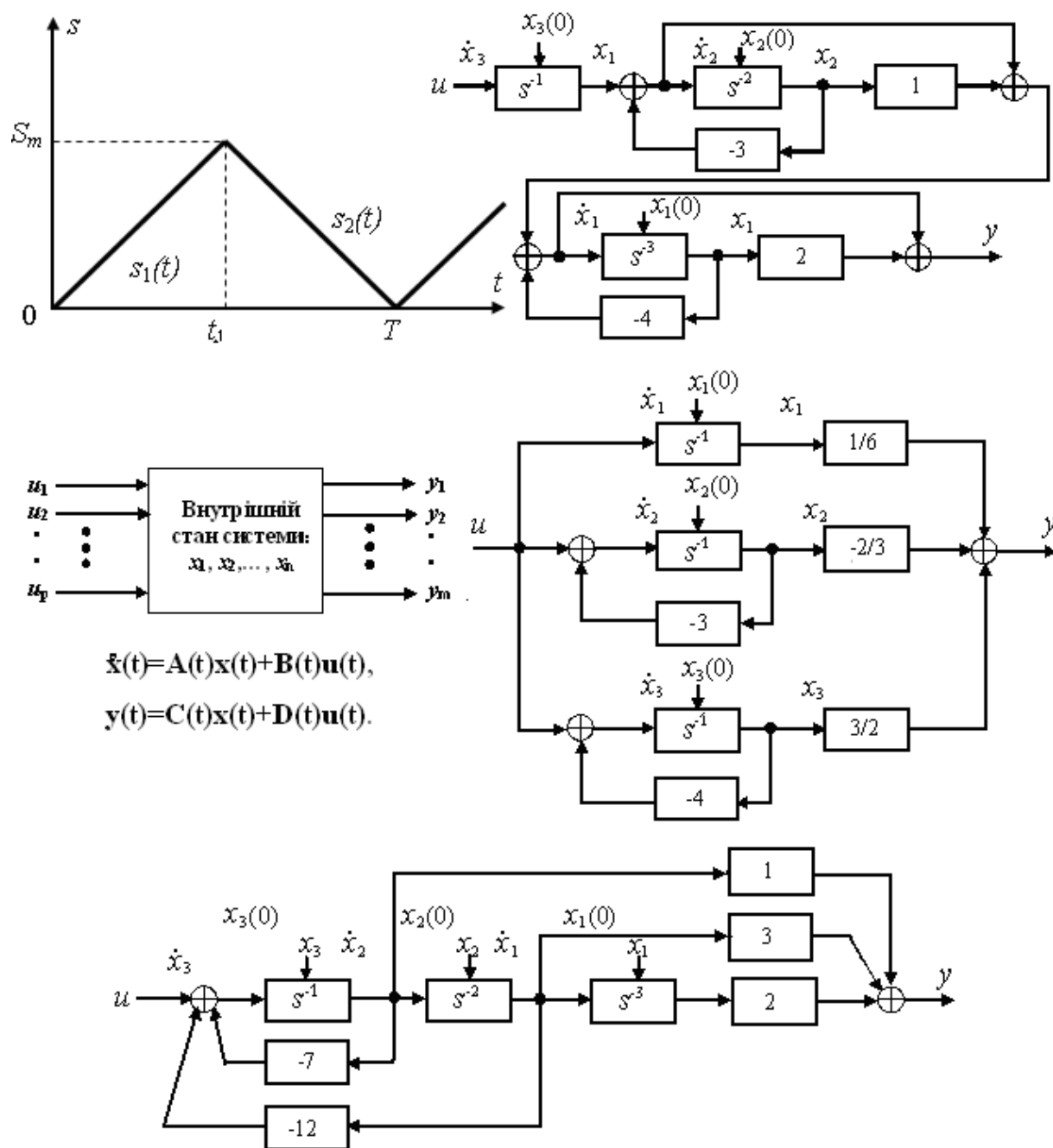


СИГНАЛИ ТА ПРОЦЕСИ У РАДІОТЕХНІЦІ

Методика та правила виконання курсової роботи



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

СИГНАЛИ ТА ПРОЦЕСИ У РАДІОТЕХНІЦІ

**Методика та правила виконання
курсової роботи**

Навчальний посібник

Вінниця
ВНТУ
2009

УДК 621.3.011.7:391
В 21

Автори:

Воловик Ю. М., Семенов А. О., Коваль К. О., Семенова О. О.

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол №2 від 25.09.2008 р.)

Рецензенти:

В. С. Осадчук, доктор технічних наук, професор

В. Ю. Кучерук, доктор технічних наук, професор

В. П. Манойлов, доктор технічних наук, професор

Сигнали та процеси у радіотехніці. Методика та правила виконання курсової роботи: навчальний посібник / [Воловик Ю. М., Семенов А. О., Коваль К. О., Семенова О. О.] – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 67 с.

У навчальному посібнику наведені правила та методика виконання курсової роботи для різних варіантів завдань комплексного аналізу лінійних кіл при дії на вході сигналів складної форми. Робота передбачає спектральний аналіз періодичних і неперіодичних сигналів, використання перетворення Лапласа та методу простору станів для визначення вихідного сигналу. Теоретичний матеріал посібника викладений з максимальним наближенням до структури курсової роботи і містить у собі детальні пояснення. Посібник призначений для студентів бакалаврського напрямку “Радіотехніка” усіх форм навчання і може бути корисним для студентів суміжних спеціальностей.

УДК 621.3.011.7:391

ЗМІСТ

Вступ.....	6
1 Організація та контроль курсового проектування.....	7
Мета та задачі курсового проектування.....	7
Тематика курсового проектування.....	7
1.3 Структура, зміст та об'єм курсової роботи.....	8
1.3.1 Структура курсової роботи.....	8
1.3.2 Титульний аркуш.....	8
1.3.3 Індивідуальне завдання.....	8
1.3.4 Реферат.....	11
1.3.5 Зміст.....	11
1.3.6 Вступ.....	13
1.3.7 Основна частина.....	13
1.3.7.1 Загальні вимоги до основної частини пояснювальної за- пiski.....	13
1.4 Вимоги до оформлення основної частини.....	14
1.4.1 Вимоги до оформлення розділів та підрозділів.....	15
1.4.2 Правила написання тексту.....	16
1.4.3 Оформлення формул.....	17
1.4.4 Оформлення ілюстрацій.....	18
1.4.5 Оформлення таблиць.....	20
1.5 Висновки.....	22
1.6 Перелік літературних джерел.....	22
1.7 Додатки.....	24
1.8 Контрольні заходи та питання документообігу.....	24
2 Класичні методи аналізу динамічних властивостей лінійних кіл, при- строїв та систем.....	26
2.1 Метод контурних струмів.....	26
2.2 Метод вузлових потенціалів.....	27
2.3 Метод еквівалентного генератора.....	27
2.3.1 Теорема про еквівалентне джерело напруги.....	28
2.3.2 Теорема про еквівалентне джерело струму.....	29
2.4 А- та Y- параметри чотирьохполюсника.....	30
2.5 Комплексний коефіцієнт передачі за напругою, АЧХ і ФЧХ електричного кола.....	32
2.6 Спектральний аналіз сигналів.....	33
2.6.1 Спектральний аналіз періодичних сигналів.....	33
2.6.2 Спектральний аналіз неперіодичних сигналів.....	35
2.6.2.1 Спектральний аналіз на основі прямого перетворення Фур'є.....	35
2.6.2.2 Спектральний аналіз на основі перетворення Лапласа..	36
2.7 Перехідна характеристика.....	37

2.8	Методи дослідження передачі сигналів лінійними електричними колами	42
2.8.1	Спектральний метод	42
2.8.2	Операторний метод	43
2.8.3	Часовий метод.....	45
3	Сучасні методи аналізу динамічних властивостей лінійних кіл, пристроїв та систем.....	48
3.1	Поняття простору станів.....	48
3.2	Опис стаціонарного динамічного кола, пристрою або системи рівняннями стану у неперервному часі	49
3.2.1	Метод прямого програмування	50
3.2.2	Метод паралельного програмування.....	52
3.2.3	Метод послідовного програмування.....	53
3.3	Визначення перехідної матриці стану.....	55
3.4	Еквівалентне подання лінійної динамічної системи у дискретному часі.....	56
3.5	Дослідження динамічних властивостей лінійної системи методом простору станів.....	57
3.5.1	Розрахунок вільного руху з ненульовими початковими умовами	57
3.5.2	Розрахунок реакції динамічної системи на одиничний імпульс.....	57
3.5.3	Розрахунок реакції динамічної системи на одиничний стрибок	58
4	Моделювання динамічних властивостей лінійних кіл, пристроїв та систем у середовищі Electronics Workbench 5.12	59
4.1	Методика моделювання	59
4.2	Моделювання імпульсної характеристики схеми корекції.....	62
4.3	Моделювання перехідної характеристики коректувальної схеми	63
4.4	Моделювання частотних характеристик коректувальної схеми.....	63
4.5	Моделювання реакції коректувальної схеми на складну вхідну дію.....	64
	Список літератури.....	65
	Глосарій.....	66

ВСТУП

Виконання курсової роботи є важливим етапом вивчення дисципліни, на якому студент мусить показати, як він засвоїв теоретичний матеріал і чи здатний застосувати його на практиці.

Курсова робота передбачає виконання комплексного завдання, у якому студент всебічно розраховує розгалужене електричне коло, пристрій або систему заданої структури з використанням найбільш вживаних методів аналізу при дії елементарних сигналів. Значний обсяг роботи складає спектральний аналіз складних періодичних та неперіодичних сигналів.

Завершальним етапом роботи є аналіз проходження через задане коло, пристрій або систему складного неперіодичного сигналу як класичними методами аналізу (операторним, спектральним та часовим), так і методами сучасної теорії систем (метод простору станів). Результати розрахунків контролюються шляхом моделювання частотних та перехідних характеристик за допомогою пакету моделювальних програм Electronics Workbench (V.5.12).

Окремі завдання роботи, хоч і взаємопов'язані, але викладені так, що студент може зразу виконувати більшу їх частину незалежно, оскільки передбачається, що відповідний теоретичний матеріал вивчався у попередньому триместрі. Незважаючи на це, теоретичні положення посібника викладені досить детально і доступно.

Матеріал посібника також можна використовувати для підготовки до практичних, лабораторних занять та окремих розділів дисципліни “Сигнали та процеси у радіотехніці”.

1 ОРГАНІЗАЦІЯ ТА КОНТРОЛЬ КУРСОВОГО ПРОЕКТУВАННЯ

1.1 Мета та задачі курсового проектування

Курсове проектування це є перш за все індивідуальна, самостійна, творча робота студента, у процесі якої він повинен навчитись знаходити адекватні методи вирішення інженерних задач, користуючись сучасною спеціальною науково-технічною літературою, опанувати відповідні засоби вимірювальної та обчислювальної техніки.

Метою курсового проектування є :

- поглиблення та закріплення теоретичних знань про сучасні методи аналізу сигналів та процесів у радіотехнічних колах пристроях та системах;
- придбання навичок використання персональних ЕОМ у системах інженерних розрахунків та системах автоматизованого проектування.

Зміст курсових робіт передбачає знання студентами основ фундаментальних дисциплін “Вища математика”, “Фізика”, “Основи теорії електричних кіл” та однієї з мов програмування високого рівня, наприклад, Turbo Pascal 7.0. Окрім того, при виконанні курсової роботи бажано проглядати реферативні журнали та періодичні видання, особливо корисно для розширення кругозору читання статей та журналів оглядового характеру.

1.2 Тематика курсового проектування

Дисципліна “Сигнали та процеси у радіотехніці” передбачає досить широку тематику для курсового проектування і може містити у собі, наприклад:

- 1) опис заданого електричного кола, пристрою або системи та розрахунок їх динамічних характеристик з врахуванням конкретного цільового призначення;
- 2) розробка або модернізація лабораторної роботи з проведенням експериментальних досліджень, складання опису та методики проведення досліджень;
- 3) тематичні огляди, реферати, переклади з зарубіжних періодичних видань, матеріалів конференцій, симпозіумів, конгресів тощо;
- 4) розробка певних математичних та програмних аспектів моделювання сигналів та процесів у радіотехнічних колах та пристроях.

Структура, зміст та об'єм курсової роботи

1.3.1 Структура курсової роботи

Курсова робота повинна містити такі частини:

- титульний лист;
- індивідуальне завдання;
- реферат;
- зміст;
- вступ;
- основна частина;
- висновки;
- список літератури;
- додатки.

1.3.2 Титульний аркуш

Титульний аркуш є першою сторінкою курсової роботи, яка не нумерується. Згідно з діючим стандартом на текстову документацію (ГОСТ 2.105-95, ДСТУ 3008-95) титульний аркуш для курсової роботи виконується без рамки за встановленим зразком, який наводиться нижче. Підписи керівника та студента із зазначенням термінів розробки та захисту обов'язкові.

Також на титульному аркуші після захисту курсової роботи має бути виставлена оцінка за п'ятибальною шкалою з підписами двох викладачів, що входять до складу комісії. Робота, яка подана у вигляді ксероксу, до захисту не приймається, у випадку прийому такої роботи відповідальність несуть обидва викладачі, що складають комісію з захисту.

1.3.3 Індивідуальне завдання

Конкретний зміст кожної курсової роботи та етапи її виконання визначає керівник на підставі індивідуального завдання, затвердженого завідувачем відповідної кафедри. Попередньо керівник видає індивідуальне завдання до курсової роботи, вказуючи номер варіанта. Індивідуальне завдання в перелік змісту не вноситься та має бути другою сторінкою після титульного аркуша. Зразок індивідуального завдання до курсової роботи наведено далі за текстом.

Керівник роботи пропонує зміст пояснювальної записки, як правило, у розроблених методичних вказівках. У навчальних цілях зміст може зазначатися в індивідуальному завданні на курсову роботу.

Зразок титульного аркуша курсової роботи

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Інститут радіотехніки, зв'язку та приладобудування
Факультет радіотехніки та телекомунікацій

Кафедра радіотехніки

АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ У ЛІНІЙНИХ ДИНАМІЧНИХ КОЛАХ, ПРИСТРОЯХ ТА СИСТЕМАХ

Пояснювальна записка
з дисципліни “Сигнали та процеси у радіотехніці”
до курсової роботи за спеціальністю
6.050901 - “Радіотехніка”
08-36.СПвРТ.0XX.00.000 ПЗ

Керівник курсової роботи
к.т.н., доц. Воловик Ю. М.

(підпис)
” ____ ” ____ 20__ р.

Розробив студент гр. _____

(підпис, прізвище та ініціали)
” ____ ” ____ 20__ р.

Вінниця ВНТУ 20__

Зразок оформлення індивідуального завдання курсової роботи

Міністерство освіти та науки України
Вінницький національний технічний університет
Інститут радіотехніки, зв'язку та приладобудування
Факультет радіотехніки та телекомунікацій

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри РТ
д.т.н., проф. Осадчук О. В.

_____ (підпис)
“ ____ ” _____ 20__ р.

ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

на курсову роботу з дисципліни
“Сигнали та процеси в радіотехніці”

Студенту гр. РТ-ХХ Іванову А. А. пропонується методами перетворення Фур'є – Лапласа та простору станів провести аналіз динаміки процесів у лінійному колі, яке має задану електричну схему:

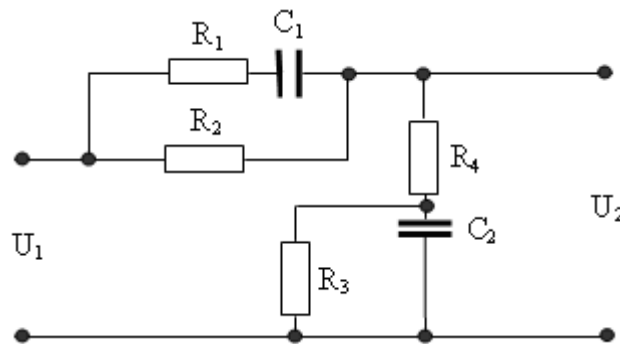


Рисунок 1 – Схема електричного кола

Інтервал дискретизації прийняти рівним $T=0,1$ с, а елементи кола мають такі значення: $R_1 = 1$ кОм; $R_2 = 2$ кОм; $R_3 = 3$ кОм; $R_4 = 4$ кОм; $C_1 = 1$ мкФ; $C_2 = 2$ мкФ.

Дата видачі „____” _____ 200__ р. Керівник _____
(підпис керівника)

Дата захисту „____” _____ 200__ р. Завдання отримав _____
(підпис студента)

Залежно від специфіки дисципліни (здебільшого електронного спрямування) керівник курсової роботи може пропонувати тему, яка підлягає конкретному обґрунтуванню та розробці індивідуального завдання в подальшому. Індивідуальне завдання до курсової роботи має містити терміни видачі та захисту, а також підписи керівника та студента.

1.3.4 Реферат

Реферат призначений для ознайомлення з текстовим документом курсової роботи. Він має бути стислим, інформативним і містити відомості, які характеризують виконану роботу. Реферат слід розміщувати безпосередньо за аркушем індивідуального завдання, починаючи з нової сторінки (другої), нумерація якої не зазначається.

Зразок оформлення реферату

РЕФЕРАТ

Методами перетворення Фур'є - Лапласа та простору станів проаналізовано динамічні властивості мостової лінійної схеми згідно з поставленим технічним завданням. Зроблено висновки відносно стійкості вказаної схеми на основі аналізу вигляду годографа, амплітудно- та фазочастотних характеристик, перехідної та імпульсної реакцій. Іл. _____. Бібл. _____

1.3.5 Зміст

Зміст розташовують безпосередньо після анотації, починаючи з нової сторінки. До змісту включають: перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів; вступ; послідовно перелічені назви всіх розділів, підрозділів, пунктів і підпунктів (якщо вони мають заголовки) суті роботи; висновки; рекомендації; перелік посилань; назви додатків і номери сторінок, які містять початок матеріалу. У змісті можуть бути перелічені номери й назви ілюстрацій та таблиць з зазначенням сторінок, на яких вони вміщені.

Зміст за нумерацією пояснювальної записки є третьою сторінкою. Назви заголовків змісту повинні однозначно відповідати назвам заголовків пояснювальної записки за текстом. Нумерація сторінок повинна бути наскрізною.

