

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

В.М. Безрук, В.В. Рапін

ОСНОВИ КОМП'ЮТЕРНОГО
МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОЄКТУВАННЯ
ЗАСОБІВ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ І РАДІОТЕХНІКИ

Навчальний посібник

Електронне видання

Харків 2024

*Рекомендовано до друку рішенням Вченої ради
Харківського національного університету радіоелектроніки
(протокол № 8/7 від 06.07.2023)*

Безрук В.М., Рапін В.В.

Основи комп'ютерного моделювання та проєктування засобів телекомунікації і радіотехніки: Навчальний посібник [Електронний ресурс] / В.М. Безрук, В.В. Рапін. За заг. ред. В.М. Безрука. – Електронне видання. – Харків: ХНУРЕ, 2024. – 305 с. – pdf 9,26 Мб

ISBN 978-966-659-361-3

У навчальному посібнику наведено загальні положення теорії проєктування та моделювання засобів телекомунікації та радіотехніки. Головна увага приділяється питанням багатокритеріальної оптимізації та моделювання на ЕОМ, що мають важливе значення для початкових етапів проєктування систем. Наведено як загальний огляд існуючих програмних комплексів, так і детальний опис деяких найбільш відомих пакетів програм, що можуть бути використані в автоматизованому проєктуванні засобів телекомунікації та радіотехніки.

Розглядаються широко поширені програмні продукти однієї з провідних компаній світу National Instruments Corporation, такі як середовища моделювання радіоелектронних пристроїв на рівні принципів схем Electronics Workbench і Multisim. Подано пакет комп'ютерного імітаційного моделювання динамічних систем Simulink, що є одним із найпотужніших розширень пакета MATLAB і найпопулярнішим засобом візуально-орієнтованого моделювання систем комунікації. Інформація, яка стосується моделювання телекомунікаційних мереж, наведена основними відомостями про мережний симулятор CiscoPacketTracerлідера у галузі мережних технологій відомого розробника мережного обладнання компанії CiscoSystems.

Рецензенти:

М.М. Климаш – д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри «Телекомунікації» Національного університету «Львівська політехніка»;

О.В. Лемешко – д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри «Інфокомунікаційна інженерія» Харківського національного університету радіоелектроніки.

ISBN 978-966-659-361-3

DOI: 10.30837/978-966-659-361-3

© В.М. Безрук, В.В. Рапін, 2024

© ХНУРЕ, 2024

ЗМІСТ

Вступ	6
1 Загальні положення проєктування систем	8
1.1 Етапи та особливості проєктування систем	8
1.2 Застосування математичних методів на початкових стадіях проєктування	12
1.3 Особливості мережі зв'язку як об'єкта проєктування	19
Контрольні запитання та завдання	25
2 Вибір оптимальних проєктних варіантів систем методами багатокритеріальної оптимізації	27
2.1 Постановка задачі проєктування оптимальної системи	27
2.2 Формування множини припустимих варіантів системи на основі морфологічного підходу	31
2.3 Вибір критерію оптимальності системи	32
2.4 Методи знаходження Парето-оптимальних рішень	35
2.5 Методи звуження множини Парето-оптимальних проєктних рішень	39
2.6. Програмна реалізація методів багатокритеріального вибору оптимальних проєктних варіантів систем	44
2.7 Приклад застосування методів багатокритеріальної оптимізації в ході планування СМЗ 3-го покоління	45
Контрольні запитання та завдання	47
3 Основні положення статистичного моделювання систем	49
3.1 Процедури та особливості моделювання систем зв'язку на ЕОМ	49
3.1.1 Формальний опис та оцінювання ефективності системи	51
3.1.2 Особливості цифрового зображення сигналів	53
3.2 Побудова математичних моделей систем зв'язку	54
3.2.1 Класифікація методів побудови математичних моделей	54
3.2.2 Математичні моделі на рівні функціональних ланок системи	55
3.3 Математичний опис сигналів у ході моделювання систем зв'язку	58
3.3.1 Математична модель вузькосмугових детермінованих сигналів	58
3.3.2 Математичні моделі низькочастотних детермінованих сигналів	59
3.3.3 Математичні моделі випадкових сигналів	60

3.4 Особливості математичних моделей мереж зв'язку	64
3.4.1 Математичний опис структури мережі зв'язку	65
3.4.2 Математичні моделі потоків заявок і процесів обслуговування у мережах зв'язку	68
Контрольні запитання та завдання.....	72
4 Моделювання на ЕОМ випадкових величин і випадкових процесів.....	73
4.1 Принципи моделювання на ЕОМ випадкових елементів.....	73
4.2 Моделювання випадкових величин із заданими ймовірнісними характеристиками	75
4.2.1 Моделювання випадкових величин, що приймають дискретні значення	75
4.2.2 Моделювання випадкових величин із заданими щільностями імовірностей методом обернених функцій.....	77
4.2.3 Моделювання випадкових величин із заданими щільностями імовірностей методом суперпозиції.....	78
4.2.4 Моделювання гаусових випадкових величин методом сумачії	79
4.2.5 Моделювання випадкових величин із експоненціальним розподілом та розподілом Релея.....	80
4.3 Моделювання випадкових процесів	81
4.3.1 Моделювання білих шумів	81
4.3.2 Моделювання корельованих випадкових процесів.....	81
4.3.3 Моделювання випадкових процесів з незалежними приростами.....	83
4.3.4 Моделювання марковських випадкових процесів.....	85
4.3.5 Моделювання випадкових фототелеграфних та телеграфних сигналів	86
4.3.6 Моделювання випадкових імпульсних сигналів	88
Контрольні запитання та завдання.....	89
5 Програмні продукти для моделювання і оптимізації систем та мереж зв'язку	90
5.1 Аналіз засобів програмної реалізації математичних моделей мереж зв'язку.....	90
5.2 Пакети програм моделювання і оптимізації мереж	94
5.3 Пакети програм для моделювання і оптимізації компонентів систем зв'язку	105
Контрольні запитання та завдання.....	109

6 Схемотехнічне моделювання	111
6.1 Програма Electronics Workbench, загальні відомості	111
6.1.1 Інтерфейс користувача, головне меню.....	113
6.1.2 Склад бібліотек компонентів.	134
6.1.3 Вимірювальні прилади каталогу Instruments.....	141
6.1.4 Створення та моделювання електронних схем	157
6.2 Система MULTISIM.....	161
6.2.1 Інтерфейс користувача і загальні налаштування	161
6.2.2 Система меню, панелі інструментів і компонентів.....	164
6.2.3 Віртуальні вимірювальні прилади	177
6.2.4 Створення електричних схем пристроїв	193
6.2.5 Методи аналізу та їхня реалізація в Multisim.....	202
6.2.6 Синтез та моделювання схем цифрових пристроїв	210
Контрольні запитання та завдання.....	220
7 Візуальне моделювання динамічних систем.....	221
7.1 Загальні відомості про систему MATLAB	221
7.2 Пакет візуального моделювання SIMULINK.....	223
7.2.1 Каталог бібліотеки Simulink.....	223
7.2.2 Вікно моделі Simulink.....	233
7.2.3 Налаштування параметрів моделювання.....	234
7.2.4 Створення та налаштування моделі	237
Контрольні запитання та завдання.....	252
8 Середовище моделювання мереж CISCO PACKET TRACER.....	253
8.1 Побудова та моделювання мереж у логічній робочій області.....	254
8.1.1 Головне вікно симулятора у логічній робочій області	254
8.1.2 Фізична комплектація обладнання.....	261
8.1.3 Робота з об'єктами телекомунікаційної мережі	265
8.1.4 Побудова та моделювання мережі	271
8.1.5 Кластеризація і кольорове виділення схем	282
8.2 Фізична топологія телекомунікаційної мережі та її реалізація	285
8.2.1 Інтерфейси симулятора у фізичному просторі	285
8.2.2 Робота у фізичному робочому просторі	288
8.2.3 Кастомізація зображень пристроїв та фону	292
Контрольні запитання та завдання.....	294
Перелік рекомендованої літератури.....	296

ВСТУП

Важливим етапом створення будь-якої системи є процес проектування. Під проектуванням розуміють комплекс робіт, що складається з досліджень, розрахунків і конструювання з метою отримання опису системи у вигляді технічної документації, достатньої для створення нової модернізації або вже існуючої системи. В умовах бурхливого розвитку інформаційних систем зростаючі вимоги до якості та термінів проектування систем не завжди вдається задовольнити прості збільшення кількості проектувальників. Вирішення цієї проблеми можливе шляхом застосування автоматизованого проектування, що означає виконання проектних процедур при тісній взаємодії людини з ЕОМ. За рахунок автоматизації проектування досягаються також якісно нові можливості виконання окремих проектних процедур, чого у ряді випадків практично неможливо досягти без застосування ЕОМ.

Успіхи автоматизованого проектування систем у минулі роки визначалися прямою експлуатацією значної швидкодії та пам'яті ЕОМ під час виконання деяких проектних процедур на етапах схемотехнічного, конструкторського та технологічного проектування. Подальше розширення автоматизації початкових етапів проектування на системотехнічному рівні можливе шляхом розвитку загальної теорії оптимального проектування складних технічних систем, а також створення методології автоматизованого проектування систем у конкретних прикладних галузях. Основу нових інформаційних технологій в автоматизації проектування складають теорія багатокритеріальної оптимізації та математичного моделювання систем.

Автоматизоване проектування – це галузь прикладних досліджень, для якої характерним є запровадження сучасних математичних методів і засобів обчислювальної техніки в проектування складних систем. Ця галузь об'єднує два основних напрями: розробку методів оптимального проектування систем та розробку систем автоматизованого проектування на базі сучасної обчислювальної техніки. Перший напрям включає побудову і реалізацію на ЕОМ математичних моделей та розробку методів оптимізації систем з метою отримання оптимальних проектних рішень за відповідним критерієм оптимальності. Другий напрям включає роботи зі створення відповідних пакетів прикладних програм та системного забезпечення, об'єднаних в проблемно-орієнтовані підсистеми автоматизованого проектування.

У даному навчальному посібнику розглядаються теоретичні та практичні особливості автоматизованого проектування на системотехнічному рівні, що є характерними для початкових етапів проектування систем. Зокрема, у стислій і доступній формі викладається методологія багатокритеріальної оптимізації та моделювання інформаційних систем, яка ілюструється на прикладах із галузі зв'язку. Наводяться відомості про деякі пакети програм, що можуть бути використані під час автоматизованого проектування систем та мереж зв'язку. Необхідно зауважити, що у роботі термін система зв'язку (якщо спеціально не оговорюється) використовується у широкому розумінні, зважаючи на те, що і мережа зв'язку – це також система зв'язку, тільки більш високого ієрархічного рівня.

У першому розділі наведено загальні відомості з проектування технічних систем. У другому розділі розглянуто особливості вибору оптимальних проектних варіантів систем методами багатокритеріальної оптимізації. У третьому та четвертому розділах розглянуто основні теоретичні відомості з моделювання інформаційних систем на ЕОМ. У п'ятому, шостому та сьомому розділах наведено відомості про деякі пакети програм, які можуть бути використані в ході оптимізації та моделювання систем і мереж. Перелік рекомендованої літератури включає широкий перелік публікацій, які для зручності користування розділені за тематичними рубриками.

Під час підготовки цієї роботи використано системні узагальнення наведених публікацій стосовно проектування, зокрема, автоматизованого проектування, багатокритеріальної оптимізації та моделювання систем. Враховано також досвід авторів з викладання відповідних дисциплін у Харківському національному університеті радіоелектроніки.

