати.

Після цього виконуємо п.13 розділу 1.4. Визначаємо час регулювання по перехідному процесу САР і зменшуємо його на 25% від знайденого.

Зменшений на 25% час регулювання буде вимогою до якості САР, яку слід приєднати до загальних вимог якості, вказаних в завданні.

Якщо новий час регулювання знайдено, продовжуємо розробку САР методом аналізу та здійснюємо її синтез.

Зрозуміло, що нове значення часу регулювання можливо знайти лише для стійкої системи. Тобто, до п.12 розділу 1.4 необхідно досягти стійкості САР. Це питання розробляється в п.10 розділу 1.4. Звичайно тут ми досягаємо стійкості, побудувавши область стійкості. Однак, якщо такої області для даної системи не існує (система структурно не стійка), необхідно не виконувати пункти 11, 12, 13 розділу 1.4 і перейти частково до виконання п.14, тобто аналізу САР. Методами аналізу САР досягаємо структурної стійкості, а потім розробляємо систему як було вказано раніше. Виконуємо п. 10, 11 і так далі.

2.6. Основні теоретичні положення аналізу САР щодо впливу на їх динамічні характеристики

Продовження розробки системи автоматичного регулювання методом аналізу здійснюють з застосуванням його теоретичних положень. Звернемо увагу на основні з них.

2.6.1. Вплив на властивості системи автоматичного регулювання місцевих зворотних зв'язків

Найбільш характерними і такими, що часто використовуються є прийоми:

1. Охоплення аперіодичної ланки жорстким від'ємним зворотним зв'язком.

Жорсткий від'ємний зворотний зв'язок не змінює типу ланки, але зменшує її інерційність (сталу часу) та передаточний коефіцієнт.

2. Охоплення аперіодичної ланки гнучким від'ємним зворотним зв'язком.

Гнучкий від'ємний зворотний зв'язок не змінює структуру і передаточний коефіцієнт, а сталу часу збільшує.

3. Охоплення інтегруючої ланки зворотним зв'язком.

Жорсткий від'ємний зворотний зв'язок перетворює інтегруючу ланку в аперіодичну. Цей прийом часто використовують для зменшення порядку астатизму системи.

Гнучкий зворотний зв'язок структуру інтегруючої ланки не змінює, але збільшує її сталу часу.

4. Охоплення коливальної ланки зворотним зв'язком.

Жорсткий від'ємний зворотний зв'язок не змінює структуру коливальної ланки, але зменшує сталу часу, передаточний коефіцієнт і коефіцієнт демпфірування.

Слабкий від'ємний гнучкий зворотний зв'язок не змінює структуру коливальної ланки, але збільшує коефіцієнт демпфірування.

Сильний гнучкий від'ємний зворотний зв'язок перетворює коливальну ланку в послідовне з'єднання двох аперіодичних ланок (аперіодичну ланку другого порядку).

5. Охоплення ідеальної підсилювальної ланки інерційним зворотним зв'язком (аперіодичною ланкою).

Інерційний від'ємний зворотний зв'язок перетворює ідеальну підсилювальну ланку в реальну форсуючу.

6. Додатний жорсткий зворотний зв'язок охоплює статичні ланки (підсилювальну, аперіодичну, коливальну).

Використання додатнього жорсткого зворотного зв'язку забезпечує підвищення передаточного коефіцієнта.

2.6.2. Забезпечення стійкості САР

1. При спрягаючій частоті аперіодичної або коливальної ланок, що розташована ліворуч частоти зрізу ЛАЧХ розімкненої системи, збільшення сталої часу ланок забезпечує зростання запасу стійкості. Те ж саме отримаємо для форсуючої ланки $[W_\phi(p) = k(Tp + 1)]$, якщо її спрягаюча частота розташована праворуч частоти зрізу.

Ці залежності мають місце, якщо спрягаюча частота від частоти зрізу віддалена наближено на одну декаду. Є структури систем, в яких ці залежності не лише не виконуються, але й змінюються в протилежному напрямі.

2. Забезпечити стійкість і підвищити запас стійкості системи можливо також введенням в пряме коло допоміжних ланок.

Для цього, наприклад, можливо ввести аперіодичну ланку зі сталою часу, яка значно більша сталих часу аперіодичних ланок, що є в системі.

Аперіодична ланка з великою сталою часу є фільтром низьких частот, який пригнічує високочастотні перешкоди, що є перевагою даного прийому. Значне зменшення частоти зрізу і, як наслідок, швидкодії системи складають його недолік.

3. Для будь-якої структурно-стійкої системи стійкість і необхідний запас стійкості можна забезпечити введенням форсуючої ланки ($W_{\phi}(p) = Tp + 1$). Одночасно при цьому збільшується і швидкодія внаслідок того, що високочастотна частина ЛАЧХ піднімається. При цьому суттєво збільшується вплив високочастотних перешкод, що є значним недоліком і обмежує даний вид демпфірування.

4. При демпфіруванні систем можливо опускати і середньочастотну асимптоту ЛАЧХ. Для цього в пряме коло системи вмикають ланку з передаточною функцією

$$W(p) = \frac{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}{(T_3 p + 1)(T_4 p + 1)}.$$

Цей вид демпфірування використовують найбільш часто.

2.6.3. Компенсація

Динамічні ланки регульованих об'єктів найбільш часто є аперіодичними з передаточною функцією вигляду

$$W(p) = K_{об} \frac{1}{T_{об} p + 1}.$$

Внаслідок наявності інерційності в об'єкті весь контур регулювання працює з інерцією. Якщо стала часу мала, то її вплив на швидкодію системи також

невеликий. Але великі сталі часу негативно впливають на процес регулювання, і необхідно добиватись компенсації цього впливу. Вигляд передаточної функції об'єкта вказує, що для такої компенсації необхідно мати в контурі регулятор, передаточна функція якого містила б в чисельнику вираз $(T_p p + 1)$. Якщо при цьому досягти ще й однаковості сталих часу $T_p = T_{об}$, то чисельник і знаменник скоротяться. Даний прийом називають компенсацією інерційності. Такий підбір регулятора не лише суттєво спрощує вихідну передаточну функцію об'єкта, але ще й значно покращує режим роботи контура регулювання.

Таким прийомом можна компенсувати і будь-яку ланку складної системи автоматичного регулювання.

2.7. Корекція систем автоматичного регулювання змінного струму

Послідовні коректуючі пристрої змінного струму виконують з активних опорів і конденсаторів. В системах змінного струму послідовні коректуючі пристрої використовувати менш зручно внаслідок того, що вони відрізняються одноманітністю властивостей. Крім того, вони забезпечують наближене диференціювання сигналів, їх динамічні характеристики суттєво залежать від зміни несучої частоти та інше.

Враховуючи недоліки коректуючих пристроїв змінного струму і неможливість внаслідок цього досягти необхідних властивостей системи, в САР змінного струму використовують пасивні чотиріполюсники постійного струму, вмикаючи їх за схемою: фазочутливий демодулятор, фільтр, чотиріполюсник постійного струму, модулятор.

2.8. Особливості заключного етапу синтезу коректуючого пристрою

В процесі синтезу коректуючого пристрою знаходять його ЛАЧХ. Отриману ЛАЧХ коректуючого пристрою знаходять в таблицях даних характеристик. Якщо така ЛАЧХ є в таблиці, то виконують розрахунки номіналів R і C , які обов'язково повинні реалізовуватись діючими стандартами

на номінали опорів та ємностей, приймають принципову схему коректуючого пристрою, приймають рішення щодо місця його ввімкнення.

Якщо знайдений коректуючий пристрій послабляє сигнал, то його компенсують збільшенням коефіцієнта підсилення діючого пристрою або вмикають додатковий підсилювач.

Якщо ЛАЧХ коректуючого пристрою складна і такої немає в таблицях, то необхідно питання вирішувати з викладачем шляхом консультування. В самих складних випадках, можливо, знадобиться змінювати незмінну частину системи, про що треба зробити відмітку в завданні.

3. Приклад виконання та оформлення курсової роботи

Нижче наведено приклад виконання та оформлення курсової роботи.

**Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет
Кафедра АВП**

Курсова робота
з курсу “Теорія автоматичного управління”

**Тема: “Аналіз та синтез типової лінійної системи
автоматичного регулювання”**

Виконав:
ст. гр. СІ-14
Іванов І.І.

Перевірив:
к.т.н., доцент
Сербул О.М.

**м. Кропивницький
2026 р.**

Зміст

Вступ	47
1. Вихідні дані для розробки САР	49
2. Будова, принцип регулювання та принцип дії САР	51
3. Функціональна схема САР	52
4. Структурна схема САР	52
5. Визначення передаточних функцій розімкнутої та замкнутої систем та характеристичного рівняння	54
6. Побудова АФЧХ, ЛАЧХ та ЛФЧХ розімкнутої системи	55
6.1. Побудова АФЧХ розімкнутої системи	55
6.2. Побудова ЛАЧХ розімкнутої системи	56
6.3. Побудова ЛФЧХ розімкнутої системи	57
7. Побудова дійсної частотної характеристики замкнутої системи	57
8. Визначення стійкості замкнутої системи і запасів стійкості. Побудова області стійкості	59
8.1. Дослідження системи на стійкість за допомогою критерію Гурвіца	59
8.2. Дослідження системи на стійкість та визначення запасів стійкості за модулем і фазою за допомогою частотного критерію Найквіста-Михайлова	59
8.3. Дослідження системи на стійкість та визначення області стійкості за методом D -розбиття в площині одного параметра	60
9. Оцінка якості регулювання замкнутої САР по ЛАЧХ розімкнутої системи	62
10. Побудова перехідного процесу замкнутої системи	63
11. Визначення прямих показників якості САР за перехідним процесом. Визначення часу регулювання системи як вимоги до САР для її аналізу та синтезу	66
12. Аналіз системи автоматичного регулювання	67
13. Побудова перехідного процесу і визначення показників якості для системи, розробленої шляхом аналізу	71
14. Побудова бажаної ЛАЧХ розімкнутої оптимальної за швидкодією системи по вимогам, які пред'явлені до неї	73
15. Синтез коректуючого пристрою САР за логарифмічними частотними характеристиками	76
16. Побудова кривої перехідного процесу синтезованої САР	77
17. Визначення прямих показників якості синтезованої САР	78
Висновки	79
Список використаної літератури	81

Вступ

Автоматизація ефективно використовується на сучасному етапі розвитку людства з метою досягнення зростання показників ресурсозбереження, поліпшення екології навколишнього середовища, якості, надійності продукції та полегшення умов праці, створення у стислі строки систем машин для комплексної механізації виробництва, а також засобів автоматизації технологічних процесів, зниження собівартості продукції, підвищення якості виробів, скорочення кількості працюючих, зменшення виробничих площ. Тепер у машинобудуванні можна автоматизувати практично будь-який виробничий процес.

Автоматизація історично розвивається, проходячи три ступеня: створення машин-автоматів і напівавтоматів на основі автоматизації робочих циклів; автоматизація систем машин, впровадження автоматичних ліній; комплексна автоматизація виробничих процесів, розробка цехів-автоматів і заводів-автоматів. Спостерігаємо і сьогодні відмінності в автоматизації різних галузей і ділянок машинобудівної промисловості, оскільки рівень автоматизації передусім залежить від економічних показників. У багатьох випадках впровадження автоматизованих систем стримується ступенем механізації виробничих процесів.

Проектування систем автоматичного регулювання можливо вести двома шляхами: методом аналізу, коли при зарані вибраній структурі системи (розрахунковим шляхом чи моделюванням) визначають її параметри; методом синтезу, коли по вимогам до системи відразу ж вибирають найкращу її структуру та параметри. Обидва ці способи отримали широке практичне застосування і саме вони використовуються в даній курсовій роботі.

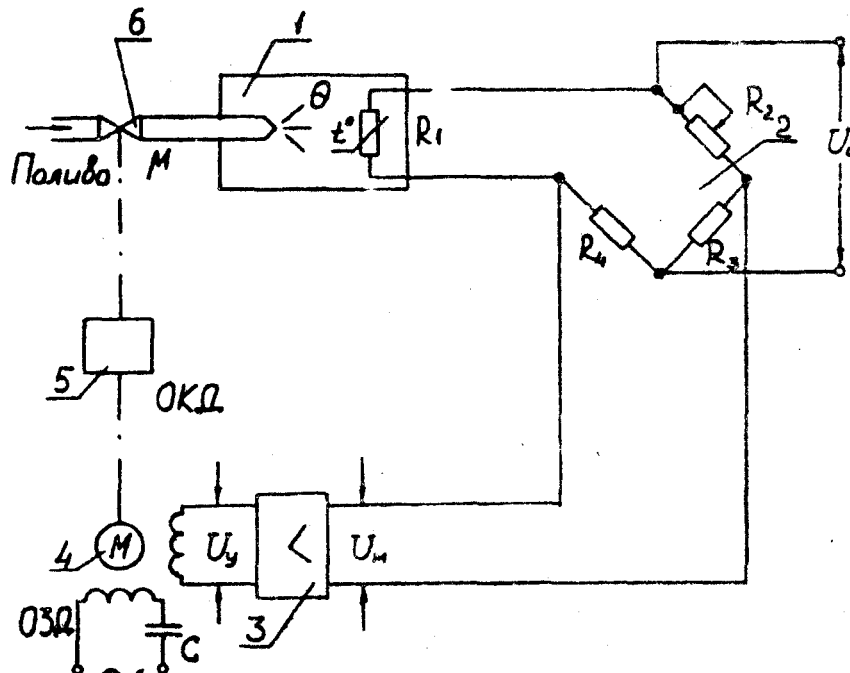
Метою курсової роботи є закріплення розрахункових методів розв'язання задач теорії автоматичного управління зі знаходженням стійкості, якості, оптимальних параметрів та структури САУ.

Курсова робота виконується у вигляді листа креслення і пояснювальної записки. На листі креслення подаються функціональна, принципова і структурна схеми САР, ЛАЧХ розімкнутої системи, АФЧХ розімкнутої системи, перехідні характеристики вихідної і скорегованих систем, приводяться у порівнянні вихідні й отримані показники якості.

У пояснювальній записці виконується побудова характеристик регульованого об'єкту, отримання рівнянь динаміки системи, частотних характеристик, аналіз і синтез САР, будується область стійкості, криві перехідних процесів, визначаються показники якості системи.

1. Вихідні дані для розробки САР

Схема 2, варіант 6



- 1 – нагрівальна піч;
- 2 – вимірювальна мостова схема;
- 3 – підсилювач;
- 4 – виконавчий двигун;
- 5 – редуктор;
- 6 – клапан;
- ОКД – обмотка керування двигуна;
- ОЗД – обмотка збудження двигуна.