Приклад оформлення змісту курсової роботи

ЗМІСТ

Вступ.....	
1 Аналіз процесів у динамічних колах, пристроях та системах методами перетворень Фур'є-Лапласа.....	ме-
1.1 Обчислення передаточної функції заданої схеми.....	
1.2 Визначення нулів та полюсів передаточної функції.....	
1.3 Визначення та побудова годографа досліджуваного динамічного кола.....	
1.4 Визначення та побудова амплітудно-частотної і фазочастотної характеристик.....	
1.5 Побудова логарифмічної АЧХ.....	
1.6 Розрахунок перехідної характеристики.....	
1.7 Розрахунок імпульсної характеристики.....	
1.8 Розрахунок реакції на складну вхідну дію.....	
2 Аналіз процесів у динамічних колах, пристроях, системах методом простору станів.....	
2.1 Поняття простору станів.....	
2.2 Опис стаціонарної динамічної системи рівняннями стану у неперервному часі.....	
2.3 Визначення перехідної матриці стану.....	
2.4 Еквівалентне зображення лінійної неперервної системи у дискретному часі.....	
2.5 Дослідження динамічних властивостей лінійного кола методом простору станів.....	
2.5.1 Розрахунок вільного руху з ненульовими початковими умовами.....	
2.5.2 Розрахунок реакції динамічної системи на одиничний імпульс.....	
2.5.3 Розрахунок реакції динамічного кола на одиничний стрибок.....	
2.5.4 Розрахунок реакції на складну вхідну дію.....	
3 Аналіз процесів у динамічних колах, пристроях, системах методом математичного моделювання.....	
3.1 Методика моделювання.....	
3.2 Моделювання імпульсної характеристики заданої схеми.....	
3.3 Моделювання перехідної характеристики.....	

заданої схеми.....	
3.4 Моделювання частотних характеристик заданої схеми.....	
3.5 Моделювання реакції на складну вхідну дію.....	
Висновки.....	
Література.....	
Додаток А.....	

1.3.6 Вступ

Вступ пишуть з нової пронумерованої сторінки з заголовком “ВСТУП” посередині (ДСТУ 3008-95 - для КР) великими буквами з більш високою насиченістю (жирністю) шрифту. Текст вступу повинен бути коротким і висвітлювати питання актуальності, значення, сучасний рівень і призначення курсової роботи. У вступі і далі за текстом не дозволяється використовувати скорочені слова, терміни, крім загальноприйнятих.

Вступ висвітлює:

- стан розвитку проблеми в даній галузі, до якої має відношення розробка;
- галузь використання та призначення;
- мету та загальну постановку задачі;
- актуальність, яка повинна подаватись в останньому абзаці вступу, з метою стислого викладення суті розробки цього напрямку.

Кількість сторінок вступу не повинна перевищувати 1 – 2-х сторінок.

1.3.7 Основна частина

1.3.7.1 Загальні вимоги до основної частини пояснювальної записки

Обсяг пояснювальної записки, як правило, встановлюється в межах годин, передбачуваних для вивчення дисципліни, і разом з теоретичною частиною не повинен перевищувати 30-35 сторінок для курсової роботи.

У основній частині пояснювальної записки до КР викладаються проектні та перевірні розрахунки об’єкта дослідження. Для курсових робіт, які пов’язана з математичним моделюванням та теоретичними дослідженнями, теоретично-розрахункова може складати 60% обсягу аркушів пояснювальної записки.

Розрахункова частина має бути логічно пов’язана з теоретичними відомостями теми роботи, демонструватись ілюстративним матеріалом (графіками, схемами, діаграмами) або таблицями з обов’язковим посиланням на ці рисунки (таблиці) за текстом пояснювальної записки.

При викладенні тексту пояснювальної записки не допускається переписування матеріалів літературних джерел, сканування рисунків, які мають відношення до технічної частини. Частину описового змісту або розрахунків (таблиць), графічної інформації бажано розміщувати в додатках пояснювальної записки. За текстом пояснювальної записки повинні бути посилання на рисунки, таблиці, додатки, що входять до змісту роботи.

Графічна частина роботи може подаватись як інформація за текстом пояснювальної записки або додатків, що чітко визначаються керівником проекту в індивідуальному завданні.

Якщо при проектуванні об'єкта виникає потреба у машинному моделюванні, то ця частина повинна отримувати детальне обґрунтування та аналіз отриманих результатів.

При виконанні текстової та графічної частини роботи рекомендується надавати перевагу машинному друку або використанню програмного продукту. Розрахунки, які входять до пояснювальної записки, рекомендується виконувати за допомогою ліцензованих комп'ютерних програм, наприклад, Pascal, Electronics Workbench, Компас і подібні. Також можна використовувати програмні матеріали, які розроблені кафедрами відповідних інститутів.

Слід вказувати назву програмного продукту, який використовується у роботі та намагатись забезпечити повне розуміння його використання з метою щоб графічні позначення не вступали в протиріччя з діючими стандартами.

1.4 Вимоги до оформлення основної частини

При оформленні текстової частини курсової роботи необхідно дотримуватись вимог міждержавного стандарту. Описова частина пояснювальної записки для курсової роботи виконується на стандартних аркушах паперу формату А4 без рамок із нумерацією сторінок в правому верхньому кутку. Текст пояснювальної записки виконується згідно з вимогами ДСТУ 3008-95 із застосуванням друкувальних та графічних пристроїв виводу ЕОМ розміром не менше 2,5 мм (Word – 14 пт.), через один інтервал (ГОСТ 2.004-88). Допускається текст оформляти машинописним (друкарським) чітким шрифтом (1,5-2 інтервали) або рукописним основним креслярським шрифтом за ГОСТ 2.304-81 з висотою букв та цифр не менше 2,5 мм.

Пояснювальна записка відноситься до текстових документів і викладається технічною мовою. Графічна інформація має подаватись у вигляді ілюстрацій (схеми, графіки, діаграми тощо). Цифрова – у вигляді таблиць.

1.4.1 Вимоги до оформлення розділів та підрозділів

Структурними елементами основної частини є розділи, підрозділи, пункти, підпункти, переліки та примітки.

Розділ – головний ступінь поділу тексту, позначений номером і має заголовок. Заголовок розділу записують по середині рядка (ДСТУ 3008-95) або з абзацу (ГОСТ 2.105-95) великими буквами з більш високою насиченістю. Заголовки розділів, підрозділів, пунктів та підпунктів (при наявності заголовка) записують з абзацу малими буквами починаючи з великої. Розділи нумерують порядковими номерами в межах всього документа (1, 2 і т.д.). Після номера крапку не ставлять, а пропускають один знак (ДСТУ 3008-95).

2 АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ У ДИНАМІЧНИХ КОЛАХ, ПРИСТРОЯХ ТА СИСТЕМАХ МЕТОДАМИ ПЕРЕТВОРЕНЬ ФУР'Є - ЛАПЛАСА

Підрозділ - частина розділу, позначена номером і має заголовок. Підрозділи нумерують в межах кожного розділу, пункти в межах підрозділу і т.д. за формою (1.1, 1.2, 3.2.1, 3.2.2, 3.2.2.1 і т.д.). Цифри, які вказують номер, не повинні виступати за абзац. Посилання в тексті на розділи виконується за формою: "...наведено в розділі 3".

Пункт – частина розділу чи підрозділу, позначена номером і може мати заголовок. Підпункт – частина пункту, позначена номером і може мати заголовок. Заголовки структурних елементів необхідно нумерувати тільки арабськими цифрами. Допускається розміщувати текст між заголовками розділу і підрозділу, між заголовками підрозділу і пункту.

Заголовки підрозділів, пунктів та підпунктів (при наявності заголовка) записують з абзацу малими буквами починаючи з великої. Наприклад:

1.1 Обчислення передаточної функції заданої схеми

1.2 Визначення нулів та полюсів передаточної функції

У тексті документа може наводитись перелік, який рекомендується виділяти дефісом перед текстом або нумерувати малими буквами українського алфавіту з дужкою. Для подальшої деталізації переліку використовують арабські цифри з дужкою. Кожну частину переліку записують з абзацу і закінчують крапкою з комою, у кінці останньої частини ставлять крапку. Наприклад:

Вступ висвітлює:

- стан розвитку проблеми в галузі, до якої має відношення розробка;

- 1) галузь використання;
 - 1.2) призначення;
- мету та загальну постановку задачі;
 - актуальність, яка повинна подаватись останнім абзацом вступу, з метою стислого викладання суті розробки цього напрямку.

Одна примітка не нумерується і після слова “Примітка” ставиться тире (ГОСТ 2.105-95). Текст примітки починають в цьому ж рядку. Продовжують без абзацу. Якщо приміток кілька, то після слова “Примітки” нічого не ставлять, а записують кожен примітку з абзацу, нумеруючи за порядком арабськими числами. Після номера крапку не ставлять. Примітку починають з великої букви. Продовжують текст примітки без абзацу. Після кожної примітки ставлять крапку. Наприклад:

Примітка - Текст приміток дозволяється друкувати через один інтервал.

1.4.2 Правила написання тексту

При написанні тексту слід дотримуватися таких правил:

- а) текст необхідно викладати в лаконічному технічному стилі;
- б) умовні буквені позначення фізичних величин і умовні графічні позначення компонентів повинні відповідати установленим в стандартах; перед буквеним позначенням фізичної величини повинно бути її пояснення (резистор R, конденсатор C);
- в) числа з розмірністю слід записувати цифрами, а без розмірності – словами (відстань – 2 мм, відміряти три рази);
- г) позначення одиниць слід писати в рядок з числовим значенням без перенесення на наступний рядок. Між останньою цифрою числа і позначенням одиниці слід робити пропуск (100 Вт, 2 А);
- д) якщо наводиться ряд числових значень однієї і тієї ж фізичної величини, то одиницю фізичної величини вказують тільки після останнього числового значення (1,5; 1,75; 2 мм);
- е) позначення величин з граничними відхиленнями слід записувати так: 100 ± 5 мм;
- ж) буквені позначення одиниць, які входять в добуток, розділяють крапкою на середній лінії (·); знак ділення замінюють косою рисою (/);
- и) порядкові числівники слід записувати цифрами з відмінковими закінченнями (9-й день, 4-а лінія); при кількох порядкових числівниках відмінкове закінчення записують після останнього (3,4,5-й графіки); кількісні числівники записують без відмінкових закінчень (на 20 аркушах); не пишуть закінчення в датах (21 жовтня) та при римських числах (XXI століття);

к) скорочення слів в тексті не допускаються, крім загальноприйнятих в українській мові і установлених в стандарті ГОСТ 2.316-68, а також скорочень, які прийняті для надписів на виробі (в тексті вони повинні бути виділені великим шрифтом: ON, OFF), а якщо надпис складається з цифр або знаків, то в лапках. Лапками також виділяють найменування команд, режимів, сигналів (“Запуск”);

л) дозволяється виконувати записи математичних виразів за формою:

$$\frac{ABC}{DE} = ABC / DE ;$$

знак множення “×” замінювати зірочкою “*”;
 $\sqrt{z} = z^{**} 1/2 = z^{**} 0,5$;

$$2^{-3} = 2^{**} - 3 ;$$

$$A_1 = A1 = A(1);$$

$$\pm 20^{\circ}\text{C} = \pm 20^{\circ}\text{C} = \pm 20 \text{ ЦЕЛ};$$

$$200 = 200 (+20; -30);$$

м) не дозволяється:

- допускати професійних або місцевих слів і виразів (техніцизмів);
- після назви місяця писати слово “місяць” (не “в травні місяці”, а “в травні”);

- використовувати вирази: “цього року”, “минулого року”, слід писати конкретну дату “у червні 2001 року”;

- використовувати позначення одиниць фізичних величин без цифр, необхідно писати повністю: “кілька кілограмів” (за виключенням оформлення таблиць і формул);

- з'єднувати текст з умовним позначенням фізичних величин за допомогою математичних знаків (не “швидкість = 5 км/год”, а “швидкість дорівнює 5 км/год”, не “температура дорівнює - 5° С”, а “температура дорівнює мінус 5°С”);

- використовувати математичні знаки <, >, 0, №, %, sin, cos, tg, log та ін. без цифрових або буквених позначень. В тексті слід писати словами “нуль”, “номер”, “логарифм” і т.д.;

- використовувати індекси стандартів (ДСТУ, СТП) без реєстраційного номера.

1.4.3 Оформлення формул

Кожну формулу записують з нового рядка, симетрично до тексту. Між формулою і текстом пропускають один рядок.

Умовні буквені позначення (символи) в формулі повинні відповідати установленим у міждержавному стандарті ГОСТ 1494-77. Їх пояснення наводять в тексті або зразу ж під формулою. Для цього після формули ставлять кому і записують пояснення до кожного символа з нового рядка в тій послідовності, в якій вони наведені у формулі, розділяючи крапкою з ко-

мою. Перший рядок повинен починатися з абзацу зі слова “де” і без будь-якого знака після нього. Усі формули нумерують в межах розділу арабськими числами. Номер вказують в круглих дужках з правої сторони, в кінці рядка, на рівні закінчення формули. Номер формули складається з номера розділу і порядкового номера формули в розділі, розділених крапкою. Дозволяється виконувати нумерацію в межах всього документа.

Приклад:

Таким чином, момент тертя в кернових опорах

$$M_T = - k G^{1,5}, \quad (5.1)$$

де k – коефіцієнт пропорційності;

G – вага рухомої частини вимірювального механізму.

Одиницю виміру, при необхідності, беруть в квадратні дужки

$$I = \frac{U}{R} [A]. \quad (5.2)$$

Числову підстановку і розрахунок виконують з нового рядка не нумеруючи. Одиницю виміру заключають в круглі дужки. Наприклад:

$$I = \frac{220}{100} = 2,2 (A).$$

Розмірність одного й того ж параметра в межах документа повинна бути однаковою.

Якщо формула велика, то її можна переносити в наступні рядки. Перенесення виконують тільки математичними знаками, повторюючи знак на початку наступного рядка. При цьому знак множення “ $\cdot$ ” замінюють знаком “ $\times$ ”. Формула є частиною речення, тому до неї застосовують такі ж правила граматики, як і до інших членів речення. Якщо формула знаходиться в кінці речення, то після неї ставлять крапку. Формули, які йдуть одна за другою і не розділені текстом, розділяють комою. Посилання на формули в тексті дають в круглих дужках за формою: “...в формулі (5.2)”;

“... в формулах (5.7, ..., 5.10)”.

1.4.4 Оформлення ілюстрацій

Для пояснення викладеного тексту рекомендується його ілюструвати графіками, кресленнями, фрагментами схем та ін., які можна виконувати чорною тушшю, простим олівцем середньої твердості та за допомогою комп’ютерної графіки.

Розміщують ілюстрації в тексті або в додатках.

В тексті ілюстрацію розміщують симетрично до тексту після першого посилання на неї або на наступній сторінці, якщо на даній вона не уміщується без повороту.

На всі ілюстрації в тексті ПЗ мають бути посилання. Посилання виконують за формою: "...показано на рисунку 3.1" або в дужках за текстом (рисунок 3.1), на частину ілюстрації: "...показані на рисунку 3.2, б". Посилання на раніше наведені ілюстрації дають зі скороченим словом "дивись" відповідно в дужках (див. рисунок 1.3).

Наведена форма запису (рисунок ...) відповідає вимогам ГОСТ2.105-95, ДСТУ 3008-95 допускає скорочення, тобто замість „Рисунок ...” – „Рис ...”.

Між ілюстрацією і текстом пропускають один рядок (3 інтервали).

Всі ілюстрації в ПЗ називають рисунками і позначають під ілюстрацією симетрично до неї за такою формою: "Рисунок 3.5 – Найменування рисунка". Крапку в кінці не ставлять, знак переносу не використовують. Якщо найменування рисунка довге, то його продовжують у наступному рядку починаючи від найменування.

Нумерують ілюстрації в межах розділів, вказуючи номер розділу і порядковий номер ілюстрації в розділі, розділяючи крапкою. Дозволяється нумерувати в межах всього документа.

Пояснюючі дані розміщують під ілюстрацією над її позначенням.

У випадку, коли ілюстрація складається з частин, їх позначають малими буквами українського алфавіту з дужкою (а), б), ...) під відповідною частиною. В такому випадку після найменування ілюстрації ставлять двокрапку і дають найменування кожної частини за формою:

а) – найменування першої частини; б) – найменування другої частини

або за ходом найменування ілюстрації, беручи букви в дужки:

Рисунок 3.2 – Структурна схема (а) і часові діаграми (б) роботи фазометра

Якщо частини ілюстрації не вміщуються на одній сторінці, то їх переносять на наступні сторінки. В цьому випадку, під початком ілюстрації вказують повне її позначення, а під її продовженнями позначають "Рисунок 3.2" (продовження). Пояснюючі дані розміщують під кожною частиною ілюстрації.

Якщо в тексті є посилання на складові частини зображеного засобу, то на відповідній ілюстрації вказують їх порядкові номери в межах ілюстрації. Якщо ілюстрація є фрагментом повної розробленої схеми, то для всіх компонентів вказують ті позиційні позначення, які вказані на схемі. Якщо ілюстраціями є фотографії, то останні повинні бути наклеєні на стандартні аркуші білого паперу і позначені як рисунки.

1.4.5 Оформлення таблиць

Таблицю розміщують симетрично до тексту після першого посилання на даній сторінці або на наступній, якщо на даній вона не уміщується і таким чином, щоб зручно було її розглядати без повороту або з поворотом на кут 90^0 за годинниковою стрілкою.

ГОСТ 2.105-95 та ДСТУ 3008-95 пропонують такий запис таблиці:

Таблиця _____ - _____

На всі таблиці мають бути посилання за формою: “наведено в таблиці 3.1”; “... в таблицях 3.1 – 3.5” або в дужках по тексту (таблиця 3.6). Посилання на раніше наведену таблицю дають з скороченим словом “дивись” (див. таблицю 2.4) за ходом чи в кінці речення.

Таблицю розділяють на графи (колонки) і рядки. В верхній частині розміщують головку таблиці, в якій вказують найменування граф. Діагональне ділення головки таблиці не допускається. Ліву графу (боковик) часто використовують для найменування рядків. Допускається не розділяти рядки горизонтальними лініями. Мінімальний розмір між основами рядків – 8 мм. Розміри таблиці визначаються об'ємом матеріалу.

Графу “№ п/п” в таблицю не включають. При необхідності нумерації, номери вказують в боковику таблиці перед найменуванням рядка.

Найменування граф може складатися з заголовків і підзаголовків, які записують в однині, симетрично до тексту графи малими буквами, починаючи з великої. Якщо підзаголовок складає одне речення з заголовком, то в цьому випадку його починають з малої букви. В кінці заголовків і підзаголовків граф таблиці крапку не ставлять. Дозволяється заголовки і підзаголовки граф таблиці виконувати через один інтервал.

Якщо всі параметри величин, які наведені в таблиці, мають одну й ту саму одиницю фізичної величини, то над таблицею розміщують її скорочене позначення (мм). Якщо ж параметри мають різні одиниці фізичних величин, то позначення одиниць записують в заголовках граф після коми (Довжина, мм).

Текст заголовків і підзаголовків граф може бути замінений буквеними позначеннями, якщо тільки вони пояснені в попередньому тексті чи на ілюстраціях (D – діаметр, H – висота і т.д.). Однакові буквені позначення групують послідовно в порядку зростання їх індексів, наприклад: (L1, L2, ...).