1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМ

Проектування – це початковий етап створення нової чи модернізації існуючої системи, який включає перетворення інформації, що задана технічним завданням, у технічну документацію на виготовлення цієї системи. Проектування включає комплекс робіт з дослідження, розрахунків, оптимізації, моделювання, конструювання для отримання оптимальної (найкращої у певному розумінні) системи, що задовольняє вимоги технічного завдання.

В сучасних умовах постійно зростають потреби суспільства у нових засобах телекомунікації та радіотехніки. Поряд із ускладненням відповідних систем виникають вимоги скорочення термінів їхнього проектування та підвищення якості проектування без зростання кількості проєктувальників. Цього можна досягти шляхом застосування автоматизованого проектування систем, що означає виконання проєктних процедур при тісній взаємодії людини та ЕОМ. Розглянемо деякі загальні положення та особливості початкових етапів проектування систем.

1.1 Етапи та особливості проектування систем

Життєвий цикл складної технічної системи, як правило, включає такі етапи:

- 1) формулювання вимог до системи і складання технічного завдання на її розробку;
- 2) проектування системи;
- 3) виготовлення, дослідження та доопрацювання дослідних зразків системи;
- 4) серійне виробництво системи;
- 5) експлуатація системи;
- 6) модернізація системи,
- 7) утилізація системи.

Етап 1 також називають зовнішнім проектуванням. При цьому з'ясовується мета, заради якої створюється система; уточнюється коло розв'язування нею задач; визначаються умови роботи системи, формулюються вимоги до технічних характеристик та показників якості системи.

Етап 2 називають також внутрішнім проектуванням. При цьому визначаються структура і параметри системи, варіанти побудови та способи практичної реалізації, конструкція, технологія виготовлення підсистем

та системи в цілому. Метою внутрішнього проектування є розробка необхідної технічної документації, що становить проєкт системи.

На етапі внутрішнього проектування передусім виділяють такі стадії: розробка технічної пропозиції, ескізного проєкту, технічного проєкту, робочої конструкторської документації. На стадії розробки технічної пропозиції формується концепція побудови та визначаються основні параметри системи, що задовольняють вимоги технічного завдання. При цьому фактично узгоджуються вимоги зовнішнього проектування з можливостями внутрішнього проектування. Основна задача ескізного проектування – розробка структури, визначення основних характеристик системи. На стадії технічного проектування уточнюється та деталізується проєкт системи, створюється та випробовується дослідницький зразок системи. На заключній стадії проектування розробляється комплект конструкторської документації на виробництво та експлуатацію системи.

Процес внутрішнього проектування системи у загальному випадку включає виконання таких робіт: аналіз аналогічних систем та обґрунтування вихідних даних і обмежень на систему; вибір принципів побудови і визначення структури системи; схемотехнічний синтез системи; конструювання системи; розробка технології виготовлення системи, підготовка апаратури для випробувань системи.

Під час проектування спочатку виконуються науково-дослідні роботи, в межах яких проводиться пошук шляхів створення та дослідження нових принципів побудови системи. Результатом є формулювання технічного завдання на розробку нової системи. Потім проводяться експериментально-конструкторські роботи, в межах яких перевіряються і конкретизуються способи побудови системи, а також створюється дослідницький зразок системи. Результатом є ескізний проєкт системи. Під час технічного проектування виконується детальна розробка усіх схемних, конструкторських і технологічних рішень, необхідних для виготовлення, випробувань та експлуатації системи.

Опис складної технічної системи складається з декількох аспектів: функціонального, конструкторського, технологічного. Функціональний аспект відображує фізичні, інформаційні процеси, що відбуваються у системі в процесі її функціонування. Конструкторський аспект характеризує структуру, розташування у просторі та форму складових частин системи. Технологічний аспект характеризує технологічність, можливість і засоби виготовлення системи в заданих умовах.

В ході описування системи виділяються такі рівні абстрагування: системний, функціональний, схемотехнічний і компонентний. На системному рівні як система фігурує той об'єкт, що призначений для проектування, наприклад, система автоматичного телефонного зв'язку або мережа передачі даних між ЕОМ. Функціональними елементами виступають блоки та пристрої, наприклад, модем, передавач, приймач, демодулятор. Схемними елементами виступають, наприклад, генератор сигналів, підсилювач, лічильник, дешифратор. На компонентному рівні розглядаються процеси, що протікають у компонентах схеми, наприклад, інтегральних схемах, транзисторах.

Залежно від того, в якій послідовності виконується проектування, розглядають спадний і висхідний спосіб проектування системи. При спадному проектуванні, що протікає «зверху-вниз», задачі більш високих ієрархічних рівнів проектування вирішуються раніше, ніж задачі нижчих ієрархічних рівнів. При висхідному проектуванні – «знизу-вверх», навпаки, задачі нижчих ієрархічних рівнів проектування вирішуються раніше, ніж задачі більш високих ієрархічних рівнів. Функціональне проектування є, як правило, спадним, а конструкторське – висхідним.

Успішне вирішення завдання проектування системи можливе лише на базі різностороннього, цілісного розгляду проектованої системи та її розвитку (зміни) у процесі взаємодії із зовнішнім середовищем та іншими системами. Лише такий підхід, який називається системним, здатний привести до істинно творчих, новаторських проектних рішень. В основі системного підходу лежать такі принципи:

1. Врахування всіх етапів «життєвого циклу» системи, що розробляється (проектування, виготовлення, експлуатація, утилізація).
2. Врахування історії і особливо перспектив розвитку систем даного та близьких класів систем.
3. Різносторонній розгляд взаємодії системи з навколишнім середовищем (з природою та суспільством взагалі).
4. Врахування основних видів взаємодії елементів самої системи (функціональної, конструктивної, енергетичної, інформаційної, динамічної).
5. Врахування взаємодії між розвитком елементної бази та схемотехніки.
6. Врахування можливості зміни вихідних даних і навіть вирішуваної задачі в процесах проектування, виготовлення та експлуатації системи.
7. Виділення головних показників якості системи, що мають враховуватися та покращуватися під час проектування.

8. Поєднання принципів композиції, декомпозиції та ієрархічності під час створення підсистем, пристроїв, блоків.

9. Розкриття основних технічних протиріч, що перешкоджають покращенню основних показників якості системи та пошук шляхів їхнього усунення.

9. Правильне поєднання різних методів проєктування: математичних, евристичних, експериментальних, а в рамках математичних методів – аналітичних та за допомогою ЕОМ.

10. Забезпечення відповідної взаємодії в процесі проєктування спеціалістів різного профілю.

Розглянемо деякі особливості проєктування систем зв'язку з урахуванням вказаних принципів системного підходу.

Оскільки складність систем зв'язку швидко зростає, то для аналізу і синтезу таких складних систем існує лише один шлях – розчленування їх на різні елементи та дослідження множини їхніх структур і взаємодії. Ці проблеми відображені у науковому напрямі – архітектура систем. Архітектура систем – містке поняття, що містить три важливих види взаємопов'язаних структур: фізичну, логічну, програмну. Кожна з цих структур визначається набором елементів і характером їхньої взаємодії.

Складній системі зв'язку притаманні такі відмінні ознаки:

- велика кількість взаємопов'язаних і взаємодіючих елементів;
- складність функції, яку виконує система;
- можливість розбивання системи на підсистеми, функціонування яких підпорядковані загальній меті функціонування системи;
- керування розгалуженою мережею (часто ієрархічної структури) і потоками інформації;
- взаємозв'язок із зовнішнім середовищем і функціонування в умовах впливу випадкових факторів.

Сучасні системи зв'язку є типовими представниками складних систем з ієрархічною, функціональною та структурною організацією. Функціональна ієрархія відбиває специфіку задач кожного елемента системи та підпорядкованість елементів, зумовлену їхнім спільним функціонуванням у складі системи зв'язку.

У сучасній практиці створення складних систем для їхнього синтезу використовується поєднання змістовних (евристичних, інтуїтивних) та формальних (алгоритмічних) методів. Синтез складних систем полягає у визначенні структури системи, що синтезується, та процесів її функціонування. Функціонально-структурний підхід зводиться до розбивання

складних систем на окремі структурні рівні (підсистеми) для визначення їхнього функціонального призначення. Така організація відображує як взаємодію системи з навколишнім середовищем, так і внутрішні взаємозв'язки елементів у процесі функціонування системи.

Внутрішні процеси в системах зв'язку можна подати у вигляді досить складних моделей фізичних, інформаційних та керуючих потоків. Однак масштаби та складність сучасних систем зв'язку такі, що їхній безсистемний опис подібним набором моделей часто не наближає, а віддаляє проєктувальників від розуміння основних процесів, що відбуваються в системі, та їхніх взаємозв'язків. З цього випливає необхідність використання простої, але водночас унікальної методології аналізу прикладних областей і специфікації (подання) систем зв'язку, що дозволяють систематизовано зафіксувати процеси, які відбуваються в них. Таким науковим методом є метод системного аналізу.

Центральне місце серед основних концепцій проєктування систем зв'язку треба надати принципу модульності, який необхідно розвивати на інформаційному, функціональному та інших рівнях. Принцип модульної організації передбачає побудову складних систем на основі набору модулів. Модульний підхід під час проєктування систем дозволяє забезпечити створення сімейств систем, які відрізняються функціональними можливостями та характеристиками, сприяє стандартизації елементів усе більш високих рівнів та скороченню витрат на проєктування систем. Основні властивості виділених типів модулів – їхня завершеність та ієрархічність у середині модулів певного типу.

В ході вирішення питання про функціональний склад модулів існують дві діалектичні протилежності – багатофункціональність та спеціалізація модулів, причому ці протилежності існують на всіх рівнях розвитку систем. Підвищення універсальності модулів розглядається як захід, який забезпечує скорочення номенклатури, зниження витрат на проєктування. Спеціалізація модулів є засобом досягнення високої ефективності системи внаслідок оптимального узгодження алгоритмів та функцій, що реалізуються, а також зменшення надлишковості структури модулів.

1.2 Застосування математичних методів на початкових стадіях проєктування

Раніше під час проєктування систем використовувалися в основному евристичні та експериментальні методи. Процес проєктування зводився

до вибору з невеликої кількості варіантів систем і тільки тих, що задовольняють задані обмеження на тактико-технічні характеристики системи. З ускладненням систем і зростанням їхньої вартості виникла необхідність створення оптимальних систем. Став крилатим вислів «Ми не настільки багаті, щоб проєктувати неоптимально». Зараз під час проєктування вже не задовольняються аналізом тільки одного варіанта системи із заданими властивостями. Намагаються порівняти якомога більше альтернативних варіантів побудови системи, щоб вибрати із них найкращий у встановленому розумінні.

В процесі проєктування складної системи необхідно, щоб на кожному етапі приймалися оптимальні проєктні рішення. Тому, під час проєктування значну роль відіграють такі основні проєктні процедури, як оптимізація, синтез, аналіз варіантів побудови системи. Оптимізація – це вибір оптимальної (найкращої у певному розумінні) структури та параметрів системи. При цьому мають місце задачі синтезу та аналізу. Вибір параметрів системи – це параметричний синтез, вибір структури – це структурний синтез. Аналіз – це оцінювання потенційних можливостей системи, визначення характеру змін значень вихідних параметрів системи залежно від того, як змінюється її структура та внутрішні параметри системи. Вихідні параметри системи визначають технічні характеристики системи (наприклад, вага, габарити, надійність, необхідна смуга частот), а також визначають показники якості, що характеризують споживчі властивості системи (наприклад, точність і швидкість передачі даних, тривалість затримки повідомлень). До внутрішніх параметрів системи належать, наприклад, вид модуляції, потужність сигналу передавача, робоча частота сигналу, коефіцієнт модуляції, девіацію частоти.