Рівняння елементів системи:

об'єкта:

$$T_0 \left(\frac{d\Theta}{dt} \right) + \Theta = k_0 \mu - k_1 f ; \quad (1)$$

вимірювальної схеми:

$$U_m = k_2 \Delta X ; \quad (2)$$

підсилювача:

$$U_y = k_3 U_m ; \quad (3)$$

виконавчого двигуна (з редуктором і клапаном)

$$T_1 \left(\frac{d^2 \mu}{dt^2} \right) + \frac{d\mu}{dt} = k_4 U_y. \quad (4)$$

Параметри:

Θ - температура повітря в печі; X – поточне значення температури після датчика; X_0 – задане значення температури печі; $\Delta X = X_0 - X$ – відхилення температури; U_y – напруга управління двигуном; μ - переміщення клапана; f – еквівалентне збурююче діяння; U_m – вихідна напруга вимірювального мосту; U_0 – напруга живлення мостової схеми.

Вихідні дані:

$T_0 = 1,4$ с; $T_1 = 0,016$ с; $k_0 = 2,5$ град/см; $k_1 = 0,7$ град/см;
 $k_2 = 0,3$ В/град; $k_3 = 22$; $k_4 = 0,35$ см/В·с; $f = 1,0$ см

Вимоги до синтезованої САР:

- час регулювання приймається зменшеним на 25% від отриманого для заданих параметрів системи;
- максимальне перерегулювання не повинно перевищувати 25 %;
- запас стійкості за модулем не менше 15 дБ, за фазою не менше 30°;
- в процесі синтезу САР розробити систему, оптимальну за швидкодією.

2. Будова, принцип регулювання та принцип дії САР

Завдання САР – підтримка температури у печі на певному (приблизно сталому) рівні, що задається оператором, за рахунок зміни кількості палива, що подається у піч. Контроль температури в приміщенні здійснюється за допомогою термодатчика.

На рис.1 показано принципову схему САР температури у печі. САР складається з об'єкту регулювання (печі), термодатчика, вимірювальної мостової схеми, задаючого резистора, фазочутливого підсилювача, виконавчого двигуна (з редуктором) та клапана.

В усталеному стані, коли температура в печі дорівнює заданому значенню, міст – збалансований, різниця на виході вимірювальної діагоналі дорівнює нулю, напруга на виході підсилювача також дорівнює нулю, виконавчий двигун не змінює положення клапана, який регулює подачу палива в піч.

Якщо температура в печі в силу будь-яких обставин зміниться в той чи інший бік, міст розбалансується і на його виході з'явиться напруга розбалансу з відповідним знаком. Ця різниця підсилюється фазочутливим підсилювачем з коефіцієнтом підсилення, необхідним для керування виконавчим двигуном, який в свою чергу поверне клапан регулювання подачі палива в піч в бік зменшення або збільшення кількості подаваного палива відповідно зі знаком напруги на вході підсилювача.

Таким чином, в даній схемі використаний принцип регулювання за відхиленням дійсного значення вихідної величини об'єкта від його заданого значення. Для реалізації принципу керування за відхиленням САР має бути замкнутою. Основною особливістю і перевагою цієї схеми є те, що САР реагує на відхилення дійсного значення регульованої величини від заданого значення не залежно від причин, які зумовили це відхилення.

3. Функціональна схема САР

На основі принципової схеми САР побудовано функціональну схему САР, яка представлена на рис. 2.

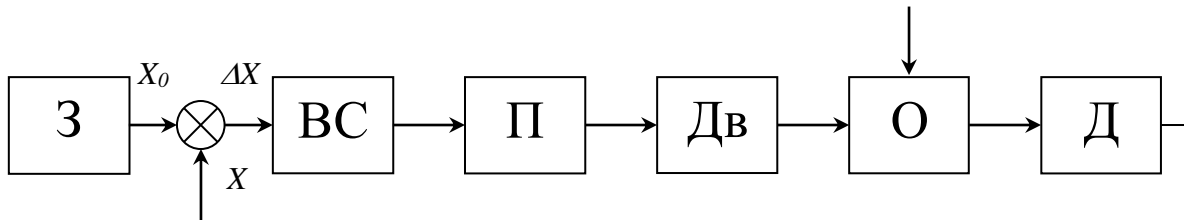


Рис. 2. Функціональна схема САР температури.

З – задаючий пристрій; ВС – вимірювальна схема;
П – підсилювач; Д – двигун (з редуктором і клапаном);
О – об’єкт регулювання; Д – датчик.

4. Структурна схема САР

При побудові структурної схеми САР були використані диференціальні рівняння елементів схеми (див. п. 1). Перейдемо від диференціальних рівнянь елементів системи до передаточних функцій цих елементів. Передаточна функція елемента – це відношення зображення за Лапласом вихідної величини до зображення за Лапласом вхідної величини при нульових початкових умовах [4].

Для отримання передаточної функції об’єкта прирівнюємо до нуля збурююче діяння f , так як наша задача – отримати передаточну функцію за керуючим діянням, отже отримаємо диференціальне рівняння об’єкта в такому вигляді:

$$T_0 \left(\frac{d\Theta}{dt} \right) + \Theta = k_0 \mu . \quad (5)$$

Для отримання передаточних функцій елементів схеми застосовано пряме перетворення Лапласа:

$$T_0 \bar{\Theta} p + \bar{\Theta} = k_0 \bar{\mu} , \text{ де } p - \text{оператор Лапласа.}$$

$$W_o(p) = \frac{\bar{X}_{\text{вих}}}{\bar{X}_{\text{вх}}} = \frac{\bar{\Theta}}{\bar{\mu}} = \frac{k_0}{T_0 p + 1} - \text{аперіодична динамічна ланка.}$$

Аналогічним чином отримуємо передаточні функції інших елементів системи:

- вимірювальної схеми:

$$W_{\text{вс}}(p) = \frac{\bar{U}_m}{\Delta \bar{X}} = k_2 - \text{підсилювальна динамічна ланка;}$$

- підсилювача:

$$W_n(p) = \frac{\bar{U}_y}{\bar{U}_m} = k_3 - \text{підсилювальна динамічна ланка;}$$

- двигуна:

$$W_{\text{дв}}(p) = \frac{\bar{\mu}}{\bar{U}_y} = \frac{k_4}{p(T_1 p + 1)} = \frac{1}{T_4 p(T_1 p + 1)} - \text{реальна інтегруюча ланка;}$$

- датчика:

$$W_{\text{д}}(p) = 1 - \text{повторювач.}$$

З'єднавши типові динамічні ланки відповідно до передачі діянь, дістанемо структурну схему системи автоматичного регулювання температури.

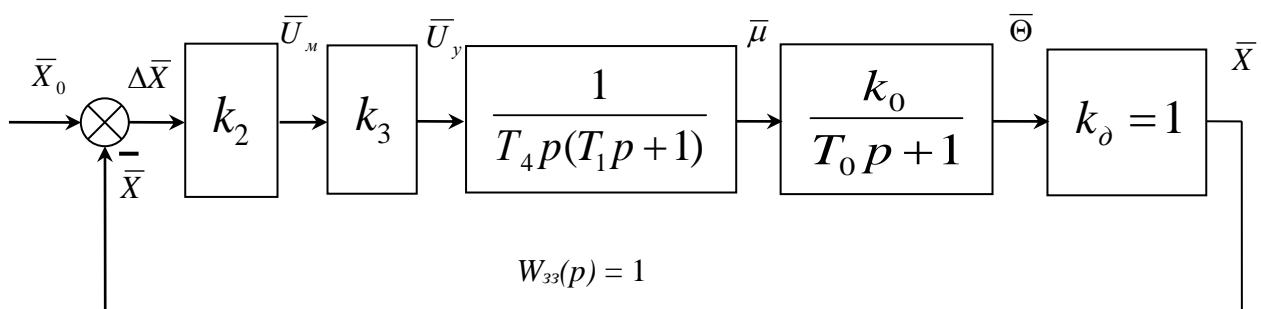


Рис.3. Структурна схема САР температури.

5. Визначення передаточних функцій розімкнутої та замкнутої систем та характеристичного рівняння замкнутої системи

Елементи структурної схеми САР розташовані послідовно, тому для отримання передаточної функції розімкнутої системи потрібно перемножити передаточні функції всіх елементів [5]:

$$W_p(p) = W_{ec}(p) \cdot W_n(p) \cdot W_{de}(p) \cdot W_o(p) \cdot W_d(p) = \frac{k_0 k_2 k_3}{T_4 p (T_1 p + 1) (T_0 p + 1)}$$

Для спрощення запису введемо позначення:

$$k = k_0 k_2 k_3$$

Тоді передаточна функція розімкнутої системи матиме вигляд:

$$W_p(p) = \frac{k}{T_4 p (T_1 p + 1) (T_0 p + 1)}. \quad (6)$$

Передаточна функція замкнутої системи, з врахуванням того, що $W_{zz}(p) = 1$, розраховується за формулою

$$W_3(p) = \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p)} = \frac{k}{T_4 p (T_1 p + 1) (T_0 p + 1) + k}. \quad (7)$$

Характеристичне рівняння має вигляд:

$$T_1 T_0 T_4 p^3 + (T_1 + T_0) T_4 p^2 + T_4 p + k = 0. \quad (8)$$

6. Побудова АФЧХ, ЛАЧХ та ЛФЧХ розімкнутої системи

6.1. Побудова АФЧХ розімкнутої системи.

Для побудови амплітудно-фазової частотної характеристики розімкнутої системи необхідно у відповідній передаточній функції провести заміну $p = j\omega$ ($j = \sqrt{-1}$, ω - частота), виділити дійсну $P(\omega)$ і уявну $Q(\omega)$ частини та, змінюючи частоту від 0 до ∞ , відкласти відповідні значення:

$$W_p(j\omega) = \frac{k}{T_4 j\omega(T_1 j\omega + 1)(T_0 j\omega + 1)} = \frac{k}{T_1 T_0 T_4 (j\omega)^3 + (T_1 + T_0) T_4 (j\omega)^2 + j\omega T_4} =$$

$$= \frac{k}{-j T_1 T_0 T_4 \omega^3 - (T_1 + T_0) T_4 \omega^2 + j\omega T_4} = \frac{k}{-(T_1 + T_0) T_4 \omega^2 + j T_4 (\omega - T_1 T_0 \omega^3)}$$

$$= \frac{k(-(T_1 + T_0) T_4 \omega^2 - j T_4 (\omega - T_1 T_0 \omega^3))}{(-(T_1 + T_0) T_4 \omega^2)^2 + (T_4 (\omega - T_1 T_0 \omega^3))^2}$$

Отже, підставивши значення коефіцієнтів і сталих часу, отримаємо:

$$P(\omega) = \frac{k(-(T_1 + T_0) T_4 \omega^2)}{(-(T_1 + T_0) T_4 \omega^2)^2 + (T_4 (\omega - T_1 T_0 \omega^3))^2} = \frac{16,5(-(0,016 + 1,4) \cdot 2,86 \omega^2)}{(-(0,016 + 1,4) \cdot 2,86 \omega^2)^2 + (2,86 \cdot (\omega - 0,016 \cdot 1,4 \cdot \omega^3))^2};$$

$$Q(\omega) = \frac{k(-T_4 (\omega - T_1 T_0 \omega^3))}{(-(T_1 + T_0) T_4 \omega^2)^2 + (T_4 (\omega - T_1 T_0 \omega^3))^2} = \frac{16,5(-2,86 \cdot (\omega - 0,016 \cdot 1,4 \cdot \omega^3))}{(-(0,016 + 1,4) \cdot 2,86 \omega^2)^2 + (2,86 \cdot (\omega - 0,016 \cdot 1,4 \cdot \omega^3))^2}$$

Таблиця 1. Значення $P(\omega)$ та $Q(\omega)$ для побудови АФЧХ.

$\omega, \text{с}^{-1}$	0	0,01	0,1	0,2	0,3	0,4	0,8	1	1,5	2	5	10
$P(\omega)$	$-\infty$	-8,2	-8	-7,6	-6,9	-6,2	-3,6	-2,8	-1,5	-0,9	-0,16	-0,04
$Q(\omega)$	$-\infty$	-577	-56,6	-26,8	-16,3	-10,9	-7,2	-1,9	-0,7	-0,3	-0,01	-0,001

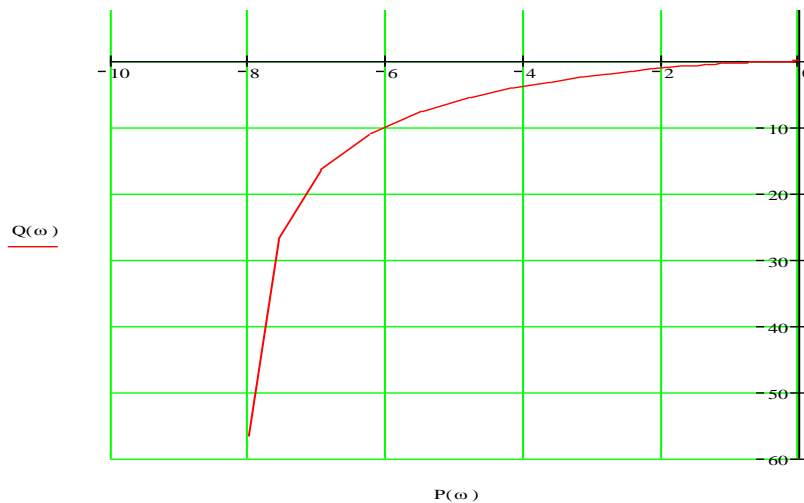


Рис. 4. АФЧХ розімкнутої системи.

6.2. Побудова ЛАЧХ розімкнутої системи.

Для побудови асимптотичної ЛАЧХ передусім потрібно знайти спрягаючі частоти за сталими часу динамічних ланок:

$$\omega_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{1,4} = 0,714 \text{ c}^{-1}, \text{ належить аперіодичній ланці};$$

$$\omega_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{0,016} = 62,5 \text{ c}^{-1}, \text{ належить аперіодичній ланці}.$$

Знайдені спрягаючі частоти відмічаємо на осі частот в логарифмічному масштабі. Низькочастотна асимптота ЛАЧХ при $\omega < \omega_0$ являє собою пряму з нахилом -20 дБ/дек, так як система містить інтегруючу динамічну ланку. Ця пряма або її продовження при $\omega = 1$ має ординату $20 \lg k = 24,35$ дБ ($k = 16,5$ – коефіцієнт підсилення розімкнутої системи).