Найменування рядків записують в боковику таблиці у вигляді заголовків в називному відмінку однини, малими буквами, починаючи з великої і з однієї позиції. В кінці заголовків крапку не ставлять. Позначення одиниць фізичних величин вказують в заголовках після коми.

Для опису певного інтервалу значень в найменуваннях граф і рядків таблиці можна використовувати слова: “більше”, “менше”, “не більше”,

“не менше”, “в межах”. Ці слова розміщують після одиниці фізичної величини:

(Напруга, В, не більше),

а також використовують слова “від”, “більше”, “до”:

(Від 10 до 15; більше 15; до 20)

Дані, що наводяться в таблиці, можуть бути словесними і числовими.

Слова записують в графах з однієї позиції. Якщо рядки таблиці не розділені лініями, то текст, який повторюється і складається з одного слова дозволяється замінювати лапками (,). Якщо текст складається з двох і більше слів, то при першому повторенні його замінюють словами “те ж”, а далі лапками. При розділенні таблиці горизонтальними лініями – ніякої заміни не виконують.

Числа записують посередині графи так, щоб їх однакові розряди по всій графі були точно один під одним, за виключенням випадку, коли вказують інтервал. Інтервал вказують від меншого числа до більшого з тире між ними:

12 – 35

122 – 450.

Дробові числа наводять у вигляді десяткових дробів, з однаковою кількістю знаків після коми в одній графі. Розміри в дюймах можна записувати у вигляді: $1/2"$, $1/4"$, $1/8"$.

Ставити лапки замість цифр чи математичних символів, які повторюються, не можна. Якщо цифрові чи інші дані в таблиці не наводяться, то ставиться прочерк.

Таблиці нумерують в межах розділів і позначають зліва над таблицею за формою: “Таблиця 4.2 – Найменування таблиці”. Крапку в кінці не ставлять. Якщо найменування таблиці довге, то продовжують у наступному рядку починаючи від слова “Таблиця”. Номер таблиці складається з номера розділу і порядкового номера таблиці в розділі, розділених крапкою. Дозволяється нумерувати в межах всього документа.

Таблиця може бути великою як в горизонтальному, так і в вертикальному напрямках або іншими словами може мати велику кількість граф і рядків. В таких випадках таблицю розділяють на частини і переносять на інші сторінки або розміщують одну частину під іншою чи поряд.

Якщо частини таблиці розміщують поряд, то в кожній частині повторюють головку таблиці, а при розміщенні однієї частини під іншою – повторюють боковик.

Якщо в кінці сторінки таблиця переривається і її продовження буде на наступній сторінці, в першій частині таблиці нижню горизонтальну лінію, що обмежує таблицю, не проводять.

При перенесенні частин таблиці на інші сторінки, повторюють або продовжують найменування граф. Допускається виконувати нумерацію

граф на початку таблиці і при перенесенні частин таблиці на наступні сторінки повторювати тільки нумерацію граф.

У всіх випадках найменування (при його наявності) таблиці розміщують тільки над першою частиною, а над іншими частинами зліва пишуть “Продовження таблиці 4.2” без крапки в кінці.

Інші вимоги до виконання таблиць – відповідно до чинних стандартів на технічну документацію.

1.5 Висновки

Висновки оформлюють з нової пронумерованої сторінки з абзацу (ГОСТ 2.105-95) та посередині (ДСТУ 3008-95) великими буквами більш високої насиченості. Висновки є заключною частиною, підсумком прийнятого конструкторського рішення виконаного проекту із зазначенням досягнутих переваг об’єкта порівняно з існуючими аналогами, з можливими рекомендаціями прикладного застосування та шляхами (перспективами) удосконалення спроектованого об’єкта. За текстом пояснювальної записки бажано давати висновки в кожному розділі, що є постановкою задачі до наступного.

Зразок оформлення висновків

ВИСНОВКИ

Методами перетворення Фур’є - Лапласа та простору станів проаналізовані динамічні властивості мостової лінійної схеми відповідно до поставленого технічного завдання. Зроблено висновки відносно стійкості вказаної схеми на основі аналізу вигляду годографа, амплітудно- та фазо-частотних характеристик, перехідної та імпульсної реакцій.

1.6 Перелік літературних джерел

Форма запису “ЛІТЕРАТУРА” (“ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ”) відповідає формі запису вступу, основної частини та висновків. Містить перелік літературних джерел, на які повинні бути обов’язкові посилання в тексті пояснювальної записки. Література (книги, статті, патенти, журнали) в загальний список записується в порядку згадування їх в тексті. Форма запису джерела повинна відповідати ГОСТ 7.1-84 або ДСТУ 3582-97. Посилання на літературу наводять в квадратних дужках [...], вказуючи порядковий номер за списком.

В списку кожен літературний запис записують з абзацу, нумерують арабськими цифрами, починаючи з одиниці. Літературу записують мовою оригіналу.

Зразок оформлення переліку літературних джерел

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Коренівський Д. Г. Дестабілізуючий ефект параметричного білого шуму в неперервних та дискретних динамічних системах / Коренівський Д. Г. — К. : Ін-т математики, 2006. — 111 с. — (Математика та її застосування) (Праці / Ін-т математики НАН України ; т. 59).
2. Генераторы высоких и сверхвысоких частот: Учеб. пособие. / О. В. Алексеев, А. А. Головков, А. В. Митрофанов и др. — М.: Высш. шк., 2003. — 326 с.
3. Осадчук В. С. Генератори електричних коливань на основі транзисторних структур з від'ємним опором: монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, А. О. Семенов. — Вінниця: ВНТУ, 2009. — 184 с.
4. Справочник по импульсной технике / [Яковлев В. Н., Воскресенский В. В., Генис А. А. и др.]; под ред. В. Н. Яковлева. — К.: Техніка, 1973. — 712 с.
5. Семенов А. О. Электричні параметри широкодіапазонних генераторів НВЧ на основі транзисторних структур з від'ємним опором / А. О. Семенов // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції “Дні науки ‘2005”. — Том 36. Техніка. — Дніпропетровськ: Наука і освіта. — 2005. — С.56–57.
6. Семенов А. О. Дослідження оптично-керованого генератора на основі аналогу інжекційно-польового транзистора / А. О. Семенов // Вісник Хмельницького національного університету. — 2006. — №4 (83). Технічні науки. — С. 153–158.
7. Осадчук В. С. Оптично керований НВЧ генератор на основі НЕМТ-транзисторної структури / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, А. О. Семенов, К. О. Коваль // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — 2007. — №2 (14). — С. 215–221.
8. А. с. 1706002 СССР, МКИ Н 03 В 5/36. Кварцевый генератор / В. Г. Прокопенко (СССР). — Заявлено 07.07.89. Опубл. 15.01.92 г. — Бюл. №2. — 2 с.
9. Патент на корисну модель 16587 Україна, МКИ Н 03 В 7/00. Електрично керований генератор / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, А. О. Семенов, М. В. Кушнір (Україна). — №u200601788; Заявлено 20.02.2006; Опубл. 15.08.2006, Бюл. 8. — 3 с.
10. <http://www.nbu.gov.ua/articles/2003/03klinko.htm>.

1.7 Додатки

Додатки оформлюють як продовження документа на його наступних сторінках, розташовуючи в порядку посилань на них у тексті пояснювальної записки. Посилання на додатки в тексті дають за формою: “... наведено в додатку А”, “... наведено в таблиці В.5 ” або (додаток Б); (додатки К, Л).

Кожен додаток необхідно починати з нової сторінки, вказуючи зверху посередині рядка слово “Додаток” і через пропуск його позначення. Додатки позначають послідовно великими українськими буквами, за винятком букв Г, Є, З, І, Ї, Й, О, Ч, Ь, наприклад, Додаток А, Додаток Б і т.д. Якщо додатків більше ніж букв, то продовжують позначати арабськими цифрами. Дозволяється позначати додатки латинськими буквами, за винятком букв І і О. Під позначенням для обов’язкового додатка пишуть в дужках слово (обов’язковий), а для інформативного – (довідниковий).

Кожен додаток повинен мати тематичний (змістовний) заголовок, який записують посередині рядка малими буквами починаючи з великої. При наявності основного напису – заголовок записують у відповідній графі.

Ілюстрації, таблиці, формули нумерують в межах кожного додатка, вказуючи його позначення: “Рисунок Б.3 – Найменування”; “Таблиця В.5 – Найменування” і т.п.

Нумерація аркушів документа і додатків, які входять до його складу, повинна бути наскрізна. Усі додатки включають у зміст, вказуючи номер, заголовок і сторінки, з яких вони починаються.

В окремих дисциплінах електронного спрямування допускається принципові електричні, структурні, функціональні, монтажні схеми підшивати в записку як обов’язкові додатки. В цьому випадку перед схемою в записці розміщується окремий аркуш формату А4 з надписом в верхній частині посередині поля “Додаток Б” (обов’язковий), а в середній частині аркушу пишеться назва схеми .

1.8 Контрольні заходи та питання документообігу

Для поліпшення стану справ з курсовим проектуванням рекомендуються додаткові впливові фактори:

- зміни індивідуальних завдань КР за науковим напрямом (тематикою) обговорюються на засіданнях кафедри, а методичні питання КР дисциплін повинні регулярно обговорюватись на методичних семінарах;
- КР здаються в архів не пізніше другого дня від дати останнього захисту, згідно з затвердженим графіком разом з екзаменаційною відомістю, а курсові роботи, які захищаються за індивідуальним гра-

фіком, здаються в архів цього ж дня або на наступний день до 10 год разом з екзаменаційним направленням;

- стимули дострокового виконання, здобуття більш високого рейтингу в межах відведеного може пропонувати керівник роботи (проекту) з обговоренням пропозицій на засіданні кафедри;
- кожна кафедра профільного інституту повинна мати свою документацію (внутрішнього використання) з вимогами до викладання дисциплін, критеріїв оцінювання пояснювальної записки та захисту проєктів; дотримання та змін відповідних державних стандартів за фахом.

2 КЛАСИЧНІ МЕТОДИ АНАЛІЗУ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЛІНІЙНИХ КІЛ, ПРИСТРОЇВ ТА СИСТЕМ

2.1 Метод контурних струмів

Метод контурних струмів (mesh-current method) є одним з класичних методів, яким широко користуються на практиці для визначення динамічних рівнянь складних електричних кіл, у тому числі і комплексного коефіцієнта передачі. Цей метод полягає у тому, що замість струмів у гілках на підставі другого закону Кірхгофа визначаються умовні ”контурні струми”, що протікають в контурах.

Якщо припустити, що задане електричне коло має n незалежних контурів, то для нього система рівнянь, на підставі другого закону Кіргофа, матиме такий вигляд

$$\begin{aligned} j_1 \underline{Z}_{11} + j_2 \underline{Z}_{12} + \dots + j_n \underline{Z}_{1n} &= \dot{E}_{11}; \\ j_1 \underline{Z}_{21} + j_2 \underline{Z}_{22} + \dots + j_n \underline{Z}_{2n} &= \dot{E}_{22}; \\ &\dots\dots\dots \\ j_1 \underline{Z}_{n1} + j_2 \underline{Z}_{n2} + \dots + j_n \underline{Z}_{nn} &= \dot{E}_{nn}, \end{aligned} \quad (2.1)$$

де $j_1, j_2 \dots j_n$ – невідомі контурні струми;

$\dot{E}_{11}, \dot{E}_{22}, \dots \dot{E}_{nn}$ – контурні *електрорушійні сили* (electromotives forces) у контурах 1, 2... n , тобто алгебраїчна сума ЕРС, що діють в контурі;

$\underline{Z}_{11}, \underline{Z}_{22} \dots \underline{Z}_{nn}$ – власні опори контурів 1, 2... n ;

$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21}; \underline{Z}_{1n} = \underline{Z}_{nn}$ – спільний опір контурів: першого і другого, першого і n -го.

Щодо рівнянь (2.1) слід зробити такі зауваження:

- ЕРС, напрям яких збігається з напрямом контурного струму, беруться зі знаком плюс, а у іншому випадку - зі знаком мінус;
- у рівняннях (2.1) власні опори беруться завжди зі знаком плюс;
- якщо контурні струми в спільних опорах збігаються, то опори в рівняннях (2.1) входять зі знаком плюс, в іншому випадку – зі знаком мінус.

Кількість незалежних контурів визначається співвідношенням $n = p - q + 1$, де p - кількість гілок; q - кількість вузлів.

Рівняння (2.1) записані для випадку, коли джерелами енергії є джерела напруги. При наявності в електричній схемі джерел струму вони можуть бути замінені еквівалентними джерелами напруги. Якщо провідності джерел струму дорівнюють нулю, то доцільно вибирати струми цих джерел як контурні; тоді кількість невідомих контурних струмів і відповідно кількість рівнянь скоротиться на кількість відомих струмів (як правило, струми джерел струму задаються). Якщо задане електричне коло має пара-

лельні гілки, то потрібно замінити їх еквівалентним комплексним опором. Це зменшить кількість контурів і відповідно зменшить кількість рівнянь в системі (2.1).

2.2 Метод вузлових потенціалів

Метод вузлових потенціалів (node-voltage method) полягає у тому, що на підставі першого закону Кірхгофа визначаються комплексні потенціали вузлів електричного кола відносно деякого вузла, потенціал якого умовно беруть рівним нулю. Напруга на будь-якій гілці кола дорівнює різниці потенціалів вузлів, які ця гілка з'єднує. Струм у цій гілці дорівнює напрузі на ній, поділеній на її опір.

У загальному випадку, коли схема має n вузлів, на підставі першого закону Кірхгофа складається $m = n - 1$ рівнянь

$$\begin{aligned} & \dot{\phi}_1 \underline{Y}_{11} - \dot{\phi}_2 \underline{Y}_{12} - \dots - \dot{\phi}_m \underline{Y}_{1m} = j_{11}; \\ & -\dot{\phi}_1 \underline{Y}_{21} - \dot{\phi}_2 \underline{Y}_{22} - \dots - \dot{\phi}_m \underline{Y}_{2m} = j_{22}; \\ & \dots\dots\dots \\ & -\dot{\phi}_1 \underline{Y}_{m1} - \dot{\phi}_2 \underline{Y}_{m2} + \dots + \dot{\phi}_m \underline{Y}_{mm} = j_{mm} \end{aligned} \quad (2.2)$$

де $\dot{\phi}_1, \dot{\phi}_2, \dots, \dot{\phi}_m$ – комплексні потенціали першого, другого і m -го вузлів;

$\underline{Y}_{11}, \underline{Y}_{22} \dots \underline{Y}_{mm}$ – власні комплексні провідності першого, другого і m -го вузлів;

$\underline{Y}_{12} = \underline{Y}_{21}$; $\underline{Y}_{1m} = \underline{Y}_{m1}$ – провідності між першим і другим та між першим і m -им вузлами, відповідно;

$j_{11}, j_{22} \dots j_{mm}$ – діючі струми у першому, другому та m -му вузлі відповідно. Ці струми дорівнюють алгебраїчній сумі струмів джерел струму, які з'єднані з відповідним вузлом. Струми, направлені до вузла, беруться зі знаком плюс, а у іншому випадку – зі знаком мінус.

Рівняння (2.2) записані для кола, в якому є тільки джерела струму. Якщо в колі є джерела напруги, їх необхідно перетворити в еквівалентні джерела струму. При наявності однієї гілки з ЕРС і нескінченно великою провідністю доцільно взяти рівним нулю потенціал одного з вузлів, з яким з'єднана ця гілка. Тоді потенціал іншого вузла стає відомим і кількість невідомих потенціалів зменшується на один. Метод вузлових потенціалів має перевагу перед методом контурних струмів, якщо кількість рівнянь, складених за цим методом, буде меншою.

2.3 Метод еквівалентного генератора

Метод еквівалентного генератора (constant-generator method) базується на теоремі про еквівалентне джерело (equivalent source). Теорема про

еквівалентне джерело часто застосовується при аналізі електричних кіл. За допомогою цієї теореми складне електричне коло з довільною кількістю джерел електричної енергії приводиться до кола з одним джерелом, унаслідок чого розрахунок кола спрощується. Існують два варіанти теореми про еквівалентне джерело:

- варіант з джерелом напруги;
- варіант з джерелом струму.

2.3.1 Теорема про еквівалентне джерело напруги

Струм у будь-якій гілці mn лінійного електричного кола не зміниться, якщо електричне коло, з яким з'єднана ця гілка, замінити еквівалентним джерелом напруги; ЕРС цього джерела повинна дорівнювати напрузі між полюсами m і n розімкненої гілки mn , а внутрішній опір еквівалентного джерела повинен дорівнювати вхідному опору пасивного електричного кола зі сторони полюсів m і n при розімкненій гілці mn .

Реалізація методу еквівалентного генератора напруги (voltage generator) здійснюється за алгоритмом, проілюстрованим на рис. 2.1.

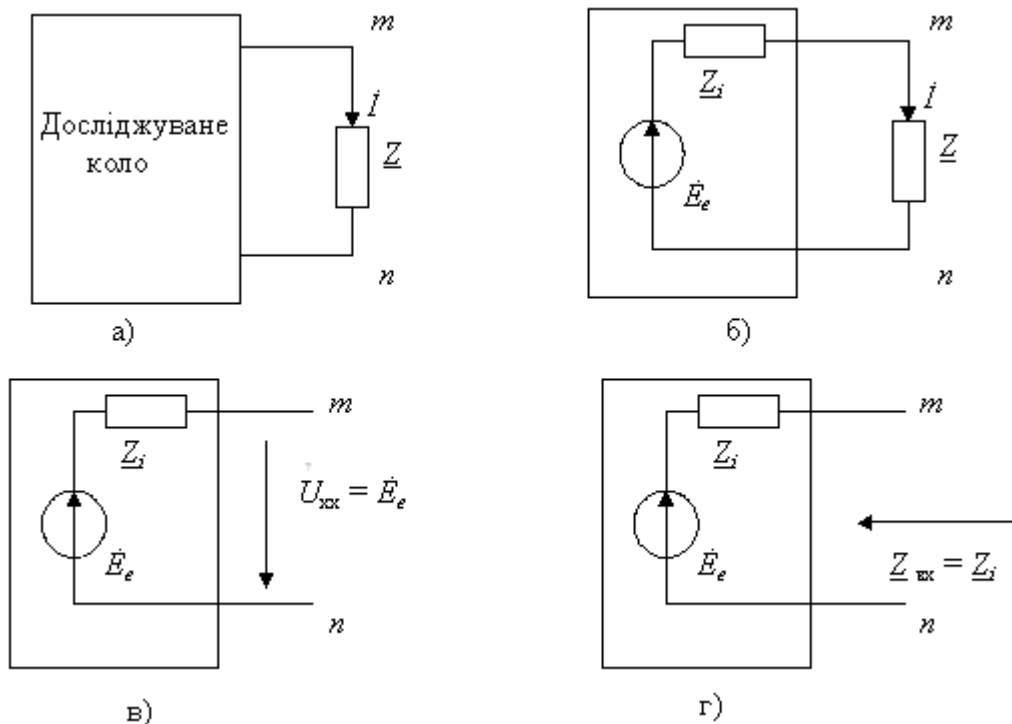


Рисунок 2.1 – Алгоритм реалізації методу еквівалентного генератора напруги

При знаходженні $\underline{Z}_i$ необхідно із досліджуваного електричного кола вилучити усі джерела енергії, залишивши їх внутрішні опори. Струм у досліджуваній гілці mn дорівнює $i = \frac{U_{xx}}{\underline{Z}_i + \underline{Z}}$.