В сучасних умовах під час проєктування застосовують математичні, евристичні та експериментальні методи. Евристичні та експериментальні методи використовуються в тому випадку, коли немає можливості вирішити поставлені задачі проєктування за допомогою математичних методів.

Під час використання математичних методів проєктування сукупність вихідних даних для проєктування формулюється у вигляді точних математичних положень, зокрема, будуються математичні моделі системи, визначаються показники якості системи, вибирається критерій оптимальності системи та розв'язуються задачі оптимізації структури та параметрів системи.

Поняття оптимальності пов'язується з вибором найкращих у встановленому розумінні варіантів системи. Цей вибір виконується шляхом оптимізації деяких цільових функцій, зв'язаних з показниками якості систем. Постає запитання, чи можливо взагалі знайти проєктне рішення, яке б задовольняло максимум

(чи мінімум) одночасно всіх цільових функцій. Як правило, це неможливо. Тому, наприклад, формулювання «добитися максимальної ефективності системи за мінімальних витрат» не має сенсу.

Обрані показники якості системи можуть бути трьох типів: нейтральні, тобто незалежні між собою; пов'язані між собою, але узгоджені; пов'язані та конкуруючі між собою. У перших двох випадках оптимізація системи може виконуватися незалежно щодо кожного із показників. У третьому, найбільш складному випадку, поліпшення одних показників якості призводить до погіршення інших показників якості. Тому, під час розв'язання оптимізаційної задачі необхідно шукати узгоджений оптимум показників якості, якому відповідає найкраще значення кожного показника якості, що може бути досягнутий за фіксованих, але довільних значень інших показників якості.

Задача вибору оптимальних варіантів систем із позиції системного аналізу є типовою задачею відомої галузі дослідження операцій, зокрема, теорії вибору і прийняття рішень. Задача прийняття рішень це пара $\langle X, PO \rangle$, де X – множина допустимих варіантів (альтернатив) системи, PO – принцип оптимальності, що визначає поняття кращих (оптимальних) варіантів. Розв'язком задачі $\langle X, PO \rangle$ є підмножина оптимальних варіантів $X_0 \subseteq X$, отримана з використанням зазначеного принципу оптимальності.

Математичним виразом принципу оптимальності є функція вибору C_0 . Вона зіставляє з підмножиною допустимих варіантів X ту її частину $X_0 = C_0(X)$, що є розв'язком сформульованої задачі вибору. Задачі прийняття проектних рішень відрізняються залежно від наявної інформації про множину X і принцип оптимальності PO . У загальній задачі прийняття рішень як X , так і PO можуть бути не повністю відомі, а додаткову інформацію для вибору X_0 отримують у процесі розв'язання задачі. Задачу з відомою множиною X називають задачею вибору, а задачу з відомими X та PO – загальною задачею оптимізації.

Нехай певна властивість альтернатив із множини X виражається числом, тобто існує відображення $\varphi: X \rightarrow E_1$. Тоді така властивість називається показником якості, а число $k = \varphi(x)$ – оцінкою альтернативи X за цільовою функцією (критерієм) $\varphi(x)$. Як правило, альтернативи характеризуються не однією, а кількома властивостями, що визначає необхідність характеризувати систему вектором показників якості $\vec{K} = (k, \dots, k_m)$. При цьому проектне рішення x оцінюється за сукупністю цільових функцій $\vec{\varphi}(x) = (\varphi_1(x), \dots, \varphi_m(x))$,

а множина X відображується у критерійному просторі E_m , де кожній альтернативі $x \in X$ відповідає свій вектор оцінок $\vec{\varphi}(x) \in E_m$.

Існує багато методів оптимізації систем, що вкладають у поняття оптимальності різне розуміння. Проте більшість правил вибору кращих рішень має спільну рису: вибір виконується на основі інформації про попарне (бінарне) порівняння варіантів систем. Зазвичай, таке порівняння може здійснюватися на множині допустимих альтернатив, але частіше це зручно виконувати у критерійному просторі, оскільки тут проєктні рішення порівнюються за допомогою критеріїв, що мають числовий характер.

Під час проєктування систем мають місце прямі й обернені задачі. Прямі задачі – це задачі аналізу, що відповідають на запитання: яке значення приймає критерій для вибраного допустимого варіанта системи $x \in X$. Обернені задачі – це задачі синтезу, що відповідають на запитання: як вибрати проєктне рішення x , для якого критерій досягає оптимального значення. Якщо є відомим аналітичний вираз для цільової функції $\varphi(x)$ (у скалярному випадку), то оптимальна альтернатива знаходиться розв'язанням деякої варіаційної задачі $x_0 = \arg \underset{x \in X}{opt} \{ \varphi(x) \}$. Складнощі розв'язання таких задач

пов'язані з апіорною невизначеністю, зокрема, при недостатній інформації про умови роботи системи. Якщо ця невизначеність носить параметричний характер, можуть бути отримані оцінки невідомих параметрів, які і використовуються під час розв'язання задач оптимізації. У загальному випадку апіорна невизначеність призводить до складніших за структурою систем.

Другий тип апіорної невизначеності пов'язаний з відсутністю достатньої інформації для формалізації розпливчастого уявлення про оптимальність системи, що є наслідком недостатньо усвідомленої, а тому і нечітко сформульованої глобальної цілі функціонування системи. Відомими є тільки вимоги до окремих властивостей (показників якості) системи. Це і призводить до задач векторної (багатокритеріальної) оптимізації, в яких виникає необхідність шукати оптимум векторної цільової функції $\vec{\varphi}(x) = (\varphi_1(x), \dots, \varphi_m(x))$.

Лише у випадку нейтральних і узгоджених показників якості розв'язок оптимізаційної задачі знаходять шляхом незалежної оптимізації окремих цільових функцій $x_{0i} = \arg \underset{x \in X}{opt} \{ \varphi_i(x) \}$, $i = \overline{1, m}$.

При пов'язаних між собою і конкуруючих показниках якості системи збіг окремих розв'язків $x_{01} = x_{02} = \dots = x_{0m}$ є швидше випадком, аніж правилом.

У цьому разі розв'язком задачі $x_0 = \arg \underset{x \in X}{opt} \{\bar{\varphi}(x)\}$ є узгоджений оптимум,

якому відповідають найкращі значення кожного з показників якості, що можуть бути досягнуті за фіксованих (але довільних) значень інших показників. Розв'язком таких оптимізаційних задач, як правило, є не одна альтернатива, а певна множина альтернатив. Множину розв'язків, що задовольняють умову узгодженого оптимуму векторної цільової функції, називають Парето-оптимальними розв'язками.

Враховуючи, що показники якості взаємопов'язані між собою, потенціально можливі значення кожного показника, наприклад, першого k_{10} залежать від значень інших $(m - 1)$ показників якості k_2, \dots, k_m . Ця залежність $k_{10} = f(k_2, \dots, k_m)$ при різних допустимих комбінаціях k_2, \dots, k_m називається робочою поверхнею. За умови, що залежність є суворо монотонною за кожним показником k_2, \dots, k_m , вона є оптимальною поверхнею. Усі точки цієї поверхні задовольняють умови m -кратного узгодженого оптимуму і тому визначають багатовимірні (m -вимірні) потенціальні характеристики системи. В термінах багатокритеріальної (векторної) оптимізації оптимальній поверхні відповідає множина Парето-оптимальних значень вектора показників якості \vec{K} , а також відповідних їм Парето-оптимальних систем. Оптимальна поверхня визначає також сімейство багатовимірних діаграм обміну показників якості, тобто залежностей потенціально можливих значень кожного із показників якості від значень інших $(m - 1)$ показників.

Необхідно зазначити, що широко використовувані на практиці одновимірні потенціальні характеристики систем, що характеризують потенціальне значення одного показника якості є, як правило, прихованою формою багатовимірної потенціальної характеристики і зв'язаною з нею багатовимірною діаграмою обміну. Це пояснюється тим, що під час визначення одновимірної потенціальної характеристики всі показники якості, окрім одного (найбільш важливого), переводяться в ранг обмежень або повністю ігноруються (тобто не враховуються). Однак фактично повністю ігнорувати всі показники якості, окрім одного, недопустимо, оскільки при цьому потенціально можливе значення цього єдиного оптимізувального показника якості досягне нуля (тобто розв'язувана оптимізаційна задача виродиться у тривіальну). Таким чином, при оптимізації обраного головного показника треба обов'язково брати до уваги значення ще як мінімум одного антогоністичного показника. Тому, на практиці доводиться обов'язково враховувати, як правило, декілька

показників якості. Звідси випливає, що у загальному випадку всі оптимізаційні задачі проектування складних систем є багатокритеріальними за своєю суттю.

Для подальшого вибору єдиного проектного рішення із отриманої множини Парето-оптимальних варіантів треба залучати додаткову інформацію, яка уточнює і формалізує початкове нечітке уявлення про оптимальність системи. Використання такої інформації дає змогу визначити деяку конструктивну процедуру вибору єдиного прийняттого варіанта. Таким чином, спроектувати оптимальну систему – означає знайти оптимальну за векторним критерієм структуру та оптимальні значення параметрів системи. Для цього потрібно розв'язувати математичні задачі у загальному випадку векторної оптимізації при заданих цільових функціях і обмеженнях. Порівняно із задачами скалярної оптимізації, це значно складніші математичні задачі.

У багатьох випадках синтез та аналіз ефективності систем виконується аналітичними методами. Але часто розв'язання цих задач зіштовхується зі складнощами не лише технічного, а й принципового характеру. У таких випадках під час проектування складних систем також широко використовується їхнє моделювання на ЕОМ. Моделювання системи включає побудову і програмну реалізацію математичної моделі системи на ЕОМ і проведення її дослідження. Метою моделювання є перевірка ще на початкових етапах проектування правильності вибраних проектних рішень, а також можливості виконання вимог технічного завдання щодо отримання необхідних тактико-технічних характеристик системи. Необхідно зазначити, що виправлення помилок проектування ще на стадії підготовки технічної документації є значно дешевшим, ніж на стадії виготовлення дослідницьких зразків системи і тим більше на стадіях серійного виробництва та експлуатації системи. Тому, моделювання системи на ЕОМ є важливим і ефективним етапом проектування системи.

Вказані проектні процедури оптимізації та моделювання притаманні початковим етапам проектування систем. Вони виконуються з використанням ЕОМ. Такий спосіб проектування, коли проектні процедури виконуються у тісній взаємодії проектувальника з ЕОМ, називається автоматизованим проектуванням. Відповідні пакети прикладних програм та організаційно-технічні засоби, що реалізують ці проектні процедури, називають системами автоматизованого проектування (САПР). Для автоматизованого є характерним раціональний розподіл функцій між людиною та ЕОМ. За допомогою ЕОМ розв'язуються ті задачі, які підлягають формалізації, але за умови, що їхнє машинне розв'язання ефективніше, ніж «ручне». Для такого способу

проектування характерним є використання ЕОМ при автоматизації окремих проектних процедур, що раніше виконувалися проєктувальниками «вручну» (розрахунки, оптимізація, дослідження та опрацювання результатів досліджень, випуск конструкторської документації тощо). На цей час автоматизоване проектування систем широко застосовується на схемотехнічному рівні, а також під час конструювання та розробки технології виготовлення окремих елементів системи. Але через ускладнення систем все більша потреба виникає в застосуванні ЕОМ під час проектування на системотехнічному рівні, зокрема, при оптимізації та моделюванні в цілому систем.