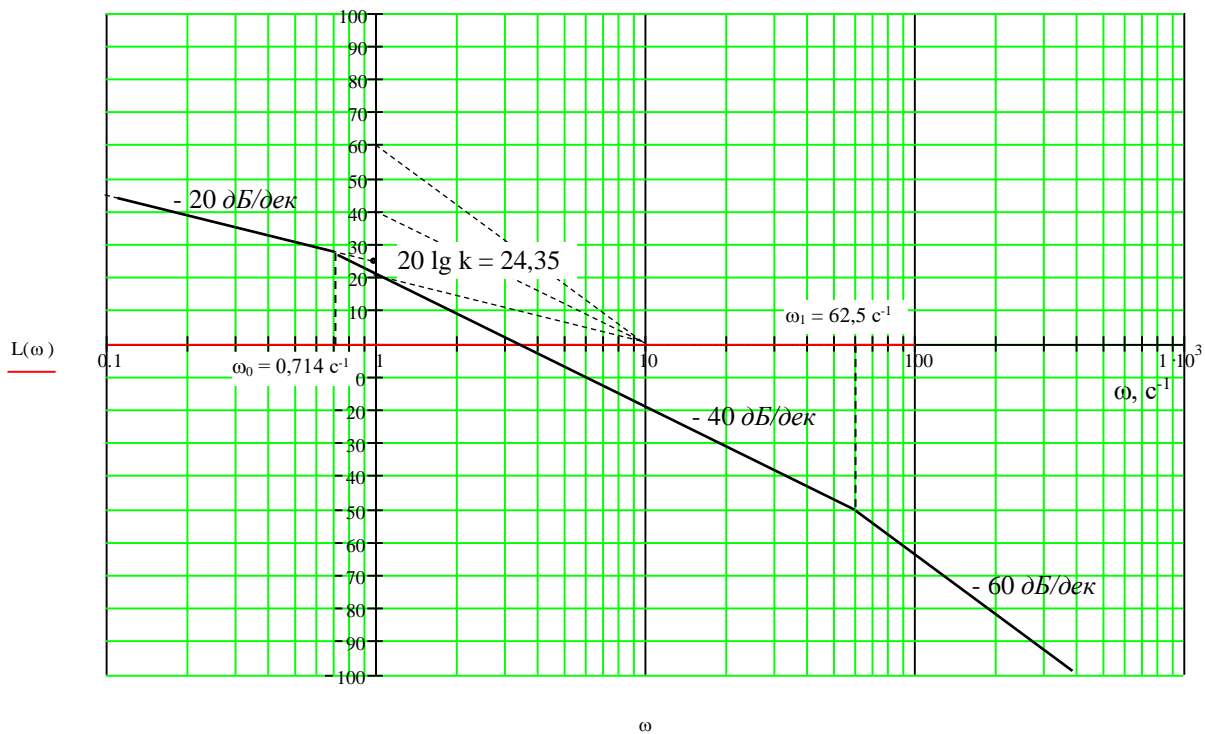


Рис. 5. ЛАЧХ розімкнутої системи $L(\omega)$.

Після кожної із спрягаючих частот нахил характеристики $L(\omega)$ змінюється порівняно з попереднім значенням на -20 дБ/дек, так як дані частоти належать аперіодичним динамічним ланкам першого порядку.

Високочастотна асимптота ЛАЧХ, тобто її частина при частотах, більших ω_1 , має нахил -60 дБ/дек.

6.3. Побудова ЛФЧХ розімкнутої системи.

ЛФЧХ одноконтурної розімкнутої системи отримується в результаті простого складання ординат фазових характеристик типових ланок:

$$\phi(\omega) = \left(-\arctg(\omega T_0) - \left(\frac{\pi}{2} + \arctg(\omega T_1) \right) \right) \cdot \frac{180}{\pi}. \quad (9)$$

Таблиця 2. Значення $\phi(\omega)$ вихідної системи.

$\omega, \text{с}^{-1}$	0,1	0,3	0,8	1	3	8	10	13	20	40	60	80
$\phi(\omega)$	-98	-113	-139	-145	-169	-182	-185	-188	-196	-212	-223	-231

За отриманими значеннями будуюмо ЛФЧХ розімкнутої системи (рис. 6).

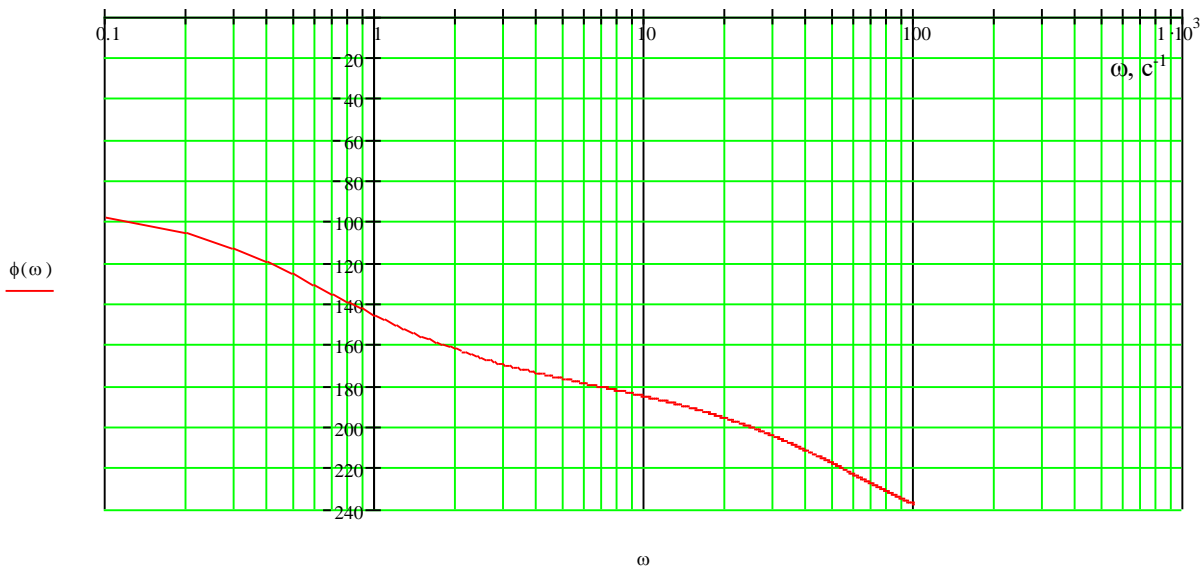


Рис. 6. ЛФЧХ розімкнутої системи.

7. Побудова дійсної частотної характеристики замкнутої системи

Для цього необхідно виділити дійсну частину передаточної функції замкнутої системи, провівши заміну $p = j\omega$ ($j = \sqrt{-1}$, ω - частота), та, змінюючи частоту від 0 до ∞ , відкласти відповідні значення $P_s(\omega)$:

$$W_3(\omega) = \frac{k}{pT_4(T_1p+1)(T_0p+1)+k} = \frac{k}{T_1T_0T_4p^3 + (T_1+T_0)T_4p^2 + pT_4+k};$$

Підставимо $p = j\omega$, отримаємо:

$$W_3(\omega) = \frac{k}{T_1 T_0 T_4 (j\omega)^3 + (T_1 + T_0) T_4 (j\omega)^2 + j\omega T_4 + k} = \frac{k}{-jT_1 T_0 T_4 \omega^3 - (T_1 + T_0) T_4 \omega^2 + j\omega T_4 + k} =$$

$$= \frac{k}{(k - (T_1 + T_0) T_4 \omega^2) + jT_4 (\omega - T_1 T_0 \omega^3)} = \frac{k((k - (T_1 + T_0) T_4 \omega^2) - jT_4 (\omega - T_1 T_0 \omega^3))}{(k - (T_1 + T_0) T_4 \omega^2)^2 + (\omega T_4 - T_1 T_0 T_4 \omega^3)^2}$$

Виділимо дійсну частину:

$$P_3(\omega) = \frac{k \cdot (k - (T_1 + T_0) \cdot T_4 \cdot \omega^2)}{(k - (T_1 + T_0) \cdot T_4 \cdot \omega^2)^2 + (\omega T_4 - T_1 T_0 T_4 \omega^3)^2} =$$

$$= \frac{16,5 \cdot (16,5 - (0,016 + 1,4) \cdot 2,86 \omega^2)}{(16,5 - (0,016 + 1,4) \cdot 2,86 \omega^2)^2 + (2,86 \cdot (\omega - 0,016 \cdot 1,4 \cdot \omega^3))^2} \quad (10)$$

Знайдемо значення дійсної частотної характеристики (10) при зміні частоти ω (результати розрахунків наведено в табл. 3) та побудуємо графік.

Таблиця 3. Значення $P_3(\omega)$ вихідної системи.

$\omega, \text{с}^{-1}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$P_3(\omega)$	1	1,26	-0,19	-0,74	-0,33	-0,19	-0,12	-0,09	-0,07	-0,05	-0,04	-0,03	-0,03	-0,02	-0,02	-0,01

За отриманими значеннями побудуємо дійсну частотну характеристику замкнутої системи (рис. 7).

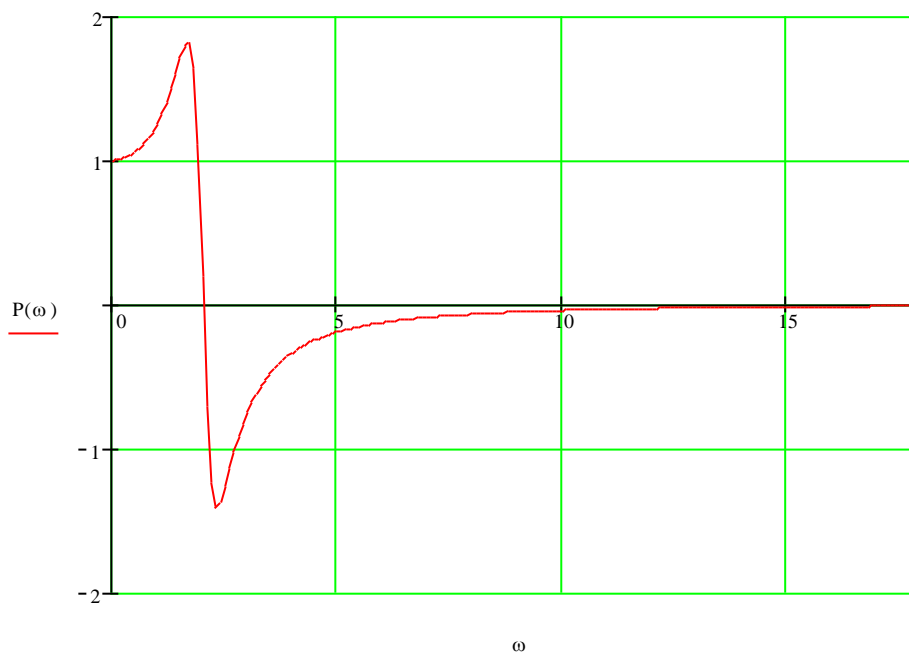


Рис. 7. Дійсна частотна характеристика замкнутої системи.

8. Визначення стійкості замкнутої системи і запасів стійкості.

Побудова області стійкості

8.1. Дослідження системи на стійкість за допомогою критерію Гурвіца.

Критерій стійкості Гурвіца (алгебраїчний критерій) дає змогу визначити стійкість системи автоматичного регулювання досить високого порядку, але користуватись цим критерієм порівняно легко лише при рівняннях до п'ятого порядку, оскільки надалі зростає складність обчислень.

Згідно з цим критерієм умови стійкості формулюються таким чином.

Всі корені характеристичного рівняння $T_1 T_0 T_4 p^3 + (T_1 + T_0) T_4 p^2 + T_4 p + k = 0$ матимуть від'ємні дійсні частини, якщо при додатному знаку всіх коефіцієнтів будуть додатними головний визначник Гурвіца $\Delta_2 > 0$ і його діагональні мінори більше нуля. Підставивши значення коефіцієнтів та сталих часу, отримаємо:

$$0,064p^3 + 4,05p^2 + 2,86p + 16,5 = 0$$

$$\Delta_2 := \left| \begin{pmatrix} 4.05 & 16.5 \\ 0.064 & 2.86 \end{pmatrix} \right|$$

$$\Delta_2 = 10.527$$

Виходячи з того, що головний визначник $\Delta_2 = 10,527 > 0$, складений за правилом знаходження визначників Гурвіца та всі коефіцієнти мають додатній знак, можна зробити висновок, що система за критерієм стійкості Гурвіца стійка.

8.2. Дослідження системи на стійкість та визначення запасів стійкості за модулем і фазою за допомогою частотного критерію Найквіста-Михайлова.

За цим критерієм стійкість замкнутої системи автоматичного регулювання визначають за амплітудно-фазовою частотною характеристикою стійкої розімкнутої системи. Розімкнута система автоматичного регулювання стійка в тому разі, коли складається тільки із стійких динамічних ланок і має не більше однієї інтегруючої ланки. Якщо

розімкнута система автоматичного керування є стійкою, то для стійкості замкнутої системи необхідно і достатньо, щоб АФХ розімкнутої системи не охоплювала точку з координатами $(-1; j0)$ при зміні частоти від 0 до ∞ .

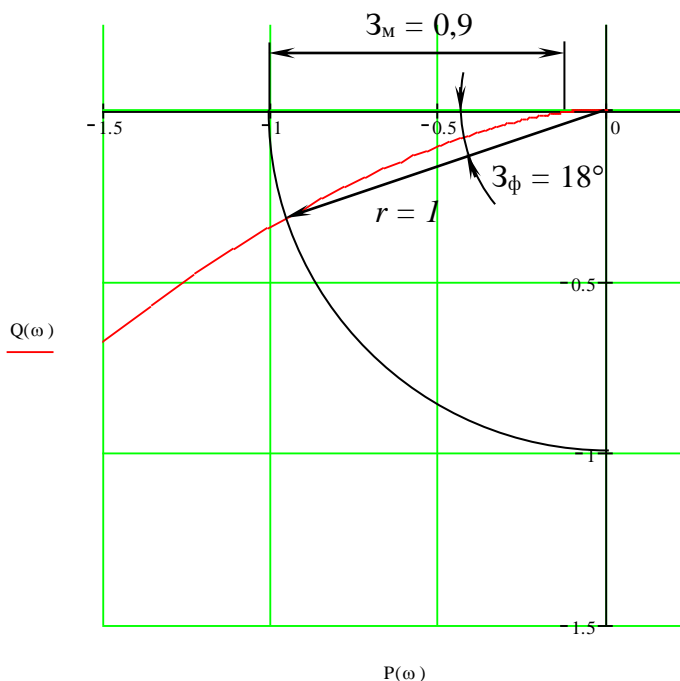


Рис. 8. Визначення запасів стійкості за модулем і фазою за допомогою частотного критерію Найквіста-Михайлова.

