

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет комп'ютерно–інтегрованих технологій, автоматизації,
електроінженерії
(повне найменування інституту, назва факультету)
та радіоелектроніки

Кафедра Автоматики та телекомунікацій
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

(підпис) (ініціали, прізвище)
“ ____ ” _____ 2020 р.

Випускна кваліфікаційна робота
магістра
(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему «Автоматизація синтезу системи автоматичного керування за методом логарифмічних частотних характеристик»

Виконав : студент 2 курсу, групи СУАм-19
(шифр групи)

спеціальності

151 «Автоматизація та
комп'ютерно- інтегровані технології»
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Горпинич Д.О.
(прізвище та ініціали)

(підпис)

Керівник к.т.н. доцент Поцєпаєв В. В.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

*Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.*

Студент _____
(підпис)

Покровськ – 2020 р.

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет комп'ютерно- інтегрованих технологій, автоматизації,
електроінженерії та радіоелектроніки
(повне найменування інституту, назва факультету)

Автоматика та телекомунікації
(повна назва кафедри)

Захист відбувся _____
(дата)

з оцінкою _____
секретар ДЕК _____
(підпис)

Випускна кваліфікаційна робота

_____магістра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему «Автоматизація синтезу системи автоматичного керування за
методом логарифмічних частотних характеристик»

Виконав студент групи СУАм–19

Горпинич Д.О.

Керівник

Поцєпаєв В.В.

Зав.каф. автоматики та телекомунікацій

Консультанти

Нормоконтролер

ас. Д.О.Жуковська

Покровськ - 2020 р.

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації
 електроінженерії та радіоелектроніки
 Кафедра автоматика та телекомунікації
 Освітній ступінь магістр
 Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
 (шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____/_____
 “ ” _____ 2020 р.

З А В Д А Н Н Я НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Горпинич Дмитр Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Автоматизація синтезу системи автоматичного керування
за методом логарифмічних частотних характеристик

керівник роботи: Поцесаєв В.В.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від “ 24 ” 07 2020 року № 440

2. Строк подання студентом роботи _____

3. Вихідні дані до роботи: Автоматизація синтезу системи автоматичного керування за методом логарифмічних частотних характеристик

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1) Виконати аналіз структури та характеристик серійного регулятора навантаження та його принципової схеми видобувним комбайном УКД200-250.

2) Виконати дослідження математичної моделі регулятора навантаження приводів виконавчих органів комбайна УКД200-250.

3) Розробити реалізацію регулятора навантаження на панельному контролері visiGRAF .

4) Виконати заходи з охорони праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Виконати аналіз існуючих рішень автоматизованого синтезу лінійних систем автоматичного керування за методом логарифмічних частотних характеристик.	25.10.20	
2	Виконати алгоритмічну і програмну реалізацію автоматизованого синтезу лінійної системи автоматичного керування за методом логарифмічних частотних характеристик за спрощеною методикою.	2.11.20	
3	Дослідити ефективність розроблених програмних рішень автоматизованого синтезу за методом логарифмічних частотних характеристик за спрощеною методикою.	15.11.20	
4	Розробка заходів з охорони праці	20.11.20	
5	Оформлення магістерської роботи	25.11.20	
6	Підготовка до захисту магістерської роботи	10.12.20	
7	Захист магістерської роботи	21.12.20	

Студент

(підпис)

Горпинич Д.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

Поцеляев В.В.

(прізвище та ініціали)

Лист зауважень

Посада П.І.Б.	Суть зауваження, оцінка та підпис

АНОТАЦІЯ

Горпинич Д.О. Автоматизація синтезу системи автоматичного керування за методом логарифмічних частотних характеристик / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». ДВНЗ ДонНТУ, Покровськ, 2020.

Пояснювальна записка: 68 сторінок, 19 рисунків, 1 таблиця, 22 посилання на використану літературу.

Об'єкт розробки – програма автоматизації синтезу лінійних систем автоматичного керування за методом логарифмічних частотних характеристик.

Мета роботи – автоматизація синтезу системи автоматичного керування за методом логарифмічних частотних характеристик.

Методи дослідження. Синтез лінійних систем автоматичного керування за методом логарифмічних частотних характеристик; методи моделювання та дослідження динамічних систем автоматичного керування в середовищі Simulink; програмування в системі Matlab;

Результат розробки – програма автоматизації синтезу лінійних систем автоматичного керування за методом логарифмічних частотних характеристик.

Ключові слова: СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ, СИНТЕЗ, ЛОГАРИФМІЧНІ ЧАСТОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ.

Список публікацій здобувача:

Горпинич Д.О., Поцєпаєв В.В., Програма автоматизованого синтезу лінійних систем керування за методом логарифмічних частотних характеристик / Д.О. Горпинич, В.В Поцєпаєв / Зб. доповідей Всеукр. наук.-практ. конф.

молодих вчених «ТАК»: телекомунікації, автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології, 25 – 26 листопада 2020р. – Покровськ: ДВНЗ «ДонНТУ», 2020. – С. 57 – 62.

ABSTRACT

Gorpinich D.O. Automation of synthesis of automatic control system by the method of Bode diagrams / Final qualification work for the degree of "master" in specialty 151 "Automation and computer-integrated technologies". SHEE DonNTU, Pokrovsk, 2020.

Explanatory note: 68 pages, 19 figures, 1 table, 22 references to the used literature.

The object of development is a program for automation of synthesis of linear automatic control systems by the method of logarithmic frequency characteristics.

The purpose of the work is to automate the synthesis of the automatic control system by the method of logarithmic frequency characteristics.

Research methods. Synthesis of linear automatic control systems by the method of logarithmic frequency characteristics; methods of modeling and research of dynamic automatic control systems in Simulink environment; programming in the MATLAB system;

The result of the development is a program for automating the synthesis of linear automatic control systems by the method of logarithmic frequency characteristics.

Keywords: AUTOMATIC CONTROL SYSTEM, SYNTHESIS, BODE DIAGRAM.

List of publications of the applicant:

Gorpynych D.O., Potsepaev V.V., Program of automated synthesis of linear control systems by the method of Bode diagrams / D.O. Gorpynych, V.V. Potsepaev / Coll. reports All-Ukrainian. scientific-practical conf. of young scientists "TAK":

telecommunications, automation, computer-integrated technologies, November 25 - 26, 2020. - Pokrovsk: DonNTU, 2020. - P. 57 - 62.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
1 АНАЛІЗ СТАНУ АВТОМАТИЗАЦІЇ СИНТЕЗУ ЛІНІЙНИХ СИСТЕМ.....	
АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ.....	13
1.1 Методи синтезу лінійних САК на основі логарифмічних.....	
амплітудно- частотних характеристик.....	13
1.2 Реалізованість автоматизованого синтезу САК за методом бажаних.....	
ЛАЧХ.....	17
Висновки до розділу 1.....	24
2 АВТОМАТИЗОВАНИЙ СИНТЕЗ САК ЗА МЕТОДОМ.....	
ЛОГАРИФМІЧНИХ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	25
2.1 Теоретичні основи синтезу за методом ЛАЧХ.....	25
2.2 Розробка програми автоматизованого синтезу САК за методом	
ЛАЧХ за спрощеною методикою.....	29
Висновки до розділу 2.....	37
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ПРОГРАМНО СИНТЕЗОВАНОЇ САК.....	39
3.1 Дослідження прямих показників якості.....	
програмо синтезованої САК.....	39
Висновки до розділу 3.....	47
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	48
4.1 Шкідливі фактори у роботі користувача комп'ютера.....	48
4.2 Заходи щодо поліпшення умов праці користувача ПК.....	49
4.2.1 Організація робочого місця користувача ПК.....	50
4.2.1.1 Освітлення робочого місця користувача ПК.....	50
4.2.1.2 Шум на робочому місті користувача ПК.....	51
4.2.1.3 Параметри мікроклімату робочого міста користувача ПК.....	52
4.2.2 Планування і оснащення робочого місця користувача ПК.....	54
4.2.3 Розрахунок системи загального рівномірного освітлення.....	55
4.2.4 Розрахунок рівня шуму на робочому місті користувача ПК.....	57
ВИСНОВКИ.....	60

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	61
ДОДАТОК А. Лістинг скрипта Sint_LAX_prim_kr_ap_kol.m для.....	
виконання синтезу САК об'єкта керування з коливальною ланкою.....	64

ВСТУП

Актуальність роботи. Стрімке зростання автоматизації технологічних процесів найбільш сучасних фірм – членів Асоціації промислової автоматизації України, де прийнятий та впроваджується стандарт Industry 4.0, забезпечує наближення виробничих показників цих підприємств до кращих світових у відповідних галузях виробництва та сфері надання послуг. Кількісні та якісні зміни торкаються всіх рівнів автоматизації, починаючи з локальних систем автоматичного керування окремими об'єктами, мехатронними системами окремих ділянок, управління промисловими роботами та закінчуючи повною автоматизацією прийняття управлінських рішень у всіх системах функціонування підприємства.

В зв'язку з цим перед фахівцями з системної інженерії постають великі обсяги завдань аналізу та синтезу складних систем автоматичного керування та їх узгодження на багатьох рівнях повністю автоматизованого виробництва.

Виконання великих обсягів завдань розробки систем автоматичного керування в прийнятні терміни неможливо без автоматизації всіх етапів проектування на будь-якому рівні автоматизації, зокрема, при побудові локальних систем автоматичного керування об'єктами та процесами, розробці мехатронних та роботизованих систем. В зв'язку з цим робота, спрямована на автоматизацію метода синтезу системи автоматичного керування, є актуальною.

Мета роботи – автоматизація синтезу системи автоматичного керування за методом логарифмічних частотних характеристик.

Ідеєю роботи є алгоритмізація та програмна реалізація алгоритму синтезу системи автоматичного керування за методом логарифмічних частотних характеристик за спрощеною методикою.

Методи дослідження. Синтез лінійних систем автоматичного керування за методом логарифмічних частотних характеристик; методи моделювання та

дослідження динамічних систем автоматичного керування в середовищі Simulink; програмування в системі Matlab;

Завдання роботи, що мають бути вирішені для досягнення поставленої в роботі мети:

Виконати аналіз існуючих рішень автоматизованого синтезу лінійних систем автоматичного керування за методом логарифмічних частотних характеристик.

Виконати алгоритмічну і програмну реалізацію автоматизованого синтезу лінійної системи автоматичного керування за методом логарифмічних частотних характеристик за спрощеною методикою.

Дослідити ефективність розроблених програмних рішень автоматизованого синтезу за методом логарифмічних частотних характеристик за спрощеною методикою.

Розробити заходи з охорони праці фахівця з системної інженерії.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблена програма автоматизованого структурного та параметричного синтезу регуляторів може бути використана при розробці локальних систем автоматичного керування лінійними та лінеаризованими об'єктами в будь якій промисловій галузі, а також в навчальному процесі при курсовому проектуванні з дисципліни «Теорія автоматичного керування».

Апробація роботи. Основні положення магістерської роботи доповідалися на Всеукраїнській науково – практичній конференції молодих вчених «ТАК»: телекомунікації, автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології, 25 – 26 листопада 2020 року, ДонНТУ, м. Покровськ.

Публікації. Результати досліджень опубліковані в роботах [27,28] автора.

Структура та обсяг кваліфікаційної роботи. Структура кваліфікаційної роботи магістра визначена метою дослідження та виконанням завдань для її досягнення. Робота містить вступ, чотири розділи, основні висновки та перелік використаної літератури. Загальний обсяг роботи становить 68 сторінок

машинописного тексту, 24 рисунка, 1 таблицю та 22 посилань на використану літературу.

1 АНАЛІЗ СТАНУ АВТОМАТИЗАЦІЇ СИНТЕЗУ ЛІНІЙНИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

1.1 Методи синтезу лінійних САК на основі логарифмічних амплітудно-частотних характеристик

Метод синтезу пристроїв корекції (регуляторів) лінійних систем автоматичного керування (САК) за допомогою логарифмічних амплітудно-частотних характеристик (ЛАЧХ) є найбільш розробленим та розповсюдженим методом і в теперішній час вважається класичним.

Методика побудови бажаних ЛАЧХ. Найбільш складним, відповідальним та неоднозначним етапом при синтезі є побудова бажаної ЛАЧХ. Розроблено цілий ряд способів визначення бажаної ЛАЧХ і розрахунку її параметрів. Основними з них є перераховані нижче [7,8].

1) метод В.В. Солодовникова. Розрахунок бажаної ЛАЧХ виконується за номограмами та дійсними частотними характеристиками розімкнутої ЛАЧХ. В цій методиці вихідними даними є коефіцієнти помилок, перерегулювання та час перехідного процесу.

2) Методи Г. Честната – Г. Майера. В цих методах використовуються повні номограми, за якими визначають параметри бажаної ЛАЧХ. Вихідними даними за цим методом є коефіцієнти помилок, перерегулювання, час перехідного процесу, запаси стійкості по амплітуді та фазі, показник коливальності та ін.

3) Метод Крейнермана. Розрахунок параметрів бажаної ЛАЧХ проводиться на основі коефіцієнтів помилок та запасів стійкості по амплітуді і фазі.

4) Метод Я.Є. Гукайло – В.А. Бесекерського. Для побудови бажаної ЛАЧХ використовуються задані коефіцієнти помилок та показник коливальності.

5) Метод Е. А. Санковського — Г. Г. Сигалова. Вихідними даними для побудови бажаної ЛАЧХ за цим методом є такі характеристики САК:

максимальні значення швидкості і прискорення впливу завдання, допустима помилка в сталому режимі; допустимі показники якості перехідної характеристики — перерегулювання та час перехідного процесу; запас стійкості по фазі. Особливістю метода є обрання одної з дев'яти типових бажаних ЛАЧХ за передавальною функцією об'єкта керування з подальшим розрахунком її параметрів відповідно до параметрів об'єкта та вимог до вказаних показників якості проектованої системи [4].

Незважаючи на ґрунтовну розробленість методу синтезу за бажаною ЛАЧХ, в сучасній науковій та навчальній літературі є багато суперечливих та неоднозначних рекомендацій, що ускладнюють використання частотних методів. Перш за все це відноситься до побудови середньо-частотної асимптоти бажаної ЛАЧХ, яка визначає якість перехідних процесів в системі керування. Якщо рекомендація щодо нахилу цієї асимптоти -20дБ/дек є безсумнівною, то її довжина рекомендується дуже по різному. В розповсюдженному підручнику [13], наприклад, вказано лише, що чим довша середньо-частотна асимптота, тим кращий перехідний процес.

В роботі [5], фрагмент якої наведено на рисунку 1.1, наведені рекомендації (або констатація без пояснень) щодо довжини середньо-частотної асимптоти приблизно $1 \dots 1,5$ декади. Також без пояснень вказано про її симетричність відносно частоти зрізу, хоча методика визначення по ЛАЧХ запасу стійкості передбачає його знаходження тільки праворуч від частоти зрізу.

Дуже близько за змістом наведені рекомендації щодо побудови середньо-частотної асимптоти в посібнику [17], де також декларативно й суперечливо викладено побудову середньо-частотної асимптоти бажаної ЛАЧХ. Тут довжина середньо-частотної асимптоти сягає $1.5 \dots 2$ декади. Далі цитується за текстом з [17]:

це. Обычно $\omega_{\text{ср}}$ находят из номограмм, но предварительные расчеты $\omega_{\text{ср}}$ можно проводить по формуле

$$\omega_{\text{ср}} \cong \frac{K\pi}{t_{\pi}^*}, \quad (4.22)$$

где $K = (2, 3, 4)$ — коэффициент, зависящий от величины заданного перерегулирования σ^* ; t_{π}^* — заданное время переходного процесса. Длина среднечастотного участка желаемой ЛАЧХ ограничивается запасом устойчивости по модулю ΔL , который откладывается вверх и вниз по оси ординат (рис. 4.8). Величина ΔL находится по номограммам в зависимости от заданного перерегулирования σ^* . Приблизительно длина среднечастотного участка l равна $(1-1,5)$ декады, причем по обе стороны от $\lg \omega_{\text{ср}}$ длина асимптоты составляет $0,5l$. Тогда в системе будет достигнуто перерегулирование $\sigma = (20-30)\%$.

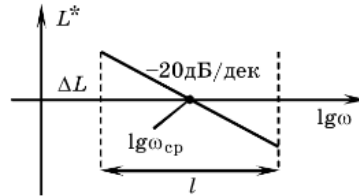


Рис. 4.8

Рисунок 1.1 – Фрагмент щодо визначення довжини та вимоги симетричності середньо-частотної асимптоти ЛАЧХ

«Середньочастотна ділянка бажаної ЛАЧХ являє собою відрізок, що перетинає вісь абсцис в точці $\lg \omega_p$ під нахилом $-20\text{дБ} / \text{дек}$ (рис. 6.12). При такому нахилі забезпечується найкраща якість перехідних процесів. Довжина середньочастотної ділянки приймається рівною $l = 1,5 \dots 2$ дек, причому точка $\lg \omega_p$ повинна знаходитися в середині ділянки. В цьому випадку в системі буде забезпечено перерегулювання не більше $20 \dots 30\%$.

Після побудови середньочастотної ділянки вона сполучається з низькочастотною за допомогою відрізка з нахилом, кратним $20\text{дБ} / \text{дек}$. Нахил може бути обраний довільно, з урахуванням специфіки кожного конкретного завдання. Іноді досить продовжити середньочастотну ділянку до перетину з низькочастотною. Якщо ж вони не перетинаються, слід використовувати мінімальний (по модулю) можливий нахил відрізка сполучення, щоб не ускладнювати передавальну функцію коригуючого пристрою.»