Необхідно відрізнити автоматизоване проектування від автоматичного проектування. В останньому випадку опис проєктувального об'єкта або алгоритм його функціонування перетворюється в технічну документацію без участі людини.

Сьогодні термін «автоматизація проектування» визначає не тільки спосіб проектування, але також характеризує важливий науково-технічний напрямок у галузі проектування систем. При автоматизації проектування спостерігається перехід кількісного виграшу в термінах та витратах на проектування в якісні можливості цілих галузей техніки. Прикладом може служити мікроелектроніка, в якій без автоматизації проектування практично неможливим було б створення великих інтегральних схем.

Для розв'язання задачі автоматизованого проектування складної системи необхідна не тільки проста «експлуатація» значних технічних можливостей ЕОМ (великої швидкодії та пам'яті), але і глибокі знання предметної галузі. Це необхідно для побудови відповідних математичних моделей системи та використання сучасного математичного апарату теорії оптимізації систем для вибору проектних рішень, оптимальних за векторним критерієм оптимальності. При цьому виникає ряд питань. Як сформулювати множину допустимих варіантів побудови системи? Як формалізувати цілі, заради яких створюється система? Як серед усіх можливих варіантів знайти оптимальний – «найбільш відповідний поставленим завданням»? Щоб відповісти на ці запитання, необхідно математично точно поставити задачу синтезу оптимальної системи з урахуванням усіх вимог технічного завдання.

Докладніше особливості проектування оптимальних систем з урахуванням сукупності показників якості розглядаються у розд. 2, а основні принципи та методи моделювання систем на ЕОМ – в розд. 3, 4 і 5.

1.3 Особливості мережі зв'язку як об'єкта проєктування

Розглянемо загальну структуру мереж зв'язку (МЗ) (рис. 1.1), яка є складовими елементами інформаційних мереж – систем більш високого ієрархічного рівня. Інформаційні мережі – це сукупність технічних засобів збору, збереження, розподілу, передачі та обробки інформації.

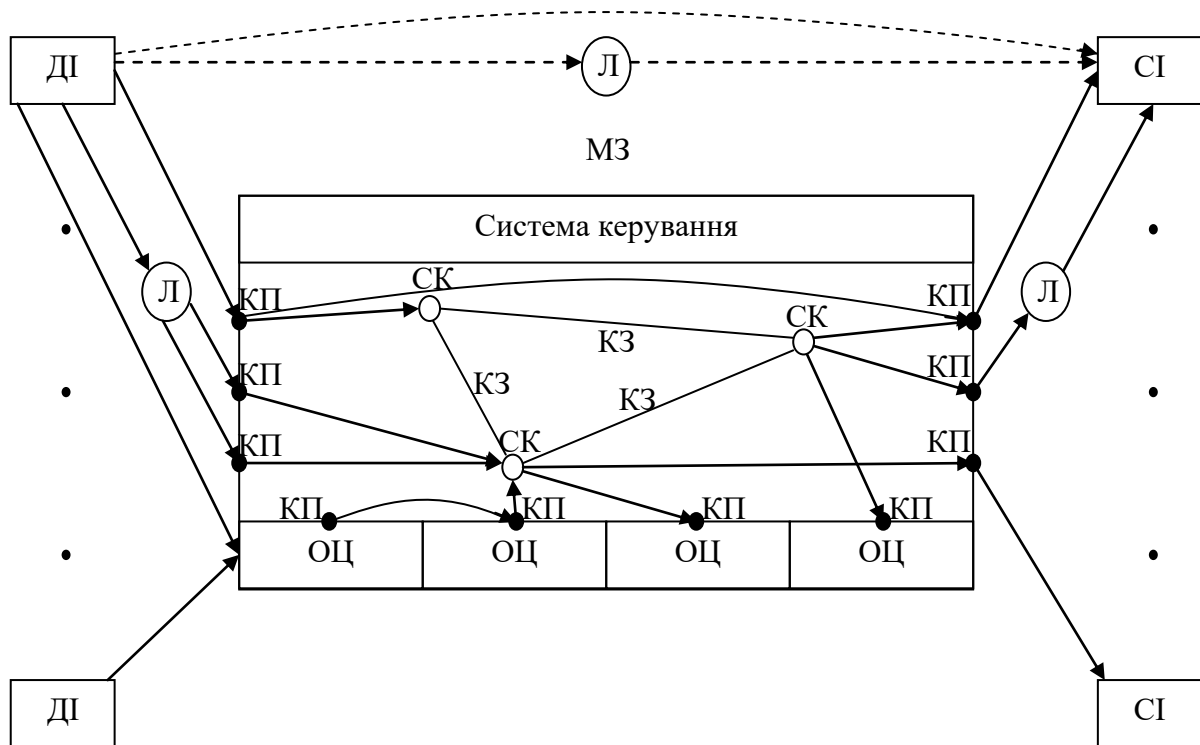


Рисунок 1.1 – Структурна схема мережі зв'язку

Інформація від джерел інформації (ДІ) до споживачів інформації (СІ) може бути доставлена різними способами: людиною (Л) безпосередньо, за допомогою якогось виду зв'язку (наприклад, поштового, кур'єрського), або за допомогою системи електрозв'язку чи мережі електрозв'язку.

Мережа зв'язку – це сукупність кінцевих пунктів (КП), вузлів зв'язку (ВЗ) або систем комутації (СК), ліній або каналів зв'язку (КЗ), система керування, що призначені для передавання інформації від джерел інформації до споживачів інформації за допомогою електричних сигналів.

Кінцеві пункти – це сукупність технічних засобів для перетворення інформації в електричні сигнали, що можуть бути передані по каналах електрозв'язку. Вузли зв'язку, поділяються на комутаційні (комутація каналів, комутація повідомлень, комутація пакетів) для розподілу інформації та мережні (з кросуванням) для розподілу пучків каналів. Канали та лінії зв'язку,

тобто ребра мережі, призначені для перенесення сигналів у просторі між окремими пунктами мережі. Фактично це одно- чи багатоканальні системи передавання сигналів. Система керування – це набір програмно-технічних засобів, призначених для забезпечення нормальної роботи окремих систем, пристроїв і каналів, а також доставки повідомлень за адресою із заданими показниками якості, перерозподілу і обмеження потоків повідомлень, що передаються в мережі зв'язку. Обчислювальні центри (ОЦ) використовуються для забезпечення інформаційних послуг, тобто збору, збереження і переробки інформації. Для обміну інформацією між окремими ОЦ може бути використана МЗ, але в ролі ОЦ можуть бути і локальні мережі ЕОМ. Обчислювальні центри, що входять в інформаційну мережу, відносно МЗ, можуть розглядатися як КП або як джерело чи споживач інформації.

Таким чином, мережа зв'язку є системою передавання та розподілу інформації, тобто системою зв'язку у широкому розумінні. У цілому задачу розподілу інформаційних потоків у МЗ виконує система комутації. Вибір методів комутації визначається, виходячи з особливостей потоків повідомлень, класів користувачів і показників якості обслуговування. Розглянемо існуючі методи комутації із зазначених позицій.

Мережі з комутацією каналів. У мережах з комутацією каналів входженню користувача у зв'язок передуює встановлення між ними прямого з'єднання через ряд проміжних ВК. Організований складений тракт передавання інформації, який одночасно використовує велике число проміжних ВК, закріплюється між двома КП на весь період сеансу зв'язку. При діалоговому режимі роботи інтервали між короткими проміжками передавання корисної інформації є значними, що призводить до зниження ефективності використання мережі.

Мережі з комутацією повідомлень. Метод комутації повідомлень на відміну від методу комутації каналів не потребує одночасного використання великої кількості проміжних ділянок. Тут повідомлення передаються по черзі від ділянки до ділянки аж до досягнення повідомленням приймального КП. Якщо чергова проміжна ділянка зайнята, то передавані повідомлення накопичуються у центрі комутації до моменту звільнення зайнятої ділянки.

Мережі з комутацією пакетів. Метод комутації пакетів на відміну від комутації повідомлень передбачає розподіл і передавання не цілих повідомлень, а частин повідомлення – пакетів, кожного зі своїм заголовком та адресою КП. Очевидно, що фаза встановлення з'єднання в явному вигляді тут відсутня. Пакети одного повідомлення можуть передаватися різними

маршрутами. При цьому легко реалізуються різні види послуг для користувача, високий коефіцієнт завантаження каналів зв'язку, відносно малий час затримки при передачі пакетів завдяки можливості адаптивного перерозподілу трафіка з урахуванням стану мережі.

Мережі з гібридною комутацією. Поєднання переваг даних методів забезпечується у системах гібридної комутації, в яких комбінується метод комутації каналів для повідомлень, що потребують передавання в реальному масштабі часу (мова, сигнали телекерування і телеметрії, факсимільні повідомлення тощо) і метод комутації пакетів для цифрових даних. При цьому частина пропускної здатності магістральних каналів відводиться під трафік, що передається у режимі комутації каналів, а друга частина – під трафік, що передається у режимі комутації пакетів. Платою за широкі можливості гібридного методу комутації є ускладнення апаратури ВК.

Процес передавання повідомлень у МЗ, коли джерела інформації незалежні один від одного, породжує систему випадкових (у часі і просторі) потоків даних. Якість функціонування такої системи зв'язку, що комутується, характеризують різними показниками: середнім часом затримки повідомлень у мережі і середнім часом передавання повідомлень, проміжком часу від моменту під'єднання відправника до мережі до моменту видачі повідомлення отримувачу. Повідомлення виникають у випадкові моменти часу, їхні тривалості також є випадковими величинами.

Велика кількість абонентів мережі і випадковість породжуваних ними потоків, що вимагають обслуговування, дозволяє розглядати МЗ як систему масового обслуговування (СМО). Кількісну сторону процесів у СМО досліджує теорія масового обслуговування, а інколи теорія черг. Вона встановлює залежність між характером потоків заявок, продуктивністю окремого каналу (обслуговуючого апарату), кількістю каналів та ефективністю обслуговування [94, 98, 99]. Існують різні види систем обслуговування під час надходження вимог у систему, коли обслуговуючі апарати (ОА) зайняті.

Системи з втратами. Вимоги, що надходять до системи, не знаходять жодного вільного обслуговуючого апарату і губляться.

Системи з доочікуванням. Можливе очікування для будь-якого числа вимог, які не можуть бути обслужені відразу. Вони складають чергу і за допомогою деякої дисципліни обслуговування визначається, в якому порядку очікувані вимоги вибираються з черги для обслуговування. Важливими дисциплінами обслуговування є: вимоги, що обслуговуються

в порядку їхнього надходження; щоразу перевагу має вимога, що надійшла останньою; чергова вимога вибирається з черги навмання.

Комбіновані системи з доочікуванням і втратами. Очікувати може лише кінцеве число вимог, що визначається числом місць для очікування. Вимога може губитися і тоді, коли час очікування вимог перевищує задані межі.

Пріоритетні системи. Вимоги, що надходять, мають різні пріоритети. Якщо вимога, що надійшла, має високий пріоритет, а всі обслуговуючі апарати зайняті, то вона або займає одне з перших місць у черзі, або тимчасово припиняє обслуговування вимоги низького пріоритету, або взагалі припиняє його.