2.3.2 Теорема про еквівалентне джерело струму

Струм у будь-якій гілці mn лінійного електричного кола не зміниться, якщо електричне коло, з яким з'єднана ця гілка, замінити еквівалентним джерелом струму; струм цього джерела повинен дорівнювати струму, що проходить між короткозамкненими полюсами m і n , а внутрішня провідність джерела повинна дорівнювати входній провідності пасивного електричного кола (без джерел енергії) зі сторони полюсів m і n при розімкненій гілці mn .

Реалізація методу еквівалентного джерела струму (current source) здійснюється за алгоритмом, проілюстрованим на рис. 2.2.

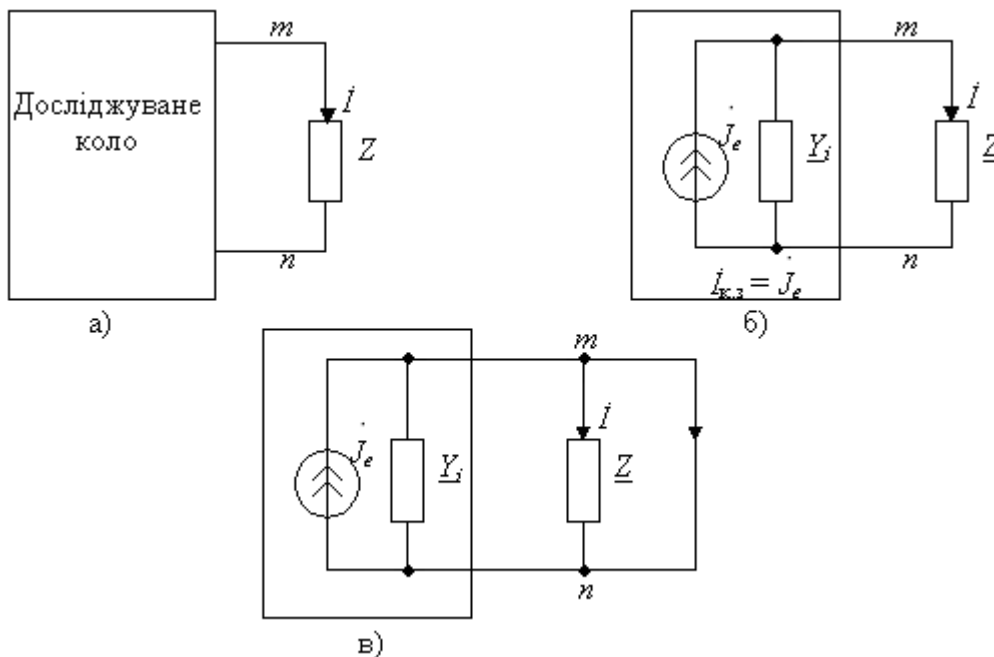


Рисунок 2.2 – Алгоритм реалізації методу еквівалентного генератора струму

Внутрішня провідність (intrinsic conduction) джерела струму дорівнює $\underline{Y}_i = \frac{1}{\underline{Z}_i}$. Внутрішній опір (intrinsic resistance) $\underline{Z}_i$ джерела напруги зна-

ходиться так, як і у попередньому випадку. Струм у досліджуваній гілці mn дорівнює $\dot{I} = \dot{I}_{кз} \frac{\underline{Y}}{\underline{Y}_i + \underline{Y}}$, де $\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}}$ – провідність гілки mn .

2.4 A - та Y - параметри чотириполюсника

Чотириполюсником (four-pole) називають частину електричного кола, що має дві пари полюсів, які можуть бути вхідними і вихідними (рис.2.7). Рівняння чотириполюсника у формі A параметрів

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{A}\dot{U}_2 + \dot{B}\dot{I}_2, \\ \dot{I}_1 &= \dot{C}\dot{U}_2 + \dot{D}\dot{I}_2. \end{aligned} \quad (2.3)$$

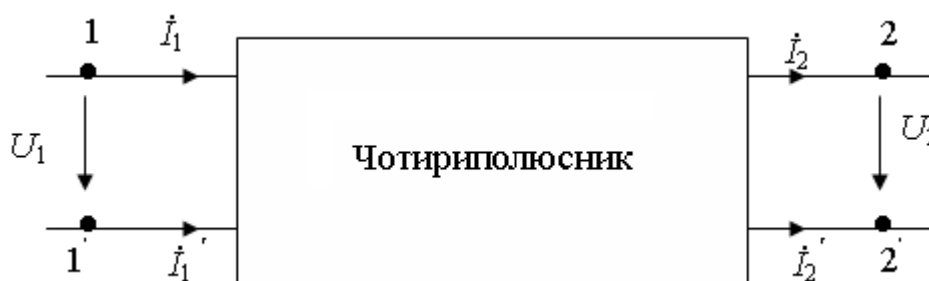


Рисунок 2.3 – Узагальнене зображення чотириполюсника

У рівняннях (2.3) коефіцієнти $\dot{A}, \dot{B}, \dot{C}$ і $\dot{D}$ називаються A – параметрами чотириполюсника (parameters of four-pole). Комплексні коефіцієнти (complex coefficient) $\dot{A}$ і $\dot{D}$ є безрозмірними величинами. Комплексний коефіцієнт $\dot{B}$ вимірюється в омах, комплексний коефіцієнт $\dot{C}$ – в сименсах. A – параметри чотириполюсника знаходять з дослідів холостого ходу (хх) і короткого замикання (кз):

- дослід холостого ходу ($\dot{I}_2 = 0$). З рівнянь (2.3) знаходимо

$$\dot{A} = \frac{\dot{U}_{1xx}}{\dot{U}_{2xx}}; \quad \dot{C} = \frac{\dot{I}_{1xx}}{\dot{U}_{2xx}}; \quad (2.4)$$

- дослід короткого замикання ($\dot{U}_2 = 0$)

$$\dot{B} = \frac{\dot{U}_{1kз}}{\dot{I}_{2kз}}, \quad \dot{D} = \frac{\dot{I}_{1kз}}{\dot{I}_{2kз}}. \quad (2.5)$$

Через A -параметри можна одержати інші параметри чотириполіусника. Виразимо Y -параметри чотириполіусника через A -параметри. Для цього спочатку запишемо рівняння чотириполіусника в формі Y

$$\begin{aligned}\dot{I}_1 &= \underline{Y}_{11}\dot{U}_1 + \underline{Y}_{12}\dot{U}_2, \\ \dot{I}_2 &= \underline{Y}_{21}\dot{U}_1 + \underline{Y}_{22}\dot{U}_2,\end{aligned}\tag{2.6}$$

де $\underline{Y}_{11}$ – *вхідна провідність* (input conduction) чотириполіусника при передачі сигналу від полюсів 1-1' до полюсів 2-2'; $\underline{Y}_{22}$ – *вихідна провідність* (output conduction) чотириполіусника при передачі сигналу від полюсів 1-1' до полюсів 2-2'; $\underline{Y}_{12}$ – *передатна провідність* (transfer conduction) при передачі сигналу від полюсів 2-2' до полюсів 1-1'; $\underline{Y}_{21}$ – *передатна провідність* при передачі сигналу від полюсів 1-1' до полюсів 2-2'.

З врахуванням того, що $\dot{I}_2 = -\dot{I}_2'$ (рис.2.3) рівняння (2.3) будуть такими

$$\dot{U}_1 = \dot{A}\dot{U}_2 - \dot{B}\dot{I}_2',\tag{2.7}$$

$$\dot{I}_1 = \dot{C}\dot{U}_2 - \dot{D}\dot{I}_2'.\tag{2.8}$$

З (2.7) знаходимо $\dot{I}_2'$

$$\dot{I}_2' = \frac{\dot{A}}{\dot{B}}\dot{U}_2 - \frac{1}{\dot{B}}\dot{U}_1 = -\frac{1}{\dot{B}}\dot{U}_1 + \frac{\dot{A}}{\dot{B}}\dot{U}_2.\tag{2.9}$$

Рівняння (2.9) підставимо в (2.8)

$$\dot{I}_1 = \dot{C}\dot{U}_2 - \dot{D}\left(-\frac{1}{\dot{B}}\dot{U}_1 + \frac{\dot{A}}{\dot{B}}\dot{U}_2\right) = \dot{C}\dot{U}_2 + \frac{\dot{D}}{\dot{B}}\dot{U}_1 - \frac{\dot{A}\dot{D}}{\dot{B}}\dot{U}_2 = -\frac{\dot{D}}{\dot{B}}\dot{U}_1 - \frac{\dot{A}\dot{D} - \dot{B}\dot{C}}{\dot{B}}\dot{U}_2.\tag{2.10}$$

Рівняння (2.9) і (2.10) об'єднаємо у систему

$$\begin{cases} \dot{I} = \frac{\dot{D}}{\dot{B}}\dot{U}_1 - \frac{\dot{A}\dot{D} - \dot{B}\dot{C}}{\dot{B}}\dot{U}_2, \\ \dot{I}_2' = -\frac{1}{\dot{B}}\dot{U}_1 + \frac{\dot{A}}{\dot{B}}\dot{U}_2. \end{cases}\tag{2.11}$$

Систему (2.11) порівнюємо з (2.16) і приходимо до висновку, що

$$\underline{Y}_{11} = \frac{\dot{D}}{\dot{B}}; \quad \underline{Y}_{12} = -\frac{\dot{A}\dot{D} - \dot{B}\dot{C}}{\dot{B}};\tag{2.12}$$

$$\underline{Y}_{21} = -\frac{1}{\dot{B}}; \quad \underline{Y}_{22} = \frac{\dot{A}}{\dot{B}}.$$

Відомо, що при $\underline{Y}_{21} = \underline{Y}_{12}$ чотириполіусник називається оборотним. З (2.12) очевидно, що для оборотного чотириполіусника справедлива рівність

$$\dot{A}\dot{D} - \dot{B}\dot{C} = 1. \quad (2.13)$$

Рівняння (2.13) називають рівнянням зв'язку чотириполіусника.

2.5 Комплексний коефіцієнт передачі за напругою, АЧХ і ФЧХ електричного кола

У загальному вигляді *комплексний коефіцієнт передачі за напругою* (complex voltage gain) електричного кола

$$\dot{K}_u = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}, \quad (2.14)$$

де $\dot{U}_2$ – комплексна напруга на виході кола;

$\dot{U}_1$ – комплексна напруга на вході кола.

Комплексний коефіцієнт передачі за напругою залежить тільки від параметрів даного кола і визначається у степеневій формі

$$\dot{K}_u = K_u(\omega)e^{j\phi(\omega)},$$

де $\dot{K}_u(\omega)$ – АЧХ кола;

$\phi(\omega)$ – ФЧХ кола.

При аналітичному визначенні $\dot{K}_u$ для будь-якої частоти необхідно (вважаючи $\dot{U}_1$ відомим) виразити $\dot{U}_2$ через $\dot{U}_1$ і параметри кола. Одержане значення розділити на $\dot{U}_1$. Таким чином, невідоме значення $\dot{U}_1$ скорочується, а одержаний вираз подається у степеневій формі, що дає можливість виділити з комплексного коефіцієнта передачі за напругою АЧХ і ФЧХ кола. Використовуючи одержані вирази $K(\omega)$ і $\phi(\omega)$ та підставивши в них ряд значень ω , можна побудувати графіки АЧХ і ФЧХ.

2.6 Спектральний аналіз сигналів

2.6.1 Спектральний аналіз періодичних сигналів

Періодичний сигнал (periodical signal) можна подати сумою *гармонічних коливань* (harmonic oscillations), кожне з яких має свою *амплітуду* (amplitude), *частоту* (frequency) і *початкову фазу* (epoch angle). *Спектр* (spectrum) періодичного сигналу графічно зображується двома спектральними діаграмами: амплітуд (амплітудний спектр) і початкових фаз (фазовий спектр) гармонік. Спектр періодичних сигналів визначається з допомогою ряду Фур'є. Якщо математична функція, що відображає періодичний сигнал, відповідає умовам Діріхле, то сигнал $s(t)$ може бути розкладений на гармонічні складові

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_n \cos n\Omega_1 t + b_n \sin n\Omega_1 t), \quad (2.15)$$

де $\frac{a_0}{2}$ – постійна складова сигналу;

$\Omega_1 = \frac{2\pi}{T}$ – частота першої гармоніки;

T – період сигналу;

n – номер гармонічної складової (може бути тільки цілим числом).

Під $s(t)$ тут розуміють миттєве значення струму, напруги, напруженості електромагнітного поля і т. ін. Як випливає з виразу (2.15), спектр періодичного сигналу є дискретним. Коефіцієнти ряду $\frac{a_0}{2}$, a_n і b_n визначаються з формул

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s(t) dt, \quad a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s(t) \cos n\Omega_1 t dt, \quad b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s(t) \sin n\Omega_1 t dt. \quad (2.16)$$

Значно зручнішим та більш наочним є інший спосіб розкладення у ряд Фур'є

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \sin(n\Omega_1 t + \Psi_n) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \cos(n\Omega_1 t - \chi_n),$$

де A_{mn} – амплітуда n -ї гармоніки;

Ψ_n – початкова фаза n -ї синусної гармоніки;

χ_n – початкова фаза n -ї косинусної гармоніки.

Амплітуда і початкові фази гармонік дорівнюють

$$A_{mn} = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad \Psi_n = \arctg \frac{a_n}{b_n}, \quad \chi_n = \arctg \frac{b_n}{a_n}. \quad (2.17)$$

У багатьох випадках використовується комплексний ряд Фур'є

$$s(t) = \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \dot{S}_{mn} e^{jn\Omega_1 t}, \quad (2.18)$$

де $\dot{S}_{mn}$ – комплексна амплітуда комплексного ряду Фур'є. Комплексна амплітуда комплексного ряду Фур'є дорівнює

$$\dot{S}_{mn} = a_n - jb_n = \dot{S}_{mn} e^{-j\chi_n}, \quad (2.19)$$

де $\dot{S}_{mn} = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$ – модуль комплексної амплітуди комплексного ряду Фур'є, дорівнює A_{mn} ;

$\chi_n = \arctg \frac{b_n}{a_n}$ – аргумент комплексної амплітуди комплексного ряду Фур'є.

Для побудови спектральних діаграм періодичних сигналів необхідно використати значення A_{mn} , Ψ_n і χ_n .

Якщо періодичний сигнал має той чи інший вид симетрії, то розкладення в ряд Фур'є спрощується. Окрім цього, при знаходженні коефіцієнтів ряду та постійної складової симетричних сигналів необхідно інтегрувати на половині періоду і множити результат на два. Якщо ж сигнал $s(t)$ протягом періоду має різні аналітичні вирази (рис. 2.4), при розрахунку коефіцієнтів ряду інтегрування проводиться по окремих частинах періоду, що відповідають різним аналітичним виразам

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \left(\int_0^{t_1} s_1(t) dt + \int_{t_1}^T s_2(t) dt \right). \quad (2.20)$$

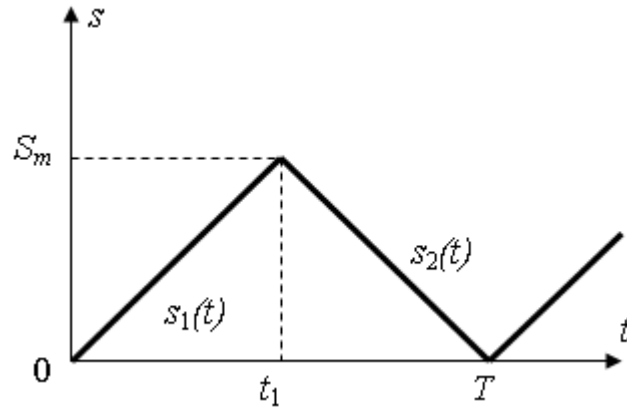


Рисунок 2.4 – Складний періодичний сигнал

2.6.2 Спектральний аналіз неперіодичних сигналів

2.6.2.1 Спектральний аналіз на основі прямого перетворення Фур'є

Суть *спектрального аналізу* (spectrum analysis) за Фур'є полягає у заміні заданої функції часу сумою нескінченно великої кількості гармонічних коливань, амплітуди яких нескінченно малі, а аргументи сусідніх гармонік відрізняються на нескінченно мале значення. На практиці використовувати нескінченно малі величини незручно, тому для аналізу неперіодичних сигналів використовують формулу прямого перетворення Фур'є

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j\omega t} dt, \quad (2.21)$$

де $S(j\omega)$ – *спектральна густина* (spectral density) досліджуваного неперіодичного сигналу;

$s(t)$ – аналітичний вираз досліджуваного неперіодичного сигналу.

Застосувавши формулу Ейлера, вираз (2.21) зводиться до алгебраїчної форми комплексного числа

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)(\cos\omega t - j\sin\omega t)dt = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)\cos\omega t dt - j \int_{-\infty}^{\infty} s(t)\sin\omega t dt = S_d(\omega) - jS_y(\omega).$$

Маючи дійсну і уявну складові спектральної густини, можна перетворити її у степеневу форму

$$S(j\omega) = S(\omega)e^{j\psi(\omega)}, \quad (2.22)$$

де $S(\omega)$ і $\psi(\omega)$ - спектральні характеристики сигналу (відповідно модуль і аргумент спектральної густини). Модуль спектральної густини та її аргумент знаходяться за формулами

$$S(\omega) = \sqrt{S_o^2(\omega) + S_y^2(\omega)}, \quad \psi(\omega) = \arctg \frac{S_y(\omega)}{S_o(\omega)}.$$

При розрахунку $S(\omega)$ і $\psi(\omega)$ необхідно задатись рядом значень $\omega = (\omega_1 \div 20\omega_1)$, а значення ω_1 знайти за виразом $\omega_1 = \frac{\pi}{5t_i}$, де t_i - тривалість імпульсу (pulse duration).