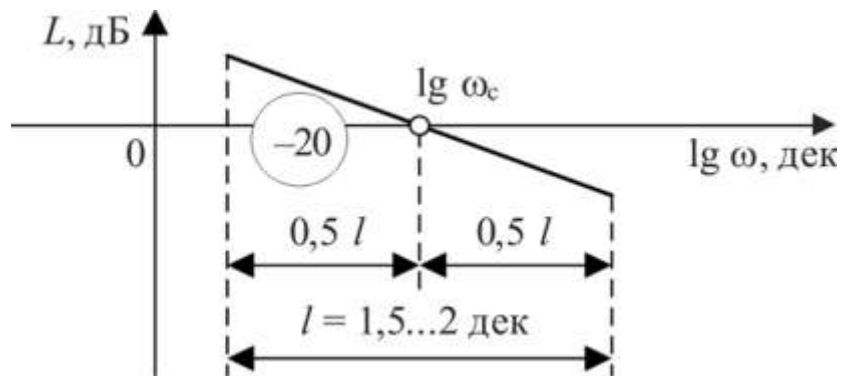


Рисунок 1.2 – визначення довжини та вимоги симетричності середньочастотної асимптоти бажаної ЛАЧХ[17]

Таким чином, для досягнення однієї і тієї ж величини перерегулювання в 20-30% в [5] необхідно запас стійкості в 10-15 дБ, а в [17] відповідно в 15-20 дБ.

Огляд наукової літератури, де представляються результати синтезу САК, свідчить, що для виконання синтезу використовується саме метод бажаних ЛАЧХ, незважаючи на закидання, що він є графоаналітичним а тому громіздким.

Так, в статті [19] представлена методика синтезу слідкуючої системи управління мотор-редуктором з контуром швидкості, налаштованим на модульний оптимум. Методика заснована на методі синтезу за допомогою логарифмічних амплітудних частотних характеристик. В результаті синтезу отримано два регулятора кута спостереження: пропорційно-інтегруючий і пропорційно-диференціюючий регулятор. Критерієм синтезу регулятора кута спостереження є бажана ЛАЧХ, характеристики якої визначаються на основі граничних значень перехідної функції об'єкта керування.

Результати виконання складних наукових завдань розробки пристроїв силової електроніки викладені в роботах [11,12]. В [11] синтез системи управління широтно-імпульсним коректором коефіцієнта потужності виконано на основі метода ЛАЧХ. Таким же чином і в статті [12] синтезовано послідовний корегуючий пристрій для імпульсного перетворювача.

В дисертаційній роботі [18] успішно адаптовано та використано частотний метод параметричного синтезу під-регулятора для стаціонарних, інтервальних і багатозв'язних САК апаратів хімічної промисловості.

1.2 Реалізованість автоматизованого синтезу САК за методом бажаних ЛАЧХ

Одною з найпотужніших програмних систем для автоматизованого аналізу та синтезу САК є система комп'ютерної математики MATLAB, до якої входить середовище моделювання динамічних систем Simulink [1].

Основні можливості аналізу та синтезу систем керування в MATLAB реалізовані у вигляді більш ніж ста функцій, що зосереджені в бібліотеці Control System Toolbox. MATLAB є об'єктно - орієнтованою системою. Основними класом для побудови моделей об'єктів САК є клас верхнього рівня LTI (Linear Time-Invariant System лінійна стаціонарна система). Нащадки класу LTI створюють об'єкти для наступних типів моделей: в формі tf (tf - transfer function) - завдання чисельника і знаменника передавальної функції; в формі zpk (завдання нулів, полюсів і коефіцієнта підсилення передавальної функції); в ss-формі (завдання системи в просторі станів, шляхом завдання матриць коефіцієнтів диференціальних рівнянь); в frd-формі (завдання вектора частот і відповідних значень комплексного коефіцієнта передачі). Функції Control System Toolbox є універсальними, тобто, одна й та ж сама функція може приймати аргументи будь якого з названих типів.

Функції пакета здатні виконувати обчислення та відображати на графіках частотні й часові характеристики, нулі і полюси систем. У пакеті реалізовано великий набір засобів аналізу одновимірних і багатовимірних безперервних і дискретних систем і об'єктів; побудова основних характеристик систем: імпульсної й перехідної функцій, реакція на довільне вплив; побудова частотних характеристик: діаграм Боде, Найквиста, Ніколса та ін .; розробка замкнутих

систем регулювання; проектування регуляторів; визначення характеристик моделей: керованості, спостережливості, зниження порядку моделей; обчислювальні операції для систем з запізненням.

В Control System Toolbox є група функцій для аналітичного конструювання регуляторів, зокрема, функція lqr здійснює синтез оптимального регулятора для безперервної системи $[K, S, e] = \text{lqr}(A, B, Q, R, N)$. Функція повертає матрицю K зворотних зв'язків таку, що закон управління $u = -Kx$ мінімізує квадратичний критерій якості для безперервної ss-моделі. Аналогічні функції є для деяких інших критеріїв оптимізації як для безперервних, так і для дискретних систем. Функція або модуль синтезу лінійної САК за методом ЛАЧХ в системі MATLAB відсутня.

Дуже близькою до мети та завдань цієї роботи є програма AmLANX, котра призначена для побудови асимптотичних ЛАЧХ і синтезу регуляторів методом бажаних ЛАЧХ [10]. Програма AmLANX написана на m-мові і виконується в середовищі MatLab 6.0 або вище. Ця програма надає користувачеві наступні можливості:

- 1) має GUI-інтерфейс;
- 2) будує асимптотичні ЛАЧХ динамічних об'єктів, заданих у вигляді передавальних функцій;
- 3) будує в діалоговому режимі бажану ЛАЧХ розімкнутої системи по заданим критеріям якості, в тому числі, програма дозволяє вибирати користувачеві сполучають ділянки (їх нахили) в залежності від виду ЛАЧХ об'єкта управління;
- 4) забезпечує автоматичне віднімання з ЛАЧХ розімкнутої системи ЛАЧХ об'єкта управління і будує таким чином ЛАЧХ регулятора, повертає частоти сполучення і нахили асимптот, що дозволяє по ЛАЧХ регулятора записати його передавальну функцію;
- 5) всі ЛАЧХ будуються із зазначенням нахилів асимптот, користувач може сам визначати формат виводу кожної ЛАЧХ, а також формат написів на їх графіках.

AmLANH має 2 режими роботи

- 1) режим побудови асимптотичної ЛАЧХ;
- 2) режим синтезу регулятора (основний режим).

Для запуску програми в першому режимі в командному рядку MatLab слід набрати `ou = amlahx (num, den, 1)` або `ou = amlahx (num, den)`. У цьому режимі програма будує тільки ЛАЧХ об'єкта управління (рисунок 12). Повертає програма масив структур `ou` (дивіться середню картинку на малюнку 17). Структури описують динамічні ланки, з яких побудований ОУ. Кожна структура складається з 9 полів:

- речова `ans.a` кореня чисельника або знаменника;
- уявна частина `ans.b` кореня (під комплексно-сполучену пару коренів відводиться 1 структура);
- кратність `ans.krt`;
- вид кореня `ans.vid` (нуль (1) або полюс (-1));
- порядок `ans.por` кореня (1 якщо корінь речовинний, 2 - корінь уявний (тобто маємо комплексно-сполучену пару коренів));
- параметри динамічної ланки, що має такий корінь або таку комплексно-сполучену пару коренів: постійна часу `ans.T`, коливальність `ans.e`, частота зрізу `ans.w`, десятковий логарифм частоти зрізу `ans.lgw`.

Запуск програми в другому режимі виконується по команді

`uu = amlahx (num, den, 2)`.

Програма в цьому режимі включає всі можливості першого режиму. Роботу в основному режимі показано на прикладі синтезу регулятора для об'єкта:

$$W_{oy}(s) = \frac{0.2 \cdot (5 \cdot p + 1)}{p \cdot (p + 1) \cdot (100 \cdot p^2 + 10 \cdot p + 1)} \quad (1.1)$$

Для цього прикладу виклик програми має вигляд

`uu = amlahx ([1 0.2], [100 110 11 1 0], 2, {1 2 3 'red' 'blue' 'green'})`.

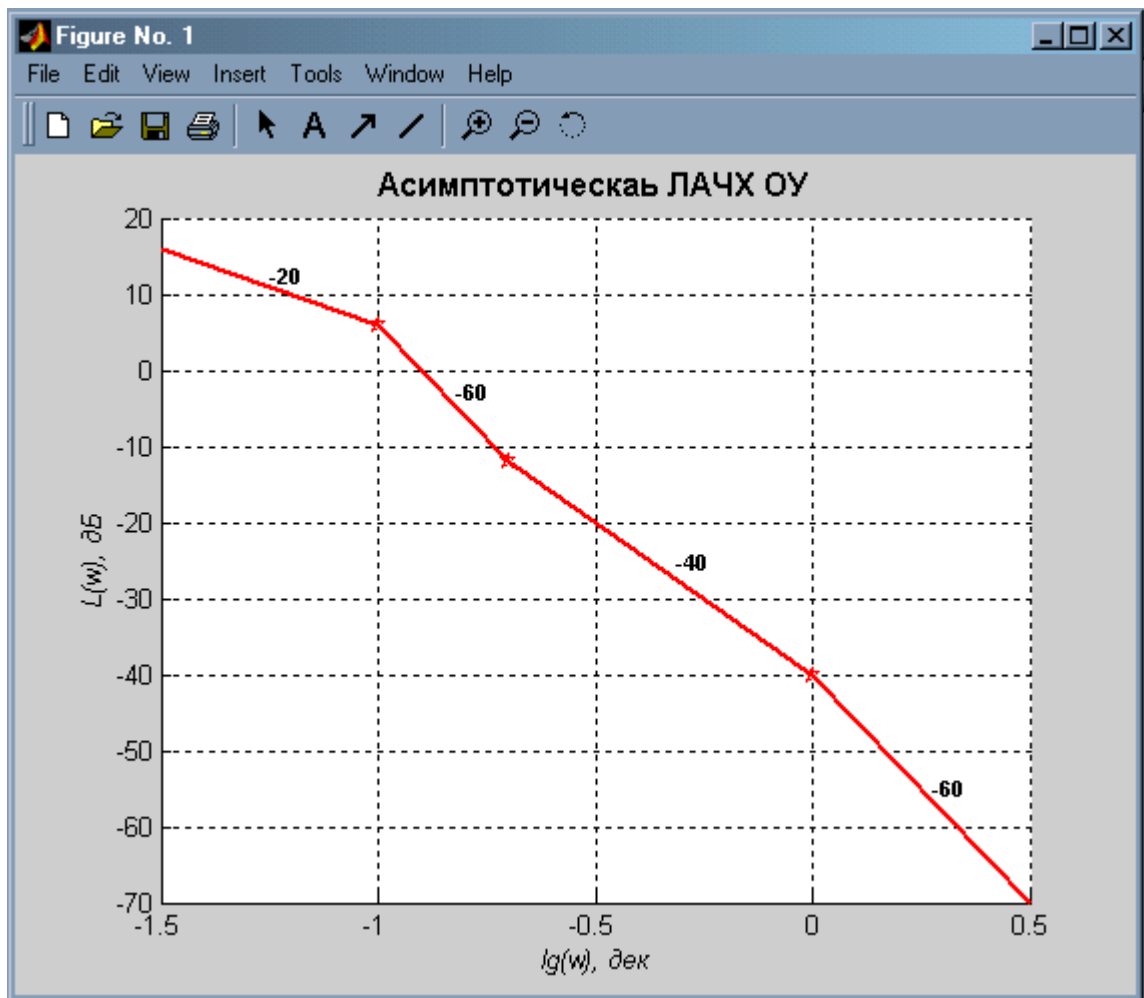


Рисунок 1.3 — Вікно з побудованою асимптотичною ЛАЧХ ОУ

Виводиться ЛАЧХ об'єкта управління (ОУ) із позначенням нахилів асимптот (рис. 1.3). Якщо в передавальній функції об'єкта управління порядок чисельника більше порядку знаменника, користувачеві пропонується зупинитися і задати реальний об'єкт. В ході розрахунків програма знаходить кратні корені в чисельнику і знаменнику, а також знаходить і видаляє однакові корені чисельника і знаменника. Результатом розрахунків є розглянутий вище масив структур ОУ. Далі вводяться бажаний коефіцієнт підсилення розімкнутого контуру, ступінь астатизму та прямі показники якості системи керування (рис. 1.4): бажаний час регулювання 40 с; ступінь астатизму 2; коефіцієнт підсилення розімкнутої системи $k = 2$; бажане перерегулювання 20%.

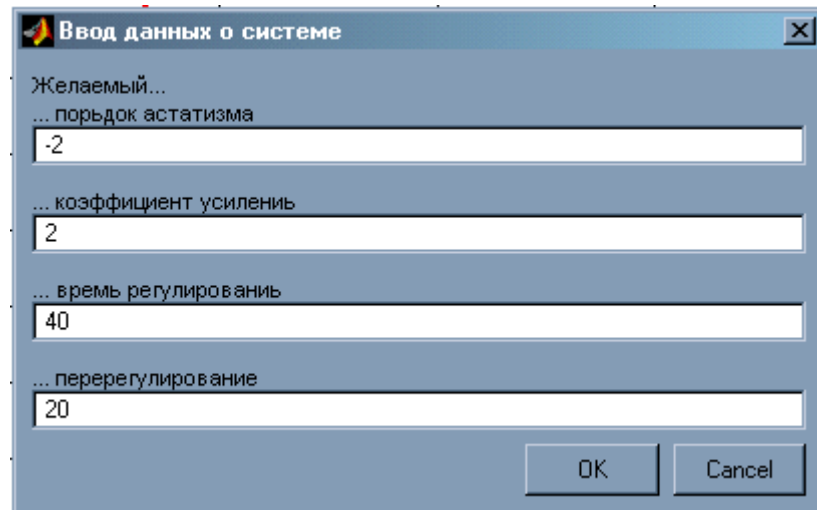


Рисунок 1.4 — Вікно вводу параметрів бажаної САК

- « — желаемое время регулирования $t_{жел} = 40$ сек;
- степень астатизма $\nu_{жел} = -2$;
- коэффициент усиления РС $k_{ЖЕЛ} = 2$;
- желаемое перерегулирование $\sigma_{ЖЕЛ} = 20\%$ »

За номограмами, що поставляються у файлі номо.т разом з програмою, програма розраховує, виходячи з $t_{жел}$, відповідно бажану частоту зрізу і величини запасу стійкості ЛАЧХ на СЧ частини Δl . В даному прикладі $\omega_C^{жел} = 0.35$, $\Delta l = \pm 20$ дБ. Програма виконує необхідні розрахунки і будує НЧ і СЧ частини бажаної ЛАЧХ із зазначенням нахилів (рис 1.5), після чого запитує у користувача бажаний нахил відрізків асимптот сполучення НЧ і СЧ частини ЛАЧХ (рисунок 1.5). Для прийняття рішення про нахил виводиться вікно попереднього перегляду (рис.1.4). В прикладі обрано нахил -60 дБ / дек.

Отримання ЛАЧХ пристрою керування (ПК) шляхом віднімання з ЛАЧХ розімкненої системи ЛАЧХ ОУ. Цей етап містить два кроки. Перший крок - розрахунок масиву структур ПК по отриманим ЛАЧХ регулятора. Ці структури описують частоти сполучення і нахили. Кожна структура складається з 5 полів:

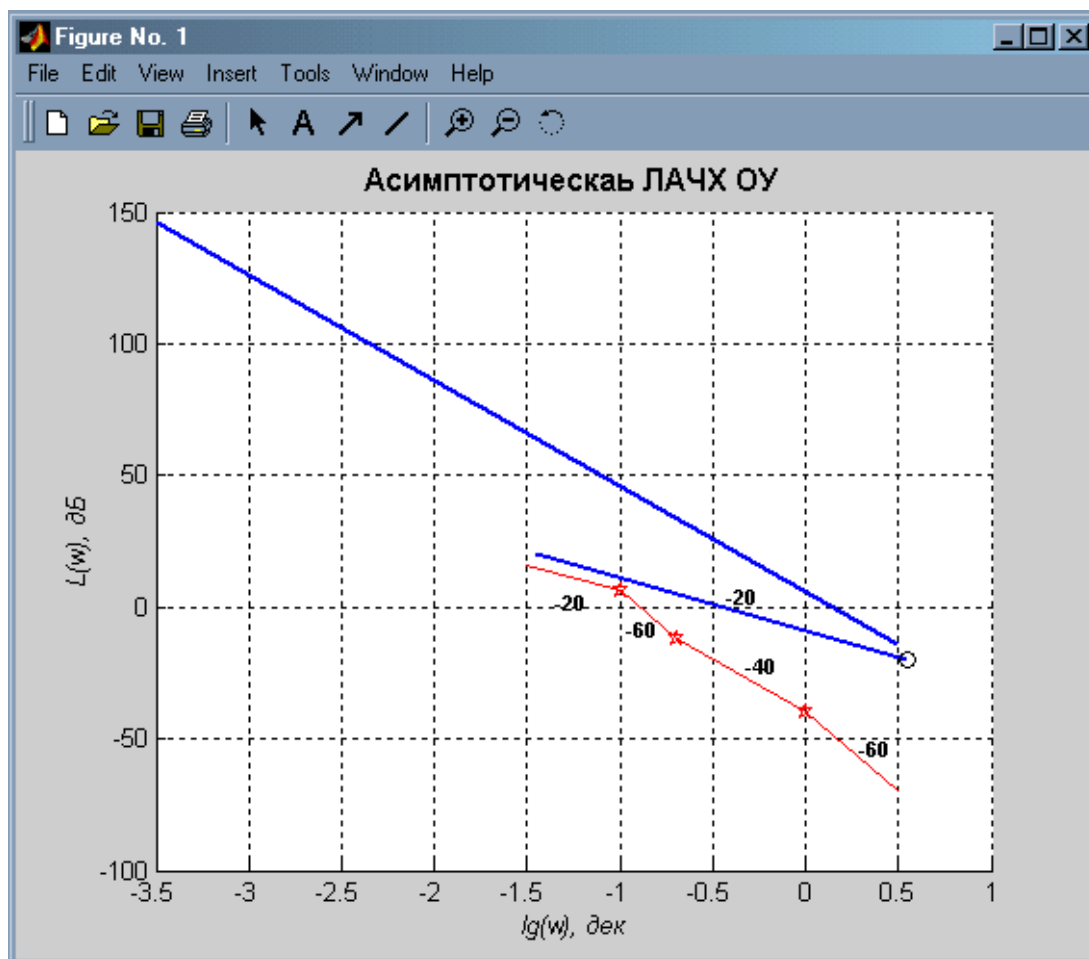


Рисунок 1.5 – Вікно попереднього перегляду для обрання сполучення ВЧ, СЧ і НЧ частин бажаної ЛАЧХ розімкнutoї САК

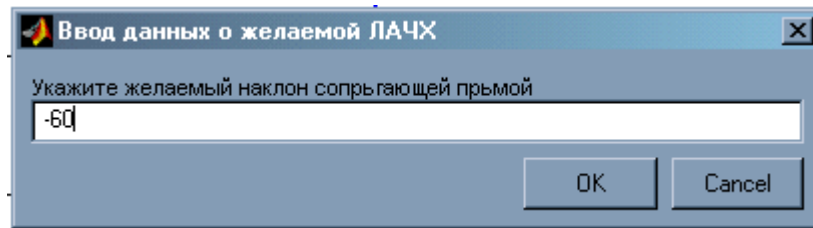


Рисунок 1.6 – Вікно введення нахилу асимптот сполучення

- 1) десятичный логарифм частоты сполучення `ans.lgw`;
- 2) нахил асимптоты на цієї частоті `ans.nakl`;
- 3) порядок і вид динамічного ланки `ans.por`, відповідної даної частоті сполучення;
- 4) частота сполучення `ans.w`;
- 5) постійна часу динамічного ланки `ans.T`.