Мережі зв'язку підрозділяються за такими принципами:

- залежно від виду інформації, що передається (телефонні, телеграфні, передачі даних, звукове і телевізійне мовлення);
- залежно від території, що обслуговується (міжміські, обласні);
- за відомчою приналежністю (загального користування, диспетчерські);
- за способом розподілу і доставки повідомлень (прямими каналами або з комутацією каналів, повідомлень, пакетів);
- залежно від техніки, що використовується для організації роботи каналів зв'язку (кабельні, радіорелейні, волоконно-оптичні, супутникові);
- за типом каналу зв'язку (аналогові, дискретні, телефонні, телеграфні);
- за напрямком передачі (симплексні – в один бік, дуплексні – в обидва боки;
- за пропускнуою здатністю (низько- і високошвидкісні).

Таким чином, проектування мереж зв'язку – це складна науково-технічна та економічна проблема, що потребує розв'язання великої кількості взаємопов'язаних задач, до них належать, насамперед, задачі, пов'язані з визначенням топології мережі, вибором її архітектури та методу комутації, вибором каналів зв'язку, керуванням інформаційними потоками та мережею в цілому, розробкою та реалізацією стандартних процедур (протоколів інтерфейсів) для взаємодії апаратних та програмних засобів мережі, сервісним обслуговуванням тощо. Для розв'язання цих задач використовується системний підхід, що дозволяє з єдиних позицій розглянути проектування мережі як складної системи зв'язку.

В ході створення мереж зв'язку виникають різні задачі проектування: побудова нової мережі, розвиток існуючих мереж з уведенням нових пунктів і каналів зв'язку, побудови нових мереж зв'язку на базі існуючих пунктів і каналів зв'язку заданої первинної мережі. У будь-якому випадку під час проектування мереж зв'язку необхідно побудувати математичну модель;

вибрати показники якості та критерій оптимальності; вибрати оптимальну структуру та параметри мереж зв'язку та її складових частин.

Проектування мережі зв'язку включає розв'язування таких основних задач: визначення топології мережі; вибору пропускних здатностей каналів; визначення процедур маршрутизації; визначення процедур керування потоками. В цілому зміст проектування мережі зв'язку полягає в тому, щоб при заданих потоках синтезувати структуру мережі, яка за мінімальну вартість і з дотриманням деяких вимог до характеристик мережі могла б обслуговувати ці потоки. Зазвичай, проектування мережі виконується в декілька етапів: прийняття рішень відносно топології абонентської мережі (загальна кількість абонентів, кількості і місця розташування концентратів доступу); проектування абонентських мереж; проектування магістральних мереж.

Різні підходи щодо розв'язання задач проектування мережі визначаються вибором глобального показника якості, якими оцінюються мережі, наприклад, ціна будівництва мережі; ціна експлуатації мережі; надійність і продуктивність мережі; середній час затримки обслуговування заявок абонентів мережі. Важливе значення для проектування має також вибір сукупності частинних показників ефективності, що характеризують споживчі властивості мережі. Процес проектування мережі включає вибір структури мережі (структурний синтез) і вибір числових значень параметрів структур (параметричний синтез).

Для розв'язування задач оптимального проектування мережі зв'язку обов'язковим є побудова її аналітичної моделі. Введена модель мережі на основі теорії масового обслуговування дає можливість вирішити ряд задач топологічного проектування, зокрема, це задача вибору пропускної продуктивності каналу та задача розподілу потоків. Однак, отримані оптимальні вирішення зазначених задач можуть бути використані лише для сформульованих у цих задачах вихідних даних. У ряді випадків вихідні дані для побудови моделі мережі відрізняються, тому для вирішення задач проектування мереж зв'язку запропоновано багато інших методів синтезу та аналізу. Зокрема, певний інтерес становлять задачі структурного синтезу системи у наступних постановках.

Задача 1. На множині можливих структур системи $Q = \{Q_j\}, j = 1, \dots, J$, знайти структуру Q_{opt} , якій відповідає мінімум критерію вартості $\min_{Q_j \in Q} C(Q_j)$ за умови виконання обмежень типу нерівностей на решту показників ефективності.

Задача у такій постановці характерна для проектування комутаційних центрів і мереж найбільш масових типів (міських та сільських АТС, зонних центрів і мереж комутації повідомлень та пакетів, концентраторів каналів та повідомлень тощо).

Задача 2. На множині можливих структур системи знайти упорядковану за зростанням показника вартості підмножину структур $Q^l = \{Q_l\}, l=1, \dots, L$; $C(Q_{l-1}) \leq C(Q_l)$, для яких $C(Q_l)$ може перевищувати допустимий рівень вартості C_δ не більш, ніж на величину ΔC , тобто $C(Q_l) - C_\delta \leq \Delta C$.

Виділення такого варіанта задачі у самостійну задачу зумовлено тим, що оптимальний за критерієм $\min C(Q_i)$ варіант структури системи може виявитися таким, що важко реалізується. Урахувати всю різноманітність зв'язків між параметрами системи дуже складно. Тому, під час проектування великих систем можна отримати не один кращий у розумінні $\min C(Q_i)$ варіант структури системи, а кілька близьких за ефективністю варіантів, що можуть розглядатися як альтернативні.

Задача 3. Синтезувати структуру системи, що забезпечує обслуговування вхідного потоку максимальної інтенсивності $\max_{Q_j \in Q} P(Q_j)$ за умови виконання обмежень типу нерівності на решту показників ефективності.

Аналіз поставлених задач показує складність їхнього точного формального розв'язання аналітичними методами через велику кількість змінних, що характеризують структуру та параметри системи. З огляду на викладене під час дослідження таких систем доцільно застосовувати традиційні для теорії складних систем методи поетапної оптимізації, субоптимізації підсистем, поєднання аналітичних та імітаційних методів моделювання, що доповнюють один одного і забезпечують можливість дослідження структур системи при вихідних даних, відповідають різному ступеню адекватності моделі та об'єкту дослідження.

Сучасні мережі зв'язку будуються з використанням великої кількості різнорідних систем, комутаційних вузлів і ліній передавання. Тому не завжди виправдано робити оцінку ефективності МЗ як систем передавання і розподілу інформації методами, придатними для оцінювання ефективності окремих систем передавання інформації. Так, для систем передавання повідомлень основними показниками якості є швидкість передавання інформації і вірогідність передавання інформації. У мережах зв'язку на перший план виходять такі комплексні показники ефективності, як загальна кількість вузлів або кінцевих

абонентських пунктів, загальна довжина ліній передавання (каналів), загальний обсяг інформації, що передається, вартість, фактичне завантаження, час доставки інформації, кількість загублених викликів і затримок, коефіцієнти готовності основних елементів мережі, показники зв'язності і живучості, показники використання вузлів і каналів та багато інших. У будь-якій мережі зв'язку зміна швидкості передавання інформації, збільшення часу встановлення з'єднання абонентів, збільшення рівня завад у каналах і спотворення сигналів, відмови апаратури на інші процеси передавання неминуче впливають на затримку повідомлень у мережі. Тому середній час затримки повідомлень часто розглядають як комплексний показник ефективності або цільову функцію мережі.

Складнощі, які виникають в процесі практичного розв'язання задач проектування мереж зв'язку, зумовлені такими основними факторами: «прокляттям розмірності» і «прокляттям невизначеності». Перший фактор визначається тим, що кількість вузлів у мережі може доходити до декількох тисяч. Другий фактор визначається тим, що відсутні достовірні апріорні дані про трафік – обсяги інформації для передавання через мережу. Крім того, в багатьох випадках не вдається подати в суворо формалізованому вигляді усі вимоги до проєктованої мережі.

Тому, під час проектування мереж зв'язку виникає необхідність виконувати багатоваріантні розрахунки мережі в ході зміни вихідних даних у широких діапазонах. Доводиться також проводити імітаційне моделювання мережі для перевірки отриманих проєктних рішень та для оцінювання деяких параметрів мережі, які не вдається розрахувати аналітичними методами. Таким чином, проектування мереж зв'язку для вказаних умов можна виконати лише в режимі тісного діалогу проєктувальника з ЕОМ, тобто за допомогою відповідних систем автоматизованого проєктування.

Оскільки кожен тип мережі зв'язку має свої особливості, у даній роботі основна увага приділятиметься викладенню загальної методології вибору оптимальних варіантів систем з урахуванням сукупності показників якості та методів моделювання систем на ЕОМ.

Контрольні запитання та завдання

1. Опишіть етапи проектування системи.
2. Охарактеризуйте формулювання задачі проектування оптимальної системи.

3. Яке призначення моделювання системи під час проектування системи?

4. Яка необхідність застосування математичних методів на початкових етапах проектування оптимальної системи?

5. Перелічіть особливості проектування оптимальної системи з урахуванням сукупності показників якості.

6. Що означає автоматизоване проектування системи?

7. Яка роль проєктувальника і ЕОМ під час автоматизованого проєктування?

2 ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ ПРОЄКТНИХ ВАРІАНТІВ СИСТЕМ МЕТОДАМИ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

Початкові етапи проєктування оптимальних систем базуються на основних положеннях теорії багатокритеріальної (векторної) оптимізації. Векторна оптимізація визначає правила вибору оптимальних проєктних рішень— варіантів побудови системи з урахуванням сукупності (вектора) показників якості системи. Методи векторної оптимізації набули бурхливого розвитку як у галузі загальносистемного аналізу, так і у галузі радіотехнічних систем, зокрема, систем зв'язку. Це було викликано об'єктивною необхідністю враховувати під час проєктування сукупність, як правило, суперечливих техніко-економічних вимог до системи. Основні положення векторної оптимізації використовуються в задачах синтезу і аналізу системи, коли створюється проєкт оптимальної системи з використанням математичних моделей повідомлень, сигналів, завад, критеріїв оптимальності, а також методів вибору оптимальних проєктних рішень.

У даному розділі розглядається формалізована постановка та основні особливості розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації, що виникають на початкових етапах проєктування системи при виборі оптимальних варіантів за сукупністю показників якості. Основні положення теорії багатокритеріальної оптимізації викладені на основі систематизації та узагальнення вказаних вище робіт.

2.1 Постановка задачі проєктування оптимальної системи

Під час проєктування систем постановка задачі відіграє важливу роль. Недаром кажуть, що правильна постановка задачі наполовину дає її успішне розв'язання. Розглянемо особливості та проблеми постановки задачі проєктування оптимальної системи з урахуванням сукупності показників якості. Конкретизуємо введені в п.1.2 основні поняття для задачі проєктування оптимальних систем. Альтернативне проєктне розв'язання x — це варіант побудови системи ϕ . У загальному вигляді систему можна подати як упорядковану множину елементів, відносин між ними та їхніх властивостей. Їхнє однозначне задання цілком визначає побудову й ефективність системи. Вважатимемо, що варіант побудови системи $\phi = (S, \vec{p})$ задається структурою S і вектором параметрів \vec{p} . Для інформаційних систем також має бути задана

множина вхідних впливів Z і результатів роботи системи Y , що фактично визначає систему ϕ як відображення множини Z на множину $Y - \phi: Z \rightarrow Y$.

Ці абстрактні означення системи мають бути конкретизовані в процесі проектування. Зокрема, для інформаційної системи множина вхідних впливів – це множина сигналів і завад, що мають бути описані певними математичними моделями. Під час проектування має бути визначена структура системи як сукупність відповідних елементів і зв'язків між ними, а також мають бути отримані значення параметрів цієї системи.