2.6.2.2 Спектральний аналіз на основі перетворення Лапласа

Операторний метод (operational method) може бути застосований двома способами:

- з використанням прямого *перетворення Лапласа* (Laplace transform)

$$S(p) = \int_0^{\infty} s(t) e^{-pt} dt,$$

де $p = c + j\omega$ - *оператор Лапласа* (Laplacian);

- з використанням зображень за Лапласом найчастіше вживаних простих електротехнічних функцій, для яких складено таблиці.

Другим способом досліджуваний складний неперіодичний сигнал потрібно розкласти на прості функції часу (рис. 2.5).

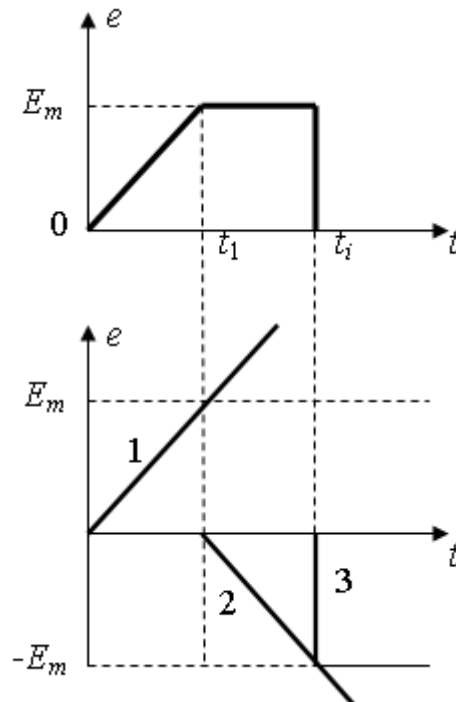


Рисунок 2.5 – Розкладення складного неперіодичного сигналу на прості функції часу

Перший сигнал описується виразом $e_1(t) = \frac{E_m}{t_1} t \cdot 1(t)$. Його зображення за Лапласом $E_1(p) = \frac{E_m}{t_1 p^2}$.

Другий сигнал описується виразом $e_2(t) = -\frac{E_m}{t_1} t \cdot 1(t - t_1)$, його зображення за Лапласом $E_2(p) = -\frac{E_m}{t_1 p^2} e^{-pt_1}$.

Третій сигнал описується виразом $e_3(t) = -E_m 1(t - t_i)$, його зображення за Лапласом $E_3(p) = -\frac{E_m}{p} e^{-pt_i}$. За *принципом суперпозиції* (superposition principle) зображення усього складного сигналу дорівнює сумі зображень його складових

$$E(p) = E_1(p) + E_2(p) + E_3(p). \quad (2.23)$$

У виразі (2.23) оператор p можна замінити на $j\omega$, якщо сигнал діє на додатній частині осі часу. Після цього одержане значення $E(j\omega)$ перетворюється спочатку в алгебраїчну форму, а далі за алгоритмом, описаним в пункті 2.6.2.1.

2.7 Перехідна характеристика

Перехідні характеристики лінійних електричних кіл є їх реакцією на одиничний стрибок, що діє на вході кола. Якщо на вході чотириполюсника діє напруга в вигляді одиничного стрибка $1(t)$, то вихідна напруга є перехідною характеристикою. *Перехідна характеристика* (transient response) $h(t)$ визначається як відношення вихідної напруги до одиничного стрибка напруги

$$h(t) = \frac{u_2(t)}{1(t)}. \quad (2.24)$$

Експериментально перехідну характеристику лінійного електричного кола $h(t)$ можна одержати на екрані осцилографа, якщо подати на вхід кола прямокутний імпульс напруги, тривалість якого t_i набагато більша постійної часу кола τ (тобто $t_i \gg \tau$), а напругу з виходу кола подати на вхід осцилографа.

Аналітично перехідна характеристика визначається при розв'язанні інтегро-диференціального рівняння лінійного електричного кола. Результат знаходиться операторним методом. Перехідна характеристика – функ-

ція безрозмірна. Якщо на вході кола діє одиничний стрибок напруги $1(t)$, а на виході визначається часова функція струму, то реакцією кола буде перехідна провідність $y(t)$

$$y(t) = \frac{i_2(t)}{1(t)}. \quad (2.25)$$

Перехідна провідність вимірюється в сименсах.

Якщо на вході діє *одиничний стрибок струму* (unit current step) $1_i(t)$, а на виході визначається часова функція напруги $u_2(t)$, то реакцією кола буде перехідний опір $Z(t) = \frac{u_2(t)}{1_i(t)}$. Перехідний опір вимірюється в омах.

Приклад 1. Визначимо перехідну характеристику лінійного електричного кола, зображеного на рис. 2.6. Складемо диференціальне рівняння кола.

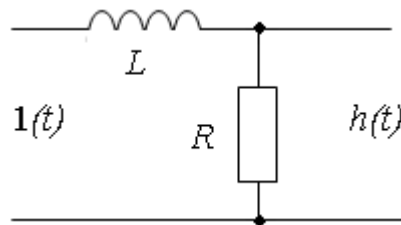


Рисунок 2.6 – Коло RL

Якщо на вході діє *одиничний стрибок напруги* (unit voltage step) $1(t)$, то за другим законом Кірхгофа

$$L \frac{di}{dt} + iR = 1(t), \quad (2.26)$$

де i – струм, що тече в колі під дією одиничного стрибка напруги. Розв’язок рівняння (2.38) дорівнює сумі загального розв’язку однорідного рівняння і окремого розв’язку неоднорідного рівняння

$$i = i_{вл} + i_{пр}, \quad (2.27)$$

де $i_{вл}$ – вільна складова струму;

$i_{пр}$ – примусова складова струму.

Однорідне рівняння для вільної складової має вигляд

$$L \frac{di_{вл}}{dt} + Ri_{вл} = 0. \quad (2.28)$$

На підставі (2.40) записуємо характеристичне рівняння $Lp + R = 0$, звідки

$$p = -\frac{R}{L} = -\frac{1}{\tau},$$

де $\tau = \frac{L}{R}$ – постійна часу кола. Загальний розв’язок в цьому випадку дорівнює

$$i_{\text{эл}} = Ae^{pt} = Ae^{-t/\tau}, \quad (2.29)$$

де A – постійна інтегрування.

Примусова складова струму $i_{\text{пр}}$ може бути визначена для кола в стаціонарному режимі (через нескінченно великий час після початку вхідної дії). Оскільки на вході кола в цей час діє постійна напруга, то на струм впливає тільки активний опір R , тому $i_{\text{пр}} = \frac{1(t)}{R}$.

Аналітичний вираз струму в колі має вигляд

$$i = \frac{1(t)}{R} + Ae^{-t/\tau}. \quad (2.30)$$

Постійну інтегрування A визначаємо з початкової умови при $t=0$ $i(0) = 0$. З врахуванням початкових умов вираз (2.42) буде таким

$$0 = \frac{1(t)}{R} + A. \quad (2.31)$$

З (2.43) знаходимо $A = -\frac{1(t)}{R}$. Значення A підставляємо в (2.30)

$$i = \frac{1(t)}{R} - \frac{1(t)}{R}e^{-t/\tau} = \frac{1(t)}{R}(1 - e^{-t/\tau}).$$

Вихідна напруга дорівнює $u_2(t) = iR = 1(t)(1 - e^{-t/\tau})$. Знайдене значення $u_2(t)$ підставляємо в (2.24), отримуємо

$$h(t) = \frac{1(t)(1 - e^{-t/\tau})}{1(t)} = 1 - e^{-t/\tau}.$$

Задаємось значеннями t і будуємо графік $h(t)$ (рис. 2.7)

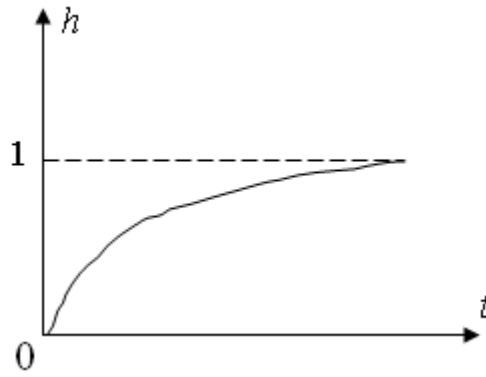


Рисунок 2.7 – Графік перехідної характеристики

Приклад 2. Визначимо перехідну характеристику операторним методом. Операторна перехідна характеристика кола

$$h(p) = \frac{K(p)}{p}, \quad (2.32)$$

де $K(p)$ – операторний коефіцієнт передачі електричного кола. Знаходимо операторний коефіцієнт передачі кола (див. рис. 2.6).

$$K(p) = \frac{U_2(p)}{U_1(p)}. \quad (2.33)$$

Знаходимо $U_2(p)$, але спочатку необхідно знайти *комплексний опір* (complex impedance) кола, операторний опір $Z(p)$, струм $I(p)$ та вихідну напругу $U_2(p)$. Комплексний опір

$$Z(j\omega) = R + j\omega L. \quad (2.34)$$

В виразі (2.34) $j\omega$ замінюємо на p і одержуємо операторний опір

$$Z(p) = R + pL. \quad (2.35)$$

Знаходимо струм $I(p)$ як відношення $I(p) = \frac{U_1}{Z(p)} = \frac{U_1}{R + pL}$ і вихідну напругу $U_2(p)$

$$U_2(p) = I(p)R = \frac{U_1 R}{R + pL}.$$

Останній вираз підставляємо в (2.33) $K(p) = \frac{R}{R + pL}$. Знаходимо остаточно операторну перехідну характеристику

$$h(p) = \frac{K(p)}{p} = \frac{R}{p(R+pL)} = \frac{N(p)}{pM(p)}. \quad (2.36)$$

Оригінал перехідної характеристики знайдемо з допомогою формули розкладання. Для виразу (2.49) вона матиме вигляд

$$h(t) = \frac{N(0)}{M(0)} + \frac{N(p)}{pM'(p)} \cdot e^{pt}, \quad (2.37)$$

де $N(0)$ – значення виразу $N(p)$ при $p = 0$;

$M(0)$ – значення виразу $M(p)$ при $p = 0$;

$M'(p)$ – значення похідної від $M(p)$;

p – корінь рівняння $M(p) = 0$.

Знаходимо p : $R + pL = 0$; $p = -\frac{R}{L} = -1/\tau$. Визначаємо складові виразу (2.37) $N(0) = R$; $M(0) = R$; $M'(p) = L$ і остаточне його значення

$$h(t) = \frac{R}{R} + \frac{R}{-\frac{R}{L}L} e^{-\frac{R}{L}t} = 1 - e^{-t/\tau}. \quad (2.38)$$

Вираз (2.38) повністю збігається з виразом, одержаним класичним методом.

Операторний метод має значні переваги перед класичним при аналізованні складних кіл. Якщо зображення розшукуваного струму чи напруги має вигляд раціонального дробу

$$\frac{N(p)}{M(p)} = \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_{m-1} p + b_m}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n} \quad (2.39)$$

до того ж багаточлени (відносно p) $N(p)$ і $M(p)$ відповідають таким умовам:

- степінь $N(p)$ менша степені $M(p)$;
- a_k і b_k – дійсні числа;
- корені $p_1, p_2, \dots, p_n$ рівняння $M(p) = 0$ різні.

Тоді оригінал визначається рівнянням

$$f(t) = \sum_{k=1}^n \frac{N(p_k)}{M'(p_k)} e^{p_k t}. \quad (2.40)$$

Якщо зображення має вигляд

$$F(p) = \frac{N(p)}{p \cdot M(p)},$$

тоді оригінал визначається рівнянням

$$f(t) = \frac{N(0)}{M(0)} + \sum_{k=1}^n \frac{N(p_k)}{p_k M'(p_k)} e^{p_k t}. \quad (2.41)$$

Якщо серед коренів $M(p)=0$ є комплексно-спряжені корені $\dot{p}_k$ і p_k^* , то при визначенні відповідних їм значень, що знаходяться під знаком суми в рівняннях (2.40) і (2.41), достатньо визначити складову для одного з цих коренів, наприклад p_k , а для спряженого кореня p_k^* необхідно взяти спряжене значення цієї складової. Сума, що відповідає цим двом доданкам, дорівнює подвоєному значенню дійсної частини, знайденої для одного з коренів. Якщо коренів тільки два $\dot{p}_1$ і p_2^* , то оригінал знаходиться за виразом

$$f(t) = 2 \operatorname{Re} \left\{ \frac{N(\dot{p}_1)}{M'(\dot{p}_1)} e^{\dot{p}_1 t} \right\}, \quad (2.42)$$

при $F(p) = \frac{N(p)}{M(p)}$.

2.8 Методи дослідження передачі сигналів лінійними електричними колами

Найчастіше використовують три методи дослідження передачі сигналів через лінійні електричні кола: спектральний, операторний, часовий.

2.8.1 Спектральний метод

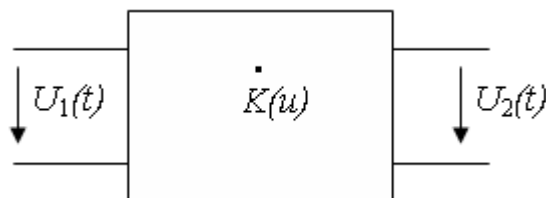


Рисунок 2.8 – Лінійне коло у вигляді чотиріполюсника

При розв'язанні задачі аналізу спектральним методом повинен бути відомий комплексний коефіцієнт передачі кола $K(j\omega)$ (рис.2.8). Вхідний сигнал розкладається на елементарні сигнали, що є гармонічними коливаннями з різними амплітудами, частотами і початковими фазами. Якщо вхідний сигнал є неперіодичним, то амплітуда елементарного гармонічно-

го коливання в спектрі сигналу визначається через спектральну густину. Для вхідного сигналу амплітуда елементарного гармонічного коливання дорівнює

$$d\dot{U}_1 = \frac{1}{\pi} S_1(j\omega) d\omega,$$

де $S_1(j\omega)$ – спектральна густина вхідного сигналу, визначена за допомогою прямого перетворення Фур'є

$$S_1(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} U_1(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (2.43)$$

Оскільки комплексний коефіцієнт передачі електричного кола $\dot{K}_u$ дорівнює відношенню комплексних амплітуд на виході і на вході кола і визначається формулою (2.14), то елементарна амплітуда в спектрі вихідного сигналу $d\dot{U}_2$ визначається за формулами

$$d\dot{U}_2 = \dot{K}_u d\dot{U}_1 = \dot{K}_u \frac{1}{\pi} S_1(j\omega) d\omega, \quad d\dot{U}_2 = \frac{1}{\pi} S_2(j\omega) d\omega, \quad S_2(j\omega) = S_1(j\omega) \dot{K}_u,$$

де $S_2(j\omega)$ – спектральна густина вихідного сигналу.

Отже спектральна густина вихідного сигналу $S_2(j\omega)$ дорівнює добутку спектральної густини вхідного сигналу $S_1(j\omega)$ на комплексний коефіцієнт передачі кола $\dot{K}_u$. Записуючи комплексні величини, що входять в рівняння (2.57), у степеневій формі, одержуємо

$$\begin{aligned} S_2(\omega) e^{j\psi_2(\omega)} &= S_1(\omega) e^{j\psi_1(\omega)} K(\omega) e^{j\psi(\omega)}, \\ S_2(\omega) e^{j\psi_2(\omega)} &= S_1(\omega) K(\omega) e^{j[\psi(\omega) + \varphi(\omega)]}. \end{aligned} \quad (2.44)$$

Прирівнюємо модулі комплексних величин в виразі (2.44)

$$S_2(\omega) = S_1(\omega) K(\omega). \quad (2.45)$$

Модуль спектральної густини вихідного сигналу $S_2(j\omega)$ дорівнює добутку модулів спектральної густини вхідного сигналу і комплексного коефіцієнта передачі кола. Прирівнюємо аргументи комплексних величин в рівнянні (2.44)

$$\psi_{S_2}(\omega) = \psi_{S_1}(\omega) + \varphi(\omega). \quad (2.46)$$

Аргумент спектральної густини вихідного сигналу дорівнює сумі аргументів спектральної густини вхідного сигналу і комплексного коефіцієнта передачі кола.

Визначивши $S_2(j\omega)$, застосуємо зворотне перетворення Фур'є на виході кола

$$s_2(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_2(j\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (2.47)$$

2.8.2 Операторний метод

При розв'язанні задачі аналізу операторним методом повинен бути відомим коефіцієнт передачі кола в операторній формі $K(p)$ (рис.2.9). Вхідний сигнал розбивається на елементарні сигнали, що є згасаючими коливаннями. Це еквівалентно перетворенню вхідного сигналу за Лапласом

$$U_1(p) = \int_0^{\infty} u_1(t) e^{-pt} dt. \quad (2.48)$$

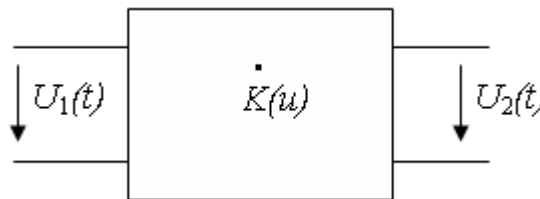


Рисунок 2.9 – Лінійне коло у вигляді чотиріполюсника

На згасання коливань вказує множник $e^{-\sigma t}$, що знаходиться в множенні $e^{-pt} = e^{-\sigma t} \cdot e^{-j\omega t}$ підінтегральної функції. Потім знаходиться реакція кола на кожний елементарний сигнал, тобто зображення вихідного сигналу за Лапласом

$$U_2(p) = U_1(p) \cdot K(p). \quad (2.49)$$

Для додавання всіх елементарних сигналів на виході кола застосовуємо зворотне перетворення Лапласа до зображення $U_2(p)$

$$u_2(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma-j\infty}^{\sigma+j\infty} U_2(p) e^{pt} dp. \quad (2.50)$$

Значно швидше можна досягти мети, розбивши вхідний сигнал на складові ($u_{11}(t), u_{12}(t) \dots u_{n1}(t)$), що мають табличні зображення за Лапласом.

Після цього знаходимо реакцію кола на кожну складову в операторній формі

$$U_{21}(p)=U_{11}(p)K(p); \quad U_{22}(p)=U_{12}(p)K(p); \quad U_{2n}(p)=U_{1n}(p) K(p). \quad (2.51)$$

Знаходимо зображення вихідного сигналу за принципом суперпозиції

$$U_2(p)=U_{21}(p)+U_{22}(p)+...+U_{2n}(p). \quad (2.52)$$

Застосувавши до виразу (2.52) формулу розкладання, знаходимо $u_2(t)$.

2.8.3 Часовий метод

При розв'язанні задачі аналізу часовим методом повинна бути відома одна з часових характеристик кола (перехідна характеристика $h(t)$ або ж імпульсна характеристика $q(t)$). Залежно від того, яка з часових характеристик кола відома, використовують два варіанти розв'язання задачі аналізу. Нехай відома перехідна характеристика $h(t)$ кола (рис. 2.10, а) (яку, до речі, необхідно знайти в одному з попередніх пунктів курсової роботи).