Другий крок - по розрахованій структурі будується ЛАЧХ регулятора. На цьому роботі програми завершується. На заключному графіку програма будує 3 ЛАЧХ: ОУ (червона), РС (синя), УУ (зелена) із зазначенням нахилів. В основному режимі AmLANHX повертає масив структур ПК.

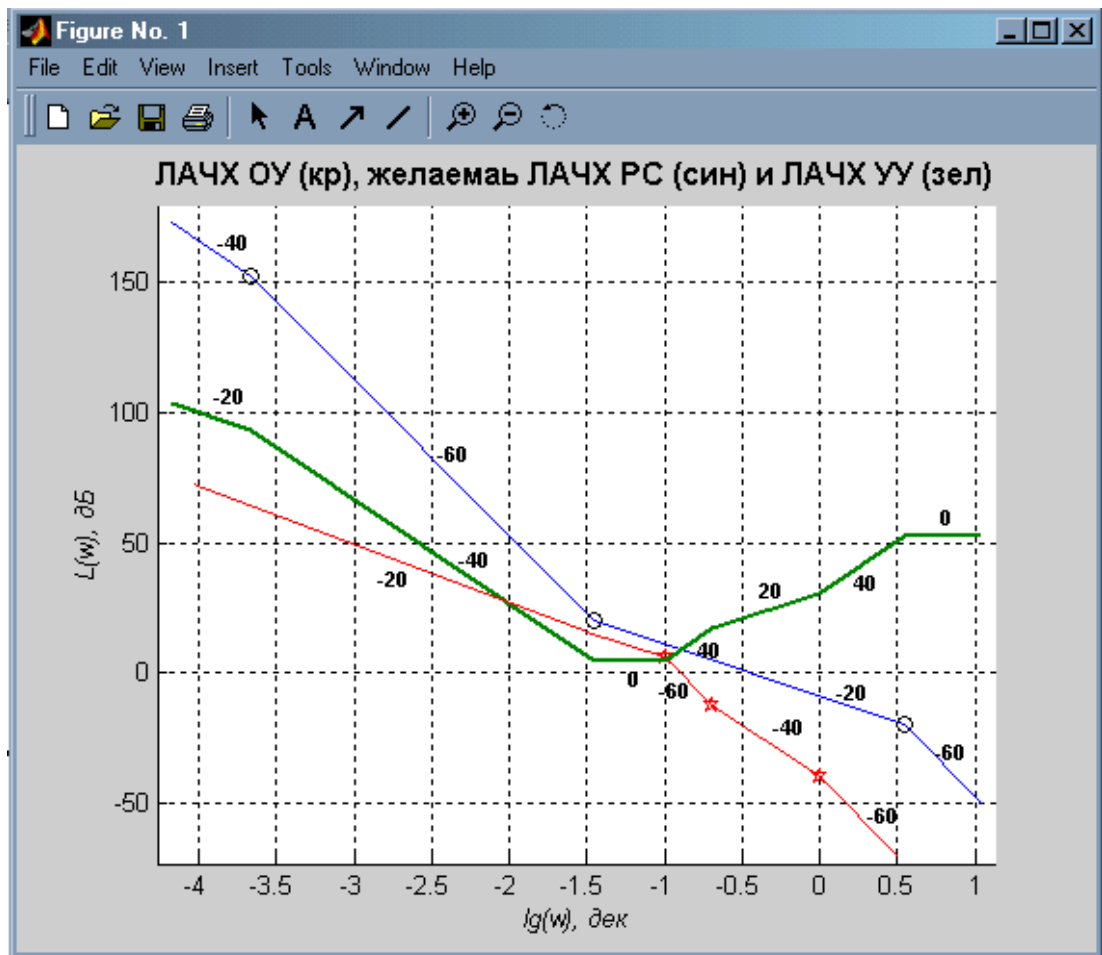


Рисунок 1.7 – Вікно з побудованими ЛАЧХ ОУ, ПК та бажаною ЛАЧХ

Висновки до розділу 1

- 1) Метод синтезу за бажаними ЛАЧХ широко й результативно використовуються в сучасних наукових та інженерних завданнях проектування САК технічними об'єктами.
- 2) В розглянутих наукових працях не представлено використання або посилання на автоматизований синтез за методом ЛАЧХ.
- 3) Відома тільки одна програма, яка реалізує повний алгоритм автоматизованого синтезу за методом ЛАЧХ.

2 АВТОМАТИЗОВАНИЙ СИНТЕЗ САК ЗА МЕТОДОМ ЛОГАРИФМІЧНИХ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

2.1 Теоретичні основи синтезу за методом ЛАЧХ

Структурний та параметричний синтез лінійних САК за методом ЛАЧХ базується на зв'язку перехідної функції замкнутої системи з частотною характеристикою розімкнутої системи

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{P(\omega)}{\omega} \sin \omega t d\omega \quad \text{або} \quad (2.1)$$

$$h(t) = P(0) + \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{Q(\omega)}{\omega} \cos \omega t d\omega, \quad (2.2)$$

де $h(t)$ - перехідна функція системи;

ω - частота;

$P(\omega)$, $Q(\omega)$ - відповідно дійсна та уявна частотна характеристика системи.

З виразів (2.1) та (2.2) випливає можливість побудувати бажану частотну характеристику системи таку, що перехідна функція буде мати бажану форму – аперіодична чи коливальна, та бажані прямі показники якості проекрованої системи – перерегулювання й час перехідного процесу.

Зважаючи на незмінність АЧХ об'єкта керування, потрібний вид АЧХ системи досягається пристроєм корекції (пристроєм керування, регулятором). Пристрій керування може бути включений послідовно або паралельно в контур САК. Обидва способи включення мають свої переваги й недоліки.

Синтез САК за методом ЛАЧХ зазвичай має наступну послідовність виконання.

1. Побудова ЛАЧХ не скорегованої системи, тобто ЛАЧХ об'єкта керування, але з необхідним коефіцієнтом підсилення κ_p майбутньої розімкненої скорегованої системи [Зайцев...]. Коефіцієнт κ_p знаходиться виходячи з вимог до точності системи в усталеному режимі. Точність системи може бути завдана по різному.

1) Завдані основні значення робочої частоти ω_p й амплітуди a_p впливу завдання $x(t)$, а також амплітуда допустимої помилки $A_\varepsilon = \varepsilon_{\text{дон}}$ [13].

Для області низьких частот, де $|W(j\omega_p)| \gg 1$ значення АЧХ по помилці на частоті ω_p буде

$$|W_\varepsilon(j\omega_p)| = \frac{1}{|1+W(j\omega_p)|} \approx \frac{1}{|W(j\omega_p)|}. \quad (2.3)$$

Звідси амплітуда помилки

$$A_\varepsilon \approx \frac{a_p}{|W(j\omega_p)|}. \quad (2.4)$$

Звідки бажане значення коефіцієнта підсилення

$$\kappa_p = |W(j\omega_p)| \geq \frac{a_p}{\varepsilon_{\text{дон}}} \quad (2.5)$$

2) Нехай завдані максимальна швидкість впливу завдання $\dot{x}_{\text{max}}$, максимальне прискорення $\ddot{x}_{\text{max}}$ та допустима помилка $\varepsilon_{\text{дон}}$. Тоді параметри відповідного синусоїдального впливу завдання визначаються

$$\omega_p = \frac{\ddot{x}_{\text{max}}}{\dot{x}_{\text{max}}}; \quad a_p = \frac{\dot{x}_{\text{max}}^2}{\ddot{x}_{\text{max}}} \quad (2.6)$$

й бажане значення κ_p знаходиться за формулою (2.5).

При впливі завдання $x = \dot{x}_0 t$ для астатичної системи першого порядку усталена помилка

$$\varepsilon_{уст} = \frac{\dot{x}_0}{K_p}, \quad (2.7)$$

Звідки бажане значення коефіцієнта підсилення розімкнутого контуру

$$K_p \geq \frac{\dot{x}_0}{\varepsilon_{доп}} \quad (2.8)$$

2. Побудова бажаної ЛАЧХ. Бажана ЛАЧХ є асимптотична ЛАЧХ розімкнутої системи, що має бажані статичні та динамічні властивості. Як відомо, бажана ЛАЧХ складається з трьох основних асимптот: низькочастотної, середньочастотної та високочастотної. Також можуть бути з'єднувальні асимптоти, що з'єднують основні. Для мінімально фазових систем вид бажаної ЛАЧХ повністю визначає показники якості перехідних процесів тому немає необхідності розглядати фазову частотну характеристику при виконанні синтезу.

З огляду на висновки розділу 1, була розроблена в системі MATLAB програма, що реалізує метод частотного синтезу за спрощеною методикою. Спрощення стосуються побудови середньочастотної асимптоти бажаної ЛАЧХ. При спрощеній методиці правим кінцем середньочастотної асимптоти є точка перетину асимптотичної ЛАЧХ об'єкта керування, але з коефіцієнтом підсилення, що визначений за умовою забезпечення усталеної динамічної помилки, що обговорено в попередньому розділі 2.1, з горизонтальною лінією, котра проходить на рівні запасу стійкості по амплітуді $-\Delta L$ дБ. Лівий кінець середньочастотної асимптоти бажаної ЛАЧХ визначається точкою її перетину з горизонтальною лінією, що проходить на рівні запасу стійкості по амплітуді ΔL дБ. Таким чином, середньочастотна асимптота має нахил -20 дБ/дек, симетрична відносно частоти зрізу, її довжина визначається завданням запасом стійкості по амплітуді. Очевидно, що в такий спосіб побудови бажана ЛАЧХ має тільки одну асимптоту сполучення – між середньочастотною асимптотою і низькочастотною. Високочастотна ділянка бажаної ЛАЧХ повністю

співпадає з ЛАЧХ об'єкта керування, починаючись з правого кінця середньочастотної асимптоти (рис1.)

3. Визначення передавальної функції корегуючого пристрою. Асимптотична ЛАЧХ послідовного корегуючого пристрою визначається відніманням вихідної асимптотичної ЛАЧХ від бажаної ЛАЧХ. Ланки передавальної функції послідовного корегуючого пристрою визначаються частотами сполучення та нахилом асимптот його ЛАЧХ. Отримання передавальної функції корегуючого пристрою докладно показано та прокоментовано в наведеному скрипті розробленої в 2.2 програми.

4. Дослідження отриманих результатів. Перевірка результатів синтезу виконується на моделі замкненої САК. Для цього слід побудувати модель в Simulink, використавши отриману структуру та параметри коригуючого пристрою. З огляду на те що дослідження будуть проводитись для різних параметрів корегуючого пристрою, в блоках моделі, що відтворюють корегуючий пристрій, слід встановити не числові значення параметрів, а їх імена. Таким чином вони будуть автоматично оновлюватись в моделі при кожному запуску скрипта, оскільки Simulink має загальну пам'ять з MATLAB. При кожному модельному експерименті оцінюються прямі показники якості – перерегулювання та час регулювання.

5. Пошук кращих налаштувань параметрів. Синтез за методом ЛАЧХ є наближеним, тому є можливості покращити показники якості зміною параметрів корегуючого пристрою. Для цього зручно побудувати дві моделі, одна з яких має параметри, що обчислюються при виконанні скрипта, друга – де параметри налаштовуються вручну, виходячи з певних міркувань, що буде показано при розгляданні прикладів. Так наочно й зручно порівнювати результати пошуку кращих налаштувань з результатами програмного синтезу за методом ЛАЧХ.

2.2 Розробка програми автоматизованого синтезу САК за методом ЛАЧХ за спрощеною методикою

Представлена програма повністю виконує описаний в попередньому підрозділі алгоритм синтезу корегуючого пристрою за спрощеною методикою. Програма написана на m-мові і призначена для виконання в системі MATLAB. При написанні програми не переслідувалася мета розробки програмного продукту масового використання, до того ж вона має дуже невеликий набір вихідних даних, а тому вона не має GUI інтерфейсу.

Вихідними даними для розробленої програми є коефіцієнт передачі розімкнутого контуру, визначений за умовою допустимої помилки по впливу завдання, запас стійкості по амплітуді та передавальна функція об'єкта керування. Прямі показники якості – перерегулювання та час перехідного процесу не використовуються.

В якості тестової для виконання програмного синтезу взята система з структурою розімкнутого контуру, що показаний на рис. 2.1.

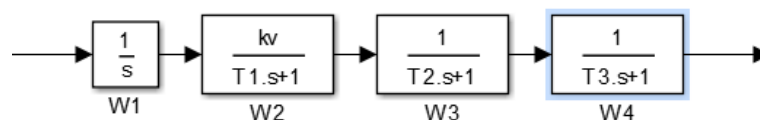


Рисунок 2.1 – Вихідна розімкнена система

Параметри системи мають наступні значення: коефіцієнт передачі розімкнутого контуру, визначений за умовою допустимої помилки по впливу завдання $kv=320$; $T1=0.01c$, $T2=0.014c$, $T3=0.1c$; заданий запас стійкості синтезованої системи по амплітуді $\Delta L=16$ дБ.

Вихідна система має бути мінімально фазовою. Ця вимога означає, що передавальна функція розімкнутої системи не має нулів та полюсів, розташованих в правій напівплощині. В розглянутій розімкнутій системі ця вимога виконується. Для системи на рис. 2.1 коефіцієнти характеристичного

поліному $dw14$ передавальної функції $W14=W1*W2*W3*W4$ визначаються $[nw14, dw14]=tfdata(W14, 'v')$, а його корені, знайдені функцією $roots(dw14)$ для набору вихідних даних, що наведені вище і використовуються в програмному скрипті, мають значення:

```

0
-100.0000
-71.4286
-10.0000

```

В системі полюси не мають додатних значень, тобто розташовані в лівій напівплощині.