Вихідні дані для проектування системи включають: сукупність умов роботи системи $\{Y\}$ та обмежень на умови роботи, на структуру і параметри системи $\{Q_s\}$; сукупність показників якості $\vec{K} = (k_1, \dots, k_m)$ та обмежень на значення цих показників якості $\{Q_k\}$; критерій оптимальності системи.

Розглянемо приклади вихідних даних під час проектування систем зв'язку. До умов роботи $\{Y\}$ системи зв'язку може належати вид і характеристики повідомлень, сигналів, завад, каналів зв'язку. Обмеження на структуру системи $\{Q_s\}$ залежно від конкретної задачі можуть бути задані як слабкі, так і жорсткі. Зокрема, це загальні вимоги до класу систем зв'язку, наприклад, вимоги, щоб система була одноканальною, мала вільний доступ, не включала зворотного (службового) каналу, ретрансляторів. За більш жорсткіших обмежень задається принцип роботи системи, вид модуляції, декомпозиція системи і навіть повністю структура, а в процесі оптимізації варіюється лише вектор внутрішніх параметрів системи. При цьому обмеження на параметри системи (наприклад, параметри модуляції, потужність сигналу або завади, число каналів) можуть бути типу рівностей, нерівностей або деякого функціонального зв'язку.

Вектор показників якості $\vec{K} = (k_1, \dots, k_m)$ включає сукупність зовнішніх параметрів системи зв'язку, що характеризують основні тактико-технічні характеристики системи (швидкість передавання повідомлень, імовірність похибок передавання, пропускну здатність, надійність). При постановці задачі задаються не числові значення, а лише склад показників якості, які мають враховуватися при оптимізації системи. На початкових етапах проектування, як правило, до уваги беруть лише найбільш важливі показники. Обмеження Q_k що накладаються на числові значення показників якості, можуть бути також типу рівностей, нерівностей або функціонального зв'язку.

Системи, які задовольняють сукупність даних $\{Y\}$, $\{Q_s\}$, називають допустимими, а такі системи, які задовольняють ще й обмеження на значення

показників якості $\{Q_k\}$ – суворо допустимими. Раніше під час проектування систем обмежувалися вибором суворо допустимих систем. З ускладненням і збільшенням вартості систем, що проектуються, актуальним стає пошук оптимальних за сукупністю показників якості систем.

З усіх суворо допустимих систем оптимальною (найкращою) є та система, якій відповідає найкраще (у раніше встановленому розумінні) значення вектора \vec{K} . Для вибору оптимальної системи треба обрати чи обґрунтувати критерій переваги однієї системи над іншою (критерій оптимальності), тобто правило, на основі якого одне значення вектора \vec{K} треба визнати кращим порівняно з іншим його значенням.

Таким чином, задача проектування оптимальної системи формулюється так: знайти таку систему, яка задовольняє сукупності вихідних даних $\{Y\}, \{Q_s\}, \{Q_k\}$ і при цьому має значення вектора показників якості \vec{K} , найкраще за обраним критерієм переваги.

Проектування, що проводиться з урахуванням сукупності показників якості $\vec{K} = (k_1, \dots, k_m)$, називають векторним синтезом (векторною оптимізацією, оптимізацією за векторним критерієм, багатокритеріальною оптимізацією). На відміну від цього синтез системи з урахуванням одного показника якості ($m = 1$) називається скалярним.

Вибір сукупності показників якості системи є однією з найбільш складних і відповідальних задач. Показником якості системи є така числова характеристика (параметр) системи, яка пов'язана з її якістю суворо монотонною залежністю – чим більше (або менше) величина показника, тим краще система за інших різних умов. Якщо зі зміною параметра якість системи не змінюється або з будь-яких причин не вдається встановити характер залежності якості системи від значень параметра, то цей параметр не належить до класу показників якості та використовувати його при багатокритеріальній оптимізації системи не можна. Оскільки якість системи характеризується не одним показником якості, а деякою сукупністю показників, то практично завжди виникає суперечність, коли деякі з показників можуть бути краще у одного варіанта системи, а інші показники кращі в іншого варіанта системи. У таких випадках вибір оптимального варіанта системи є надскладним завданням, оскільки більшість показників якості системи є пов'язаними між собою і антагоністичними, тобто поліпшення одних показників якості призводить до погіршення інших показників якості. Вибрати оптимальний варіант побудови системи зі значною кількістю

показників якості складно, тому на практиці спочатку враховують найбільш важливі показники, а далі за потреби число показників якості збільшують.

Задання критерію оптимальності для вибору оптимального варіанта на множині допустимих проєктних варіантів системи пов'язано з формалізацією уявлень замовника системи або особи, що приймає рішення про оптимальність системи. Через недостатню визначеність уявлень замовника про оптимальність системи спочатку не вдається у формалізованому вигляді задати скалярний критерій оптимальності. Тому на початкових етапах систему характеризують сукупністю показників якості. При цьому для вибору оптимальних проєктних рішень необхідно застосовувати методи багатокритеріальної оптимізації. Спочатку необхідно використовувати ординалістичний підхід для вибору оптимальних проєктних рішень за безумовним критерієм переваги, що базується на введенні бінарних відношень переваги між проєктними рішеннями. Зокрема, при введенні відношення суворої переваги \succ на множині Φ_δ знаходиться підмножина Парето-оптимальних проєктних варіантів. Потім використовується кардиналістичний підхід, заснований на введенні умовного критерію переваги, який дає можливість звузити підмножину Парето до єдиного переважаючого варіанта системи.

Залежно від сформульованих вихідних даних знаходження оптимальної системи зводиться до розв'язання різних у математичному відношенні оптимізаційних задач:

1. Синтез оптимальної структури системи, що означає знаходження оптимального оператора системи.
2. Параметрична оптимізація, тобто вибір оптимальних значень параметрів системи при заданій її структурі.
3. Дискретний вибір оптимальних варіантів системи із скінченного числа допустимих варіантів.

Математичні методи оптимізації параметрів і дискретного вибору добре розвинуті й широко використовуються під час проєктування систем. Синтез структури системи є складнішою задачею і часто нашоується на труднощі не лише математичного, а й принципового характеру, що зв'язані з інформаційною невизначеністю при формулюванні умов роботи системи, а також при виборі узагальненої цільової функції системи.

В останньому випадку виникає непроста задача «апроксимації» функції вибору оптимальної системи, яка є в уяві замовника системи, іншою функцією вибору, що формалізується у вигляді певного критерію оптимальності з використанням суворих математичних методів. Як правило, відразу

не вдається вибрати глобальній критерій оптимальності у вигляді скалярної цільової функції, що включає сукупність показників якості, і оптимізація якої призвела б до вибору єдиного варіанта системи. Тому доводиться вводити сукупність цільових функцій, пов'язаних з відповідними показниками якості, що призводить до необхідності розв'язання задач векторної оптимізації. Під час введення векторної цільової функції

$$\vec{K}(\phi) = (k_1(\phi), \dots, k_m(\phi)) \quad (2.1)$$

множина допустимих варіантів системи Φ_δ відображується у критеріальний простір векторних оцінок $\Phi_\delta \rightarrow V \in E^m$. Це дає можливість порівнювати варіанти системи між собою у критеріальному просторі V і вибирати оптимальні варіанти системи. Вибір оптимальних варіантів системи пов'язаний з певним критерієм оптимальності.

2.2 Формування множини припустимих варіантів системи на основі морфологічного підходу

Під час задання множини припустимих варіантів технічних систем широкого застосування набув морфологічний підхід, для якого характерні такі чинники:

- виявлення максимального переліку основних функцій системи та декомпозиція системи на підсистеми за функціональними ознаками $\{\phi_l, l = \overline{1, L}\}$;

- визначення різних альтернативних способів реалізації кожної підсистеми і задання припустимих варіантів їхньої побудови $\Phi_l = \{\phi_{l1}, \phi_{l2}, \dots, \phi_{lK_l}\}$;

- формування різних варіантів побудови системи в цілому на основі морфологічних класів – множини варіантів побудови кожної підсистеми, для яких виконуються умови $\sigma(l) = \Phi_l, l = \overline{1, L}, \sigma(l) \cap \sigma(j) = 0$.

Формується морфологічна таблиця (табл. 2.1). Кожен варіант побудови системи визначається різними можливими варіантами підсистем. В ході формування припустимої множини варіантів системи мають враховуватися обмеження на структуру, параметри і технічну реалізацію окремих підсистем та системи в цілому, а також припустимі комбінації поєднання окремих варіантів підсистем між собою. Кількість можливих варіантів системи

визначається так: $Q = \prod_{l=1}^L K_l$.

Таблиця 2.1 – Морфологічна таблиця для задання множини припустимих варіантів системи

Морфологічні класи	Можливі способи реалізації підсистеми	Кількість способів реалізації системи
$\sigma(1)$	$\phi_{11} \phi_{12} \phi_{13} \dots \phi_{1K_1}$	K_1
$\sigma(2)$	$\phi_{21} \phi_{22} \phi_{23} \dots \phi_{2K_1}$	K_2
....
$\sigma(l)$	$\phi_{l1} \phi_{l2} \phi_{l3} \dots \phi_{lK_l}$	K_l
...
$\sigma(L)$	$\phi_{L1} \phi_{L2} \phi_{L3} \dots \phi_{LK_L}$	K_L

2.3 Вибір критерію оптимальності системи

Дуже важливим під час розв'язання задач оптимізації є питання вибору критерію оптимальності системи. Саме критерій оптимальності визначає істинну цінність проєктованої системи. Ніякі зручності математичного чи іншого характеру не можуть компенсувати шкідливих наслідків застосування неадекватного критерію оптимальності системи.

Вибір критерію оптимальності, як уже зазначалося, пов'язаний з формалізацією уяви замовника системи про її оптимальність. Існує два підходи до опису переваги одного варіанта системи над іншим: ординалістичний і кардиналістичний.

Кардиналістичний підхід до опису переваги замовника приписує кожній системі $\phi \in \Phi_\sigma$ якесь числове значення функції корисності $U(\phi)$. Функція корисності визначає відповідний порядок (або перевагу) R на множині Φ_σ тоді і тільки тоді, коли для різних варіантів $\phi' R \phi''$ виконується нерівність $U(\phi') > U(\phi'')$. У цьому випадку кажуть, що функція корисності $U(\phi)$ є індикатором переваги R . Фактично цей підхід пов'язаний із заданням такої скалярної цільової функції, оптимізація якої у загальному випадку може призвести до вибору єдиного найкращого варіанта системи.

Однак на початкових етапах проєктування систем задати скалярну функцію корисності досить складно, тому спочатку вводять сукупність показників якості та пов'язаних з ними цільових функцій (2.1). Це пов'язано з такими причинами: багатогранність технічних вимог, які висуваються до проєктувальної системи; необхідність забезпечення оптимальності системи

за різних умов її роботи; система складається з декількох взаємозалежних між собою підсистем і оптимальність системи в цілому визначається ефективністю її складових частин.

У зв'язку з тим, що систему ϕ доводиться характеризувати сукупністю показників якості (цільових функцій), це ускладнює процес вибору оптимальних варіантів систем. При цьому мають місце три випадки:

- показники якості не пов'язані між собою; показники якості пов'язані між собою, але є узгодженими;
- показники якості пов'язані між собою;
- конкуруючими (антагоністичними).