Таким чином, за критерієм Найквіста-Михайлова система стійка і запас стійкості за модулем $Z_M = 0,9$; за фазою $Z_\phi = 18^\circ$.

8.3. Дослідження системи на стійкість та визначення області стійкості за методом D -розбиття в площині одного параметра.

Побудуємо область стійкості системи в площині параметру k_3 , тому що його легко змінювати шляхом підбору коефіцієнту підсилення підсилювача:

Характеристичне рівняння має вигляд:

$$T_1 T_0 T_4 p^3 + (T_1 + T_0) T_4 p^2 + T_4 p + k_0 k_2 k_3 = 0$$

Запишемо характеристичне рівняння відносно k_3 :

$$K(p) = - \frac{(T_1 T_0 T_4 p^3 + (T_1 + T_0) T_4 p^2 + T_4 p)}{k_0 k_2}$$

Підставивши $p = j\omega$ та виділивши дійсну і уявну частини даного виразу, отримаємо:

$$K(\omega) = -\frac{(-jT_1T_0T_4\omega^3 - (T_1 + T_0)T_4\omega^2 + jT_4\omega)}{k_0k_2} = \frac{(T_1 + T_0)T_4\omega^2}{k_0k_2} + j\frac{(T_1T_0T_4\omega^3 - T_4\omega)}{k_0k_2}$$

$$P(\omega) = \frac{(T_1 + T_0)T_4\omega^2}{k_0k_2}; \quad Q(\omega) = \frac{(T_1T_0T_4\omega^3 - T_4\omega)}{k_0k_2}$$

Таблиця 4. Значення $P(\omega)$ та $Q(\omega)$ для побудови кривої D -розбиття.

$\omega, \text{с}^{-1}$	-7	-6	-5	-4	-3	-2	2	3	4	5	6	7
$P(\omega)$	264	194	134	86	48	21	21	48	86	134	194	264
$Q(\omega)$	-2,6	4,4	8	9,7	9	6,9	-6,9	-9	-9,7	8	-4,4	2,6

Побудуємо криву D -розбиття в площині параметру k_3 при зміні частоти від $-\infty$ до $+\infty$ (рис. 9).

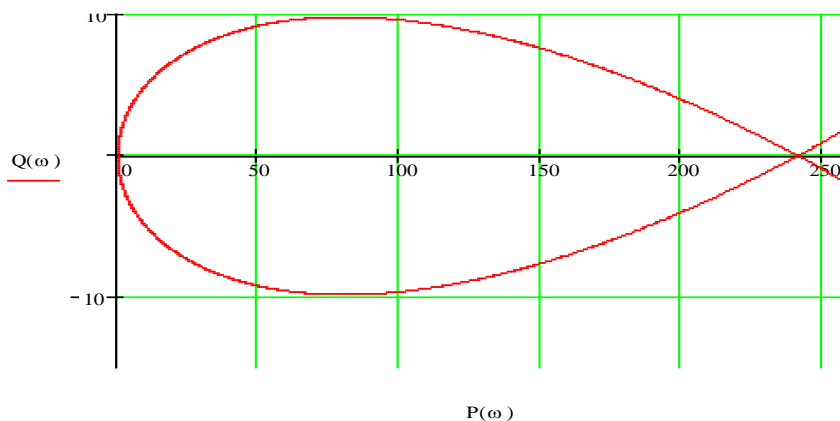


Рис. 9. D -розбиття в площині параметру k_3 .

Ділянка стійкості буде ліворуч від добутої кривої при русі по ній від $-\infty$ до $+\infty$. З побудованої області стійкості можна визначити критичне значення коефіцієнта k_3 , яке в даному випадку дорівнює $k_{3кр} = 240$. Як видно, задане значення коефіцієнта підсилення підсилювача $k_3 = 22$ входить в зону стійкості, а значить для подальших розрахунків можна залишити задане значення цього параметра.

9. Оцінка якості регулювання замкнутої САР по ЛАЧХ розімкнутої системи

Оцінка якості регулювання замкнутої САР полягає в визначенні запасу стійкості (по модулю і фазі), та частоти зрізу. Для визначення цих величин будуюмо ЛАЧХ і ЛФЧХ розімкнутої системи, причому виконуємо їх взаємне розміщення.

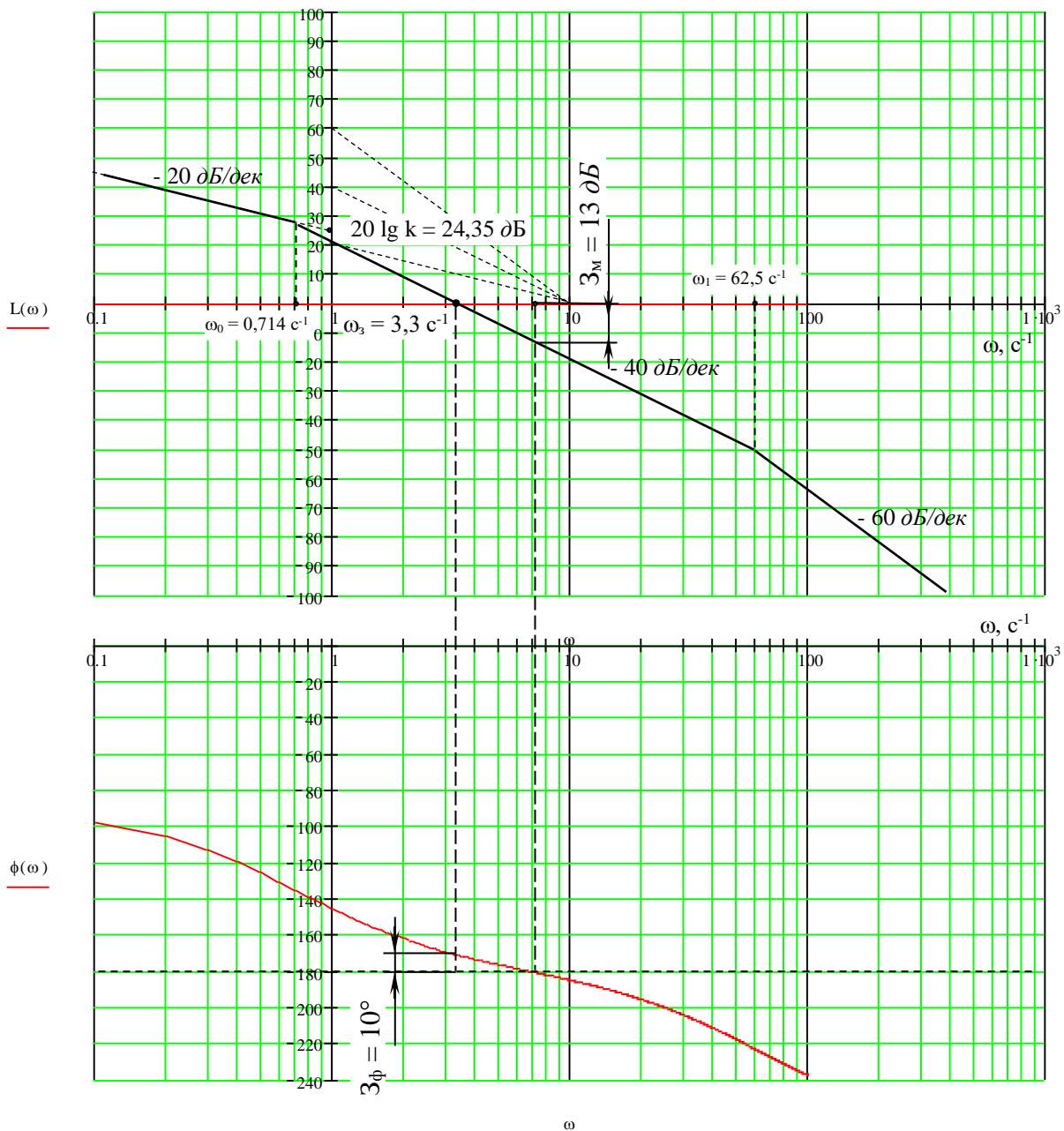


Рис. 10. Оцінка якості регулювання замкнутої САР по ЛАЧХ розімкнутої системи.

З даної побудови можна визначити: частота зрізу $\omega_3 = 3,3 \text{ c}^{-1}$, звідки можна визначити час регулювання, поставивши систему в жорсткі умови, $t_p = \frac{2\pi}{\omega_3} = 1,9 \text{ c}$; запас стійкості по амплітуді $z_m \approx 13 \text{ dB}$; запас стійкості по фазі $z_\phi \approx 10^\circ$.

10. Побудова перехідного процесу замкнутої системи

Регульована величина в часі при подачі на вхід системи одиничного ступінчастого діяння описується залежністю

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} P_3(\omega) \frac{\sin(\omega t)}{\omega} d\omega. \quad (11)$$

Для побудови перехідного процесу скористаємось методом одиничних трапецій [1]. Для цього апроксимуємо дійсну частотну характеристику трапеціями (рис. 11). Параметри фігур:

фігура $N1$ – трапеція $CDEF$, $H_{lp} = 1,8 + 1,4 = 3,2$; $\omega_{0lp} = 1,7$; $\omega_{1lp} = 2,3$;

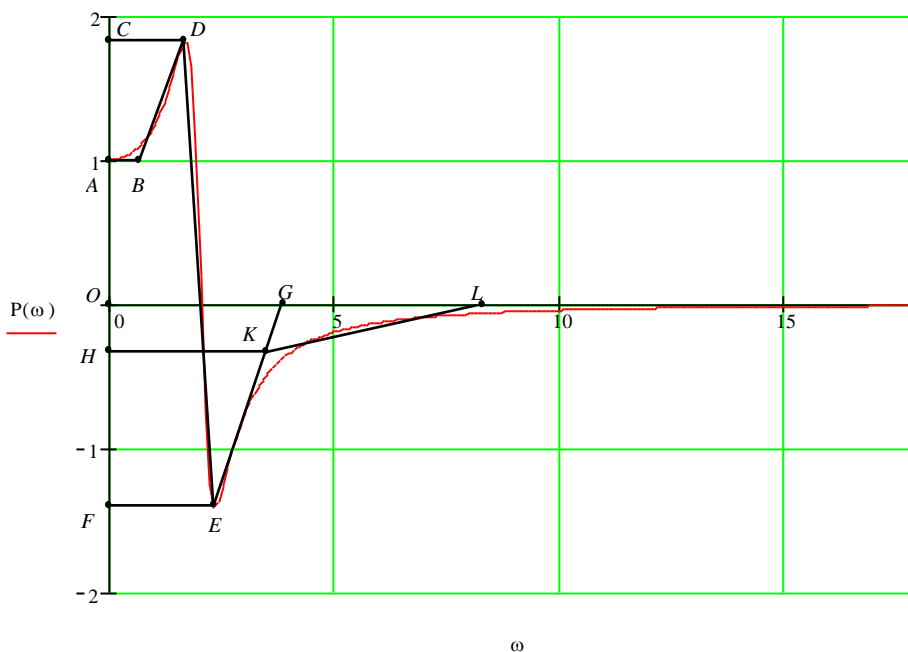


Рис. 11. Розбиття дійсної частотної характеристики замкнутої системи на трапеції.

$$v_{1p} = 1,7/2,3 = 0,74;$$

фігура $N2$ – трапеція $OFEG$, $H_{2p} = 1,4$; $\omega_{02p} = 2,3$; $\omega_{12p} = 4$;

$$v_{2p} = 2,3/4 = 0,575;$$

фігура $N3$ – трапеція $ABDC$, $H_{3p} = 0,8$; $\omega_{03p} = 0,8$; $\omega_{13p} = 1,7$;

$$v_{3p} = 0,8/1,7 = 0,47;$$

фігура $N4$ – трапеція $OHKL$, $H_{4p} = 0,3$; $\omega_{04p} = 3,5$; $\omega_{14p} = 7,5$;

$$v_{4p} = 3,5/7,5 = 0,47.$$

Побудуємо ординату перехідного процесу для реального моменту часу $t_{реал} = 1$ с. Знайдемо табличний час відповідних фігур

$$\tau_{N1} = \omega_{11p} \times t_{реал} = 2,3 \times 1 = 2,3;$$

$$\tau_{N2} = \omega_{12p} \times t_{реал} = 4 \times 1 = 4;$$

$$\tau_{N3} = \omega_{13p} \times t_{реал} = 1,7 \times 1 = 1,7;$$

$$\tau_{N4} = \omega_{14p} \times t_{реал} = 7,5 \times 1 = 7,5.$$

За даними таблиць h -функцій [1] по відповідних значеннях v і τ знайдемо значення h -функцій для фігур $N1$, $N2$, $N3$, $N4$.

$$h(t)_{N1} = 1,067; h(t)_{N2} = 1,158; h(t)_{N3} = 0,831; h(t)_{N4} = 0,974.$$

Помноживши знайдені табличні значення $h(t)$ на ординати відповідних реальних фігур H_p , дістанемо ординати $h_i(t_{реал})$ відповідних фігур

$$h_1(t_{реал}) = h(t)_{N1} \times H_{1p} = 1,067 \times 3,2 = 3,41;$$

$$h_2(t_{реал}) = h(t)_{N2} \times H_{2p} = 1,158 \times 1,4 = 1,62;$$

$$h_3(t_{реал}) = h(t)_{N3} \times H_{3p} = 0,831 \times 0,8 = 0,67;$$

$$h_4(t_{реал}) = h(t)_{N4} \times H_{4p} = 0,974 \times 0,3 = 0,29;$$

Врахувавши знак $h_2(t_{реал})$, $h_3(t_{реал})$, $h_4(t_{реал})$ знайдемо результуючу ординату перехідної характеристики при $t_{реал} = 1$ с

$$\begin{aligned} h_{\Sigma}(t_{реал}) &= h_1(t_{реал}) - h_2(t_{реал}) - h_3(t_{реал}) - h_4(t_{реал}) = \\ &= 3,41 - 1,62 - 0,67 - 0,29 = 0,83. \end{aligned}$$

Аналогічно можна дістати й інші ординати перехідного процесу при різних значеннях реального часу $t_{реал}$ і побудувати відповідну характеристику.