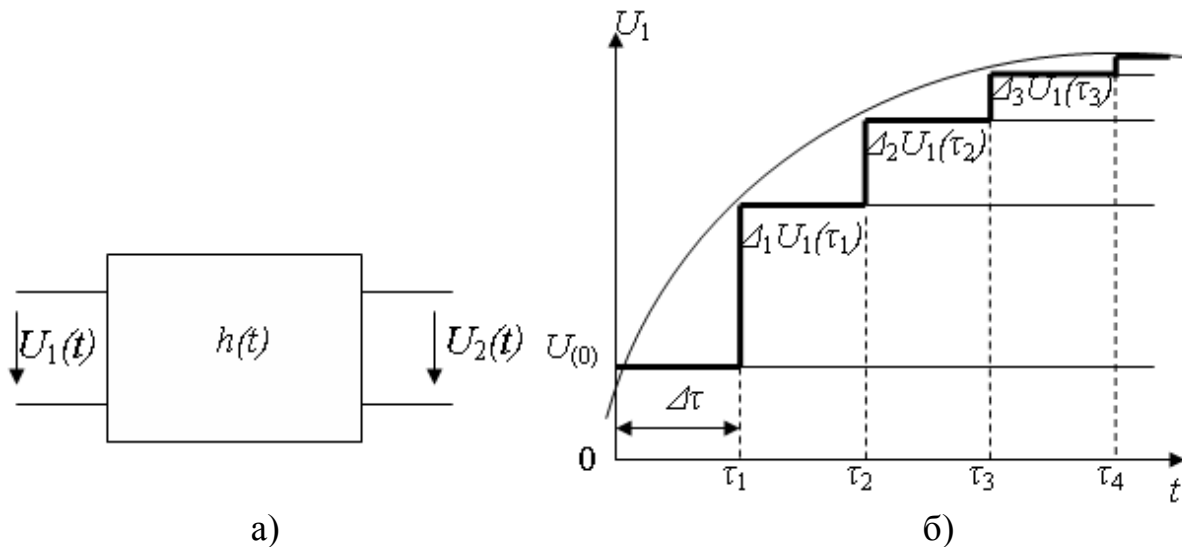


Рисунок 2.10 – До розрахунку задачі аналізу часовим методом

В цьому випадку вхідна напруга $u_1(t)$ наближено замінюється сумою стрибків напруги (рис. 2.10, б). Кожен зі стрибків зсунутий відносно сусіднього на один і той самий час $\Delta\tau$. Моменти стрибків позначені $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \dots$. Вхідна напруга при цьому дорівнює

$$\begin{aligned} u_1(t) \approx & U_1(0) \cdot 1(t) + \Delta_1 U_1(\tau_1) \cdot 1(t - \tau_1) + \Delta_2 U_1(\tau_2) \cdot 1(t - \tau_2) + \dots \\ & \dots + \Delta_k U_1(\tau_k) \cdot 1(t - \tau_k) + \dots \end{aligned} \quad (2.53)$$

Знак наближеної рівності стоїть тому, що ступінчаста напруга, яка утворена з стрибків, відрізняється від дійсної. Зменшуючи часові інтервали $\Delta\tau$ і тим самим збільшуючи кількість стрибків в певному інтервалі часу, можна збільшувати ступінь наближення ступінчастої напруги до дійсної. Напруга на виході кола від кожного стрибка на вході визначається через перехідну характеристику кола $h(t)$

$$\begin{aligned}\Delta_0 U_2(t) &= U_1(0) \cdot h(t), \\ \Delta_1 U_2(t) &= \Delta_1 U_1(\tau) \cdot h(t - \tau_1), \\ \Delta_2 U_2(t) &= \Delta_2 U_1(\tau_2) \cdot h(t - \tau_2), \\ &\text{-----} \\ \Delta_k U_2(t) &= \Delta_k U_1(\tau_k) \cdot h(t - \tau_k).\end{aligned}\tag{2.54}$$

Згідно з принципом суперпозиції вихідна напруга дорівнює сумі елементарних вихідних напруг, що визначаються виразом (2.54)

$$u_2(t) \approx U_1(0)h(t) + \sum_k \Delta_k U_1(\tau_k)h(t - \tau_k).\tag{2.55}$$

Оскільки вхідна напруга $u_1(t)$ виражена формулою (2.53) наближено, то вираз (2.55) також є наближенням. Для одержання точного виразу вихідної напруги помножимо і розділимо вираз під знаком суми на часовий проміжок $\Delta\tau$ і визначимо межу суми при $\Delta\tau \rightarrow 0$

$$u_2(t) = U_1(0)h(t) + \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \sum_k \frac{\Delta_k U_1(\tau_k)}{\Delta\tau} h(t - \tau_k) \Delta\tau;$$

оскільки

$$\lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \sum_k \frac{\Delta_k U_1(\tau_k)}{\Delta\tau} = \frac{dU_1(\tau)}{d\tau} = U_1'(\tau); \quad \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \sum_k f(\tau_k, t) \Delta\tau = \int_0^t f(\tau, t) d\tau$$

(індекс k опускаємо, бо він при інтегруванні не має сенсу), тоді

$$u_2(t) = U_1(0)h(t) + \int_0^t U_1'(\tau)h(t - \tau) d\tau,\tag{2.56}$$

де $U_1(0)$ – початкове значення вхідної напруги;

$U_1'(\tau) = \left. \frac{dU_1(t)}{dt} \right|_{t=\tau}$ – похідна вхідної напруги;

$h(t - \tau)$ – перехідна характеристика, в якій t замінено на $(t - \tau)$.

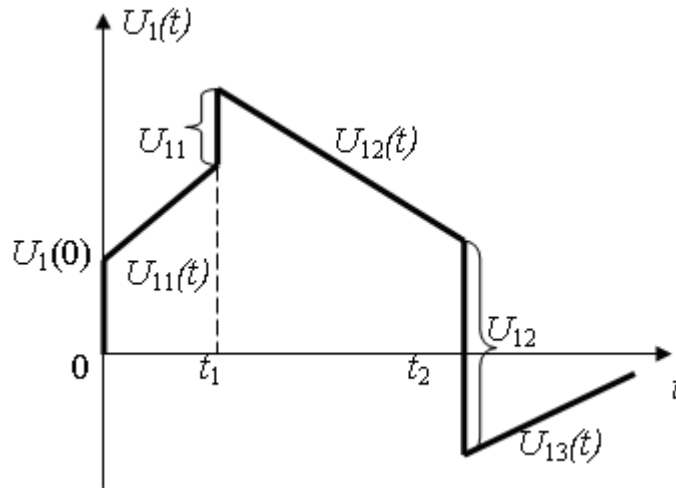


Рисунок 2.11 – Складний вхідний сигнал

Вираз (2.56) називається формулою *інтеграла Дюамеля* (Duhamel integral). Є декілька різновидів цієї формули. Цей вираз дозволяє визначити відгук кола на відому дію на його вході. Якщо вхідна напруга $u_1(t)$ має різні вирази на різних інтервалах часу (див. рис. 2.11) і окрім того має або не має стрибків, то інтервал інтегрування розбивається на окремі ділянки, а реакцію кола, що розраховується за інтегралом Дюамеля, записують для окремих інтервалів часу. Для виразу (див. рис. 2.11) матимемо:

а) на першому інтервалі часу від 0 до t_1 (не включаючи стрибок U_{11})

$$u_2(t) = U_1(0)h(t) + \int_0^t U_1'(\tau)h(t-\tau)d\tau; \quad (2.57)$$

б) на другому проміжку часу від t_1 до t_2 (не виключаючи стрибок U_{12})

$$u_2(t) = U_1(0)h(t) + \int_0^{t_1} U_1'(\tau)h(t-\tau)d\tau + U_{11}h(t-t_1) + \int_{t_1}^t U_{12}'(\tau)h(t-\tau)d\tau; \quad (2.58)$$

в) на третьому проміжку часу від t_2 до ∞

$$u_2(t) = U_1(0)h(t) + \int_0^{t_1} U_1'(\tau)h(t-\tau)d\tau + U_{11}h(t-t_1) + \int_{t_1}^{t_2} U_{12}'(\tau)h(t-\tau)d\tau - U_{12}'h(t-t_2) + \int_{t_2}^t U_{13}'(\tau)h(t-\tau)d\tau, \quad (2.59)$$

де складова $-U_{12}'h(t-t_2)$ обумовлена від'ємним стрибком вхідної напруги в момент t_2 .

Оскільки аналіз передбачає визначення вихідної напруги після закінчення вхідної дії, то необхідно користуватись виразами (2.57) - (2.59).

3 СУЧАСНІ МЕТОДИ АНАЛІЗУ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЛІНІЙНИХ КІЛ, ПРИСТРОЇВ ТА СИСТЕМ

3.1 Поняття простору станів

З точки зору аналізу та синтезу систем доцільно поділити всі змінні, які характеризують систему або мають до неї відношення, на три групи:

- вхідні змінні або вхідні діяння, позначимо їх як u ; вони являють собою сигнали зовнішні відносно системи;
- вихідні змінні, позначимо їх як y ; вони характеризують реакцію системи на вхідні діяння і найбільше цікавлять проектувальника;
- змінні стану x або проміжні змінні, які характеризують поведінку системи і безпосередньо для спостережень недоступні.

Схематично система може бути зображена у вигляді “чорного ящика” з деяким числом вхідних та вихідних каналів.

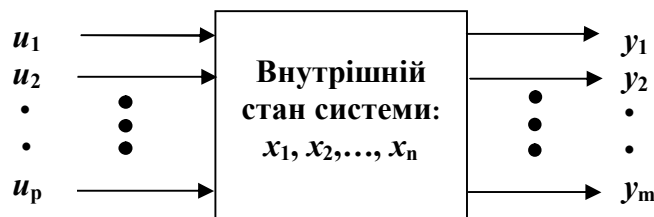


Рисунок 3.1 – Подання кіл, пристроїв та систем змінними стану

Згідно з рис. 3.1, *вхідні канали* (input channels) являють собою сукупність вхідних діянь u_i ; *вихідні канали* – сукупність вихідних змінних y_i . Проміжні змінні або координати стану системи x_i відносяться до вмісту “чорного ящика” і таким чином приховані від безпосереднього спостереження, це так звані внутрішні змінні. Величини u_i , y_i , x_i передбачаються функціями часу, тобто $u_i(t)$, $y_i(t)$, $x_i(t)$ – означають значення величин u_i , y_i , x_i в довільний момент часу t .

Заради зручності оперування з багатовимірними величинами сукупність вхідних змінних позначимо у вигляді вектора-рядка входу, розмірності p $u^T(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_p(t)]^T$; сукупність вихідних змінних – у вигляді вектора-рядка виходу, розмірності m $y^T(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_m(t)]$; сукупність змінних стану системи – у вигляді вектора-рядка стану, розмірності n $x^T(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T$. Множини значень, які зможуть прийняти вектори $u(t)$, $y(t)$, $x(t)$ прийнято називати простором вхідних змінних, простором вихідних змінних та простором станів, відповідно.

У будь-який довільний момент часу t стан системи є функцією початкового стану $x(t_0)$ та вектора входу $u(t_0, t)$, тобто

$$\dot{\mathbf{x}}(t)=\mathbf{F}[\mathbf{x}(t_0),\mathbf{u}(t_0,t)], \quad (3.1)$$

де $\mathbf{F}$ – однозначна функція своїх аргументів.

Вектор виходу у будь-який довільний момент часу t є також функцією $\mathbf{x}(t_0)$ та $\mathbf{u}(t_0,t)$ і може бути записаним, як

$$\mathbf{y}(t)=\mathbf{G} [\mathbf{x}(t_0), \mathbf{u}(t_0,t)]. \quad (3.2)$$

Рівняння (3.1) - (3.2) прийнято записувати у загальній формі

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{F} [\mathbf{x}(t_0), \mathbf{u}(t_0,t)]; \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{G} [\mathbf{x}(t_0), \mathbf{u}(t_0,t)] \end{aligned}$$

і часто називають рівняннями стану системи.

Якщо система описується лінійними диференціальними рівняннями, то рівняння стану системи зводяться до наступного вигляду [3]

$$\dot{\mathbf{x}}(t)=\mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t)+\mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t); \quad (3.3)$$

$$\mathbf{y}(t)=\mathbf{C}(t)\mathbf{x}(t)+\mathbf{D}(t)\mathbf{u}(t), \quad (3.4)$$

де $\mathbf{A}(t)$ – системна матриця;

$\mathbf{B}(t)$ – матриця входу;

$\mathbf{C}(t)$ – матриця виходу системи;

$\mathbf{D}(t)$ – матриця обходу системи.

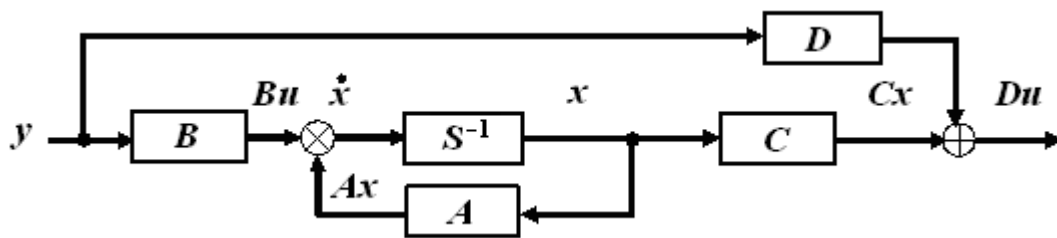


Рисунок 3.2 – Структурна схема моделі у змінних стану

Якщо система стаціонарна, то системні матриці $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$, $\mathbf{D}$ від часу не залежать. Виведення рівнянь стану, які повністю описують систему, є обов'язковим початковим етапом аналізу та синтезу в сучасній теорії сигналів, процесів та систем.

3.2 Опис стаціонарного динамічного кола, пристрою або системи рівняннями стану у неперервному часі

Оскільки сучасна теорія систем оперує термінами простору станів, а більшість результатів, накопичених класичною теорією систем, подається

у термінах передаточних функцій $W(s)$, то є сенс показати тісний зв'язок між вищезазначеними підходами.

Як відомо [1], модель у термінах змінних станів може бути складена на основі заданої передаточної функції трьома різними способами:

- прямого програмування;
- паралельного програмування;
- послідовного програмування.

Розглянемо ці способи на прикладі динамічної системи, яка має таку передаточну функцію

$$W(s) = \frac{s^2 + 3s + 2}{s(s^2 + 2s + 12)}. \quad (3.5)$$

Метод прямого програмування

Рівняння (3.5) можна подати таким чином

$$W(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{s^2 + 3s + 2}{s(s^2 + 2s + 12)} = \frac{s^3(s^{-1} + 3s^{-2} + 2s^{-3})}{s^3(1 + 7s^{-1} + 12s^{-2})}.$$

Скоротимо чисельник і знаменник отриманого виразу на s^3 та введемо нові позначення, а саме

$$E(s) = \frac{u(s)}{(1 + 7s^{-1} + 12s^{-2})}. \quad (3.6)$$

Тоді для виходу системи у нових позначеннях отримаємо такий вираз

$$y(s) = (s^{-1} + 3s^{-2} + 2s^{-3})E(s).$$

Надалі розв'яжемо рівняння (3.6) відносно $E(s)$ і одержимо

$$E(s) = -7s^{-1}E(s) - 12s^{-2}E(s) + u(s). \quad (3.7)$$

Якщо виходи інтеграторів s^{-1} , s^{-2} , s^{-3} , розташованих в указаному порядку, узяти як змінні стану x_3 , x_2 , x_1 , а їх входи позначити як відповідні похідні $\dot{x}_3$, $\dot{x}_2$, $\dot{x}_1$, то з рівнянь (3.6) - (3.7) безпосередньо утворюється така структурна схема моделі у термінах змінних станів (див. рис. 3.3).

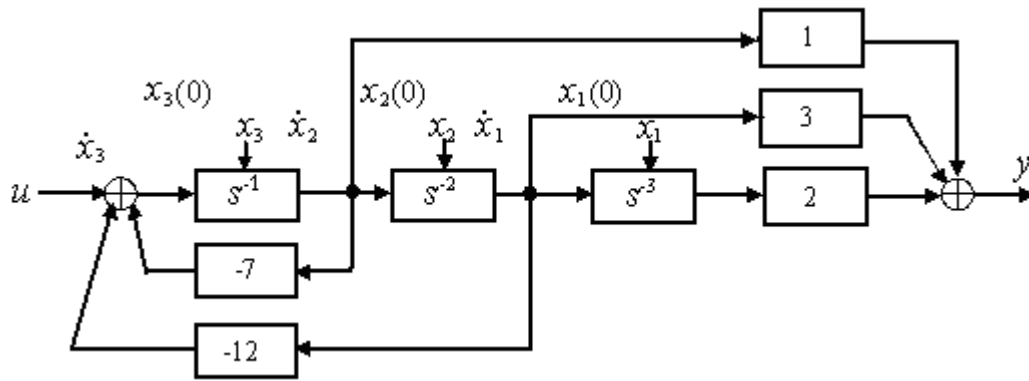


Рисунок 3.3 – Схема моделі у термінах змінних станів для методу прямого програмування

Маючи схему моделі у термінах змінних станів, неважко скласти систему диференціальних рівнянь, яка їй відповідає

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= 0 \cdot x_1(t) + 1 \cdot x_2(t) + 0 \cdot x_3(t) + 0 \cdot u(t); \\ \dot{x}_2(t) &= 0 \cdot x_1(t) + 0 \cdot x_2(t) + 1 \cdot x_3(t) + 0 \cdot u(t); \\ x_3(t) &= 0 \cdot x_1(t) - 12 \cdot x_2(t) - 7 \cdot x_3(t) + 1 \cdot u(t).\end{aligned}$$

Рівняння для виходу системи буде мати такий вигляд

$$y(t) = 2 \cdot x_1(t) + 3 \cdot x_2(t) + 1 \cdot x_3(t) + 0 \cdot u(t).$$

Матричний форму запису (3.3) - (3.4) відповідають рівняння

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -7 & -12 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} u(t);$$

$$y(t) = \begin{pmatrix} 2 & 3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \end{pmatrix} u(t).$$

Таким чином системні матриці визначено і вони дорівнюють

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -7 & -12 & 0 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 2 & 3 & 1 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{D} = \begin{pmatrix} 0 \end{pmatrix}.$$

Оскільки усі знайдені матриці від часу не залежать, то розглянута система є стаціонарною.

Метод паралельного програмування

У методі паралельного програмування передаточна функція $W(s)$ розкладається на суму простих дрібно-раціональних функцій з використанням способу невизначених коефіцієнтів і для кожної складової будується схемна модель у просторі станів.

$$W(s) = \frac{1/6}{s} - \frac{2/3}{s+3} + \frac{3/2}{s+4}.$$

Структурна схема моделі у термінах змінних станів показана на рис. 3.4, відповідна система диференціальних рівнянь подана нижче.