Скрипт Sint_LAX_prim_kr.

```

% Синтез послідовного корегуючого пристрою методом ЛАХ за
спрощеною
% методикою для лінійного об'єкта керування
clc
clear all

% Вихідні дані для об'єкта з трьома аперіодичними ланками-----
--

T1=0.01;
T2=0.014;
T3=0.1;
kv=320; % kv=k1*k2*k3 коеф. передачі розімкнутого контуру
zaps=16; % запас стійкості, дБ
% УВАГА! Запас стійкості не може бути більше 16дБ! Чим більший
запас
% стійкості, тим ширше середньочастотна асимптота бажаної ЛАЧХ і
тим
% кращій % перехідний процес.

wz=0.12*sig*pi/tr; % 13.1947 частота зрізу, визначена виходячи
% з завданого часу регулювання та перерегулювання для того, щоб
% показати, що за спрощеною методикою частота зрізу декілька
вище,
%що більш ніж достатньо для забезпечення завданих показників
якості %перехідного процесу.

% передавальні функції відповідно до варіанту завдання

W1=tf([0 kv],[1 0]) % інтегратор kv/s
W2=tf([0 1],[T1 1]) % аперіодична ланка 1/(T1s+1)
W3=tf([0 1],[T2 1]) % аперіодична ланка 1/(T2s+1)
W4=tf([0 1],[T3 1]) % аперіодична ланка 1/(T3s+1)
% -----
-----

```

```

W14=W1*W2*W3*W4      % передавальна функція розімкнутого контуру
% передавальні функції див. у командному вікні при виконанні
скрипта
% w частота
w=0.01:0.01:1000; % w – частота. ЛАХ будуються в діапазоні
% 0.01...1000 рад/с, крок 0.01

[nw14, dw14]=tfdata(W14,'v') % отримання коеф. поліному
передавальної
% функції розімкнутого контуру: nw14 - чисельника, dw14 -
знаменника,
% див. help tfdata

W14=kv./(dw14(1).*(1i*w).^4+dw14(2).*(1i*w).^3+dw14(3).*(1i*w).^2
+...
dw14(4).*(1i*w)+dw14(5)*1); % АФЧХ розімкнутого контуру
W14(jw)

% За методикою отримаємо частоту wa в точці a, на якій
пересікається
% ЛАХ 20*log10(abs(W14)) з рівнем -zaps. Для цього вирішимо
рівняння
% 20*log10(abs(W14))=-zaps або 20*log10(abs(W14))+zaps=0. MATLAB
має
% універсальну функцію solve для рішення нелінійних рівнянь, але
вона
% погано працює з комплексними змінними. Тому для рішення
використано
% функцію fzero, котра теж може не спрацювати, якщо початкові
значення
% коренів відокремлені недостатньо точно (наш випадок). Для
зняття вказаної
% проблеми написана функція abroots, що наведена нижче. Для
виконання цього
% скрипта вона має бути поміщена в окремий одноіменний m-файл
abroots.m.

% function x=abroots(f,a,b,h)
% % возвращает корни нелинейного уравнения f(x)=0
% % интервалы изоляции корней находятся
% % табулированием функции f на интервале [a,b] с шагом h
% % f – функция пользователя, которая может быть передана как
% % указатель на функцию в m-файле @fname, как строковое имя
% % функции в m-файле 'fname', как строковое выражение функции,
% % например, 'x.^3-cos(5*x)', как строковая переменная fstr
% % с выражением функции, как анонимная функция
% % примеры обращения к функции:
% % x=abroots(@feq,-10,10,0.01);
% % x=abroots('feq',-10,10,0.01);
% % x=abroots('x.^3-cos(5*x)',-10,10,0.01);
% %
% % fun='x.^3-cos(5*x)';
% % x=abroots(fun,-10,10,0.01);
% %
% % fun=@(x) x.^3-cos(5*x)
% % x=abroots(fun,-10,10,0.01);

```

```

% a=a+0.123;
% f=fcnchk(f);
% %plot(a:h:b,f(a:h:b)), grid
% r=find(f(a:h:b).*f(a+h:h:b+h)<=0);
% ki=length(r);
% r=a+(r-1)*h;
% r(2,:)=r+h;
% x=1:ki;
% for k=1:ki
% x(k)= fzero(f,r(:,k));
% end
% end

% Можливі варіанти запису рівняння для обчислення частоти в точці
a =====

% fa=['20*log10(abs(' num2str(kv) './(' num2str(dw14(1))
'*(1i*x).^4+'...
% num2str(dw14(2)) '*(1i*x).^3+' num2str(dw14(3))
'*(1i*x).^2+'...
% num2str(dw14(4)) '*(1i*x)+' num2str(dw14(5)) '*1)))+
num2str(zaps)];
% працює

%fa=@(x)
20*log10(abs(kv./(dw14(1)*(1i*x).^4+dw14(2)*(1i*x).^3+...
% dw14(3)*(1i*x).^2+dw14(4)*(1i*x)+dw14(5)*1)))+zaps; % працює

fa=@(w)
20*log10(abs(kv./(dw14(1)*(1i*w).^4+dw14(2)*(1i*w).^3+...
dw14(3)*(1i*w).^2+dw14(4)*(1i*w)+dw14(5)*1)))+zaps; % працює.
Анонімна
% функція, див. help anonymous

%fa=@(x) 20*log10(abs(W14s))+zaps; % не працює

%fa=inline(['20*log10(abs(' num2str(kv) './(' num2str(dw14(1))
'*(1i*x).^4+'...
% num2str(dw14(2)) '*(1i*x).^3+' num2str(dw14(3))
'*(1i*x).^2+'...
% num2str(dw14(4)) '*(1i*x)+' num2str(dw14(5)) '*1)))+
num2str(zaps)]);
% працює
=====
=====

wa=abroots(fa,0.1,1000,1);

% Асимптотичні ЛАХ ланок вихідної системи інтегр-ап1-ап2-ап3-----
-----

% асимптотична ЛАХ аперіодичної ланки ап1 з коеф. передачі kv
ап1=20*log10(kv).*(w<1./T1)+(20*log10(kv)-
20*log10(T1.*w)).*(w>=1./T1);
% асимптотична ЛАХ аперіодичної ланки ап2 з коеф. передачі=1
ап2=(-20*log10(T2.*w)).*(w>=1./T2);
% асимптотична ЛАХ аперіодичної ланки ап3 з коеф. передачі=1
ап3=(-20*log10(T3.*w)).*(w>=1./T3);

```

```

% асимптотична ЛАХ інтегруючої ланки intg з коеф. передачі=1
intg=-20*log10(w);

%-----
-----

figure(15)
bv=ap1+ap2+ap3+intg; % асимптотична ЛАХ розімкнутої вихідної
системи
% інтегр-ап1-ап2-ап3

plot(log10(w),bv,'r') % графік асимптотичної ЛАХ вихідної
системи
hold on
plot(log10(w),20*log10(abs(W14))) % графік ЛАХ вихідної системи
zs(1:length(w))=zaps;
plot(log10(w),zs,'g',log10(w),-zs,'g') % графіки рівнів запасу
стійкості
grid on

%* Знаходження точки пересічення рівня -zaps з асимптотичною
вихідною ЛАХ**
% знаходиться елемент масиву bv, що мінімально відрізняється по
модулю від
% рівня -zaps. Пошук виконується серед 2000 елементів, починаючи
з точки
% пересічення wa вихідної (неасимптотичної) ЛАХ з рівнем -zaps.
kmin=fix(100*wa);
mind=abs(bv(kmin)+zaps);
for k=fix(100*wa)+1:1:fix(100*wa)+2000
    if abs(bv(k)+zaps)<mind
        mind=abs(bv(k)+zaps);
        kmin=k;
    end
end
wa=kmin/100
%*****
*****

% _____ Побудова бажаної асимптотичної
ЛАХ _____

% Бажана асимптотична ЛАХ формується в масиві bb. За методикою
% високочастотна частина бажаної ЛАХ співпадає з вихідною ЛАХ,
% починаючи з точки a, тобто з частоти wa. Тому елементи масива
bb,
% починаючи з елемента з індексом round(100*wa)
% (індекс=округлено(100*частота) при кроці по частоті 0.01
рад/с), отримують
% значення відповідних елементів масива bv.
bb(round(100*wa):length(w))=bv(round(100*wa):length(w));

% Далі отримаємо рівняння середньочастотної ділянки бажаної ЛАХ.
Це потрібно
% для формування масива bb та для визначення координат лівого
кінця
% середньочастотної ділянки бажаної ЛАХ - точки b.
L0s=-zaps+20*log10(wa); % ордината точки пересічення продовження

```

```

% середньочастотної асимптоти ab з віссю ординат L.
% Частота wb в точці b визначається з рівняння L0s-
20*log10(wb)=zaps,
% звідки
wb=10.^((L0s-zaps)/20)
bb(round(100*wb):round(100*wa))=L0s-
20*log10(w(round(100*wb):round(100*wa)));

% Виходячи з тих же міркувань що й для отримання рівняння
середньочастотної
% асимптоти бажаної ЛАХ, отримаємо рівняння асимптоти bc, що
з'єднує
% середньочастотну ділянку бажаної ЛАХ з вихідною ЛАХ. Асимптота
bc має
% нахил -40дБ/дек (може мати -60дБ/дек).
L0c=zaps+40*(log10(wb)); % ордината точки пересічення
продовження
% з'єднувальної асимптоти bc з віссю ординат L. % Частота wc в
точці c
% визначається з рівняння 20*log10(abs(W14))=L0c-40*log10(w).
Відповідно
% до рівняння анонімна функція:
fc=@(w) 20*log10(abs(kv./(dw14(1)*(1i*w).^4+dw14(2)*(1i*w).^3+...
dw14(3)*(1i*w).^2+dw14(4)*(1i*w)+dw14(5)*1)))-(L0c-
40*log10(w));
wc=abroots(fc,0.01,wb,0.01) % частота wc в точці c
bb(round(100*wc):round(100*wb))=L0c-
40*log10(w(round(100*wc):round(100*wb)));

% Асимптота бажаної ЛАХ до частоти wc співпадає з вихідною, тому
bb(1:round(100*wc))=bv(1:round(100*wc));
%plot(log10(w),L0c-40*log10(w),'--')
plot(log10(w),bb,'black')

%_____Побудову бажаної ЛАХ
завершено_____

bc=bb-bv; % масив з асимптотичною ЛАХ послідовного коригуючого
%пристрою
plot(log10(w),bc,'magenta')

% ++++++Анотування рисунка+++++

wz=10.^(L0s/20); % обчислення частоти зрізу з рівняння L0s-
20*log10(w)=0
text(log10(wz), 0,'\color{rgb}{0.9 .2 .2}\bullet') % прорисовка
значка
% bullet • в точку з координатами (log10(wz), 0), див. help text
text(log10(wz), -5,['wz=' num2str(wz)],'HorizontalAlignment',...
'right','BackgroundColor','white')
axis([-1 3 -80 80]) % обмеження осі log10(w) півнем log10(0.1)=-1
% на рисунку
plot([0 0],[-80 180],'cyan','LineWidth',1) % побудова осі L
text(0, 70,'L(w),дБ','HorizontalAlignment',...
'right','BackgroundColor','white')

text(log10(wc), -50,['1/Tc1='
num2str(wc)],'HorizontalAlignment',...

```

```

        'center','BackgroundColor','white')
    % text(log10(wc), -50,['1/T1='
num2str(wc)], 'HorizontalAlignment',...
    % 'center','BackgroundColor',[.7 .9 .7]) % варіант завдання
    кольору в попередньому операторі
    text(log10(wc), bb(round(100*wc)), '\color{rgb}{0.9 .2
.2}\bullet')
    % bullet • circ \uparrow \downarrow
    plot([log10(wc+0.003) log10(wc+0.003)], [-45 bv(round(100*wc))], '--
-')

    text(log10(wb), -50,['1/Tc2='
num2str(wb)], 'HorizontalAlignment',...
        'center','BackgroundColor','white')
    text(log10(wb), bb(round(100*wb)), '\color{rgb}{0.9 .2
.2}\bullet')
    plot([log10(wb+0.03) log10(wb+0.03)], [-45 bb(round(100*wb))], '--
')

    text(log10(1./T3), bc(round(100*wb))-7, ['1/Tc3=1/T3='
num2str(1./T3)],...
        'HorizontalAlignment','center','BackgroundColor','white')
    text(log10(1./T3), bv(round(100./T3)), '\color{rgb}{0.9 .2
.2}\bullet')
    plot([log10(1./T3) log10(1./T3)],...
        [bc(round(100./T3))-3 bv(round(100./T3))], '--')

    text(log10(1./T2), bc(round(100./T2))-20, ['1/Tc4=1/T2='
num2str(1./T2)],...
        'HorizontalAlignment','right','BackgroundColor','white')
    text(log10(1./T2), bv(round(100./T2)), '\color{rgb}{0.9 .2
.2}\bullet')
    plot([log10(1./T2) log10(1./T2)],...
        [bc(round(100./T2))-15 bv(round(100./T2))], '--')

    text(log10(1./T1), bc(round(100./T1))-50, ['1/Tc5=1/T1='
num2str(1./T1)],...
        'HorizontalAlignment','left','BackgroundColor','white')
    text(log10(1./T1), bv(round(100./T1)), '\color{rgb}{0.9 .2
.2}\bullet')
    plot([log10(1./T1) log10(1./T1)],...
        [bc(round(100./T1))-45 bv(round(100./T1))], '--')

    text(log10(wa), -35, ['1/Tc6='
num2str(wa)], 'HorizontalAlignment',...
        'right','BackgroundColor','white')
    text(log10(wa), bv(round(100*wa)), '\color{rgb}{0.9 .2
.2}\bullet')
    plot([log10(wa) log10(wa)], [bc(round(100*wa)) bc(round(100*wa))]-
35], '--')

    text(log10(wa)+0.02, bv(round(100*wa))+3, 'a', 'FontSize', 11)
    text(log10(wb)+0.02, bb(round(100*wb))+3, 'b', 'FontSize', 11)
    text(log10(wc)+0.01, bb(round(100*wc))+2, 'c', 'FontSize', 11)

    text(log10(wb)-0.001,
bv(round(100*wb))+3, 'Lba', 'FontSize', 11, 'color', 'red')

```

```

text(log10(wb)-0.02, bv(round(100*wb))-
5, 'Lv', 'FontSize', 11, 'color', 'blue')
text(log10(wb)-0.2,
bb(round(100*wb))+3, 'Lb', 'FontSize', 11, 'color', 'black')
text(0.5*(log10(wc)+log10(wb)), -
7, 'Lc', 'FontSize', 11, 'color', 'magenta')

xlabel('lg(w), рад/с', 'FontSize', 12, 'Color', 'black') % підписи на
осях, див. % help xlabel, help ylabel
ylabel('L, дБ', 'FontSize', 12, 'Color', 'black')

text(log10(wa+40), zaps-3, '\uparrow', 'color', 'black') % вивід
запасу
text(log10(wa+40), 2, '\downarrow', 'color', 'black') %
стійкості
text(log10(wa+40), zaps*0.5, ['запас стійкості' num2str(zaps)
'дБ'], ...
'HorizontalAlignment', 'left', 'BackgroundColor', 'white')

%+++++
+++++

% Результати на рисунку - частоти сполучення та нахил асимптот
ЛЯХ
% послідовного керуючого пристрою дозволяють отримати
передавальні %функції корегуючих ланок
Tc1=1/wc % ланка в знаменнику передавальної функції, оскільки
нахил
% асимптоти зменшився на -20дБ/дек;
Tc2=1/wb % ланка в чисельнику, збільшення на +20дБ/дек;
Tc3=T3 % ланка в чисельнику, збільшення на +20дБ/дек;
Tc4=T2 % ланка в чисельнику, збільшення на +20дБ/дек;
Tc5=T1 % ланка в чисельнику, збільшення на +20дБ/дек;
Tc6=1/wa % ланка в знаменнику, зменшення на -60дБ/дек,
% тобто (Tc6+1)*(Tc6+1)*(Tc6+1)

% Комбінуючи та об'єднуючи ланки корекції, послідовний корегуючий
%пристрій можна представити у вигляді чотирьох передавальних функцій
wk1, wk2, wk3, wk4

wk1=tf([Tc2 1],[Tc1 1])
wk2=tf([Tc3 1],[Tc6 1])
wk3=tf([Tc4 1],[Tc6 1])
wk4=tf([Tc5 1],[Tc6 1])
Wk=wk1*wk2*wk3*wk4*W1*W2*W3*W4 % передавальна функція
скорегованої
% розімкненої системи
figure(16)
bode(Wk) % Побудова ЛАХ L(log10(w)) та ФЧХ fi(log10(w)) для
визначення
%запасу по фазі в скорегованій розімкнутій системі
grid on
hold on

```

Результати програмного синтезу представлені у вигляді асимптотичної ЛАЧХ корегуючого пристрою на рис. 2.2. На рисунку програмно побудовано: L_b – ЛАЧХ вихідної системи, L_{ba} – асимптотична ЛАЧХ вихідної системи; L_b – бажана асимптотична ЛАЧХ системи; L_c – асимптотична ЛАЧХ корегуючого пристрою. Зеленими лініями позначені рівні заданого запасу стійкості $+zaps$ та $-zaps$. Виведено частоту зрізу w_z . Також виведені та позначені всі частоти сполучення в лінійному масштабі, що є зворотними величинами постійних часу відповідних ланок. Постійні часу ланок корегуючого пристрою позначені $T_{c1} \dots T_{c6}$.

В командне вікно виводяться: передавальні функції ланок вихідної системи $W1 \dots W4$; передавальна функція розімкнутої вихідної системи $W14$; коефіцієнти поліномів чисельника та знаменника $W14$; частоти в точках a, b, c відповідно w_a, w_b, w_c ; постійні часу ланок корегуючого пристрою $T_{c1} \dots T_{c6}$; передавальні функції ланок корегуючого пристрою $w_{k1} \dots w_{k4}$; передавальна функція розімкнутої скорегованої системи W_k .

Для оцінки запасу по фазі функцією `bode` будується ФЧХ розімкнутої скорегованої системи. В наведеному прикладі запас по фазі складає 54° , що більш ніж достатньо.

Висновки до розділу 2

1. Розроблено програму автоматизованого синтезу за методом ЛАЧХ за спрощеною методикою.
2. Програму використано для автоматизованого синтезу послідовного корегуючого пристрою астатичної САК з об'єктом четвертого порядку.