Також побудувати перехідний процес можна з допомогою комп'ютера, використовуючи формулу (11). В разі збігу кількох значень $h_{\Sigma}(t_{real})$ для кількох моментів часу, отриманих методом одиничних трапецій і значень $h_{\Sigma}(t_{real})$, отриманих на комп'ютері при використанні формули (11) для цих же моментів часу, можна прийняти графік перехідного процесу, отриманий з допомогою комп'ютера (рис. 12).

Таблиця 5. Значення перехідної функції $h(t)$.

t, c	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
$h(t)$	0	1,42	0,99	0,89	1,08	0,98	0,99	1,01	1	1,01	1	0,99

По графіку можна зробити висновок, що перехідний процес – коливальний (період коливань не змінюється з часом).

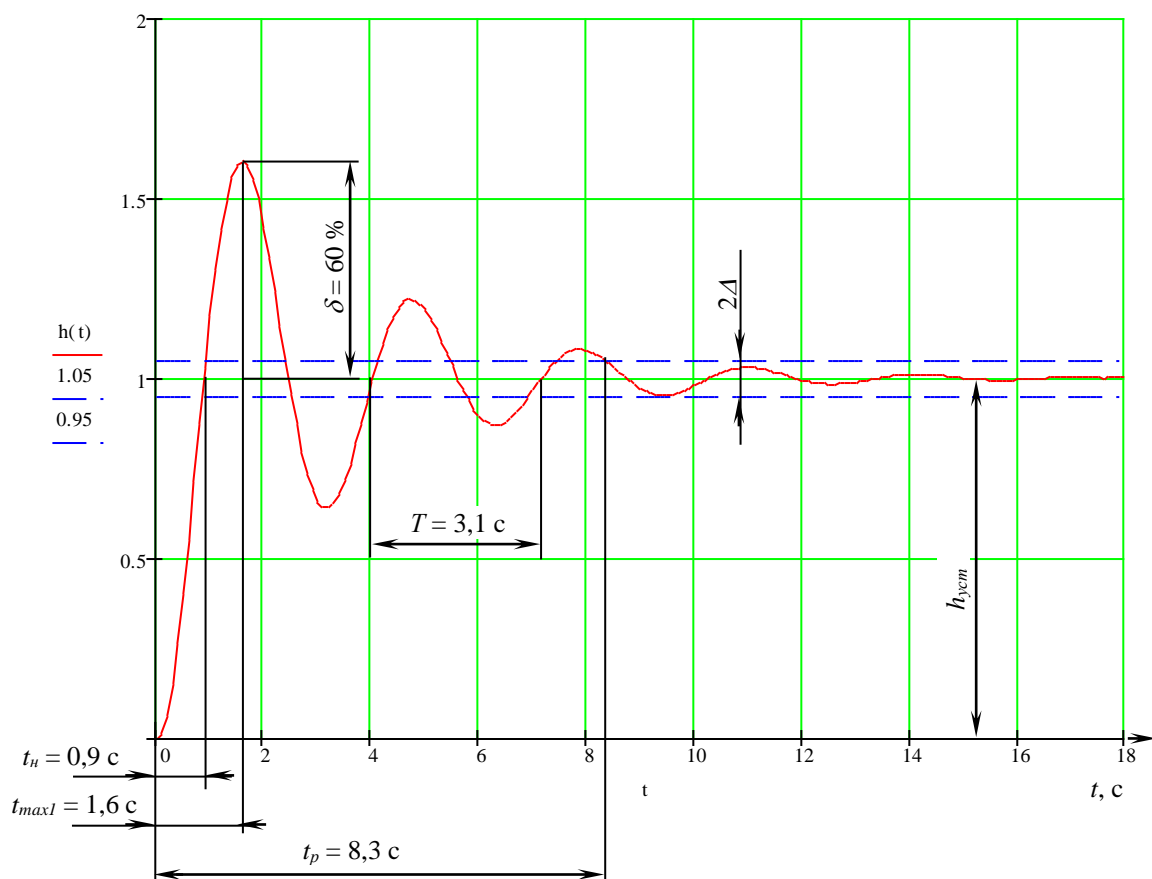


Рис. 12. Графік перехідного процесу вихідної системи.

11. Визначення прямих показників якості САР за графіком перехідного процесу. Визначення часу регулювання системи як вимоги до САР для її аналізу та синтезу.

З побудованого перехідного процесу можна визначити наступні прямі показники якості САР:

1) час регулювання $t_p \approx 8,3$ с – це час від початку дії вхідного діяння до входження системи в зону 2Δ , він залежить від швидкодії динамічних ланок та від їх кількості в головному контурі; через те, що до системи ставляться жорсткі вимоги, то даний параметр, як вимога до САР для її аналізу та синтезу, приймається зменшеним на 25 % від отриманого і рівним $t_p = 6,64$ с;

2) перерегулювання $\delta = 60$ %;

3) частота коливань $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2,03 \text{ с}^{-1}$, де $T = 3,1$ с – період коливань;

4) кількість коливань перехідного процесу $n = 2$;

5) час досягнення першого максимуму $t_{max1} = 1,6$ с;

6) час наростання перехідного процесу $t_n = 0,9$ с – це час досягнення вихідною величиною усталеного значення;

7) декремент затухання перехідного процесу характеризує затухання перехідного процесу, це відношення відхилень сусідніх коливань $d = 2,73$.

12. Аналіз системи автоматичного регулювання

Аналіз являє собою метод проб і помилок. При аналізі розробляють принципову схему системи з врахуванням досвіду такої розробки, потім отримують структурну схему і рівняння динаміки, за якими досліджують САР на стійкість, визначають показники якості.

У випадках отримання від'ємних результатів, змінюються параметри та структура системи і знову обчислюються показники якості. В результаті кількох спроб отримується система, яка задовольняє поставленим вимогам. Розроблені спеціальні прийоми, які дозволяють аналіз САР виконати ефективніше. До них можна віднести заходи підвищення якості в усталеному режимі, забезпечення стійкості і підвищення запасу стійкості, покращення показників якості системи.

Для аналізу САР та підвищення запасу стійкості системи в даній роботі застосовано демпфірування з підняттям високих частот. Цей спосіб підвищення запасу стійкості теоретично є універсальним і дає бажаний результат практично при будь-якій передаточній функції вихідної системи. Крім того, одночасно із збільшенням запасу стійкості підвищується швидкодія системи. Проте практичне застосування цього способу значно обмежується, через те що при розширенні смуги пропускання системи зростає вплив високочастотних перешкод. Ефект демпфірування досягається за рахунок послідовного введення інтегро-диференціюючої ланки з передаточною функцією:

$$W_k(p) = \frac{k_5(T_5p + 1)}{(T_6p + 1)} \quad (12)$$

Передаточна функція розімкнутої системи, скорегованої шляхом аналізу матиме вигляд

$$W_p(p) = \frac{k \cdot k_5 \cdot (T_5p + 1)}{T_4p(T_1p + 1)(T_0p + 1)(T_6p + 1)} \cdot \quad (13)$$

Формула ЛФЧХ такої системи матиме вигляд:

$$\phi(\omega) = -\arctg(\omega T_0) - \frac{\pi}{2} - \arctg(\omega T_1) + \arctg(\omega T_5) - \arctg(\omega T_6). \quad (14)$$

Для знаходження оптимальних значень сталих часу T_5 , T_6 та коефіцієнту k_5 необхідно здійснити кілька спроб.

1-й етап: $k_5 = 0,05$; $T_5 = 0,5$ с ; $T_6 = 0,15$ с, при цьому ЛАЧХ та ЛФЧХ розімкнutoї системи приймуть вигляд:

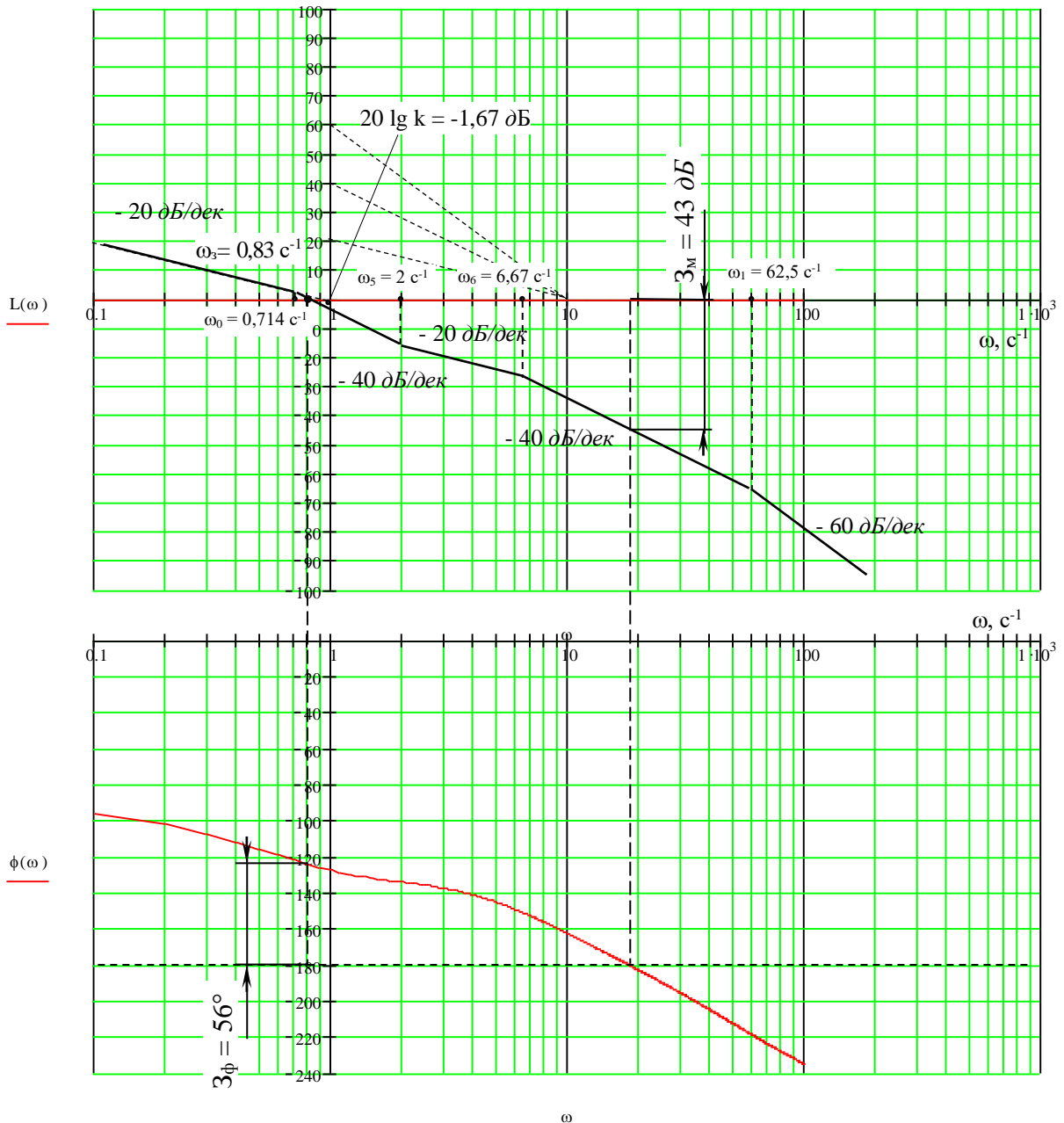


Рис. 13. Визначення показників якості, перший етап аналізу.

Таблиця 6. Значення $\varphi(\omega)$ системи, скорегованої шляхом аналізу (перший етап).

ω, c^{-1}	0,1	0,3	0,8	1	3	8	10	13	20	40	60	80
$\varphi(\omega)$	-96	-107	-124	-127	-137	-156	-163	-170	-183	-205	-219	-228

З даної побудови можна визначити: частота зрізу $\omega_3 = 0,83 \text{ c}^{-1}$, звідки можна визначити час регулювання $t_p = 11,36 \text{ c}$ (не задовольняє вимогам); запас стійкості по амплітуді $z_m \approx 43 \text{ дБ}$; запас стійкості по фазі $z_\phi \approx 56^\circ$.

2-й етап: $k_5 = 0,03$; $T_5 = 2,5 \text{ c}$; $T_6 = 0,1 \text{ c}$, при цьому ЛАЧХ та ЛФЧХ розімкнutoї системи приймуть вигляд:

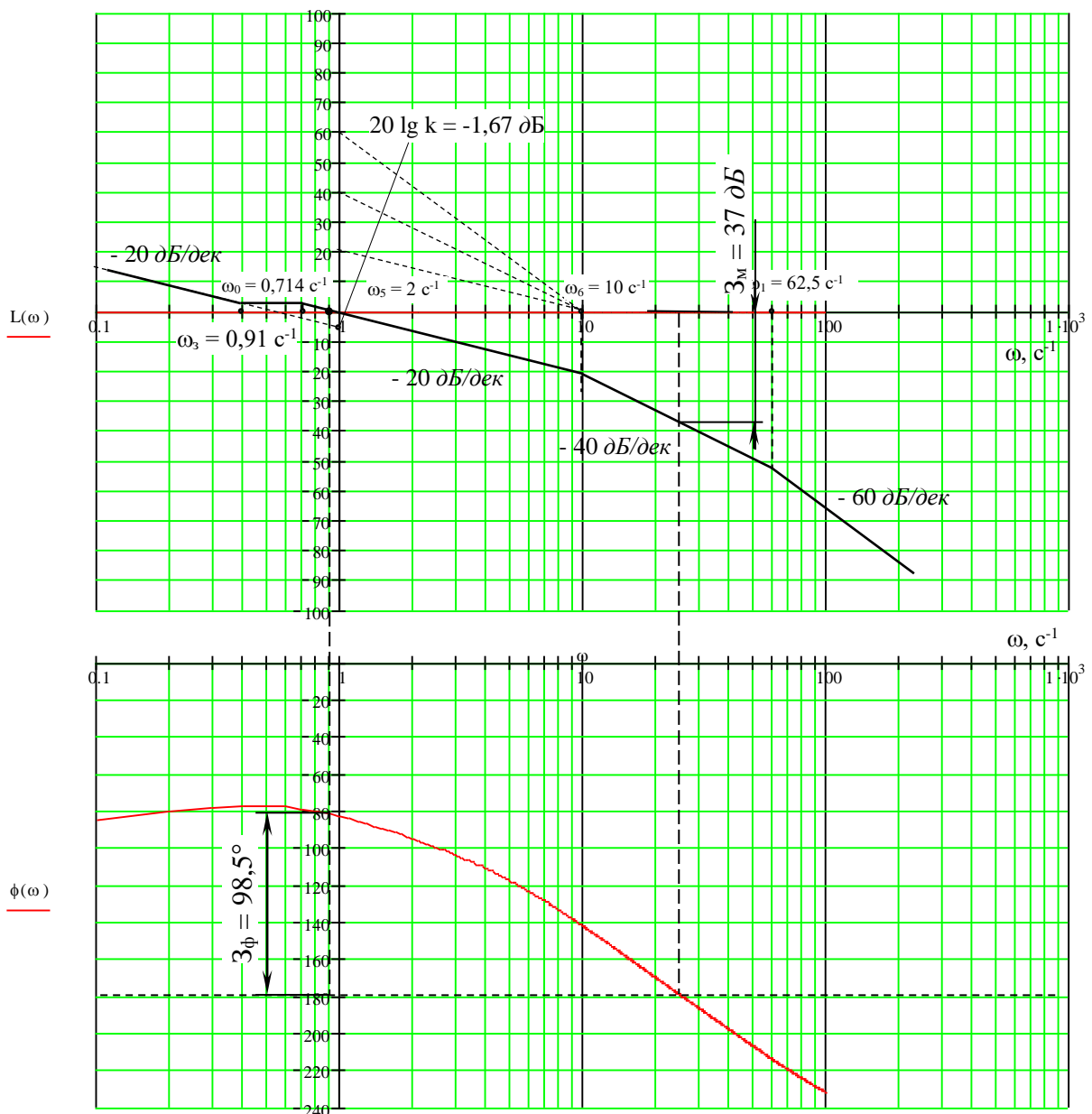


Рис. 14. Визначення показників якості, другий етап аналізу.