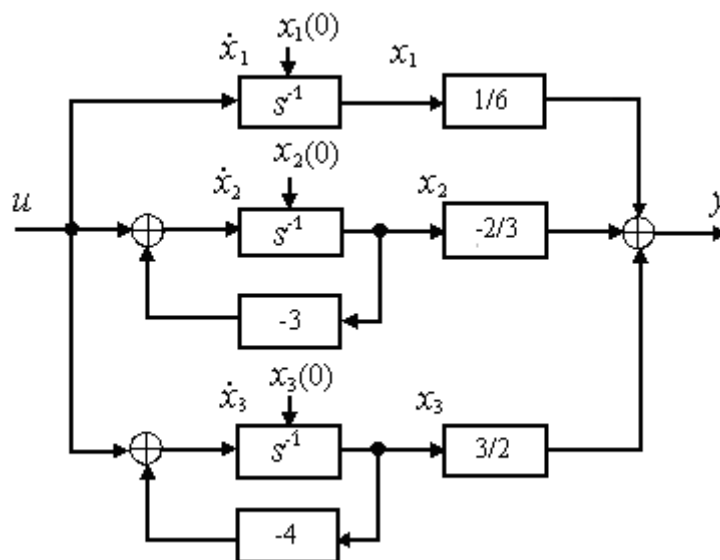


Рисунок 3.4 – Схема моделі у термінах змінних станів для методу паралельного програмування

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= 0 \cdot x_1(t) + 0 \cdot x_2(t) + 0 \cdot x_3(t) + 1 \cdot u(t); \\ \dot{x}_2(t) &= 0 \cdot x_1(t) - 3 \cdot x_2(t) + 0 \cdot x_3(t) + 1 \cdot u(t); \\ \dot{x}_3(t) &= 0 \cdot x_1(t) - 0 \cdot x_2(t) - 4 \cdot x_3(t) + 1 \cdot u(t).\end{aligned}$$

Рівняння для виходу системи буде мати такий вигляд

$$y(t) = 1/6 \cdot x_1(t) - 2/3 \cdot x_2(t) + 3/2 \cdot x_3(t) + 0 \cdot u(t).$$

Матричний форму запису (3.3) - (3.4) відповідають рівняння

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -3 & 0 \\ 0 & 0 & -4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} u(t);$$

$$y(t) = (1/6 \quad -2/3 \quad 3/2) \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{pmatrix} + (0) u(t).$$

Таким чином, системні матриці визначено і вони дорівнюють

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -3 & 0 \\ 0 & 0 & -4 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{C} = (1/6 \quad -2/3 \quad 3/2); \quad \mathbf{D} = (0).$$

Метод послідовного програмування

Застосування цього методу передбачає попередню факторизацію передаточної функції, тобто подання її у вигляді добутку дрібнораціональних функцій, а саме

$$W(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{s^2 + 3s + 2}{s(s^2 + 7s + 12)} = \frac{s^2 (1 + s^{-1})(1 + 2s^{-1})}{s^3 (1 + 3s^{-1})(1 + 4s^{-1})} =$$

$$= \frac{s^{-1} (1 + s^{-1})(1 + 2s^{-1})}{(1 + 3s^{-1})(1 + 4s^{-1})}. \quad (3.8)$$

Згідно з раніше викладеною методикою, виразу (3.8) відповідає така структурна схема та система рівнянь у термінах змінних стану

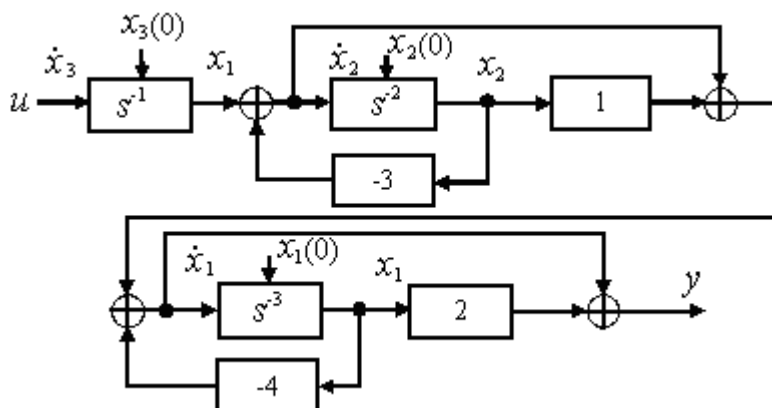


Рисунок 3.5 – Схема моделі у змінних станів для методу послідовного програмування

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= -4 \cdot x_1(t) + 1 \cdot x_2(t) + 2 \cdot x_3(t) + 0 \cdot u(t); \\ \dot{x}_2(t) &= 0 \cdot x_1(t) - 3 \cdot x_2(t) + 1 \cdot x_3(t) + 0 \cdot u(t); \\ \dot{x}_3(t) &= 0 \cdot x_1(t) - 0 \cdot x_2(t) - 4 \cdot x_3(t) + 1 \cdot u(t).\end{aligned}$$

Рівняння для виходу системи буде мати такий вигляд

$$y(t) = 2 \cdot x_1(t) + 1 \cdot x_2(t) + 1 \cdot x_3(t) + 0 \cdot u(t).$$

Матричний форму запису (3.3) - (3.4) відповідають рівняння

$$\begin{aligned}\begin{pmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} -4 & 1 & 1 \\ 0 & -3 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} u(t); \\ y(t) &= (2 \quad 1 \quad 1) \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{pmatrix} + (0) u(t).\end{aligned}$$

Таким чином системні матриці визначено і вони дорівнюють

$$\begin{aligned}\mathbf{A} &= \begin{pmatrix} -4 & 1 & 1 \\ 0 & -3 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; & \mathbf{B} &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}; \\ \mathbf{C} &= (2 \quad 1 \quad 1); & \mathbf{D} &= (0).\end{aligned}$$

Порівнюючи отримані рівняння бачимо, що вони мають різну форму запису, але усі ці рівняння еквівалентні. У цьому неважко переконатись, якщо обчислити власні значення матриці $\mathbf{A}$. Вони однакові, це і не дивно, адже кожен раз розглядалась одна і та ж динамічна система, а саме власні значення характеризують її динаміку. Слід зауважити, що існують ще й інші форми запису вищезгаданих рівнянь, серед них є найпростіші з точки зору простоти обчислень. Їх називають канонічними формами запису. Оскільки для подальших розрахунків потрібно використання ЕОМ, то з'являється необхідність у записі отриманих рівнянь динаміки у еквівалентній формі для дискретного часу. Методика такого переходу потребує обчислення перехідної матриці станів, що буде викладено у наступному підрозділі.

3.3 Визначення перехідної матриці стану

Поняття перехідної матриці стану з'являється при розв'язанні однорідного диференційного рівняння $\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t)$, яке описує еволюцію у часі вектора стану динамічної системи, що залишена сама по собі. Розв'язок цього рівняння за нульових початкових умов має вигляд

$$\frac{\dot{\mathbf{x}}(t)}{\mathbf{x}(t)} = \mathbf{A}(t); \quad \int_{t_0}^t d \ln \mathbf{x}(t) dt = \mathbf{A}(t) dt;$$

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}(t_0) \exp\left(\int \mathbf{A}(t) dt\right).$$

Матричну функцію $\Phi(t, t_0) = \exp\left(\int \mathbf{A}(t) dt\right)$ прийнято називати перехідною матрицею станів. Для стаціонарних систем

$$\Phi(t; t_0) = \exp(\mathbf{A}(t - t_0)).$$

Звідси випливає, що перехідну матрицю станів можливо просто обчислювати шляхом розкладання у степеневий ряд експоненціальної функції [3]

$$e^{\mathbf{A}(t-t_0)} = 1 + \mathbf{A}(t-t_0) + \frac{1}{2!} \mathbf{A}^2(t-t_0)^2 + \dots + \frac{1}{n!} \mathbf{A}(t-t_0)^n. \quad (3.9)$$

Існує ще й інший спосіб точного обчислення перехідної матриці, оснований на використанні перетворення Лапласа. Згідно з [3] цю матрицю знаходять як

$$\Phi(t) = F^{-1} \left\{ [s\mathbf{I} - \mathbf{A}]^{-1} \right\}.$$

У нашому випадку зручно користуватись виразом (3.9). Наприклад для динамічної системи, заданої у вигляді

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1/T_2^2 & -2\xi/T_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/T_2^2 \end{bmatrix} u(t);$$

$$y(t) = \left[(1 - T_1/T_2^2) - (2\xi T_1/T_2^2 + 2\xi T_1) \right] \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + (T_1/T_2^2) u(t) \quad (3.10)$$

перехідна матриця станів дорівнює

$$\begin{aligned}\Phi(t, \tau) &\approx I + A(t - \tau) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & (t - \tau) \\ (-1/T_2^2)(t - \tau) & -(2\xi/T_2)(t - \tau) \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} 1 & (t - \tau) \\ (-1/T_2^2)(t - \tau) & 1 - (2\xi/T_2)(t - \tau) \end{bmatrix}.\end{aligned}$$

3.4 Еквівалентне подання лінійної динамічної системи у дискретному часі

У процесі цифрового моделювання необхідно диференціальні рівняння системи (3.3) - (3.4) замінити їх еквівалентами у дискретному часі, тобто різницеvim рівняннями виду

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}(k+1, k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}(k+1, k)\mathbf{u}(k); \quad (3.11)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}(k)\mathbf{u}(k). \quad (3.12)$$

Причому системні матриці $\mathbf{A}(k+1, k)$, $\mathbf{B}(k+1, k)$, $\mathbf{C}(k)$, $\mathbf{D}(k)$ знаходяться з таких співвідношень [3]

- $\mathbf{A}(k+1, k) = \Phi(t_{k+1}, t_k) = \exp(\mathbf{A}(t_{k+1} - t_k));$
- $\mathbf{B}(k+1, k) = \int_{t_k}^{t_{k+1}} \Phi(t, \tau) \mathbf{B}(\tau) d\tau;$
- $\mathbf{C}(k) = [(1 - T_1/T_2^2) - (2\xi T_1/T_2^2 + 2\xi T_1)];$
- $\mathbf{D}(k) = (T_1/T_2^2).$

Покладаючи сітку дискредитації рівномірною та позначивши $t_{k+1} - t_k = \Delta T$, з врахуванням даних прикладу (3.10) та конкретних значень ξ , K_0 , T маємо

- $\mathbf{A}(k+1, k) = \begin{bmatrix} 1 & \Delta T \\ (-1/T_2^2)\Delta T & 1 - (2\xi/T_2)\Delta T \end{bmatrix};$
- $\mathbf{B}(k+1, k) = \int_{t_k}^{t_{k+1}} \begin{bmatrix} 1 & (t - \tau) \\ (-1/T_2^2)(t - \tau) & 1 - (2\xi/T_2)(t - \tau) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1/T_2^2 \end{bmatrix} d\tau =$

$$= \begin{bmatrix} (1/T_2^2)(\Delta T^2/2) \\ (1/T_2^2)\Delta T - 2\xi/T_2^3(\Delta T^2/2) \end{bmatrix};$$
- $\mathbf{C}(k) = [(1 - T_1/T_2^2) - (2\xi T_1/T_2^2 + 2\xi T_1)];$
- $\mathbf{D}(k) = (T_1/T_2^2).$

При заданих параметрах $T_1=0,8$, $T_2=0,1$, $\zeta=0,6$ числові значення матриць A , B , C , D будуть такими

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \Delta T \\ -10^4 \Delta T & 1 - 20 \Delta T \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 10^4 (\Delta T^2 / 2) \\ 10^4 \Delta T - 2 \cdot 10^5 (\Delta T^2 / 2) \end{bmatrix};$$

$$C = [-99 \quad -20,002]; \quad D = [100].$$

3.5 Дослідження динамічних властивостей лінійної системи методом простору станів

3.5.1 Розрахунок вільного руху з ненульовими початковими умовами

У даному підрозділі наводиться методика математичного моделювання поведінки динамічної системи, яка знаходиться під впливом типових вхідних сигналів детермінованої природи. Моделювальні програми написані мовою програмування персональних комп'ютерів Turbo Pascal 7.0.

Цифрове моделювання вільного руху динамічної системи виконувалось відповідно до програми [7]:

- покладаємо $u(k) = 0$ для усіх $k = 0, 1, 2, \dots, n$;
- покладаємо $x(k) = \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \neq 0$, для $k = 0$;
- моделювальне рівняння має вигляд
 $x(k+1) = A(k+1, k)x(k)$;
 $y(k) = C(k)x(k)$;
- знімаємо залежність $x_1(k+1)$, $y(k)$ від дискретного часу $k = 0, 1, \dots, n$.

3.5.2 Розрахунок реакції динамічної системи на одиничний імпульс

Цифрове моделювання імпульсної характеристики системи виконувалось відповідно до такої програми [7]:

- покладаємо $u(k) = 1$ для $k = 0$;
- покладаємо $x(k) = \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ для $k = 0$;
- моделювальне рівняння має вигляд:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}(k+1, k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}(k+1, k)\mathbf{u}(k);$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}(k)\mathbf{x}(k);$$

- знімаємо залежність $x_1(k+1)$, $y(k)$ від дискретного часу $k = 0, 1, \dots, n$.

3.5.3 Розрахунок реакції динамічної системи на одиничний стрибок

Цифрове моделювання перехідної характеристики виконувалось відповідно до такої програми [7]:

- покладаємо $\mathbf{u}(k) = 1$ для всіх $k = 0, 1, \dots, n$;

- покладаємо $\mathbf{x}(k) = \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ для $k = 0$;

- моделювальне рівняння має вигляд:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}(k+1, k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}(k+1, k)\mathbf{u}(k);$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}(k)\mathbf{x}(k);$$

- знімаємо залежність $x_1(k+1)$, $y(k)$ від дискретного часу $k = 0, 1, \dots, n$.

4 МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЛІНІЙНИХ КІЛ, ПРИСТРОЇВ ТА СИСТЕМ У СЕРЕДОВИЩІ ELECTRONICS WORKBENCH 5.12

4.1 Методика моделювання

Моделювання рекомендується виконувати з допомогою моделювальної програми Electronics Workbench (v.5.12).

На панелі керування розміщені основні робочі вікна, з допомогою яких утворюється потрібна схема, з'єднується генератор вхідного сигналу, вимірювач частотних характеристик та осцилограф.

З вікна Instruments вибираємо функціональний генератор (Function Generator) (рис. 4.1).

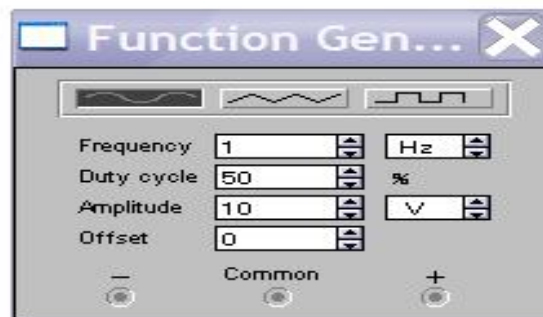


Рисунок 4.1 – Передня панель функціонального генератора

Цей прилад дозволяє формувати гармонічний, трикутний і прямокутний сигнали. Для його роботи потрібно задати умовну робочу частоту (Frequency), необхідні амплітуду (Amplitude), робочий цикл (Duty cycle) і початкову фазу (Offset). Щоб одержати гармонічний сигнал та прямокутний імпульсний з шпаруватістю 2 робочий цикл має дорівнювати 50%.

З вікна Basic вибираємо необхідні електричні елементи кола, з яких формуємо електричну схему: а) опір (Resistor); б) ємність (Capacitor); в) індуктивність (Inductor). Для цього за допомогою маніпулятора миша наводимо курсор на потрібний елемент, натискаємо ліву клавішу маніпулятора і не відпускаючи її, переносимо потрібний елемент на набірне поле (основне робоче вікно). Аналогічним чином вибираємо всі потрібні елементи. Для задання необхідних параметрів вибраному елементу потрібно навести на нього курсор і подвійно натиснути на ліву клавішу маніпулятора. Відкриється вікно властивостей елемента, в якому робимо відповідні зміни параметрів.

Щоб з'єднати між собою елементи в схему, необхідно маніпулятором підвести курсор до виводу елемента. При цьому на виводі утворюється жирна чорна точка. Натиснувши і не відпускаючи ліву клавішу маніпулятора (курсор при цьому зникає) ведемо лінію до виводу потрібного елемента.

нта (при з'єднанні на виводі другого елемента знову утворюється чорна жирна точка) і відпускаємо ліву клавішу.

Примітка. Утворена схема має бути обов'язково заземлена (вибрати вікно Sources з панелі інструментів, а потім взяти елемент “земля” (Ground)).

З вікна Instruments вибираємо вимірювач частотних характеристик (ВЧХ) (Bode Plotter), переносимо його в основне робоче вікно та з'єднуємо зі досліджуваною схемою. Для того, щоб задати необхідні параметри ВЧХ, наводимо курсор в робочому вікні на нього і подвійно натискаємо на ліву клавішу. На екрані з'являється передня панель приладу, на якій, натиснувши клавішу Magnitude, одержимо вимірювач АЧХ (рис. 4.2), натиснувши клавішу Phase, - вимірювач ФЧХ.

Вертикальна (Vertical) і горизонтальна (Horizontal) осі вимірювача можуть бути задані в логарифмічному Log і лінійному Lin масштабах, який визначається початковим (I) та кінцевим (F) значеннями. Початкові і кінцеві значення вертикальних і горизонтальних масштабів попередньо необхідно встановити в максимальне значення і поступово зменшувати, щоб одержати оптимальне зображення графіка. Запуск схеми здійснюється одночасним натисканням клавіш Ctrl+G на клавіатурі.