У першому випадку знаходження оптимальних варіантів системи виконується шляхом оптимізації за кожною із цільових функцій незалежно

$$\phi_{0i} = \arg \underset{\phi \in \Phi_{\delta}}{\text{opt}} \{k_i(\phi)\}, i = \overline{1, m}. \quad (2.2)$$

У другому випадку оптимальні варіанти можуть знаходитися також шляхом оптимізації окремих цільових функцій, тобто цей випадок близький до першого.

У третьому випадку оптимуми за різними цільовими функціями не збігаються. Розв'язанням цієї задачі є узгоджений оптимум цільових функцій. Узгоджений оптимум полягає в тому, що досягається мінімальне (максимальне) значення кожної цільової функції за умови, що інші цільові функції приймають фіксовані, але довільні значення.

Ординалістичний підхід апелює до порядку (краще-гірше) і базується на введенні певних бінарних відношень на множині допустимих систем. У цьому випадку поняття переваги замовника системи – це бінарне відношення R на множині допустимих систем Φ_{δ} , яке відображує уяву замовника системи, що система ϕ' краща за систему ϕ'' : $\phi' R \phi''$.

На практиці часто при виборі системи на множині Φ_{δ} можна керуватися відношенням суворої переваги \succ , що є асиметричним і транзитивним. При цьому система $\phi_0 \in \Phi_{\delta}$ називається оптимальною за відношенням \succ , якщо не існує іншої системи $\phi \in \Phi_{\delta}$, для якої справедливе відношення $\phi \succ \phi_0$. Множина оптимальних систем за відношенням \succ визначається як $\text{opt}_{\succ} \Phi_{\delta}$. Залежно від структури допустимої множини Φ_{δ} і властивостей відношення \succ множина оптимальних систем може включати єдиний елемент, скінченне або нескінченне число елементів. Якщо відношення нероздільності збігається

з відношенням рівності $=$, то множина $opt_{\succ} \Phi_{\delta}$ (якщо вона не порожня) складається з єдиного елемента.

Із введенням сукупності цільових функцій кожна система відображується на простір векторних оцінок (критеріальний простір). При цьому дане відношення суворої переваги існує і для оцінок. Узгодженість відношення переваги на множині проектних рішень Φ_{δ} і просторі векторних оцінок V встановлює аксіома Парето [48]. Згідно з нею для будь-яких двох векторних оцінок $\vec{v}', \vec{v}'' \in V$, що задовольняють векторну нерівність $\vec{v}' \geq \vec{v}''$, завжди виконується відношення $\phi' \succ \phi''$.

Множину оптимальних оцінок відносно \geq на просторі V називають множиною Парето-оптимальних (оптимальних за Парето) або ефективних оцінок і позначають $P(V) = opt_{\geq} V$ [41 – 48]. Включення $\vec{v}^0 \in P(V)$ має місце тоді і тільки тоді, коли немає оцінок, для яких виконується нерівність $\vec{v} \geq \vec{v}^0$. Такий критерій вибору оптимальних рішень називають безумовним критерієм переваги (БКП) або критерієм Парето.

Проектні рішення, тобто варіанти побудови системи $\phi_0 \in \Phi_{\delta}$, для яких справджується включення $\vec{v}^0 = \vec{K}(\phi_0) \in P(V)$ називають Парето-оптимальними відносно векторної цільової функції $\vec{K}(\phi)$ на множині Φ_{δ} і позначають як $P_{\vec{K}}(\Phi_{\delta})$. Іншими словами, $\phi_0 \in P_{\vec{K}}(\Phi_{\delta})$ тоді і тільки тоді, коли не існує такої системи $\phi \in \Phi_{\delta}$, для якої виконується векторна нерівність.

$$\vec{K}(\phi) \geq \vec{K}(\phi_0). \quad (2.3)$$

Співвідношення (2.3) означає, що виконуються нерівності $k_j(\phi) \geq k_j(\phi_0)$ для всіх $j = \overline{1, m}$ і принаймні для одного з показників якості виконується суворі нерівність.

Необхідно зазначити, що відношення суворої переваги \geq , яке має місце для векторних оцінок, перетворюється при $m=1$ на відношення $>$ для скалярних оцінок. При цьому Парето-оптимальна оцінка збігається з максимальним елементом множини $v_0 \in R^1$, якому відповідає оптимум скалярної цільової функції $k(\phi)$. Таким чином, поняття Парето-оптимальності треба розглядати як узагальнення поняття оптимуму на випадок кількох цільових функцій. При цьому оптимум за Парето – це узгоджений оптимум зв'язаних між собою і конкуруючих показників якості системи.

Для Парето-оптимальних проектних рішень характерні такі властивості:

1. Усі елементи множини допустимих варіантів системи Φ_δ , що не належать до множини Парето-оптимальних $P_{\bar{K}}(\Phi_\delta)$, є безумовно гіршими.

2. Жодна Парето-оптимальна система з множини $P_{\bar{K}}(\Phi_\delta)$ не може бути визнана безумовно гіршою або кращою порівняно з іншою системою цієї множини. Це означає, що всі вони є незрівнянними за критерієм Парето-безумовним критерієм переваги.

3. Якщо множина $P_{\bar{K}}(\Phi_\delta)$ узгоджена, тобто містить лише один елемент (систему), то відповідний варіант системи є найкращим.

4. Кожній Парето-оптимальній системі відповідає потенціально можливе значення кожного із показників якості (k_1, k_2, \dots, k_m) , що може бути досягнуто за фіксованих, але довільних значень інших $(m-1)$ показників якості. Це властивість m -кратного оптимуму. Сукупність таких оптимальних значень показників якості є багатовимірними потенціальними характеристиками системи (БПХ).

5. Оптимальна поверхня, що є геометричним місцем Парето-оптимальних оцінок, має суворо монотонний характер, тобто кожна із функцій

$$\begin{aligned}k_{10} &= f_1(k_2, k_3, \dots, k_m), \\k_{20} &= f_2(k_1, k_3, \dots, k_m), \\k_{m0} &= f_m(k_1, k_2, \dots, k_{m-1})\end{aligned}\tag{2.4}$$

для Парето-оптимальних оцінок монотонно спадає щодо кожного з аргументів. Ці залежності називаються багатовимірними діаграмами обміну (БДО) для Парето-оптимальних систем.

Порівняно з одновимірними потенціальними характеристиками системи БПХ та зв'язані з ними БДО характеризуються двома важливими властивостями. По-перше, вони дають найкраще (потенціально можливе) значення не одного, а кожного з обраних показників якості. По-друге, вони вказують, як треба змінити значення одних показників якості для поліпшення інших показників якості і за рахунок якої зміни структури чи параметрів системи це можна зробити.

2.4 Методи знаходження Парето-оптимальних рішень

Більшість методів знаходження Парето-оптимальних рішень базується на тих чи інших умовах Парето-оптимальності. У загальному випадку використовуються достатні й необхідні умови Парето-оптимальності. Зокрема,

розв'язання є Парето-оптимальним, якщо воно є розв'язанням задачі максимізації певної функції, зростаючої за відношенням \geq . Фактично розв'язання задачі Парето-оптимізації зводиться до множини відповідних задач скалярної оптимізації за деяких обмежень. Якщо використані умови оптимальності є також і достатніми, то знайдена у такий спосіб множина рішень є множиною Парето-оптимальних рішень. У протилежному випадку, знайдена множина може включати і зайві рішення, що мають бути відкинуті.

Знаходження множини Парето-оптимальних систем може здійснюватися або безпосередньо перебиранням усіх суворо допустимих варіантів системи та перевіркою умови (2.3), або з використанням спеціальних методів, наприклад, методу послідовних поступок, вагового методу, методу робочих характеристик [33, 38, 41, 48]. Вибір відповідного методу оптимізації залежить від змісту сформульованих вихідних даних, типу поставленої задачі проектування. Розглянемо особливості деяких методів.

Метод перебору. Під час розв'язання оптимізаційної задачі методом перебору згідно з умовою (2.3) припускається, що множина Φ_δ має скінченну потужність. Такі задачі виникають, наприклад, при виборі з уже відомих («у натурі» або у вигляді технічних проєктів) варіантів систем. Зокрема, множина допустимих систем може формуватися на основі відомого морфологічного підходу як різні допустимі комбінації певної кількості підсистем. Тут суттєво зазначити, що навіть для порівняно простих систем, які складаються лише з кількох підсистем, кількість допустимих комбінацій останніх може бути значною (десятки і сотні тисяч). Тому, хоча принципових труднощів у ході використання методу перебору не існує, проте на практиці можливі складнощі обчислювального характеру.

Метод робочих характеристик. Метод полягає у тому, що знаходять оптимум однієї із цільових, наприклад, першої функції на множині суворо допустимих систем за умови, що на всі цільові функції накладаються обмеження типу рівності

$$\underset{\phi \in \Phi_\delta}{opt} k_1(\phi), \text{ при } k_2(\phi) = k_{2\phi}, \dots, k_m(\phi) = k_{m\phi}, \quad (2.5)$$

де $k_{2\phi}, \dots, k_{m\phi}$ – фіксовані, але довільні значення показників якості.

Очевидно, оптимальне значення показника $k_{1\phi}$ у загальному випадку залежатиме від фіксованих значень інших показників якості $k_{1\phi} = f_p(k_{2\phi}, k_{3\phi}, \dots, k_{m\phi})$. Знайдені у такий спосіб залежності за допустимих комбінацій фіксованих значень $k_{2\phi}, k_{3\phi}, \dots, k_{m\phi}$ у критеріальному просторі

є робочою поверхнею. Робочій поверхні відповідає сім'я одновимірних робочих характеристик $(m - 1)$ вигляду

$$k_{1o} = f_p(\underline{k_2}, \underline{k_3}, \dots, \underline{k_m}) \quad (2.6)$$

Тут підкреслені змінні, що розглядаються як фіксовані параметри.

Робоча поверхня має такі характерні властивості:

1. Робоча поверхня включає усі Парето-оптимальні точки, але поряд з ними має і ряд безумовно гірших точок. Вони мають бути відкинуті з подальшого розгляду.

2. Необхідною і достатньою умовою збіжності робочої поверхні з Парето-оптимальною множиною, є її суворона монотонність, тобто монотонно спадний характер відносно кожного з аргументів. У цьому випадку робоча поверхня визначає БПХ системи.

Основні складнощі під час використання методу робочих характеристик полягають у розв'язанні задачі скалярної оптимізації в умовах $(m - 1)$ -го обмеження типу рівностей. Але у багатьох практичних випадках таку задачу вдається довести до отримання конкретної структури системи з довільними параметрами.

Ваговий метод. Під час його застосування Парето-оптимальні розв'язання знаходяться шляхом оптимізації зваженої суми цільових функцій вигляду

$$\underset{\phi \in \Phi_0}{opt} \{k_{\epsilon} = k_1(\phi) + a_1 k_2(\phi) + \dots + a_{m-1} k_m(\phi)\}. \quad (2.7)$$

Тут a_1, a_2, \dots, a_{m-1} – скінченні додаткові зважуючі коефіцієнти. При цьому знаходиться оптимальне значення $k_{\epsilon 0}$ і відповідні йому значення показників якості $k_{1\epsilon}, k_{2\epsilon}, \dots, \dots, k_{m\epsilon}$,

$$k_{\epsilon 0} = k_{1\epsilon} + a_1 k_{2\epsilon} + \dots + a_{m-1} k_{m\epsilon}. \quad (2.8)$$

У загальному випадку значення $k_{1\epsilon}, \dots, k_{m\epsilon}$ залежать від обраних вагових коефіцієнтів a_1, \dots, a_{m-1} :

$$\begin{aligned} k_{1\epsilon} &= f_{1\epsilon}(a_1, \dots, a_{m-1}), \\ k_{2\epsilon} &= f_{2\epsilon}(a_1, \dots, a_{m-1}), \\ k_{m\epsilon} &= f_{m\epsilon}(a_1, \dots, a_{m-1}). \end{aligned} \quad (2.9)$$

Для розв'язання оптимізаційної задачі (2.7), а також для знаходження залежностей (2.9) необхідно виконати оптимізацію для усіх можливих комбінацій коефіцієнтів $0 < a_j < \infty, \quad j = \overline{1, m-1}$.