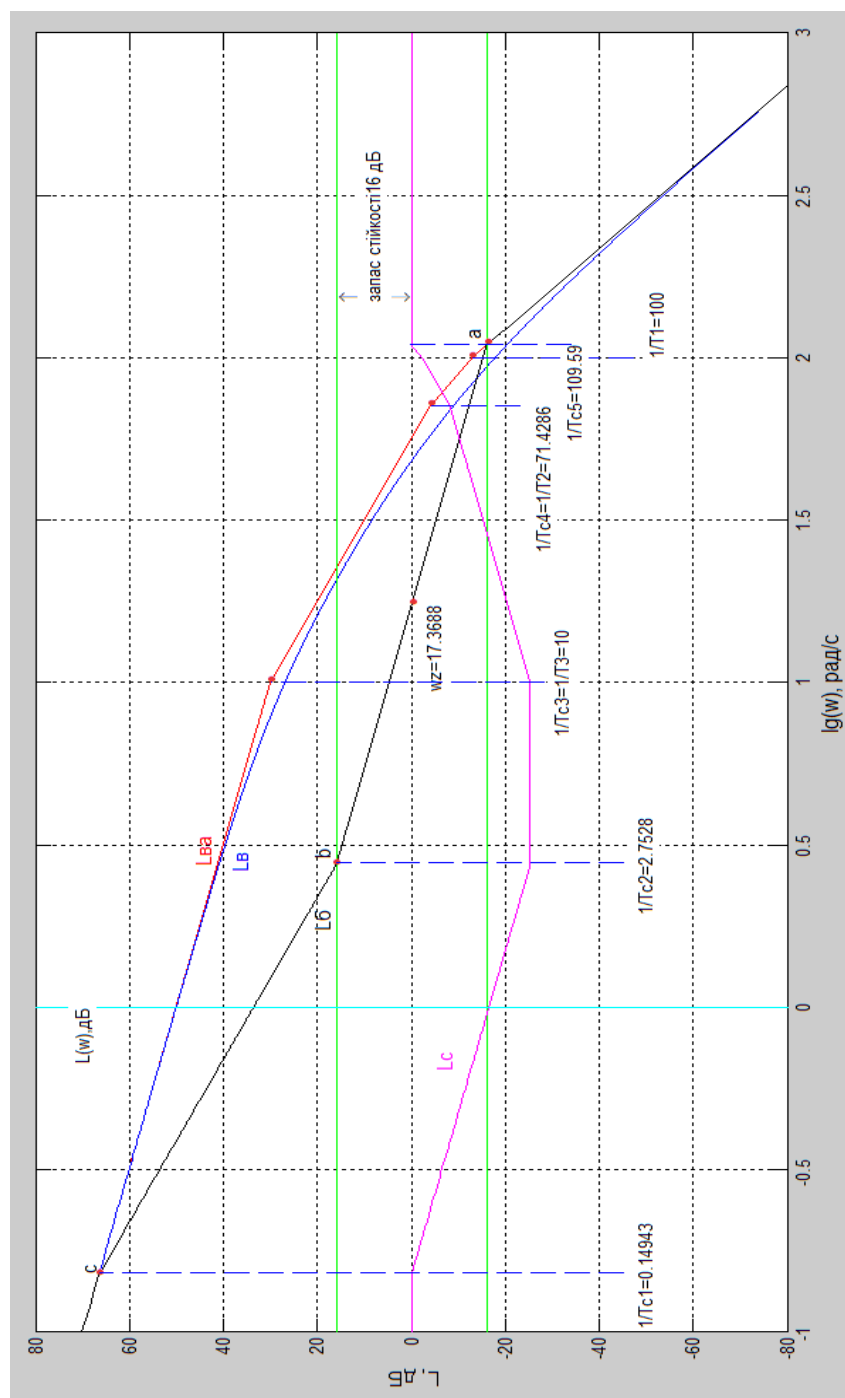


Рисунок 2.2 – Програмний синтез методом ЛАЧХ за спрощеною методикою

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ПРОГРАМНО СИНТЕЗОВАНОЇ САК

3.1 Дослідження прямих показників якості програмно синтезованої САК

Синтез за методом бажаних ЛАЧХ є наближеним, а тому потребує дослідження якості синтезованої системи керування. Найбільш доцільно використовувати прямі показники якості – перерегулювання та час перехідного процесу.

Вихідна система є нестійкою – два останніх кореня характеристичного поліному замкненої системи мають позитивні дійсні частини, що показано за результатами виконання наведеного нижче скрипта:

```
clc
T1=0.01;
T2=0.014;
T3=0.1;
kv=320;
W1=tf([0 kv],[1 0]) % інтегратор kv/s
W2=tf([0 1],[T1 1]) % аперіодична ланка 1/(T1s+1)
W3=tf([0 1],[T2 1]) % аперіодична ланка 1/(T2s+1)
W4=tf([0 1],[T3 1]) % аперіодична ланка 1/(T3s+1)

W14=W1*W2*W3*W4
W14z=feedback(W14,1)
[nw14, dw14]=tfdata(W14z,'v')
roots(dw14)

ans =

    1.0e+02 *

    -1.0349 + 0.3967i
    -1.0349 - 0.3967i
     0.1277 + 0.4120i
     0.1277 - 0.4120i
```

Для дослідження синтезованої системи в Simulink побудовано її модель, показану на рис. 3.1.

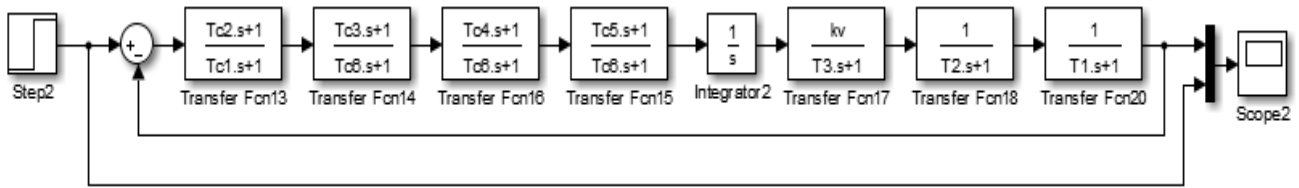


Рисунок 3.1 – Модель синтезованої системи в Simulink

Результати моделювання наведені на рис. 3.2. Вони свідчать, що синтезована система є стійкою, а перехідна функція є аперіодичною. Показники якості перехідного процесу цієї моделі САК є $\sigma=17,65\%$, $t_p=0.482\text{с}$ при відхиленні 5% від усталеного значення.

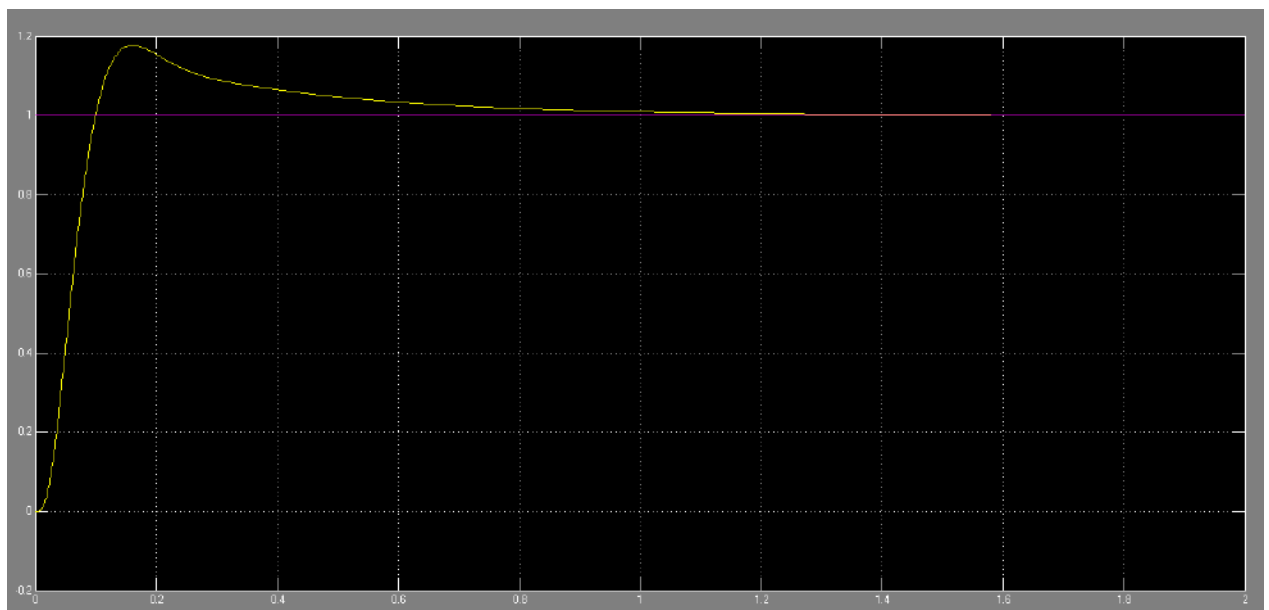


Рисунок 3.2 – Перехідний процес в моделі системи з програмно синтезованими структурою та параметрами

Для оцінки запасу по фазі з використанням функції `bode` будується ФЧХ розімкнутої скорегованої системи. В наведеному прикладі запас по фазі складає 54° , що більш ніж достатньо.

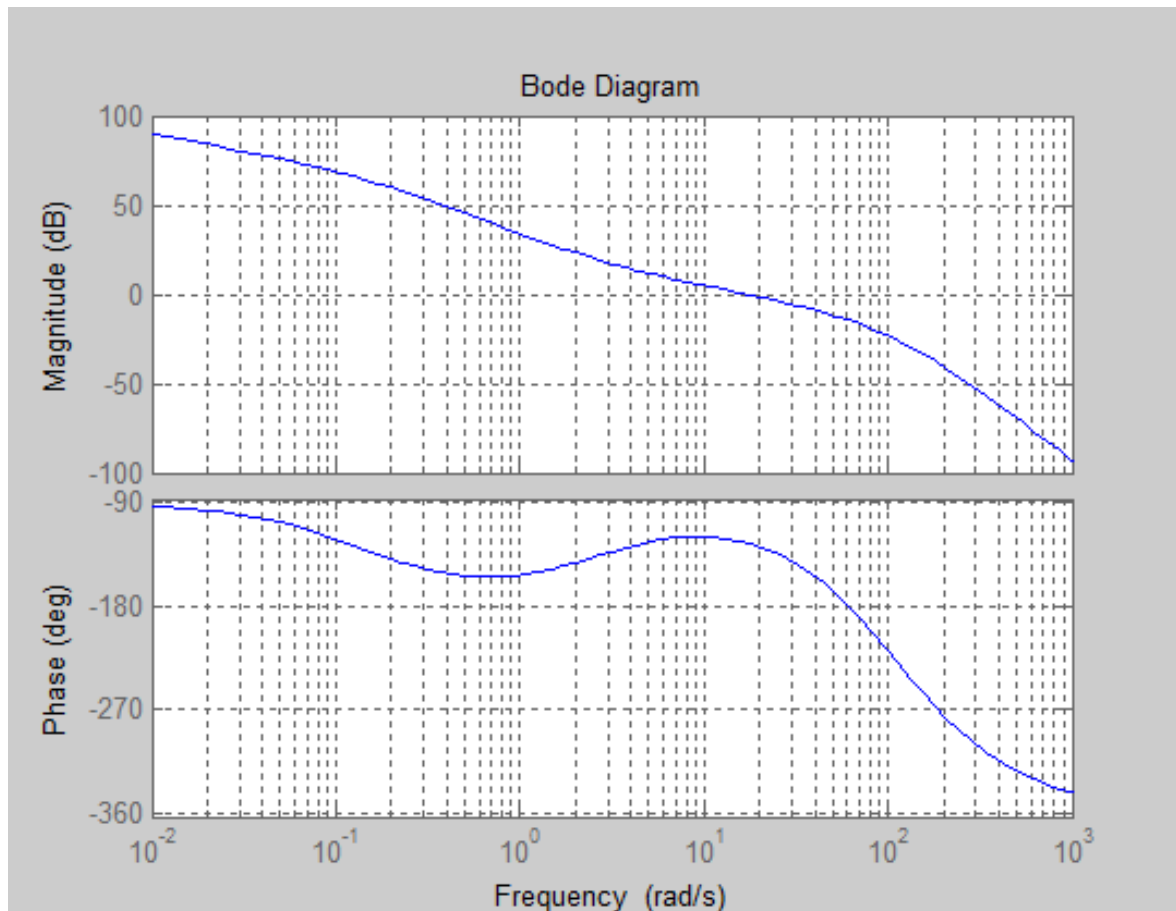


Рисунок 3.3 – ЛАЧХ та ЛФЧХ програмно синтезованої системи

Усталене абсолютне значення динамічної швидкісної помилки при впливі завдання виду $x(t)=v \cdot t$ складає $v \cdot 0,0032$. Відповідний перехідний процес наведено на рис. 3.4.

Перехідний процес при параболічному впливі завдання виду $x(t)=a \cdot t^2$ наведено на рис. 3.5. Абсолютне значення динамічної помилки за прискоренням на 5-тій секунді складає 0,0355 при $a=1$.

Метод бажаних ЛАЧХ є наближеним методом синтезу САК, тому він є тільки основою для подальшої структурної та параметричної оптимізації з ціллю покращання показників якості. В отриманій в результаті

автоматизованого синтезу моделі при збільшенні постійної часу корегуючої ланки $T_{с5}$ з 0,01 до 0,03с суттєво покращено перехідний процес, рис. 3.6.

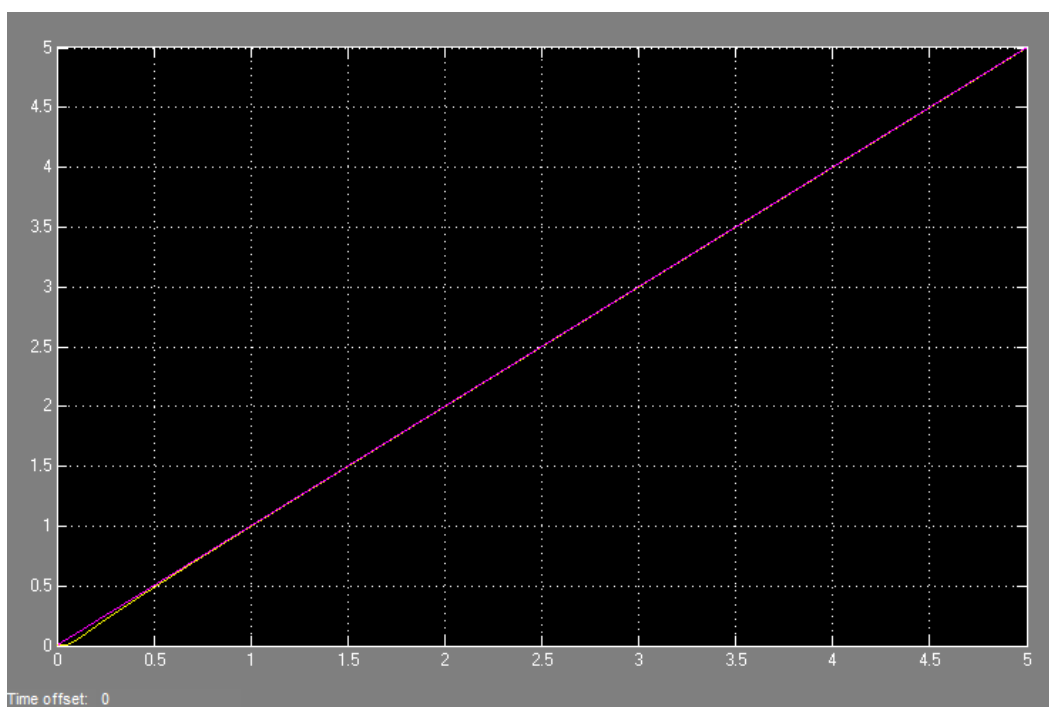


Рисунок 3.4 – Перехідний процес в синтезованій системі при лінійному впливі завдання.

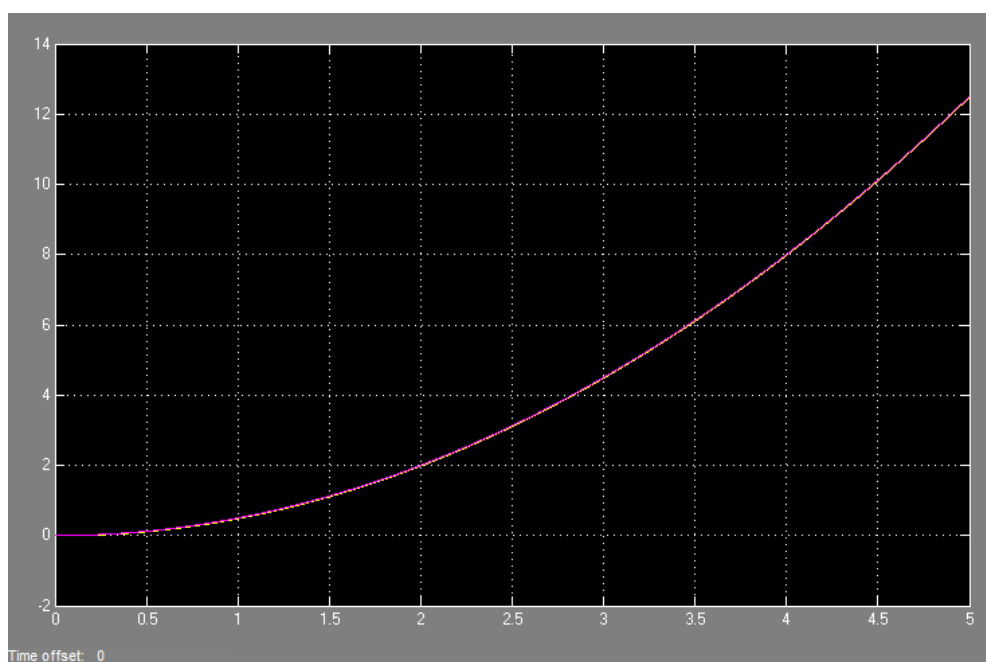


Рисунок 3.5 – Перехідний процес в синтезованій системі при параболічному впливі завдання.