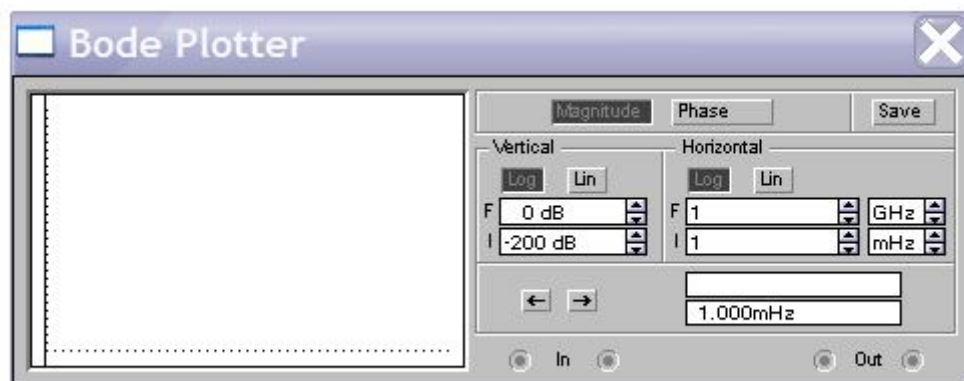


Рисунок 4.2 – Передня панель вимірювача АЧХ

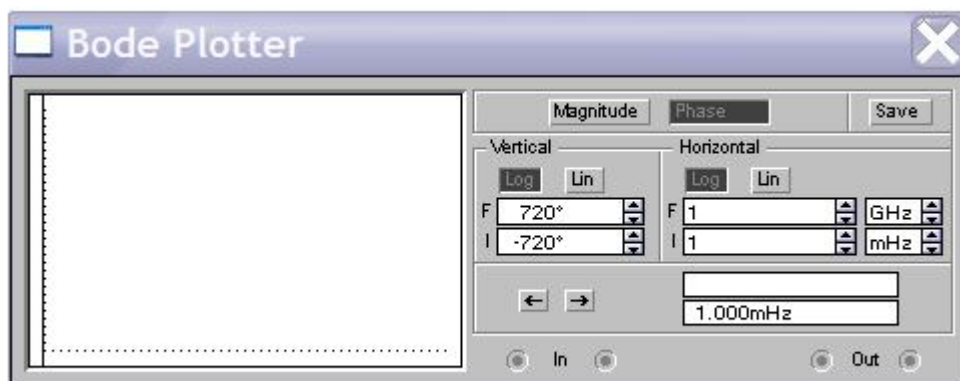


Рисунок 4.3 – Передня панель вимірювача ФЧХ

З вікна Instruments вибираємо осцилограф (рис. 4.4.) (Oscilloscope) і під'єднуємо його канал *A* (Channel *A*) до виходу схеми, попередньо встановивши потрібний масштаб по осі *Y* і по осі *X*.

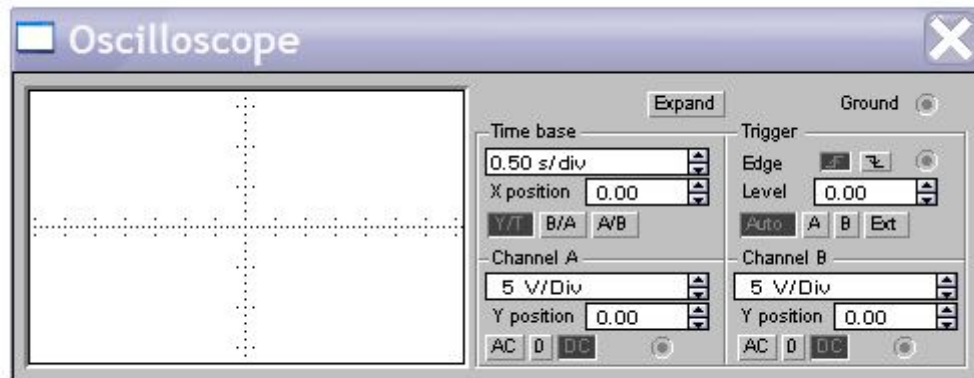


Рисунок 4.4 – Передня панель осцилографа

На панелі осцилографа вибираємо клавішу параметрів *Y/T*, оскільки нам необхідно на осі *X* мати час.

Часова розгортка може змінюватись в межах 0,1 нс/Под. (0,1ns/Div) – 1с/Под. (1s/Div). Щоб одержати оптимальне зображення одного періоду вихідного сигналу, частоту розгортки потрібно узгодити з частотою функціонального генератора.

Наприклад, якщо досліджується сигнал частотою 1кГц, часова розгортка повинна бути близькою до 0,1мс. При цьому можна спостерігати один період сигналу. Один період сигналу частотою 10 кГц потребує часової розгортки 0,01 мс. Канал вертикального підсилення осцилографа дозволяє змінювати масштаб в межах 0,01мВ/Под. (0,01mv/Div) – 5кВ/Под. (5kv/Div).

Щоб одержати оптимальне зображення по вертикалі, необхідно установлення масштабу узгодити з амплітудою сигналу. Наприклад, вхідний сигнал змінного струму амплітудою 3 В заповнює екран осцилографа повністю, якщо встановити масштаб 1В/Под. (1V/Div). Його можна роздрукувати, задавши оптимальний масштаб по осях. Для дослідження перехідної характеристики рекомендується використовувати режим роботи осцилографа “DC” (постійний струм), оскільки досліджуватиметься прямокутний сигнал зі зміною амплітуди від 0 до заданого значення. На передній панелі розміщені також регулятори зміщення зображення по горизонталі (*X position*) та по вертикалі (*Y position*). Отримавши відповідні графіки на екранах приладів (АЧХ і ФЧХ – на вимірювачі частотних характеристик, перехідну характеристику – на осцилографі), наводимо курсор на вікно Display Graphs основної панелі і натискаємо ліву клавішу маніпулятора. На екрані дисплея з’являється розгорнуте зображення графіка. Рекомендовану

методику проілюструємо на прикладі дослідження динамічних властивостей коректувальної схеми.

4.2 Моделювання імпульсної характеристики схеми корекції

Схема моделювання та вимірювальні пристрої зображено на рис. 4.5. На вхід схеми подавалась періодична послідовність коротких імпульсів з частотою 1 Гц. Тривалість сигналу складала 0,01 від періоду повтору $T_{\text{п}} = 1\text{с}$. Осцилограф було поставлено у режим синхронізації імпульсними входними сигналами. У даних умовах, реакція мостової схеми на короткі імпульси визначала імпульсну характеристику з достатнім наближенням.

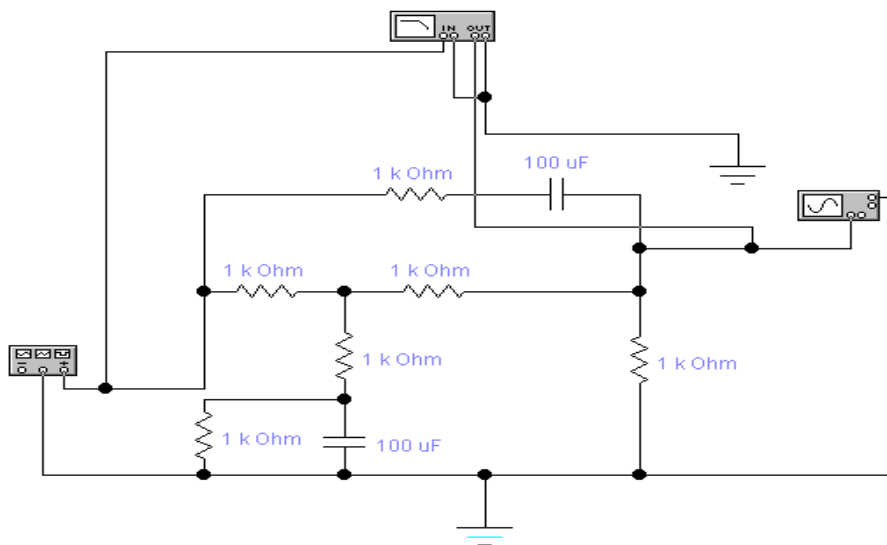


Рисунок 4.5 – Схема моделювання коректувальної схеми

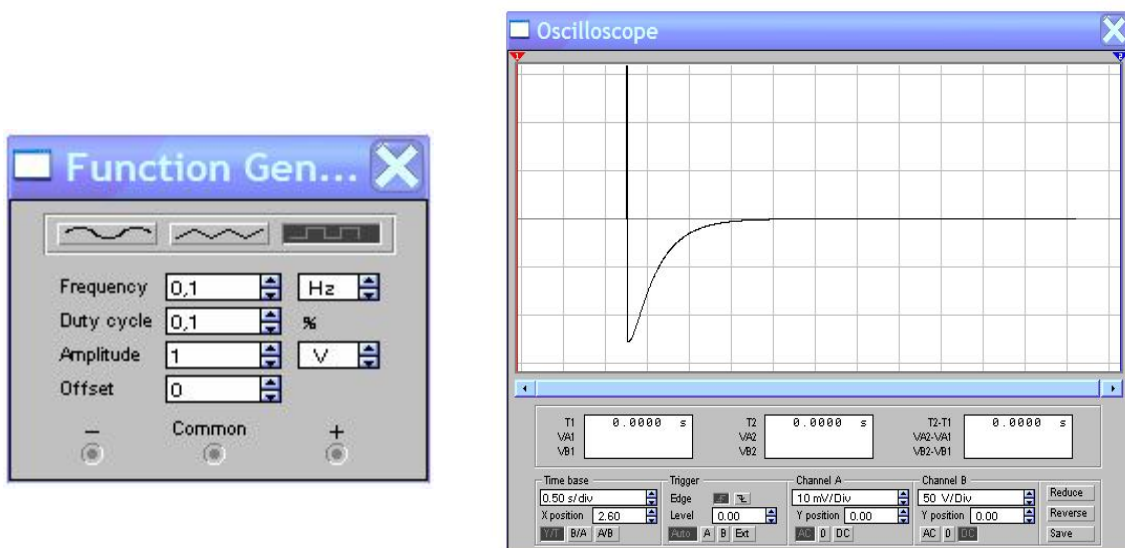


Рисунок 4.6 – Імпульсна характеристика коректувальної схеми

4.3 Моделювання перехідної характеристики коректувальної схеми

Умови моделювання та покази приладів показано на рисунку 4.7. Одиничний сигнал моделювався імпульсним сигналом великої тривалості, який складав 99 % від періоду повтору $T_n = 1$ с. Розгортка осцилографа синхронізувалась переднім фронтом вхідного сигналу. За таких умов реакція мостової схеми дає добре наближення до перехідної характеристики .

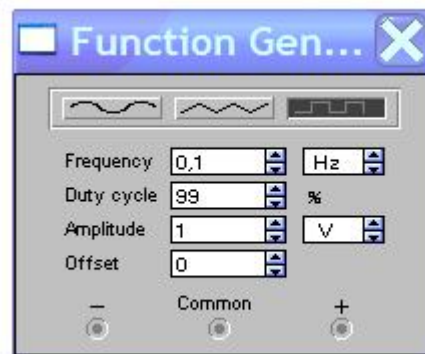
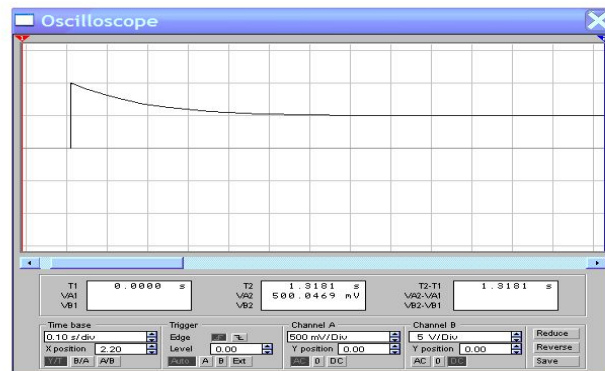


Рисунок 4.7 – Перехідна характеристика схеми корекції

4.4 Моделювання частотних характеристик коректувальної схеми

Схема моделювання частотних характеристик зображена на рис. 4.8. Порівняно з попередньою схемою, вона доповнена вимірювачем АЧХ та ФЧХ. АЧХ подана у логарифмічному масштабі уздовж обох осей. Одиниці вимірювання по горизонтальній осі – кГц, а по вертикальній – ДБ. ФЧХ подана у напівлогарифмічному масштабі. Одиниці вимірювання фази – градуси. Як видно з рис. 4.8, схема корекції являє собою низькочастотний фільтр з максимальним ослабленням сигналу на частоті 1.0 Гц, яке складає приблизно 2,5 раза.

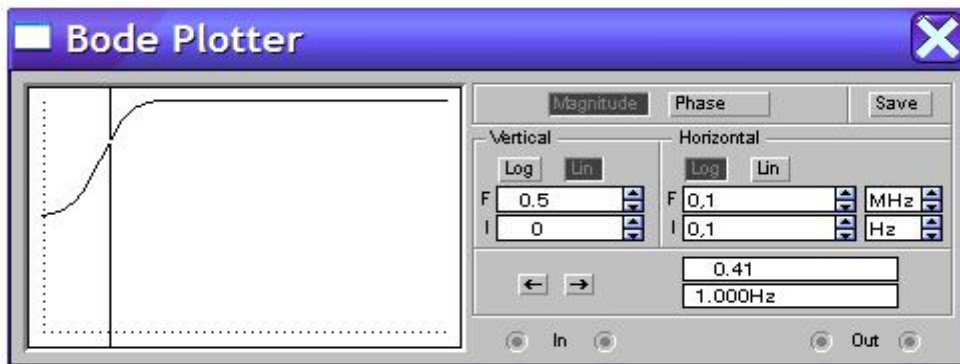


Рисунок 4.8 – Схема моделювання частотних характеристик коректувальної схеми

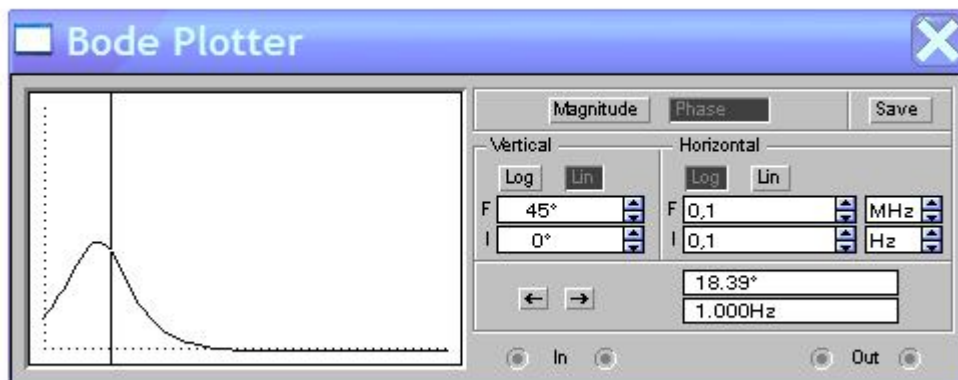


Рисунок 4.9 – Моделювання фазочастотної характеристики коректувальної схеми

4.5 Моделювання реакції коректувальної схеми на складну вхідну дію

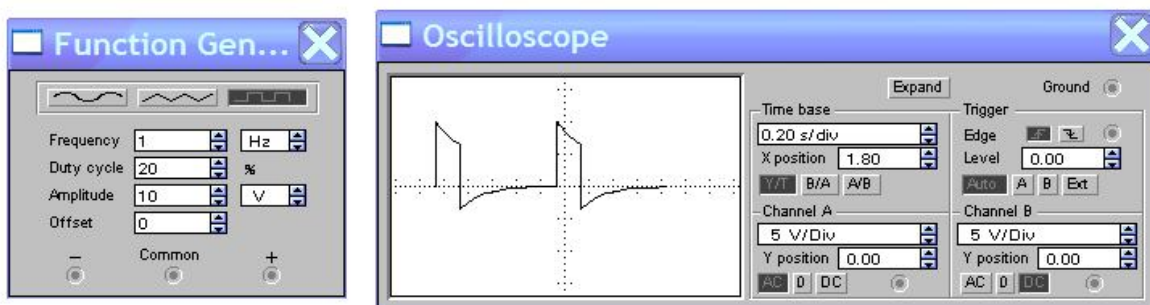


Рисунок 4.10 – Реакція схеми корекції на складну вхідну дію

Література

Основна

1. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы / Гоноровский И. С. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
2. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы / Баскаков С. И. – М.: Высшая школа, 1983. – 536 с.
3. Сиберт У. М. Цепи, сигналы, системы: В 2-х частях. Ч.1,2: Пер. с англ. / Сиберт У. М. – М.: Мир, 1988. – 336 с.

Додаткова

4. Зиновьев А. Л., Филиппов Л. И. Введение в теорию сигналов и цепей / А. Л. Зиновьев, Л. И. Филиппов. – М.: Высшая школа, 1975. – 264 с.
5. Директор С., Рорер Р. Введение в теорию систем/ Под ред. Н. П. Бусленко. – М.: Мир, 1974. – 176 с.
6. Тихонов В. И., Харисов В. Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем / В. И. Тихонов, В. Н. Харисов. – М.: Радио и связь, 1991. – 608 с.
7. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. Пер. с англ. / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989. – 412 с.
8. Андре Анго. Математика для электро- и радиоинженеров / Андре Анго. – М.: Наука, 1967. – 780 с.
9. Быков В. В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике / Быков В. В. – М.: Сов. радио, 1971. – 326 с.
10. Чернышов Н. Г., Чернышова Т. И. Моделирование и анализ схем в Electronics Workbench: Учеб.-метод. пособие / Н. Г. Чернышов, Т. И. Чернышова. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. – 52 с.

ГЛОСАРІЙ

Амплітуда – amplitude
Амплітудний спектр – amplitude spectrum
Внутрішній опір – intrinsic resistance
Внутрішня провідність – intrinsic conduction
Вихідна провідність – output conduction
Вхідна провідність – input conduction
Вхідні канали – input channels
Гармонічні коливання – harmonic oscillations
Генератора напруги – voltage generator
Джерело струму – current source
Еквівалентне джерело – equivalent source
Електрорушійна сила – electromotive force
Інтеграл Дюамеля – Duhamel integral
Комплексний коефіцієнт передачі за напругою – complex voltage gain
Комплексний опір – complex impedance
Комплексні коефіцієнти – complex coefficient
Метод вузлових потенціалів – node-voltage method
Метод еквівалентного генератора – constant-generator method
Метод контурних струмів – mesh-current method
Одиничний стрибок напруги – unit voltage step
Одиничний стрибок струму – unit current step
Оператор Лапласа – Laplacian
Операторний метод – operational method
Параметри чотириполюсника – parameters of four-pole
Передачна провідність – transfer conduction
Перетворення Лапласа – Laplace transform
Перехідна характеристика – transient response
Періодичний сигнал – periodical signal
Початкова фаза – epoch angle
Принцип суперпозиції – superposition principle
Спектр – spectrum
Спектральна густина – spectral density
Спектральний аналіз – spectrum analysis
Тривалість імпульсу – pulse duration
Частота – frequency
Чотириполюсник – four-pole
Фазовий спектр – phase spectrum

Навчальне видання

**Юрій Микитович Воловик
Андрій Олександрович Семенов
Костянтин Олегович Коваль
Олена Олександрівна Семенова**

СИГНАЛИ ТА ПРОЦЕСИ У РАДІОТЕХНІЦІ

Методика та правила виконання курсової роботи

Навчальний посібник

Редактор Т. Старічек

Оригінал-макет підготовлено А. Семеновим

Підписано до друку
Формат 29,7×42¹/₄. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. .
Наклад прим. Зам. №

Вінницький національний технічний університет,
науково-методичний відділ ВНТУ.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.