Таблиця 7. Значення $\varphi(\omega)$ системи, скорегованої шляхом аналізу (другий етап).

ω, c^{-1}	0,1	0,3	0,8	1	3	8	10	13	20	40	60	80
$\varphi(\omega)$	-85	-78	-80	-83	-104	-134	-142	-153	-170	-198	-214	-225

З даної побудови можна визначити: частота зрізу $\omega_3 = 0,91 \text{ c}^{-1}$, звідки можна визначити час регулювання $t_p = 10,35 \text{ c}$ (не задовольняє вимогам); запас стійкості по амплітуді $z_M \approx 37 \text{ дБ}$; запас стійкості по фазі $z_\phi \approx 98,5^\circ$.

3-й етап: $k_5 = 0,09$; $T_5 = 1,4 \text{ c}$; $T_6 = 0,125 \text{ c}$, при цьому ЛАЧХ та ЛФЧХ розімкненої системи приймуть вигляд:

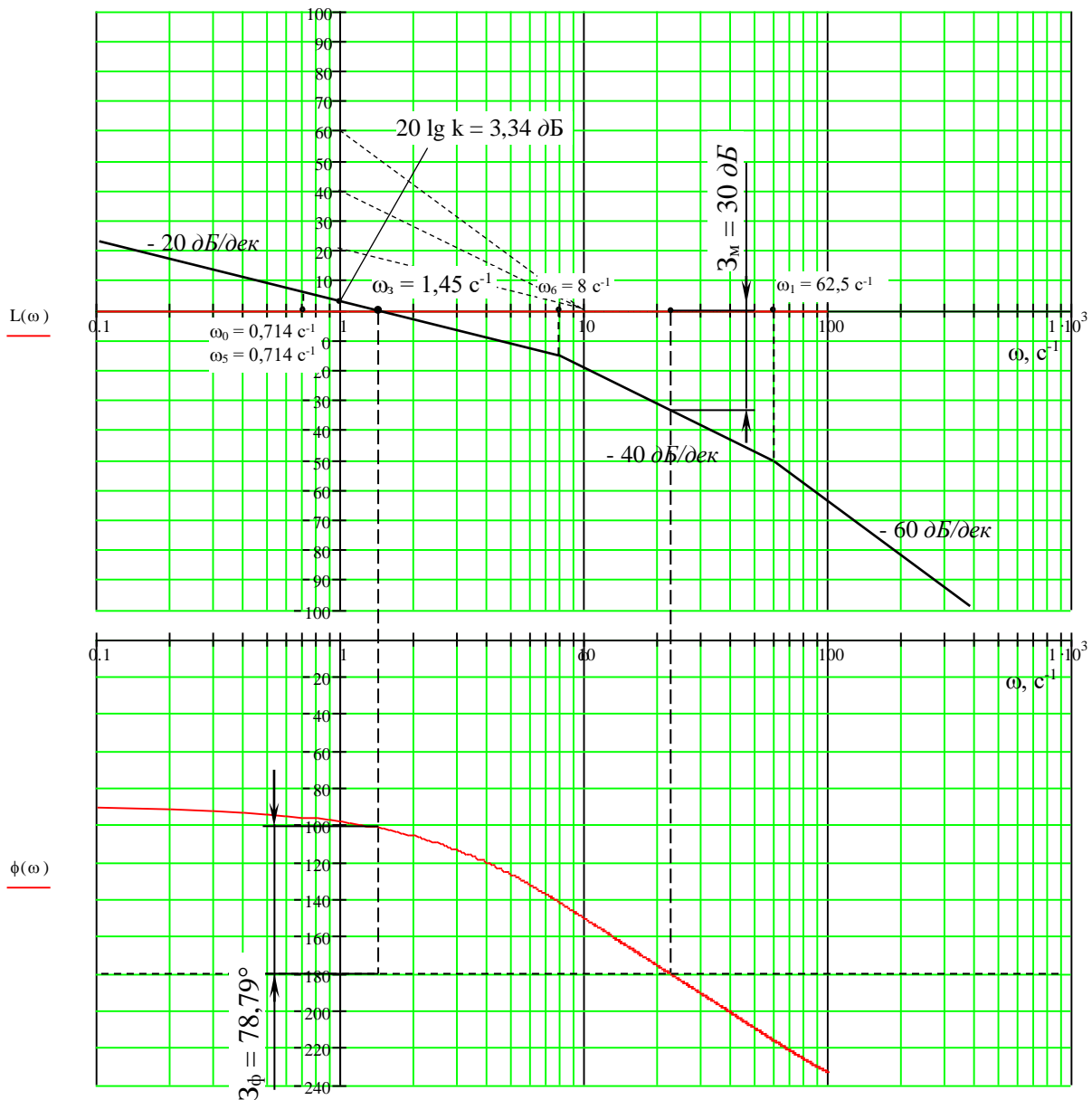


Рис. 15. Визначення показників якості, третій етап аналізу.

Таблиця 8. Значення $\varphi(\omega)$ системи, скорегованої шляхом аналізу (третій етап).

$\omega, \text{с}^{-1}$	0,1	0,3	0,8	1	3	8	10	13	20	40	60	80
$\varphi(\omega)$	-91	-92	-96	-98	-113	-142	-150	-160	-176	-201	-216	-226

З даної побудови можна визначити: частота зрізу $\omega_z = 1,45 \text{ с}^{-1}$, звідки можна визначити час регулювання $t_p = 6,5 \text{ с}$; запас стійкості по амплітуді $z_M \approx \approx 30 \text{ дБ}$; запас стійкості по фазі $z_\phi \approx 78,79^\circ$. Як видно, при введенні коректуючої ланки з останніми параметрами САР задовольняє поставленим до неї вимогам.

13. Побудова перехідного процесу і визначення показників якості для системи, розробленої шляхом аналізу

Запишемо передаточну функцію замкнутої скорегованої системи

$$W_{зк}(p) = \frac{k \cdot k_5 (T_5 p + 1)}{p(T_1 p + 1)(T_0 p + 1)(T_6 p + 1) + k \cdot k_5 (T_5 p + 1)}. \quad (15)$$

Провівши заміну $p = j\omega$, виділимо дійсну частину передаточної функції замкнутої скорегованої системи:

$$P_3(\omega) = \frac{k \cdot k_5 \cdot T_5 \omega \left((1 + k \cdot k_5 \cdot T_5) \omega - ((T_0 + T_6) \cdot T_1 + T_0 \cdot T_6) \omega^3 \right) + (T_1 \cdot T_0 \cdot T_6 \cdot \omega^4 - (T_1 + (T_0 + T_6)) \omega^2 + k \cdot k_5)^2 + k \cdot k_5 \cdot (T_1 \cdot T_0 \cdot T_6 \cdot \omega^4 - (T_1 + (T_0 + T_6)) \omega^2 + k \cdot k_5)}{(1 + k \cdot k_5 \cdot T_5) \omega - ((T_0 + T_6) \cdot T_1 + T_0 \cdot T_6) \omega^3)^2}$$

Таблиця 9. Значення $P_3(\omega)$ системи, скорегованої шляхом аналізу.

$\omega, \text{с}^{-1}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$P_3(\omega)$	1	0,17	-0,006	-0,04	-0,05	-0,049	-0,045	-0,041	-0,036	-0,032	-0,028	-0,025	-0,022

За отриманими значеннями $P_3(\omega)$ побудуємо дійсну частотну характеристику системи, скорегованої шляхом аналізу (рис. 16).

Таблиця 10. Значення перехідної функції $h(t)$.

$t, \text{с}$	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$h(t)$	0	0,643	0,884	0,962	0,988	0,996	0,999	1,0	1,0	1,0	1,0

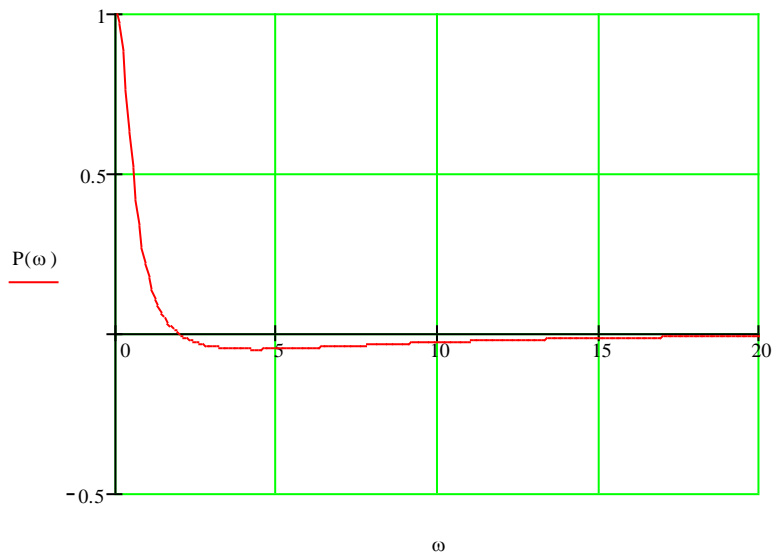


Рис. 16. Дійсна частотна характеристика замкнутої скорегованої системи.

Побудуємо криву перехідного процесу скорегованої САР температури.

З побудованого перехідного процесу можна визначити наступні прямі

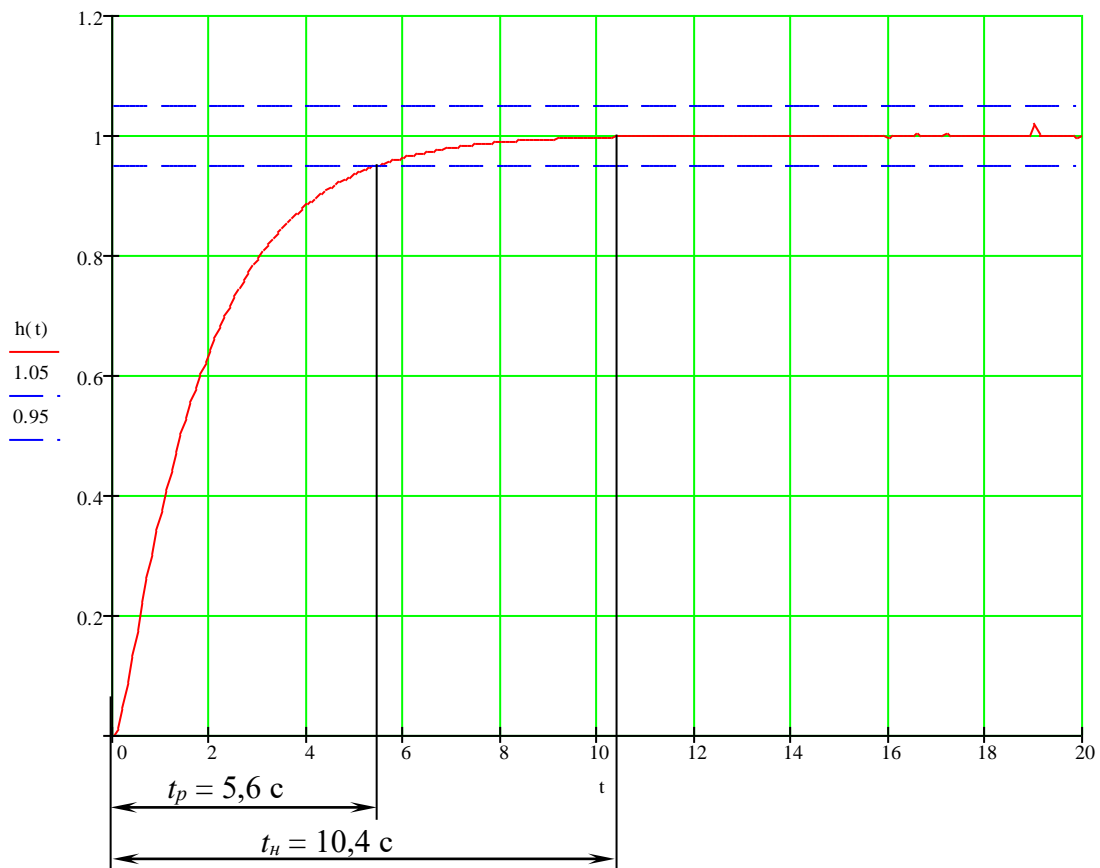


Рис. 17. Графік перехідного процесу системи, скорегованої шляхом аналізу.

показники якості САР:

- час регулювання $t_p = 5,6$ с;
- перерегулювання $\delta = 0$ %;
- час наростання перехідного процесу $t_H = 10,4$ с

По вигляду кривої перехідний процес – монотонний.

14. Побудова бажаної ЛАЧХ розімкнутої оптимальної за швидкодією системи по вимогам, які пред'явлені до неї.