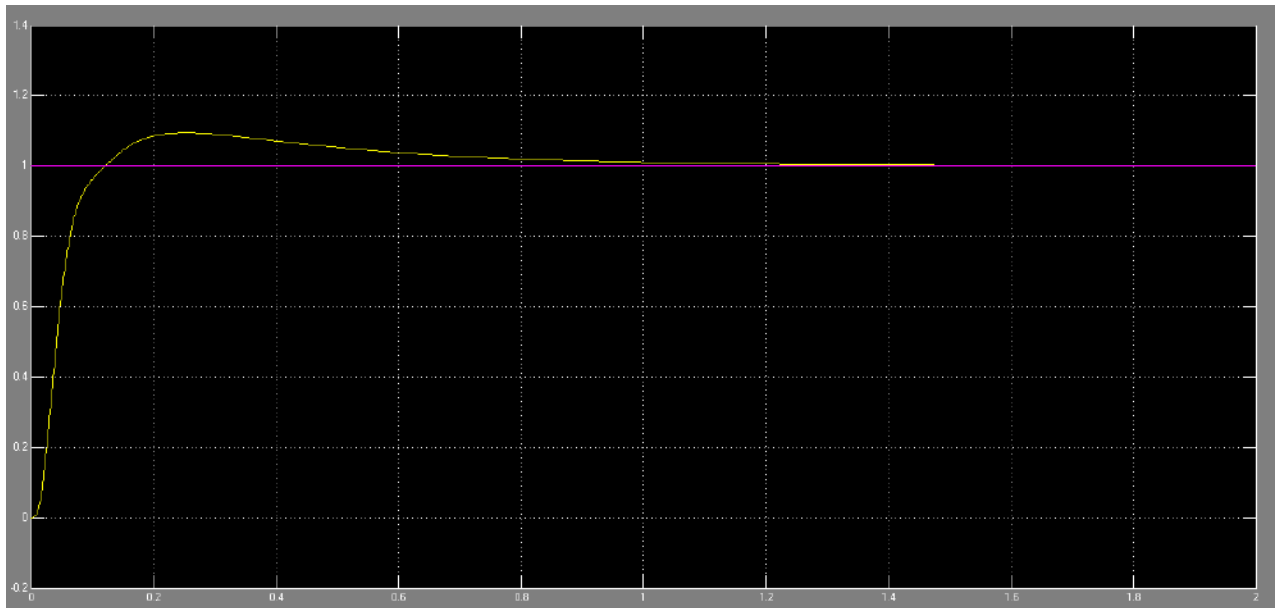


Рисунок 3.6 – Перехідний процес в моделі системи з переналаштованою постійною часу $T_{c5}=0.03\text{с}$.

Перехідний процес при вказаному переналаштуванні – перерегулювання складає 7.8%, при практично незмінному часі перехідного процесу 0,48 с.

Практичний інтерес представляє синтез системи автоматичного керування об'єктом з коливальними властивостями. Структурна схема такого об'єкта наведена на рис. 3.7.

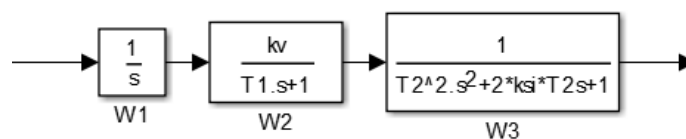


Рисунок 3.7 – Структура об'єкта з коливальною ланкою

Параметри системи мають наступні значення: коефіцієнт передачі розімкнутого контуру, визначений за умовою допустимої помилки по впливу завдання $kv=186$; $T_1=0.016\text{с}$, $T_2=0.042\text{с}$, $\xi=0.02$; завданий запас стійкості синтезованої системи по амплітуді $\Delta L=16\text{дБ}$.

Вихідна система є нестійкою – два останніх кореня характеристичного поліному замкненої системи мають позитивні дійсні частини, що визначено за допомогою скрипта

```

clc
T1=0.016;
T2=0.042;
ksi=0.02;
kv=186;

W1=tf([0 kv],[1 0]) % інтегратор kv/s
W2=tf([0 1],[T1 1]) % аперіодична ланка 1/(T1s+1)
W3=tf([0 1],[T2.^2 2*ksi*T2 1]) % коливальна ланка
1/(T2^2s+2ksiT2s+1)
W4=1;
% -----
-----

W14=W1*W2*W3*W4 % передавальна функція об'єкта
W14z=feedback(W14,1)
[nw14, dw14]=tfdata(W14z,'v') % отримання коеф. поліному
передавальної
% функції замкнутого контуру: nw14 - чисельника, dw14 -
знаменника,
% див. help tfdata
roots(dw14) % обчислення коренів характеристичного поліному

ans =
-54.0078 +26.4963i
-54.0078 -26.4963i
22.2816 +36.3946i
22.2816 -36.3946i

```

Об'єкт керування є мінімально фазовою системою, оскільки корені характеристичного поліному $dw14$ передавальної функції $W14=W1*W2*W3*W4$ не мають позитивних дійсних частин:

```

0.0000 + 0.0000i
-62.5000 + 0.0000i
-0.4762 +23.8048i
-0.4762 - 23.8048i .

```

Результати програмного синтезу представлені у вигляді асимптотичної ЛАЧХ корегуючого пристрою на рис. 3.8. На рисунку програмно побудовано:

L_b – ЛАЧХ вихідної системи, L_{ba} – асимптотична ЛАЧХ вихідної системи; L_b – бажана асимптотична ЛАЧХ системи; L_c – асимптотична ЛАЧХ корегуючого пристрою. Зеленими лініями позначені рівні завданого запасу стійкості $+zaps$ та $-zaps$. Виведено частоту зрізу wz . Також виведені та позначені всі частоти сполучення в лінійному масштабі, що є зворотними величинами постійних часу відповідних ланок. Постійні часу ланок корегуючого пристрою позначені $Tc1...Tc5$.

В командне вікно виводяться: передавальні функції ланок вихідної системи $W1...W4$; передавальна функція розімкнутої вихідної системи $W14$; коефіцієнти поліномів чисельника та знаменника $W14$; частоти в точках a, b, c відповідно wa, wb, wc ; постійні часу ланок корегуючого пристрою $Tc1...Tc5$; передавальні функції ланок корегуючого пристрою $wk1...wk4$; передавальна функція розімкнутої скорегованої системи Wk .

Для оцінки запасу по фазі функцією `bode` будується ФЧХ розімкнутої скорегованої системи. В наведеному прикладі запас по фазі складає 54° , що більш ніж достатньо.

Для дослідження синтезованої системи в Simulink побудовано її модель, показану на рис. 3.9.

Показники якості перехідного процесу (рис.3.10) в цьому завданні є $\sigma=17,45\%$, $t_p=0.653c$ при відхиленні $|5\%|$ від усталеного значення. Перехідна функція в синтезованій системі, незважаючи на наявність коливальної ланки в об'єкті керування, є аперіодичною.

Лістинг скрипта для синтезу системи з об'єктом з коливальною ланкою наведено в додатку А. Ця програма використовувалася в курсовому проектуванні з теорії автоматичного керування та при виконанні лабораторних робіт з частотних методів синтезу САК.

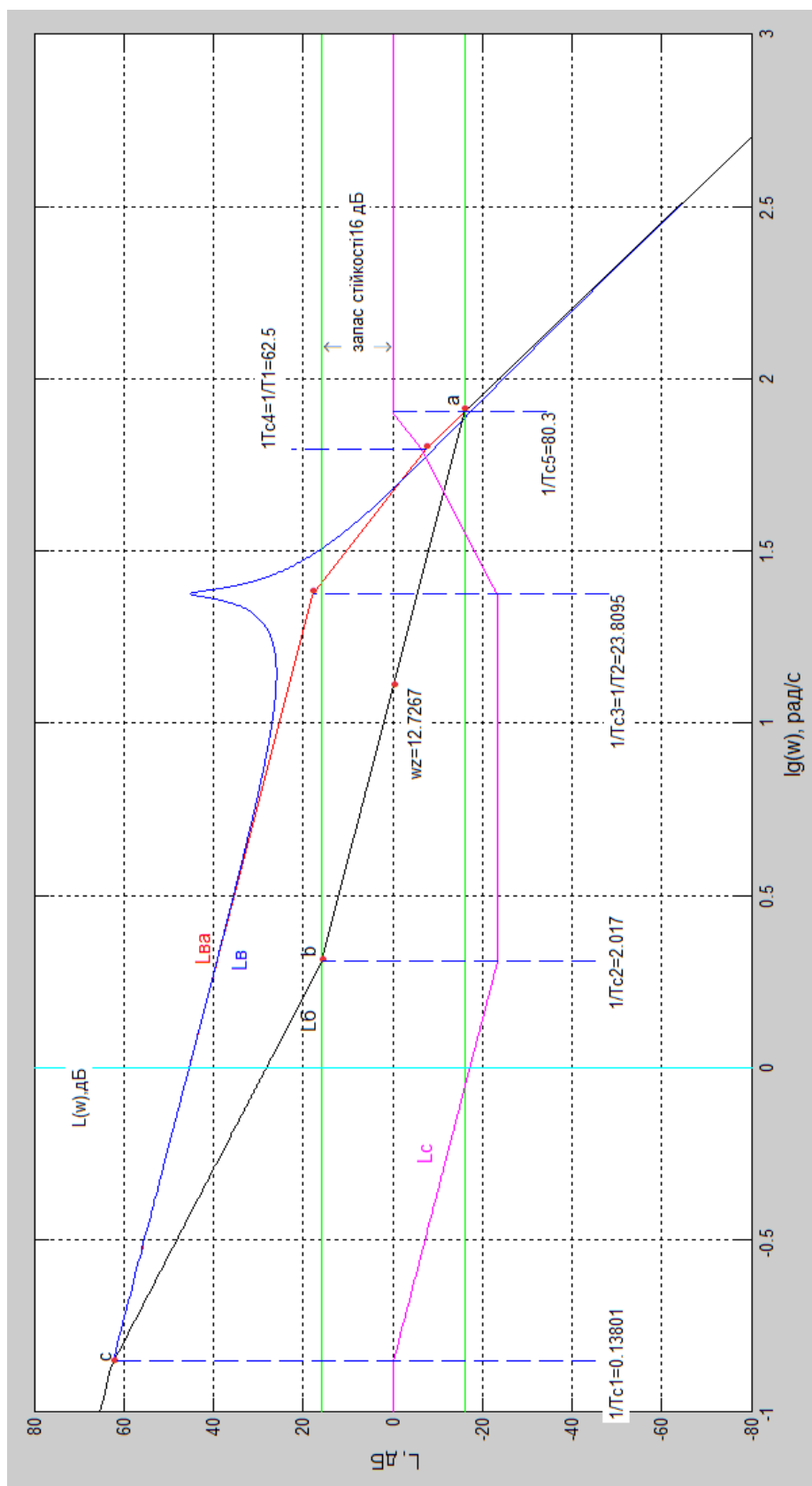


Рисунок 3.8 – Програмний синтез САК з коливальним об'єктом методом ЛАЧХ за спрощеною методикою

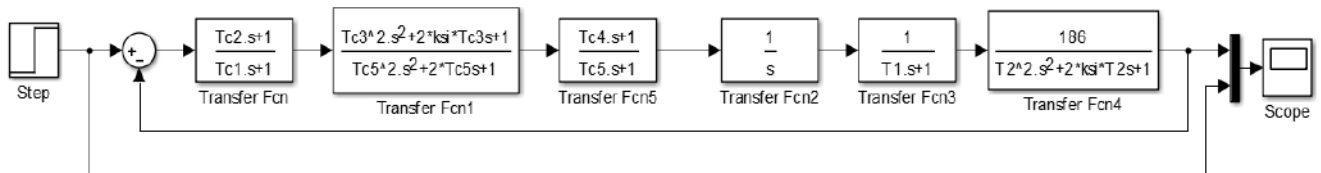


Рисунок 3.9 – Модель синтезованої системи з коливальною ланкою в Simulink

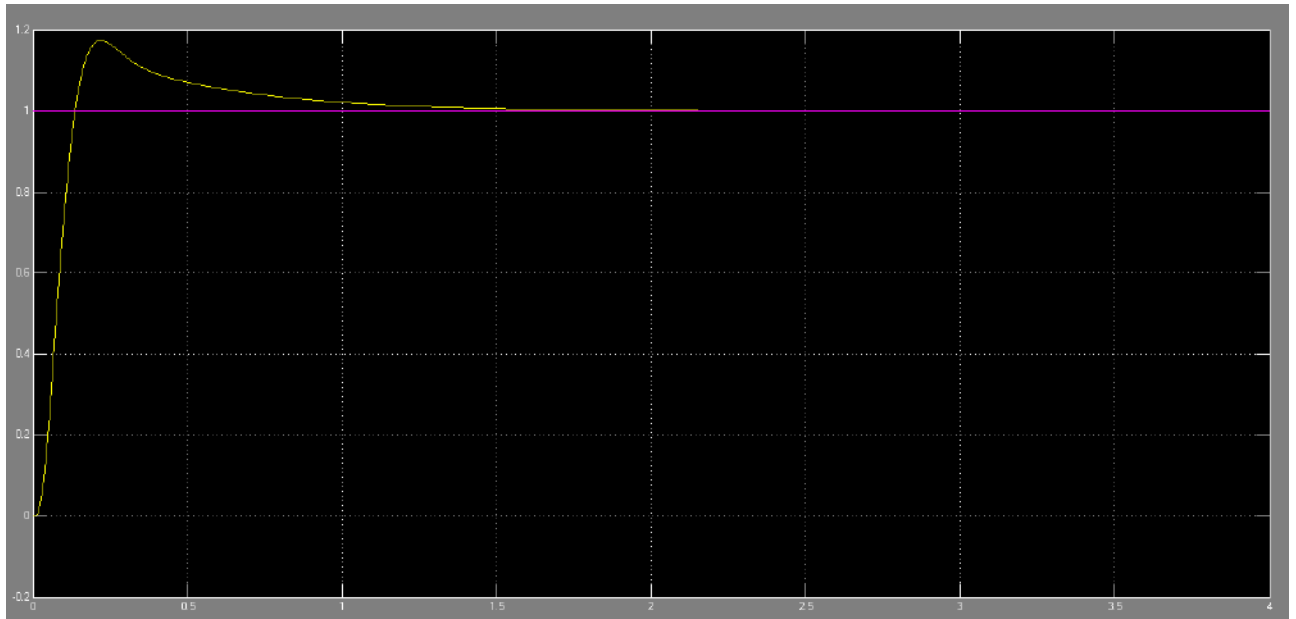


Рисунок 3.10 – Перехідний процес в моделі системи з коливальною ланкою з програмно синтезованими структурою та параметрами

Висновки до розділу 3

1. Досліджено якість САК астатичним об'єктом четвертого порядку з трьома інерційними ланками. В системі має місце аперіодичний перехідний процес з перерегулюванням 17,65%, часом регулювання 0.482с та швидкісною помилкою $v \cdot 0.0032$.

2. Досліджено якість САК астатичним об'єктом четвертого порядку з інерційною та коливальною ланками. В системі має місце аперіодичний перехідний процес з перерегулюванням 17,45% та часом регулювання 0.653с.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Шкідливі фактори у роботі користувача комп'ютера

Розробка САК будь якого об'єкта автоматизації на стадії свого проектування, моделювання та програмування передбачає застосування персонального комп'ютера (ПК) – ноутбука або стаціонарного комп'ютера, тому необхідно створити сприятливі умови роботи та робоче місце для користувача ПК. Створення сприятливих умов в даному випадку означає максимальне зниження впливу шкідливих та небезпечних факторів, що діють на працівника при довгостроковій роботі за комп'ютером впродовж робочого часу.

До основних шкідливих та небезпечних факторів, пов'язаних з роботою на персональному комп'ютері відповідно ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ «Опасные и вредные производственные факторы», НПАОП 0.00–1.28-10 «Правила охорони праці при експлуатації ОМ» належать: напруга зорових органів та пов'язане з нею перевтомлення; значне навантаження на кисті рук та пальці; тривале знаходження в сидячій позі, що викликає застійні явища в організмі; випромінювання різного виду (рентгенівське, електромагнітне, інфрачервоне, статистичні поля); механічні шуми, пов'язані з роботою кулера, дискового приводу, оргтехніки; іонізація повітря; виділення в повітря робочого приміщення різних хімічних речовин (озон, триметілфосфат, біфеніли).

До психологічно шкідливих факторів, які впливають на людину при роботі з комп'ютером можна віднести розумову напругу та нервово-емоційне перевантаження, які виникають внаслідок підвищеної концентрації уваги.

Усі ці фактори негативно впливають на здоров'я користувачів ПК та сприяють виникненню професійних захворювань:

- комп'ютерний зоровий синдром;
- радіохвильова хвороба;

- синдром висихання рогівки ока;
- кистьовий тунельний синдром;
- захворювання шкіри;
- захворювання кишкового тракту;
- серцево-судинні захворювання.

4.2 Заходи щодо поліпшення умов праці користувача ПК

Для зменшення шкідливого впливу негативних факторів на користувачів ПК проектом пропонується вжити заходів щодо поліпшення їх умов праці. Розміщення робочих місць з ПК у підвальних приміщеннях та на цокольних поверххах заборонено. Кімната, у якій розташоване робоче місце з ПК має природне освітлення, яке здійснюється через світлові прорізи, орієнтовані переважно на північ чи північний схід. Віконні прорізи такого приміщення обладнані регульованими пристроями (жалюзі, завіски, зовнішні козирки).

Також приміщення обладнане системою опалення, кондиціонування повітря, або припливно-витяжною вентиляцією для забезпечення оптимальних показників мікроклімату.

Загальний контур заземлення будівлі виводиться через розетку на кожне робоче місце з ПК.

Забороняється для оздоблення інтер'єру приміщень з ПК застосовувати полімерні матеріали (деревинно-стружкові плити, шпалери, що миються, рулонні синтетичні матеріали, пластикуватий паперовий пластик тощо), що виділяють у повітря шкідливі хімічні речовини.

У приміщеннях, де розташовано монітори, потрібно виконувати заходи щодо боротьби зі статичним полем.

Найбільш простим способом відповідно до рекомендацій є підтримка відносної вологості повітря на рівні 50-60%, заземлення усіх приладів, а також використання для підлоги антистатичного ліноліума.

Площа на одне робоче місце з ПК відповідно ГОСТ 12.2.032-78, ССБТ. «Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования» має становити не менше ніж 6,0 м², а об'єм не менше ніж 20,0 м³. Відстань від робочого місця з ПК до стіни з вікном повинна становити не менше ніж 1,5 м; від інших стін – на відстані 1 м, а відстань між столами – 1,5 м.