Вимоги до синтезуємої САР: час регулювання $t_p = 6,64$ с; максимальне перерегулювання $\delta = 25\%$; запас стійкості за модулем не менше 15 дБ; за фазою не менше 30° . Для синтезу САР необхідно побудувати вихідну ЛАЧХ розімкнутої системи, бажану ЛАЧХ та ЛАЧХ коректуючого пристрою.

Побудова бажаної ЛАЧХ виконується в кілька етапів.

Побудова в області низьких частот аналогічна до побудови ЛАЧХ незмінної системи. Тобто проводиться асимптота з нахилом -20 дБ/дек через точку з координатами $20 \lg k = 24,35$ дБ.

Побудова в області середніх частот – це найбільш відповідальна асимптота. В даному діапазоні ЛАЧХ визначається заданими значеннями перерегулювання та тривалістю перехідного процесу. З міркувань наближення реального процесу до оптимального (за швидкодією) нахил середньо частотної асимптоти бажаної ЛАЧХ вибирається -20 дБ/дек. Вибір частоти зрізу ω_3 (частота, при якій ЛАЧХ перетинає вісь частот) виконують на підставі нерівності $\omega_{3,\min} \leq \omega_3 \leq \omega_{3,\text{opt}}$. Для того, щоб задовольнити вимоги до якості системи, необхідно, щоб ω_3 була менше частоти зрізу $\omega_{3,\text{opt}}$, яка визначається за максимальним прискоренням координати і величиною керуючого ступінчатого сигналу. Крім того дана частота ω_3 повинна бути більше $\omega_{3,\min}$, яка вибирається за заданим значенням максимального перерегулювання δ_m та часом

регулювання t_p . По заданому значенню δ_m за допомогою номограми $\delta = f(P_{з\max})$ [1] визначаємо відповідне значення $P_{з\max}$. Потім по значенню $P_{з\max}$ за допомогою номограми $t_p = f(P_{з\max})$ знаходимо значення $\frac{3\pi}{t_p}$. Цю величину прирівнюємо до заданого значення $t_p = 6,64$ с і з отриманого рівняння визначаємо частоту зрізу $\omega_{з\min} = 1,42$ с⁻¹.

Вибрану частоту зрізу $\omega_з = 1,45$ с⁻¹ (дещо збільшену), наносимо на графік. Потім будуємо середньочастотну асимптоту, провівши її через точку $\omega_з$ на осі абсцис з нахилом -20 дБ/дек.

По відомому значенню $P_{з\max} = 1,2$ дійсної частотної характеристики знаходимо мінімальне значення $P_{з\min}$, використовуючи наближене співвідношення для типової дійсної частотної характеристики $P_{з\min} = 1 - P_{з\max} = -0,2$.

Для забезпечення необхідного запасу стійкості системи по амплітуді і фазі треба продовжити середньочастотну асимптоту ліворуч і праворуч на певну величину. Запаси стійкості знаходять по номограмам $L(\omega) = f(\varphi)$ при $P_з$ дорівнює константі – це колові діаграми, $P_з$ – значення дійсної частотної характеристики замкнутої системи. Отже по номограмі знаходимо лінії, які відповідають $P_{з\max} = 1,2$ і $P_{з\min} = -0,2$. Ці криві симетричні відносно осі абсцис. Запас стійкості по амплітуді Z_M знайдемо, провівши до цих кривих горизонтальні дотичні і прочитавши відповіді на осі ординат, $L_1 = 15$ дБ, $L_2 = -15$ дБ, тобто середньочастотну асимптоту треба продовжити ліворуч і праворуч до ординат L_1 та L_2 і лише після цього спрягати з сусідніми ділянками [2].

Запас стійкості по фазі Z_ϕ знайдемо, провівши вертикальні дотичні до кривих $P_{з\max} = 1,2$ і $P_{з\min} = -0,2$ і відрахувавши значення кута в градусах від дотичної до лінії -180° . В даному випадку $Z_\phi = 45^\circ$ [2], [3].

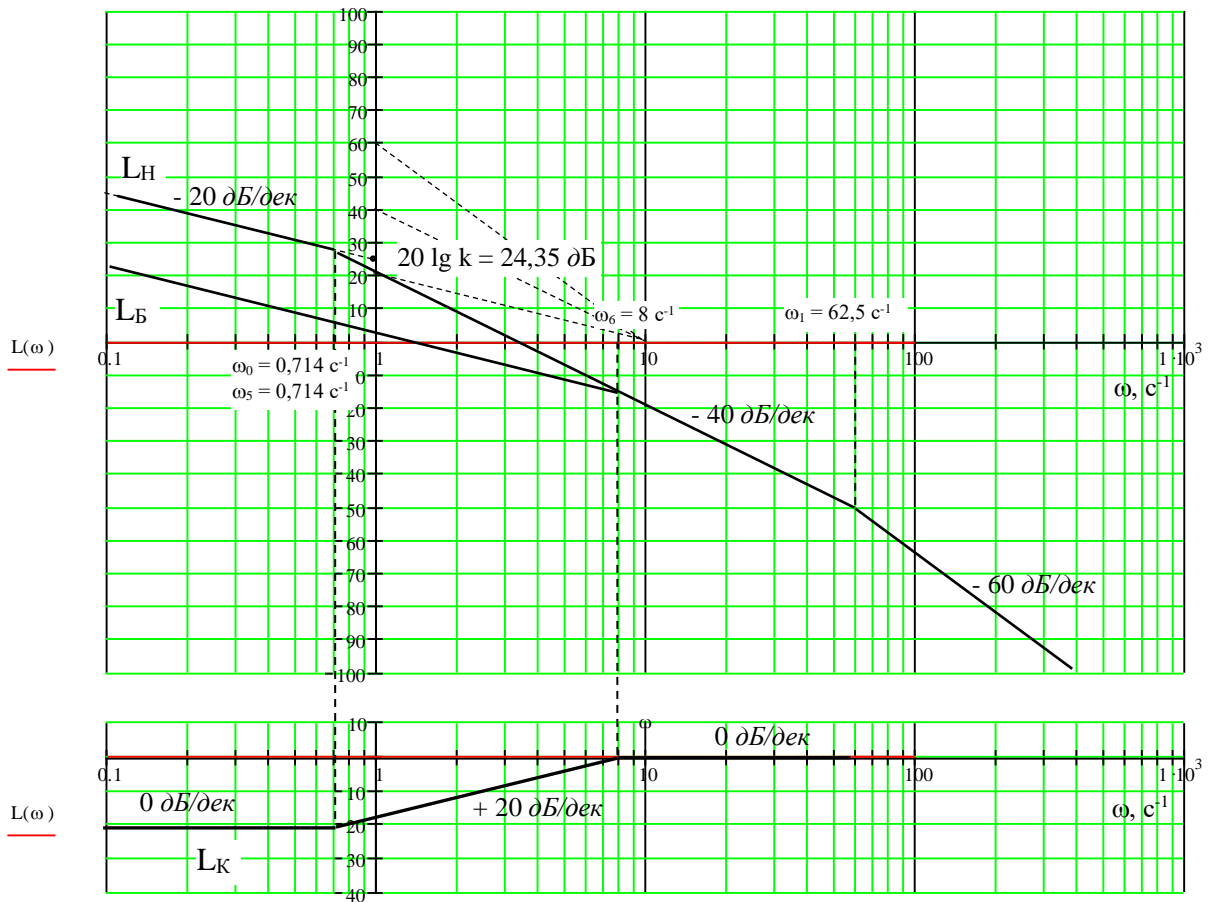


Рис. 18. Побудова бажаної ЛАЧХ та визначення ЛАЧХ коректуючого пристрою.

15. Синтез коректуючого пристрою САР за логарифмічними частотними характеристиками

ЛАЧХ коректуючого пристрою визначаємо як різницю бажаної та незмінної ЛАЧХ $L_{\kappa} = L_{\sigma}(\omega) - L_{\eta}(\omega)$ (рис. 17). За виглядом ЛАЧХ коректуючого пристрою обираємо схему коректуючого пристрою [1]:

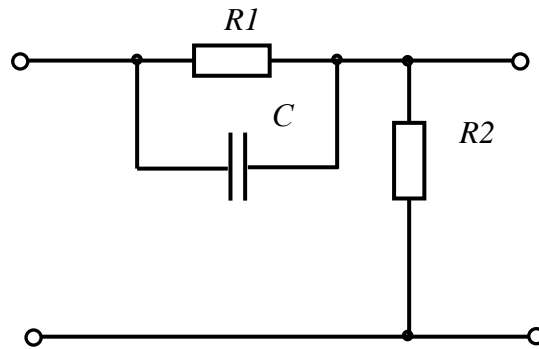


Рис. 19. Схема коректуючого пристрою.

Передаточна функція такого чотирьохполюсника у загальному вигляді:

$$W_{\kappa}(p) = \frac{k_5(T_5 p + 1)}{(T_6 p + 1)},$$

де $k_5 = \frac{R_2}{R_2 + R_1};$

$$T_5 = R_1 \cdot C;$$

$$T_6 = k_5 \cdot T_5 = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot C}{R_1 + R_2}.$$

Підставивши у рівняння загального виду сталі часу

$$\omega_5 = 0,714 \text{ с}^{-1} \Rightarrow T_5 = 1/\omega_5 = 1,4 \text{ с}; \quad \omega_6 = 8 \text{ с}^{-1} \Rightarrow T_6 = 1/\omega_6 = 0,125 \text{ с}.$$

Отже, передаточна функція коректуючого пристрою:

$$W_{\kappa}(p) = \frac{0,089 \cdot (1,4 p + 1)}{(0,125 p + 1)}$$

Для отримання номіналів елементів коректуючого пристрою задавшись $C = 2 \times 10^{-6} = 2 \text{ мкФ}$, отримано такі значення опорів:

$$R_1 = T_5/C = 1,4/2 \times 10^{-6} = 700 \text{ кОм}; \quad R_2 = \frac{k_5 \cdot R_1}{1 - k_5} = \frac{0,089 \cdot 700 \times 10^3}{1 - 0,089} \approx 70 \text{ кОм}.$$

Приймаємо опори зі стандартного ряду опорів з номіналами 710 кОм та 71 кОм відповідно.

16. Побудова кривої перехідного процесу синтезованої САР

Запишемо передаточну функцію замкнутої скорегованої системи

$$W_{зк}(p) = \frac{k \cdot k_5 (T_5 p + 1)}{p(T_1 p + 1)(T_0 p + 1)(T_6 p + 1) + k \cdot k_5 (T_5 p + 1)} \quad (16)$$

Провівши заміну $p = j\omega$, виділимо дійсну частину передаточної функції замкнутої скорегованої системи:

$$P_3(\omega) = \frac{k \cdot k_5 \cdot T_5 \omega \left((1 + k \cdot k_5 \cdot T_5) \omega - ((T_0 + T_6) \cdot T_1 + T_0 \cdot T_6) \omega^3 \right) + (T_1 \cdot T_0 \cdot T_6 \cdot \omega^4 - (T_1 + (T_0 + T_6)) \omega^2 + k \cdot k_5)^2 + k \cdot k_5 \cdot (T_1 \cdot T_0 \cdot T_6 \cdot \omega^4 - (T_1 + (T_0 + T_6)) \omega^2 + k \cdot k_5)}{\left((1 + k \cdot k_5 \cdot T_5) \omega - ((T_0 + T_6) \cdot T_1 + T_0 \cdot T_6) \omega^3 \right)^2}$$

Таблиця 11. Значення $P_3(\omega)$ системи, скорегованої шляхом синтезу.

$\omega, \text{с}^{-1}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$P_3(\omega)$	1	0,17	-0,006	-0,04	-0,05	-0,049	-0,045	-0,041	-0,036	-0,032	-0,028	-0,025	-0,022

За отриманими значеннями $P_3(\omega)$ побудуємо дійсну частотну характеристику системи, скорегованої шляхом синтезу (рис. 20).

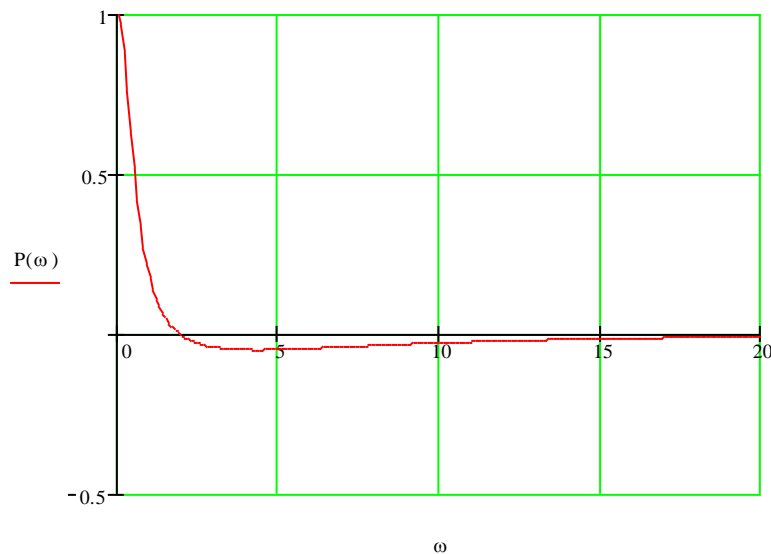


Рис. 20. Дійсна частотна характеристика замкнутої скорегованої системи.

Таблиця 12. Значення перехідної функції $h(t)$.

t, c	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$h(t)$	0	0,643	0,884	0,962	0,988	0,996	0,999	1,0	1,0	1,0	1,0

Побудуємо криву перехідного процесу синтезованої САР температури.

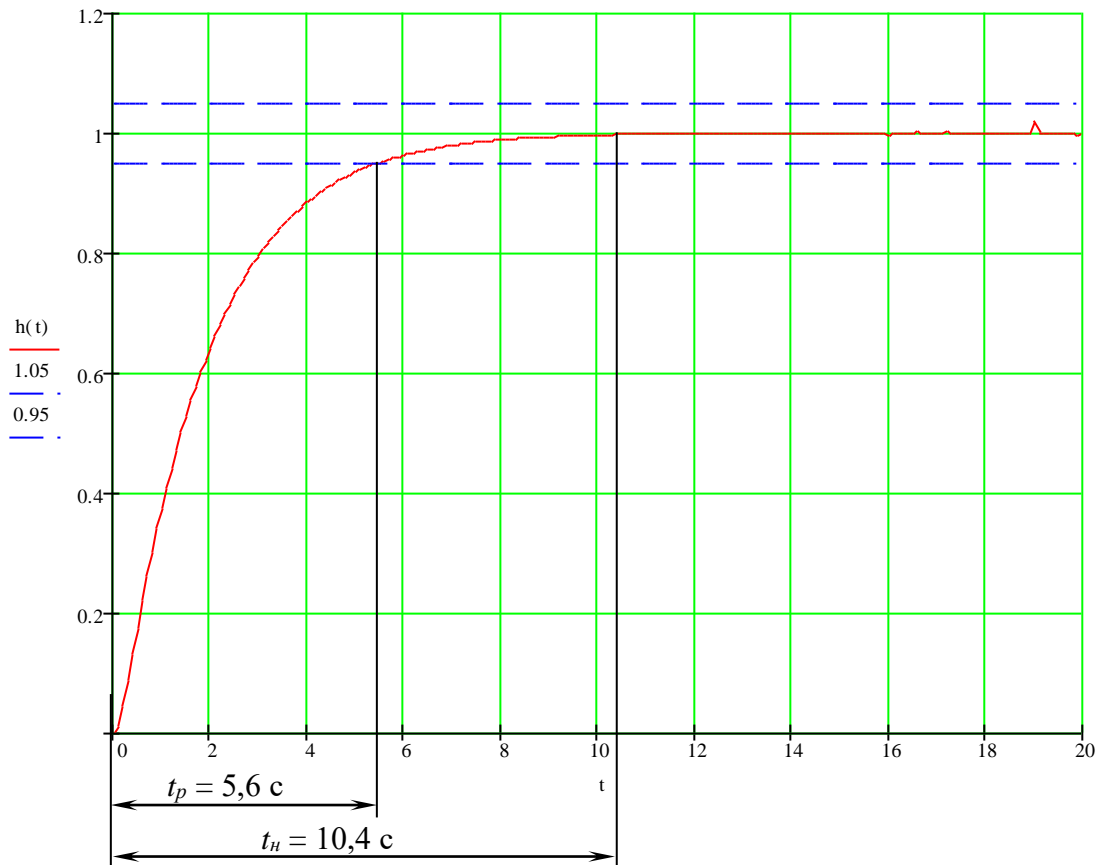


Рис. 21. Графік перехідного процесу системи, розробленої шляхом синтезу.

17. Визначення прямих показників якості синтезованої САР

З побудованого перехідного процесу можна визначити наступні прямі показники якості САР:

- час регулювання $t_p = 5,6 c$;
- перерегулювання $\delta = 0 \%$;
- час наростання перехідного процесу $t_H = 10,4 c$

По вигляду кривої перехідний процес – монотонний.

Висновки

Метою курсової роботи було створення системи автоматичного регулювання із заданими вимогами до швидкодії та запасів стійкості за модулем і фазою. В результаті виконання роботи отримано систему, що задовольняє поставленим вимогам. При цьому проведено аналіз САР та синтез коректуючого пристрою до неї. Вихідна САР мала такі показники якості:

- час регулювання $t_p = 8,3$ с;
- перерегулювання $\delta = 60$ %;
- частота коливань $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2,03 \text{ с}^{-1}$, де T – період коливань;
- кількість коливань перехідного процесу $n = 2$;
- час досягнення першого максимуму $t_{max1} = 1,6$ с;
- час наростання перехідного процесу $t_n = 0,9$ с;
- декремент затухання перехідного процесу $d = 2,73$;
- запас стійкості системи по амплітуді $Z_m = 13$ дБ;
- запас стійкості системи по фазі $Z_\phi = 10^\circ$.

В результаті аналізу САР отримано систему з наступними показниками:

- час регулювання $t_p = 5,6$ с;
- перерегулювання $\delta = 0$ % (перехідний процес монотонний);
- час наростання перехідного процесу $t_n = 10,4$ с;
- запас стійкості системи по амплітуді $Z_m = 30$ дБ;
- запас стійкості системи по фазі $Z_\phi = 79^\circ$.

Та після синтезу корегуючого пристрою САР мала такі показники:

- час регулювання $t_p = 5,6$ с;
- перерегулювання $\delta = 0$ % (процес монотонний);
- час наростання перехідного процесу $t_n = 10,4$ с;
- запас стійкості системи по амплітуді $Z_m = 30$ дБ;
- запас стійкості системи по фазі $Z_\phi \approx 79^\circ$.

Розроблені за допомогою обох підходів системи автоматичного регулювання задовольняють поставленим до них вимогам, при цьому вони мають кращу швидкодію, більші запаси по амплітуді та по фазі, ніж вихідна система.

В результаті розроблені шляхом аналізу та синтезу системи мають дещо збільшений час наростання перехідного процесу ніж вихідна система, але при цьому перехідний процес перетворився з коливального затухаючого в монотонний.

Таким чином результатом виконання курсової роботи є закріплення навичок використання розрахункових методів розв'язання задач теорії автоматичного управління із знаходженням стійкості, якості, оптимальних параметрів та структури системи автоматичного регулювання.

Список використаної літератури

1. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – К.: Либідь, 1997. – 544 с
2. Зайцев Г.Ф. та ін. Теорія автоматичного управління. /Г.Ф. Зайцев, В.К. Стеклов, О.І. Бріцький: За ред. проф. Г.Ф. Зайцева. – К.: Техніка, 2002. – 688 с.
3. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування : підручник. 2-ге вид., перероб. і доп. Київ : Либідь, 2007. 656 с.
4. Кондратець В.О. Теорія і технічні засоби систем: Підручник. – К.: Вища шк., 1993. – 319 с.
5. Гоголюк П. Ф., Гречин Т. М. Теорія автоматичного керування : підручник. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2012. 280 с.

Рекомендована література

1. Кондратець В.О. Теорія і технічні засоби систем: Підручник. – К.: Вища шк., 1993 – 319 с. – (Автоматика та автоматизація виробництва с/г машин: У. 2ч.; ч1).
2. Кондратець В.О. Системи керування технологічними та виробничими процесами і проектуванням: Підручник. – К.: Вища шк., 1993. – 256 с. – (Автоматика та автоматизація виробництва с/г машин: У 2ч.; ч2).
3. Носов Г.Р.; Кондратець В.А., Сакало Л.Г., Серeda Л.И. Автоматика и автоматизация мобильных сельскохозяйственных машин. – К.: Высш. шк., 1984. – 248 с.
4. Асланян А. Е., Блажко А. В., Жуков І. А. та ін. Теорія автоматичного керування : підручник. Київ : НАУ, 2015. 532 с.
5. Александров Є. Є., Єлісеєв В. В., Сотник В. О. Теорія автоматичного управління : навч. посіб. У 3 т. Т. 3. Нестационарні, цифрові, нелінійні та оптимальні системи автоматичного керування. Харків : ХДПУ, 2002. 195 с.
6. Артюшин Л. М., Машков О. А., Дурняк Б. В., Сівов М. С. Теорія автоматичного керування : навч. посіб. Львів : Українська академія друкарства, 2004. 272 с.
7. Мокін Б. І., Мокін О. Б. Теорія автоматичного керування. Методологія та практика оптимізації : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2013. 210 с.
8. Landau I. D., Lozano R., Saad M. M., Karimi A. Adaptive Control: Algorithms, Analysis and Applications. London : Springer, 2024. 682 p.
9. Annaswamy A. M., Fradkov A. L. A Historical Perspective of Adaptive Control and Learning. Annual Reviews in Control. 2021. Vol. 52. P. 18–41.

Еквівалентні комплексні передаточні функції та динамічні параметри
коректуючих ланцюгів змінного струму

Схема	$W_{екв}(j\omega)$	T_1	T_2	K
	$\frac{j\omega T_1}{1 + j\omega T_1}$	$\frac{RC}{2}$	-	1
	$\frac{j\omega T_1}{1 + j\omega T_1}$	$\frac{(2R_n + R)R_n RC}{R^2 + (2R_n + R)^2}$	-	1
	$K \frac{1 + j\omega T_1}{1 + j\omega T_2}$	$\frac{(R_1 + R_2)R}{2R_2} C$	$\frac{RC}{2}$	$\frac{R_2}{R_1 + R_2}$
	$K \frac{1 + j\omega T_1}{1 + j\omega T_2}$	$\frac{(2R_n + R)R_n}{R^2 + (2R_n + R)^2} \times \frac{R_1 + R_2}{R_2} RC$	$\frac{(2R_n + R)R_n}{R^2 + (2R_n + R)^2} \times \frac{RC}{R^2 + (2R_n + R)^2}$	$\frac{R_2}{R_1 + R_2}$
	$K \frac{1 + j\omega T_1}{1 + j\omega T_2}$	RC	$\frac{2R_1 R}{2R_1 + R} C$	$\frac{2R_1}{2R_1 + R}$

В САР бувають випадки, коли сигнал помилки є напруга змінного струму певної (несучої) частоти. Для покращення якості перехідних процесів в них використовують RC-ланцюги змінного струму. Аналогом передаточної функції в цих ланцюгах є еквівалентний комплексний коефіцієнт передачі $W_{екв}(j\omega)$ (еквівалентна комплексна передаточна функція). Тут приведені вирази для її визначення для схем, що найбільш часто використовуються.

Шкала номінальних опорів
(для резисторів постійного опору відповідно ДЕСТ 2825-60)

Допустимі відхилення									
± 20%	± 10%	± 5%	± 20%	± 10%	± 5%	± 20%	± 10%	± 5%	± 20% ± 10% ± 5%
<i>ом, ком, Мом, Том</i>									<i>Том</i>
1,0	1,0	1,0	10	10	10	100	100	100	1,0
		1,1			11			110	
	1,2	1,2		12	12		120	120	
		1,3			13			130	
1,5	1,5	1,5	15	15	15	150	150	150	
		1,6			16			160	
	1,8	1,8		18	18		180	180	
		2,0			20			200	
2,2	2,2	2,2	22	22	22	220	220	220	
		2,4			24			240	
	2,7	2,7		27	27		270	270	
		3,0			30			300	
3,3	3,3	3,3	33	33	33	330	330	330	
		3,6			36			360	
	3,9	3,9		39	39		390	390	
		4,3			43			430	
4,7	4,7	4,7	47	47	47	470	470	470	
		5,1			51			510	
	5,6	5,6		56	56		560	560	
		6,2			62			620	
6,8	6,8	6,8	68	68	68	680	680	680	
		7,5			75			750	
	8,2	8,2		82	82		820	820	
		9,1			91			910	

Номінальна величина опору – одиниці, десятки та сотні Ом, кілоом і одиниці та десятки мегом – повинна відповідати ряду 1,0; 1,5; 2,2; 3,3; 4,7; 6,8.

Перевагу слід надавати величинам 1,0; 2,2 та 4,7.

Допустимі відхилення встановлюються: для дротяних резисторів ± 5 , ± 10 , ± 20 і $\pm 30\%$, а для недротяних ± 10 , ± 20 і $\pm 30\%$.

Стандарт розповсюджується на дротяні резистори від 1 ом до 1 Мом і на недротяні від 1 ом до 10 Мом.

Шкала номінальних ємностей по ДЕСТ 2519-60

±20 % і біль ше	±10 %	±5 %	±20 % і біль ше	±10 %	±5 %	±20 % і біль ше	±10 %	±5 %	±20 % і біль ше	±10 %	±5 %	±20 % і біль ше	±10 %; ±5%	±5 %	±10 % і біль ше	±20 %
<i>nф</i>												<i>мкф</i>				
1,0	1,0	1,0	10	10	10	100	100	100	1000	1000	1000	0,01	0,01	0,1	1,0	10
		1,1			11			110			1000					
	1,2	1,2		12	12		120	120		1200	1200		0,012			
1,5	1,5	1,5	15	15	15	150	150	150	1500	1500	1500	0,015	0,015	0,1 5	1,5	15
		1,6			16			160			1600					
	1,8	1,8		18	18		180	180		1800	1800		0,018			
		2,0			20			200			2000					
2,2	2,2	2,2	22	22	22	220	220	220	2200	2200	2200	0,022	0,022	0,2 2	2,2	22
		2,4			24			240			2400					
	2,7	2,7		27	27		270	270		2700	2700		0,027			
		3,0			30			300			3000					
3,3	3,3	3,3	33	33	33	330	330	330	3300	3300	3300	0,033	0,033	0,3 3	3,3	33
		3,6			36			360			3600					
	3,9	3,9		39	39		390	390		3900	3900		0,039			
		4,3			43			430			4300					
4,7	4,7	4,7	47	47	47	470	470	470	4700	4700	4700	0,047	0,047	0,4 7	4,7	47
		5,1			51			510			5100					
	5,6	5,6		56	56		560	560		5600	5600					
		6,2			62			620			6200					
6,8	6,8	6,8	68	68	68	680	680	680	6800	6800	6800	0,068	0,068	0,6 8	6,8	68
		7,5			75			750			7500					
	8,2	8,2		82	82		820	820		8200	8200		0,082			100
		9,1			91			910			9100					

Стандарт розповсюджується на слюдяні, керамічні, паперові, плівкові та аналогічні їм конденсатори. Номінальна ємність електролітичних конденсаторів повинна відповідати наступному ряду: 1 – 2 – 5 – 10 – 20 – 50 – 100 – 200 – 500 – 1000 – 5000 мкФ.

Зміст

Вступ.....	
1. Методичні вказівки по виконанню курсової роботи.....	
1.1. Мета і структура роботи.....	
1.2. Тема курсової роботи.....	
1.3. Вимоги до САР.....	
1.4. Зміст пояснювальної записки.....	
1.5. Вимоги до оформлення пояснювальної записки.....	
2. Основні особливості виконання курсової роботи.....	
2.1. Підготовка даних.....	
2.2. Аналіз складу динамічних ланок.....	
2.3. Подання інтегруючої ланки.....	
2.4. Перетворення виразів складних динамічних ланок.....	
2.5. Заключний етап роботи з заданою САР.....	
2.6. Основні теоретичні положення аналізу САР щодо впливу на їх динамічні характеристики.....	
2.6.1. Вплив на властивості системи автоматичного регулювання місцевих зворотних зв'язків.....	
2.6.2. Забезпечення стійкості і підвищення запасу стійкості САР.....	
2.6.3. Компенсація.....	
2.7. Корекція систем автоматичного регулювання змінного струму.....	
2.8. Особливості заключного етапу синтезу коректуючого пристрою.....	
3. Приклад виконання та оформлення курсової роботи.....	
4. Рекомендована література.....	
5. Додатки.....	

5.1. Еквівалентні комплексні передаточні функції та динамічні параметри коректуючих ланцюгів змінного струму.....

5.2. Шкала номінальних опорів для резисторів постійного опору (по ДЕСТ 2825-60).....

5.3. Шкала номінальних ємностей по ДЕСТ 2519-60.....