4.2.1 Організація робочого місця користувача ПК

Проектування робочих місць ПК відноситься до числа важливих проблем ергономічного проектування в області обчислювальної техніки. Планування робочого місця здійснюється на основі ГОСТ 12.2.032-78 і СанПіН 2.2.2./2.4.1340-03 [4.2, 4.3]. Правильна організація робочого місця, може знизити або звести нанівець більшу частину небезпечних і шкідливих факторів, що впливають на користувача ПК.

Існують певні ергономічні вимоги, що стосуються обстановки, що оточує робоче місце користувача ПЕВМ, такі як – вимоги до освітленості, рівня шуму, температури навколишнього середовища, вологості.

4.2.1.1 Освітлення робочого місця користувача ПК

Правильно спроектоване і виконане освітлення покращує умови зорової роботи, знижує стомлюваність, сприяє підвищенню продуктивності праці, благотворно впливає на виробниче середовище, надаючи позитивну психологічну дію на працюючого, підвищує безпеку праці і знижує травматизм.

Згідно СНіП 11-4-79 в приміщеннях, де встановлені комп'ютери необхідно застосувати систему комбінованого освітлення.

При виконанні робіт категорії високої зорової точності (найменший розмір об'єкта розрізнення 0,3 ... 0,5 мм) величина коефіцієнта природного освітлення (КПО) повинна бути не нижче 1,5%, а при зоровій роботі середньої точності (найменший розмір об'єкта розрізнення 0,5 ... 1,0 мм) КПО повинен бути не нижче 1,0%. В якості джерел штучного освітлення звичайно використовуються люмінесцентні лампи типу ЛБ або ДРЛ, які попарно об'єднуються в світильники, які повинні розташовуватися рівномірно над робочими поверхнями.

Вимоги до освітленості в приміщеннях, де встановлені комп'ютери, наступні: при виконанні зорових робіт високої точності загальна освітленість повинна складати 300лк, а комбінована – 750лк. Аналогічні вимоги при виконанні робіт середньої точності – 200 і 300лк відповідно.

Крім того все поле зору повинне бути освітлено достатньо рівномірно – це основна гігієнічна вимога. Іншими словами, ступінь освітлення приміщення і яскравість екрану комп'ютера повинні бути приблизно однаковими, тому що яскраве світло в районі периферійного зору значно збільшує напруженість очей і, як наслідок, призводить до їх швидкої стомлюваності.

При необхідності, залежно від вирішуваних завдань, робоче місце користувача ПК оснащується індивідуальним джерелом освітлення.

Розрахунок освітленості для робочого міста користувача ПК представлений у розділі 4.2.3

4.2.1.2 Шум на робочому місті користувача ПК

Шум погіршує умови праці, чинячи шкідливу дію на організм людини. Працюючі в умовах тривалої шумової дії випробовують дратівливість, головні болі, запаморочення, зниження пам'яті, підвищену стомлюваність, зниження

апетиту, біль у вухах і т.д. Такі порушення в роботі ряду органів і систем організму людини можуть викликати негативні зміни в емоційному стані людини аж до стресових. Під впливом шуму знижується концентрація уваги, порушуються фізіологічні функції, з'являється втома у зв'язку з підвищеними енергетичними витратами і нервово-психічним напруженням, погіршується мовна комутація. Все це знижує працездатність людини і її продуктивність, якість і безпеку праці. Тривала дія інтенсивного шуму (вище 80 дБ) на слух людини приводить до його часткової або повної втрати.

Шум, що виробляється яким-небудь пристроєм, що входить до складу робочої станції враховується і обмежується на рівні, що не приводить до втрати уваги користувача ПК на робочому місці і не заважає сприйняттю голосу. У місцях, де важливо підвищену увагу або можливість спілкування голосом, максимальний рівень шуму обмежений – 55 дБ, а для звичайних робочих місць – 60 дБ.

Шумляче обладнання (АЦПУ, принтери і т.д.) встановлюються на віброізолюючі поверхні автономно від робочого місця користувача ПК. Як віброізолююча поверхня використовується гума, повсть, пробка, м'які килимки з синтетичних матеріалів.

Також для зниження рівня шуму стіни і стеля приміщень, де встановлені комп'ютери, облицьовані звукопоглинальними матеріалами.

Розрахунок рівня шуму на робочому місці користувача ПК представлений у розділі 4.2.4

4.2.1.3 Параметри мікроклімату робочого міста користувача ПК

Обчислювальна техніка – є джерелом істотних тепловиділень, що може привести до підвищення температури і зниження відносної вологості в

приміщенні, де встановлені комп'ютери. У таких приміщеннях повинні дотримуватися певні параметри мікроклімату.

На робочому місці користувачів ПК забезпечуються оптимальні параметри мікроклімату відповідно до СанПіН 2.2.2./2.4.1340-03.

Роботи на ПК по тяжкості і енерговитратам належать до категорії – легкі фізичні роботи (1а, 1б). До категорії 1а належать роботи вироблювані сидячи і що не вимагають фізичної напруги, при яких енерговитрати складають до 120 ккал/ч. При виконанні таких робіт, температура повітря в холодний період року не більше 22–24°C, в теплий період року не більше 23–25°C. До категорії 1б належать роботи, вироблені сидячи, стоячи або які пов'язані з ходьбою і супроводжуються деякою фізичною напругою, при яких енерговитрати становить від 120 до 150 ккал/г. При виконанні таких робіт, температура повітря в холодний період року 21-23 ° С, в теплий період 22-24 °С. Відносна вологість на робочих місцях – 40-60 відсотків, а швидкість руху повітря – не більше 0,1 м/с. Для забезпечення достатнього постійного і рівномірного нагрівання повітря в приміщеннях в холодний період року використовується опалення. Для опалення приміщень, де розташовуються ПК використовуються водяні, повітряні і панельно-променисті системи центрального опалення. Місцеве опалення в приміщеннях з ПК не застосовують.

Для підвищення вологості повітря в приміщеннях з ПК слід застосовувати зволожувачі повітря, що заправляють щодня дистильованою або прокип'яченою питною водою.

Для забезпечення встановлених норм метеорологічних параметрів і чистоти повітря в приміщеннях з ПК обладнуються системи вентиляції або кондиціонування повітря.

Приміщення для роботи з ПК обладнуються ефективною припливно-втяжною вентиляцією. З метою підтримки параметрів мікроклімату в допустимих межах, що забезпечують надійну роботу ПК, а також комфортні умови роботи користувачів ПК застосовується кондиціонування повітря. У приміщеннях, де виробляють роботи з ПК, виділяється більша кількість

теплоти. Тому кондиціонери, обслуговуючі приміщення з ПК, працюють постійно тільки на охолодження.

4.2.2 Планування і оснащення робочого місця користувача ПК

Робоче місце це оснащене технічними засобами (засобами відображення інформації, органами управління, допоміжним обладнанням) простір, де здійснюється діяльність користувача ПК.

Необхідно щоб робоче місце людини, що працює на ПК відповідало наступним заходам:

- обладнання робочого місця (стіл, стілець, підставка для ніг) – спеціальної конструкції, що забезпечує можливість індивідуального регулювання;
- сидіння і спинка стільця покриваються напівм'якими матеріалами, що не електризуються;
- розташування робочих поверхонь забезпечує узгодженість компонування робочого місця і маршруту рухів, а також достатню легкість для стеження за робочими операціями;
- освітленість на поверхні столу в зоні розміщення робочого документу – 300-500 лк (при комбінованому освітленні).

Для зменшення шкідливого впливу негативних факторів проектом пропонується щоб робоче місце з ПК відповідало наступним гігієнічним заходам:

- екран та клавіатура розташовуються на оптимальній відстані від очей користувача, що становить 600...700 мм;
- висота робочої поверхні робочого столу – 800 мм;
- робочий стіл має простір для ніг заввишки не менше ніж 600 мм, завширшки не менше ніж 500 мм, завглибшки (на рівні колін) не менше ніж 450 мм, на рівні простягнутої ноги – ніж 650 мм.

4.2.3 Розрахунок системи загального рівномірного освітлення з люмінесцентними лампами для приміщення, в якому використовуються зорові роботи високої точності

Розрахунок освітленості робочого місця користувача ПК зводиться до вибору системи освітлення, визначенню необхідного числа світильників, їхнього типу і розміщення. Виходячи з цього, розрахуємо параметри штучного освітлення.

Розрахунок освітлення проводиться для кімнати площею 15м², довжина якої 5м, ширина – 3 м. Для розрахунку освітлення скористаємося методом світлового потоку [32].

Для розрахунку загального рівномірного освітлення горизонтальної робочої поверхні використовують метод світлового потоку, що враховує світловий потік, відображений від стелі та стін.

Для визначення кількості світильників визначимо світловий потік, падаючий на поверхню за формулою:

$$F = \frac{E \cdot K \cdot S \cdot Z}{n}, \quad (4.1)$$

де F – світловий потік, що розраховується, Лм;

E – нормована мінімальна освітленість, Лк (визначається по таблиці).

Роботу користувача ПК, відповідно до цієї таблиці, можна віднести до розряду точних робіт, отже, мінімальна освітленість буде E = 300Лк;

S – площа освітлюваного приміщення (у нашому випадку S = 15м²);

Z – відношення середньої освітленості до мінімальної (зазвичай приймається рівним 1,1...1,2, нехай Z = 1,1);

K – коефіцієнт запасу, що враховує зменшення світлового потоку лампи в результаті забруднення світильників в процесі експлуатації (його значення

залежить від типу приміщення і характеру робіт, що проводяться в ньому, і в нашому випадку $K = 1,5$);

n – коефіцієнт використання, (виражається відношенням світлового потоку, що падає на розрахункову поверхню, до сумарного потоку всіх ламп і обчислюється в частках одиниці; залежить від характеристик світильника, розмірів приміщення, фарбування стін і стелі, які характеризуються коефіцієнтами відображення від стін (R_c) і стелі ($R_{ст}$)), значення коефіцієнтів R_c і $R_{ст}$ визначимо по таблиці залежностей коефіцієнтів відображення від характеру поверхні: $R_c = 40\%$, $R_{ст} = 60\%$. Значення n визначимо по таблиці коефіцієнтів використання різних світильників. Для цього вичислимо індекс приміщення по формулі:

$$I = \frac{S}{h \cdot (A + B)}, \quad (4.2)$$

де S – площа приміщення, $S = 15 \text{ м}^2$;

h – розрахункова висота підвісу, $h = 2.92 \text{ м}$;

A – ширина приміщення, $A = 3 \text{ м}$;

B – довжина приміщення, $B = 5 \text{ м}$.

Підставивши значення у формулу (4.2) отримаємо:

$$I = \frac{15}{2,92 \cdot (3 + 5)} = 0,64$$

Знаючи індекс приміщення I , R_c і $R_{ст}$ за таблицею 7 [22] знаходимо $n = 0,22$. Підставимо всі значення у формулу (4.1) для визначення світлового потоку F :

$$F = \frac{300 \cdot 1,5 \cdot 15 \cdot 1,1}{0,22} = 33750 \text{ ЛЛ}.$$

Для освітлення вибираємо люмінесцентні лампи типу ЛБ40-1, світловий потік яких $F_{\text{л}} = 4320$ Лк.

Розрахуємо необхідну кількість ламп за формулою:

$$N = \frac{F}{F_{\text{л}}}, \quad (4.3)$$

де N – визначуване число ламп;

F – світловий потік, $F = 33750$ Лм;

$F_{\text{л}}$ – світловий потік лампи, $F_{\text{л}} = 4320$ Лм.

Підставивши значення $F = 33750$ Лм і $F_{\text{л}} = 4320$ Лм у формулу (4.3) знайдемо N :

$$N = \frac{33750}{4320} = 8 \text{ шт.}$$

При виборі освітлювальних приладів використовуємо світильники типу ОД. Кожен світильник комплектується двома лампами.

4.2.4 Розрахунок рівня шуму на робочому місці користувача ПК

Одним з несприятливих факторів при роботі користувача на ПК є високий рівень шуму, створюваний друкованими пристроями, обладнанням для кондиціонування повітря, вентиляторами систем охолодження в самих ПК.

Для вирішення питань про необхідність і доцільність зниження шуму необхідно знати рівні шуму на робочому місці користувача ПК.

Рівень шуму, що виникає від декількох некогерентних джерел, працюючих одночасно, підраховується на підставі принципу енергетичного підсумовування випромінювань окремих джерел [23] за формулою:

$$L_{\Sigma} = 10 \lg \sum_{i=1}^{i=n} 10^{0,1L_i}, \quad (4.4)$$

де L_i – рівень звукового тиску i -го джерела шуму;

n – кількість джерел шуму.

Отриманий результат розрахунку порівнюється з допустимим значенням рівня шуму для даного робочого місця. Якщо результати розрахунку вище припустимого значення рівня шуму, то необхідні спеціальні заходи щодо зниження шуму. До них відносяться: облицювання стін і стелі залу звукопоглинальними матеріалами, зниження шуму в джерелі, правильне планування обладнання і раціональна організація робочого місця користувача ПК.

Рівні звукового тиску джерел шуму, що діють на користувача ПК на його робочому місці представлені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Рівні звукового тиску різних джерел

Джерело шуму	Рівень шуму, дБ
Жорсткий диск	40
Вентилятор	45
Монітор	17
Клавіатура	10
Принтер	45
Сканер	42

Зазвичай робоче місце користувача ПК оснащено наступним обладнанням: вінчестер в системному блоці, вентилятор(и) систем охолодження ПК, монітор, клавіатура, принтер і сканер.

Підставивши значення рівня звукового тиску для кожного виду обладнання у формулу (4.4), отримаємо:

$$L_{\Sigma}=10 \cdot \lg(104+104,5+101,7+101+104,5+104,2)=49,5 \text{ дБ.}$$

Отримане значення не перевищує допустимий рівень шуму для робочого місця людини яка працює на ПК, рівний 65 дБ (ГОСТ 12.1.003-83). І якщо врахувати, що навряд чи такі периферійні пристрої як сканер і принтер будуть використовуватися одночасно, то ця цифра буде ще нижче. Крім того при роботі принтера безпосередня присутність користувача ПК не обов'язкова, тому що принтер забезпечений механізмом автоматичної подачі аркушів.

ВИСНОВКИ

1. Метод синтезу за бажаними ЛАЧХ активно використовується в теперішній час для проектування систем автоматичного керування.
2. Програми автоматизованого синтезу за методом бажаних ЛАЧХ, котрі виконують повний алгоритм синтезу, практично відсутні або не представлені в науковій літературі.
3. Інформація про побудову середньочастотної асимптоти бажаної ЛАЧХ носить суперечливий характер, що ускладнює практичне застосування методу.
4. Розроблено та протестовано програму автоматизованого синтезу за методом бажаних ЛАЧХ, яка виконує повний алгоритм синтезу за спрощеною методикою.
5. Результати тестування програми для двох об'єктів керування четвертого порядку свідчать, що отримані показники якості синтезованих САК не гірші ніж заявлені або гарантовані в науковій літературі за повними методиками.
6. Наведені результати демонструють виконання поставленого завдання та доцільність використання спрощеної методики синтезу за методом бажаних ЛАЧХ.
7. Розглянуто заходи з охорони праці фахівця з комп'ютерного проектування систем автоматичного керування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дьяконов В.П. MATLAB 6.5 SP1/ 7.0 + Simulink 5/6 в математике и моделировании. – Серия «Библиотека профессионала». – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 576 с: ил.
2. Материалы по продуктам MATLAB & Toolboxes - <http://matlab.exponenta.ru/>
3. Гайдук, А.Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB. [Электронный ресурс] / А.Р. Гайдук, В.Е. Беляев, Т.А. Пьявченко. - Электрон. дан. - СПб. : Лань, 2016. - 464 с. - Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/71744>
4. Справочное пособие по теории систем автоматического регулирования и управления [Текст] / Под общ. ред. Е.А.Санковского. – Минск : Вышэйшая школа, 1973. – 584с. : ил. – 2,03.
5. Кудинов Ю.И. Пашенко В.Ф. Теория автоматического управления (с использованием MATLAB – Simulink): Учебное пособие. – 3-е изд. стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2019. – 312 с.:ил. <https://e.lanbook.com/reader/book/111198/#159>
6. Ощепков А.Ю. Системы автоматического управления: теория, применение, моделирование в MATLAB: Учебное пособие. – 3-е изд. стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2018. – 208 с.:ил.
7. Нейдорф Р.А., Обухов П.С. Синтез и оптимизация алгоритмов управления в технических системах: Учеб. пособие. Ч.2 — Ростов-н/Д: Издательский центр ДГТУ, 1997. 94 с.
8. Нейдорф Р.А., Обухов П.С. Синтез законов управления в технических системах. — Ухта: УГТУ, 2000. – 168 с.:ил..
9. [Программа для построения асимптотических ЛАЧХ first.tsilikin.ru](http://first.tsilikin.ru)
10. Программа синтеза регуляторов методом желаемых ЛАЧХ AmLANX (автор Груздев В.В., ДГТУ) <http://download.2101.net.ru>

11. Белов Г.А. Синтез системы управления широтно-импульсным корректором коэффициента мощности / Г.А. Белов // Электротехника. 2006. № 10. С. 46-55.
12. Г. А. Белов, А.В. Серебрянников, А.А. Павлова Частотный метод синтеза непрерывного корректирующего устройства для импульсного преобразователя. Вестник Чувашского университета. Естественные и технические науки. – 2008. – № 2. – С. 151–166.
13. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. - М.: Наука, 1978. - 256 с.
14. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування: Підручник. — 2-ге вид., перероб. і доп. — К.: Либідь, 2007. — 656 с.
15. Зайцев Г. Ф, Костюк В. И., Чинаев П. И. Основы автоматического управления и регулирования. — К.: Техніка, 1975. — 496 с.
16. Черных И.В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений/ под общ. ред. В.Г. Потемкина.- М.: ДИАЛОГ- МИФИ, 2003.- 496с.
17. Частотный метод синтеза последовательных корректирующих устройств
https://studref.com/522804/tehnika/chastotnyy_metod_sinteza_posledovatelnyh_k_orrektiruyuschih_ustroystv
18. Михалевич С.С. Частотный метод параметрического синтеза пид-регулятора для стационарных, интервальных и многосвязных САУ.- Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, Специальность 05.13.06 - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (химическая промышленность). - «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ), Томск, 2015.
19. Стельмашук С.В, Бунаков В.А. Синтез следящего электропривода с контуром скорости, настроенного на модульный оптимум / Ученые записки

Комсомольского-на-Амуре Государственного технического университета, Том:1, № 4(28), 2016, с. 54-62.- Комсомольск-на Амуре, 2016.

20. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т.3. Методы современной теории автоматического управления /Под ред. Н.Д. Егупова. – М.: МВТУ, 2000. – 748 с.

21. Костюченко М.П. Основи охорони праці, Охорона праці в галузі. Ч.1. Загальні питання та менеджмент охорони праці: Навч.-методичний посібник. – Донецьк: Вид-во ДУІ і ШІ, 2010. – 158с.

22. Безпека промислових підприємств. Загальні положення та вимоги. ДСТУ 3273-95// Наказ Держстандарту України від 19 грудня 1995 р. № 434.

ДОДАТОК А

Лістинг скрипта Sint_LAX_prim_kr_ar_kol.m для виконання синтезу САК
об'єкта керування з коливальною ланкою

```
% Синтез послідовного корегуючого пристрою методом ЛАЧХ за спрощеною
% методикою для курсового проектування з Теорії автоматичного керування для
% довільного лінійного об'єкта керування
clc
clear all

% Вихідні дані для об'єкта з аперіодичною та коливальною ланкою::::::::::::
T1=0.016;
T2=0.042;
% коефіцієнти k1, k2, k3 в розрахунках не використовуються оскільки коеф.
% передачі розімкнутого контуру має бути kv і коеф. корегуючого пристрою
% kk=kv/(k1*k2*k3) не обчислюється
k1=0.14;
k2=290;
k3=40;
kv=186; % kv коеф. передачі розімкнутого контуру
ksi=0.02; % декремент затухання коливальної ланки;
c2=0.45; % динамічна помилка по прискоренню
sig=40; % перерегулювання
tr=1.4; % час регулювання

zaps=16; % запас стійкості, дБ
% УВАГА! Запас стійкості не може бути більше 16дБ!

wz=0.12*sig*pi/tr; % 10.7712 частота зрізу

% передавальні функції відповідно до варіанту завдання
W1=tf([0 kv],[1 0]) % інтегратор kv/s
W2=tf([0 1],[T1 1]) % аперіодична ланка 1/(T1s+1)
W3=tf([0 1],[T2.^2 2*ksi*T2 1])% коливальна ланка 1/(T2^2*s^2+2*ksi*T2*s+1)
W4=tf([0 1],[0 1]) % W4=1
% ::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::

W14=W1*W2*W3*W4 % передавальна функція розімкнутого контуру
% передавальні функції див. у командному вікні при виконанні скрипта
% w частота
w=0.01:0.01:1000; % ЛАЧХ будуються в діапазоні 0.01...1000 рад/с, крок 0.01

[nw14, dw14]=tfdata(W14,'v') % отримання коеф. поліному передавальної
% функції розімкнутого контуру: nw14 - чисельника, dw14 - знаменника,
% див. help tfdata

W14=kv./ (dw14(1).*(1i*w).^4+dw14(2).*(1i*w).^3+dw14(3).*(1i*w).^2+...
dw14(4).*(1i*w)+dw14(5)*1); % АФЧХ розімкнутого контуру W14(jw)

% Згідно з методикою отримуємо частоту wa в точці a, на якій пересікається
% ЛАЧХ 20*log10(abs(W14)) з рівнем -zaps. Для цього вирішимо рівняння
% 20*log10(abs(W14))=-zaps або 20*log10(abs(W14))+zaps=0. MATLAB має
% універсальну функцію solve для рішення нелінійних рівнянь, але вона
% погано працює з комплексними змінними. Тому для рішення використано
% функцію fzero, котра теж може не спрацювати, якщо початкові значення
% коренів відокремлені недостатньо точно (наш випадок). Для зняття вказаної
% проблеми написана функція abroots, що наведена нижче.Для виконання цього
% скрипта вона має бути поміщена в окремий одноіменний m-файл abroots.m.
```

```

% function x=abroots(f,a,b,h)
% % возвращает корни нелинейного уравнения f(x)=0
% % интервалы изоляции корней находятся
% % табулированием функции f на интервале [a,b] с шагом h
% % f - функция пользователя, которая может быть передана как
% % указатель на функцию в m-файле @fname, как строковое имя
% % функции в m-файле 'fname', как строковое выражение функции,
% % например, 'x.^3-cos(5*x)', как строковая переменная fstr
% % с выражением функции, как анонимная функция
% % примеры обращения к функции:
% % x=abroots(@feq,-10,10,0.01);
% % x=abroots('feq',-10,10,0.01);
% % x=abroots('x.^3-cos(5*x)',-10,10,0.01);
% %
% % fun='x.^3-cos(5*x)';
% % x=abroots(fun,-10,10,0.01);
% %
% % fun=@(x) x.^3-cos(5*x)
% % x=abroots(fun,-10,10,0.01);
% a=a+0.123;
% f=fcnchk(f);
% plot(a:h:b,f(a:h:b)), grid
% r=find(f(a:h:b).*f(a+h:h:b+h)<=0);
% ki=length(r);
% r=a+(r-1)*h;
% r(2,:)=r+h;
% x=1:ki;
% for k=1:ki
% x(k)= fzero(f,r(:,k));
% end
% end

% Можливі варіанти запису рівняння для обчислення частоти в точці a =====

% fa=['20*log10(abs(' num2str(kv) './( ' num2str(dw14(1)) '* (1i*x).^4+'...
% num2str(dw14(2)) '* (1i*x).^3+' num2str(dw14(3)) '* (1i*x).^2+'...
% num2str(dw14(4)) '* (1i*x)+' num2str(dw14(5)) '*1))+' num2str(zaps)];
% працює

%fa=@(x) 20*log10(abs(kv./(dw14(1)*(1i*x).^4+dw14(2)*(1i*x).^3+...
% dw14(3)*(1i*x).^2+dw14(4)*(1i*x)+dw14(5)*1)))+zaps; % працює

fa=@(w) 20*log10(abs(kv./(dw14(1)*(1i*w).^4+dw14(2)*(1i*w).^3+...
dw14(3)*(1i*w).^2+dw14(4)*(1i*w)+dw14(5)*1)))+zaps; % працює. Анонімна
% функція, див. help anonymous

%fa=@(x) 20*log10(abs(W14s))+zaps; % не працює

%fa=inline(['20*log10(abs(' num2str(kv) './( ' num2str(dw14(1))
'* (1i*x).^4+'...
% num2str(dw14(2)) '* (1i*x).^3+' num2str(dw14(3)) '* (1i*x).^2+'...
% num2str(dw14(4)) '* (1i*x)+' num2str(dw14(5)) '*1))+' num2str(zaps)']);
% працює
%=====

wa=abroots(fa,0.1,1000,1);

% Асимптотичні ЛАЧХ ланок вихідної системи інтегр-ап1-коливальн-----

% асимптотична ЛАЧХ аперіодичної ланки ап1 з коеф. передачі kv
ap1=20*log10(kv).*(w<1./T1)+(20*log10(kv)-20*log10(T1.*w)).*(w>=1/T1);

```

```

% асимптотична ЛАЧХ коливальної ланки kol з коеф. передачі=1
kol=(-40*log10(T2.*w)).*(w>=1./T2);
% асимптотична ЛАЧХ інтегруючої ланки intg з коеф. передачі=1
intg=-20*log10(w);

%-----

figure(17)
bv=ap1+kol+intg;          % асимптотична ЛАЧХ розімкнутої вихідної системи
                        % інтегр-ап1-коливальн

plot(log10(w),bv,'r') % графік асимптотичної ЛАЧХ вихідної системи
hold on
plot(log10(w),20*log10(abs(W14))) % графік ЛАЧХ вихідної системи
zs(1:length(w))=zaps;
plot(log10(w),zs,'g',log10(w),-zs,'g') % графіки рівнів запасу стійкості
grid on

%* Знаходження точки пересічення рівня -zaps з асимптотичною вихідною ЛАЧХ**
% знаходиться елемент масиву bv, що мінімально відрізняється по модулю від
% рівня -zaps. Пошук виконується серед 2000 елементів, починаючи з точки
% пересічення wa вихідної (неасимптотичної) ЛАЧХ з рівнем -zaps.
kmind=fix(100*wa);
mind=abs(bv(kmind)+zaps);
for k=fix(100*wa)+1:1:fix(100*wa)+2000
    if abs(bv(k)+zaps)<mind
        mind=abs(bv(k)+zaps);
        kmind=k;
    end
end
wa=kmind/100
%*****

% _____ Побудова бажаної асимптотичної ЛАЧХ _____

% Бажана асимптотична ЛАЧХ формується в масиві bb. За методикою
% високочастотна частина бажаної ЛАЧХ співпадає з вихідною ЛАЧХ,
% починаючи з точки a, тобто з частоти wa. Тому елементи масива bb,
% починаючи з елемента з індексом round(100*wa)
%(індекс=округлено(100*частота) при кроці по частоті 0.01 рад/с), отримують
% значення відповідних елементів масива bv.
bb(round(100*wa):length(w))=bv(round(100*wa):length(w));

% Далі отримуємо рівняння середньочастотної ділянки бажаної ЛАЧХ. Це потрібно
% для формування масива bb та для визначення координат лівого кінця
% середньочастотної ділянки бажаної ЛАЧХ - точки b.
L0s=-zaps+20*log10(wa); % ордината точки пересічення продовження
% середньочастотної асимптоти ab з віссю ординат L.
% Частота wb в точці b визначається з рівняння L0s-20*log10(wb)=zaps,
% звідки
wb=10.^((L0s-zaps)/20)
bb(round(100*wb):round(100*wa))=L0s-20*log10(w(round(100*wb):round(100*wa)));

% Виходячи з тих же міркувань що й для отримання рівняння середньочастотної
% асимптоти бажаної ЛАЧХ, отримуємо рівняння асимптоти bc, що з'єднує
% середньочастотну ділянку бажаної ЛАЧХ з вихідною ЛАЧХ. Асимптота bc має
% нахил -40дБ/дек (може мати -60дБ/дек).
L0c=zaps+40*(log10(wb)); % ордината точки пересічення продовження
% з'єднувальної асимптоти bc з віссю ординат L. % Частота wc в точці c
% визначається з рівняння 20*log10(abs(W14))=L0c-40*log10(w). Відповідно
% до рівняння анонімна функція:
fc=@(w) 20*log10(abs(kv./(dw14(1)*(1i*w).^4+dw14(2)*(1i*w).^3+...

```

```

dw14(3)*(1i*w).^2+dw14(4)*(1i*w)+dw14(5)*1))- (L0c-40*log10(w));
wc=abroots(fc,0.01,wb,1) % частота wc в точці c
bb(round(100*wc):round(100*wb))=L0c-40*log10(w(round(100*wc):round(100*wb)));

% Асимптота бажаної ЛАЧХ до частоти wc співпадає з вихідною, тому
bb(1:round(100*wc))=bv(1:round(100*wc));
plot(log10(w),bb,'black')

% _____ Побудову бажаної ЛАЧХ завершено _____

bc=bb-bv; % масив з асимптотичною ЛАЧХ послідовного коригуючого пристрою
plot(log10(w),bc,'magenta')

% ++++++Анотування рисунка+++++

wz=10.^(L0s/20); % обчислення частоти зрізу з рівняння L0s-20*log10(w)=0
text(log10(wz), 0, '\color{rgb}{0.9 .2 .2}\bullet') % прорисовка значка
% bullet • в точку з координатами (log10(wz), 0), див. help text
text(log10(wz), -5, ['wz=' num2str(wz)], 'HorizontalAlignment',...
    'right', 'BackgroundColor', 'white')

axis([-1 3 -80 80]) % обмеження осі log10(w) рівнем log10(0.1)=-1
% на рисунку, див. help axis

plot([0 0],[-80 80], 'cyan', 'LineWidth',1) % побудова осі L
text(0, 70, 'L(w), дБ', 'HorizontalAlignment',...
    'right', 'BackgroundColor', 'white')

text(log10(wc), -50, ['1/Tc1=' num2str(wc)], 'HorizontalAlignment',...
    'center', 'BackgroundColor', 'white')
% text(log10(wc), -50, ['1/T1=' num2str(wc)], 'HorizontalAlignment',...
% 'center', 'BackgroundColor', [.7 .9 .7]) % варіант завдання кольору в
% попередньому операторі
text(log10(wc), bb(round(100*wc)), '\color{rgb}{0.9 .2 .2}\bullet')
% bullet • circ \uparrow \downarrow
plot([log10(wc+0.003) log10(wc+0.003)], [-45 bv(round(100*wc))], '--')

text(log10(wb), -50, ['1/Tc2=' num2str(wb)], 'HorizontalAlignment',...
    'center', 'BackgroundColor', 'white')
text(log10(wb), bb(round(100*wb)), '\color{rgb}{0.9 .2 .2}\bullet')
plot([log10(wb+0.03) log10(wb+0.03)], [-45 bb(round(100*wb))], '--')

text(log10(1./T2), bc(round(100./T2))-27, ['1/Tc3=1/T2=' num2str(1./T2)],...
    'HorizontalAlignment', 'right', 'BackgroundColor', 'white')
text(log10(1./T2), bv(round(100./T2)), '\color{rgb}{0.9 .2 .2}\bullet')
plot([log10(1./T2) log10(1./T2)],...
    [bc(round(100./T2))-25 bv(round(100./T2))], '--')

text(log10(1./T1), bv(round(100./T1))+35, ['1/Tc4=1/T1=' num2str(1./T1)],...
    'HorizontalAlignment', 'left', 'BackgroundColor', 'white')
text(log10(1./T1), bv(round(100./T1)), '\color{rgb}{0.9 .2 .2}\bullet')
plot([log10(1./T1) log10(1./T1)],...
    [bv(round(100./T1)) bv(round(100./T1))+30], '--')

text(log10(wa), -35, ['1/Tc5=' num2str(wa)], 'HorizontalAlignment',...
    'right', 'BackgroundColor', 'white')
text(log10(wa), bv(round(100*wa)), '\color{rgb}{0.9 .2 .2}\bullet')
plot([log10(wa) log10(wa)], [bc(round(100*wa)) bc(round(100*wa))-35], '--')

text(log10(wa)+0.02, bv(round(100*wa))+3, 'a', 'FontSize',11)

```

```

text(log10(wb)+0.02, bb(round(100*wb))+3, 'b', 'FontSize', 11)
text(log10(wc)+0.01, bb(round(100*wc))+2, 'c', 'FontSize', 11)

text(log10(wb)-0.001, bv(round(100*wb))+3, 'La', 'FontSize', 11, 'color', 'red')
text(log10(wb)-0.02, bv(round(100*wb))-5, 'Lb', 'FontSize', 11, 'color', 'blue')
text(log10(wb)-0.2, bb(round(100*wb))+3, 'Lб', 'FontSize', 11, 'color', 'black')
text(0.5*(log10(wc)+log10(wb)), -7, 'Lc', 'FontSize', 11, 'color', 'magenta')

xlabel('lg(w), рад/с', 'FontSize', 12, 'Color', 'black') % підписи на осях, див.
ylabel('L, дБ', 'FontSize', 12, 'Color', 'black') % help xlabel, help ylabel

text(log10(wa+40), zaps-3, '\uparrow', 'color', 'black') % вивід запасу
text(log10(wa+40), 2, '\downarrow', 'color', 'black') % стійкості
text(log10(wa+40), zaps*0.5, ['запас стійкості' num2str(zaps) ' дБ'], ...
    'HorizontalAlignment', 'left', 'BackgroundColor', 'white')

%+++++

% Результати на рисунку - частоти сполучення та нахил асимптот ЛАЧХ
% послідовного керуючого пристрою дозволяють отримати передавальні функції
% корегуючих ланок
Tc1=1/wc % ланка в знаменнику передавальної функції, оскільки нахил асимптоти
% зменшився на -20дБ/дек;
Tc2=1/wb % ланка в чисельнику, збільшення на +20дБ/дек;
Tc3=T2 % ланка в чисельнику, збільшення на +40дБ/дек. Важливо: це ланка
% другого порядку ідентична знаменнику коливальної ланки W3 об'єкта
% керування.
Tc4=T1 % ланка в чисельнику, збільшення на +20дБ/дек;
Tc5=1/wa % ланка в знаменнику, зменшення на -60дБ/дек
% тобто (Tc5+1)*(Tc5+1)*(Tc5+1) або (Tc5.^2+2*Tc5+1)*(Tc5+1)

% Комбінуючи та об'єднуючи ланки корекції, послідовний корегуючий пристрій
% можна представити у вигляді трьох передавальних функцій wk1, wk2, wk3
wk1=tf([Tc2 1],[Tc1 1])
wk2=tf([Tc3.^2 2*ksi*Tc3 1],[Tc5.^2 2*Tc5 1])
wk3=tf([Tc4 1],[Tc5 1])
Wk=wk1*wk2*wk3*W1*W2*W3 % передавальна функція скорегованої розімкнутої
% системи
figure(18)
bode(Wk) % Побудова L(log10(w)) та fi(log10(w)) для визначення запасу по
% фазі в скорегованій розімкнутій системі
grid on

```