Розв'язавши систему із m рівнянь (2.9), можна отримати залежність

$$k_{1\epsilon} = f_{1\epsilon}(k_{2\epsilon}, k_{3\epsilon}, \dots, k_{m\epsilon}). \quad (2.10)$$

У m -вимірному просторі векторних оцінок ця залежність розглядається, як рівняння вагової поверхні. Незважно бачити, що використання вагового методу зводиться до скалярної оптимізації, зокрема, відомим методом множників Лагранжа.

Вагова поверхня має такі властивості:

1. Включає тільки Парето-оптимальні точки, тобто жодна з безумовно гірших точок не може належати цій поверхні.

2. У багатьох випадках вагова поверхня є повністю визначеною і неперервною в усьому діапазоні значень показників якості k_2, k_3, \dots, k_m . У таких випадках вагова поверхня збігається з Парето-оптимальною множиною.

Отже, під час використання розглянутих методів, а також їхніх модифікацій векторна оптимізаційна задача зводиться у математичному відношенні до розв'язання множини скалярних оптимізаційних задач з урахуванням різного роду обмежень.

У загальному випадку під час розв'язання оптимізаційних задач (2.5), (2.7) варіюється оператор системи $\phi = (S, \vec{p})$, тобто як структура S , так і параметри \vec{p} системи. При цьому можуть бути використані методи варіаційного числення, функціонального аналізу, теорії статистичних рішень, теорії інформації. При фіксованій структурі системи S задача синтезу зводиться до задачі оптимізації вектора параметрів \vec{p} . Ця задача у ряді випадків може розв'язуватися методами лінійного, нелінійного чи динамічного програмування.

Якщо знайдена множина Парето $P(V)$ порівняно вузька, то за оптимальне рішення може бути прийнята будь-яка Парето-оптимальна оцінка і відповідна їй система. У таких випадках можна вважати, що відношення суворої переваги \succ збігається з відношенням \geq на множині векторних оцінок, а тому $opt_{\succ} V = P(V)$. При цьому часто і не вдаються до пошуку всієї множини Парето-оптимальних систем, а зразу вибирають один із Парето-оптимальних варіантів.

Проте часто множина $P(V)$ є занадто обширною. Це свідчить, що відношення \succ та \geq хоча і зв'язані аксіомою Парето, але не збігаються. Для звуження множини Парето-оптимальних оцінок необхідно використати умовний критерій переваги (УПК), який зводиться до задання деякої скалярної цільової функції. УПК може бути заданий після отримання додаткової інформації та введення різного роду умов.

При цьому постає запитання: чи має сенс виконувати синтез на основі безумовного критерію переваги – критерію Парето, якщо на заключному етапі все ж доводиться вводити умовний критерій переваги. В обґрунтування

доцільності пошуку Парето-оптимальних варіантів систем з використанням БКП на початкових етапах оптимального проектування зазначимо таке:

1. БКП дає змогу знайти всі Парето-оптимальні системи, тобто відкинути безумовно гірші варіанти системи.

2. БКП дає змогу знайти потенціальні (найкращі можливі) значення кожного із показників якості і зв'язок між ними.

3. Методи знаходження Парето-оптимальних систем зводяться у математичному відношенні до оптимізації скалярних цільових функцій, тобто зводять розв'язання задачі векторного синтезу до деякої множини задач скалярного синтезу.

4. У виродженому випадку БКП дає змогу знайти єдину найкращу систему.

5. У невиродженому випадку знаходження Парето-оптимальних систем часто призводить до однієї структури системи, але з різними параметрами.

6. Навіть тоді, коли на заключному етапі синтезу для вибору єдиної системи доводиться вводити УКП, то краще вводити різного роду умовності на більш пізньому етапі синтезу.

2.5 Методи звуження множини Парето-оптимальних проектних рішень

Формальна модель задачі Парето-оптимізації не містить інформації для вибору єдиної альтернативи. При цьому множина допустимих варіантів системи лише звужується до множини Парето шляхом виключення безумовно гірших варіантів за відношенням \succ . Проте для наступних етапів проектування системи, як правило, має бути обраний єдиний варіант системи. Тому виникає необхідність звуження множини Парето-оптимальних рішень із залученням додаткової інформації про відношення \succ . Така інформація з'являється в результаті різностороннього аналізу структури і параметрів Парето-оптимальних варіантів системи, багатовимірних діаграм обміну показників якості системи, відносної важливості показників якості, порівняльного аналізу отриманих варіантів системи між собою.

Отримана при цьому додаткова інформація може бути використана для побудови скалярної цільової функції $U(k_1(\phi), \dots, k_m(\phi))$, оптимізація якої на множині Парето-оптимальних рішень $P_k^-(\Phi_\delta)$ призводить до вибору єдиного оптимального варіанта системи

$$\phi_0 = \text{opt} \left(U(k_1(\phi), \dots, k_m(\phi)) \right), \phi \in P_k^-(\Phi_\delta). \quad (2.11)$$

Загальна вимога до функції $U(k_1, \dots, k_m)$ зводиться до того, щоб вона була монотонною (зростаючою чи спадною) за кожним зі своїх аргументів.

Існують як об'єктивні, так і суб'єктивні підходи до побудови такої функції. У ряді випадків на основі розгляду призначення системи, що проектується у складі більш складної надсистеми (комплексу), об'єктивними методами може бути встановлено взаємозв'язок показників якості системи (k_1, \dots, k_m) з якимось показником якості K надсистеми у вигляді відповідної функції $K = U(k_1, \dots, k_m)$. Проте у більшості випадків об'єктивно ввести таку функцію не вдається і доводиться вдаватися до її побудови значною мірою суб'єктивними методами. Розглянемо деякі з них.

Вибір оптимальних рішень з використанням функцій цінності.

Одним із широко використовуваних методів звуження множини Парето-оптимальних рішень є використання скалярної функції цінності (корисності), оптимізація якої веде до вибору одного з оптимальних варіантів системи. Числову функцію $U(v_1, \dots, v_m)$ називають функцією цінності для відношення суворої переваги \succ , якщо для довільних оцінок $\vec{v}', \vec{v}'' \in V$ у просторі V нерівність $U(\vec{v}') > U(\vec{v}'')$ має місце тоді і тільки тоді, коли $\vec{v}' \geq \vec{v}''$. Припустимо, що відношення суворої переваги \succ задовольняє аксіому Парето. При цьому із нерівності $\vec{v}' \geq \vec{v}''$ випливає відношення $\vec{v}' \succ \vec{v}''$, що означає $U(\vec{v}') > U(\vec{v}'')$, тобто функція цінності $U(\vec{v})$, є зростаючою за відношенням \geq . Якщо існує функція цінності $U(\vec{v})$, то оптимальна оцінка знаходиться шляхом максимізації цієї функції на множині Парето

$$\vec{v}^0 \in V : U(\vec{v}^0) = \max_{\vec{v} \in \text{opt} \geq V} U(\vec{v}). \quad (2.12)$$

Тобто знаходження оптимальної оцінки зводиться до розв'язання задачі скалярної оптимізації функції багатьох змінних $U(\vec{v})$.

Питання існування функцій цінності та способи їхнього оцінювання детально розглядаються у роботах. При цьому можуть бути побудовані адитивна, мультиплікативна, полінійна функції цінності.

Процедура утворення функції цінності $U(\vec{v})$ інколи називається згорткою векторного критерію $\vec{K} = (K_1, K_2, \dots, K_m)$.

Операція згортки можлива, якщо:

- частинні критерії кількісно сумарні за важливістю, тобто кожному з них відповідає певне число C_i , яке визначає його відносну важливість відповідно до інших критеріїв;

– частинні критерії є однорідні, тобто кількісно порівнюються в одній вимірності.

Існують різноманітні форми подання узагальненого скалярного критерію та вибору відповідних оптимальних рішень. Зокрема, це такі способи згортки частинних критеріїв:

– формується узагальнений критерій, чисельник якого складає добуток критеріїв, які підлягають максимізації, а знаменник – добуток критеріїв, які підлягають мінімізації;

– формується узагальнений критерій з використання елементів теорії адитивної корисності, тобто підсумовування частинних критеріїв за певною вагою коефіцієнтів вибору чисельника і знаменника;

– формується узагальнений критерій відносно всіх частинних критеріїв.

Узагальнена функція цінності може набувати такого вигляду

$$U(v_1, \dots, v_m) = \sum_{j=1}^m c_j \varphi_j(v_j), \quad (2.13)$$

де $\varphi_j(\cdot)$ – одновимірні функції цінності, що характеризують цінність системи за j -м показником якості; c_j – шкалюючі коефіцієнти.

Задача побудови функції (2.13) зводиться до оцінки коефіцієнтів c_j , вибору виду функцій $\varphi_j(v_j)$, перевірки їхньої незалежності за перевагою \geq , перевірки узгодженості побудованої функції цінності. У ряді випадків може бути використана функція цінності (2.13) у вигляді

$$U(\vec{v}) = \sum_{j=1}^m c_j v_j. \quad (2.14)$$

При цьому використовуються різні методи отримання додаткової інформації про значення коефіцієнтів c_j . Зокрема, це добре розроблені методи експертних оцінок. Вони зводяться до опитування вибраної групи експертів про цінність отриманих Парето-оптимальних варіантів системи, відносно важливість показників якості та ін. Існують добре розроблені методики врахування отриманої інформації, які реалізовані у методі Сааті.

Інколи для вибору єдиного варіанта обмежуються так званою пороговою оптимізацією: найбільш вагомий критерій піддається оптимізації, інші включаються до системи обмежень. Треба зауважити, що існує також багато інших принципів і підходів до вибору єдиного варіанта з використанням скалярних критеріїв оптимальності. Фактично співвідношення (2.14) визначає байєсовий детермінований критерій оптимальності. За умов невизначеності про умови вибору рішень використовує методи теорії ігор. Такі ситуації вибору

проектних рішень під час створення систем часто називають «іграми з природою». Для прийняття рішень вишуковують найкращу стратегію, з використанням критерію Вальда, критерію Севіджа, критерію Гурвіца, критерію Лапласа та ін.

Вибір оптимальних рішень на основі теорії розмитих множин.

Цей підхід базується на тому, що через апріорну невизначеність поняття «найкращий варіант системи» неможливо визначити точно. Можна вважати, що це поняття є розмитою множиною і для оцінки системи можуть бути використані основні положення теорії розмитих множин. У загальному випадку розмита множина G на множині X задається функцією належності $\xi_G: X \rightarrow [0, 1]$, яка зіставляє з кожним елементом $x \in X$ дійсне число ξ_G на інтервалі $[0, 1]$. Це число називається ступенем належності елемента x розмитій множині G . Чим воно ближче до 1, тим вищий ступінь належності. Функція $\xi_G(x)$ є узагальненням характеристичної функції множин, яка набуває лише два значення: 1 – при $x \in G$ і 0 – при $x \notin G$. У випадку дискретних множин використовується запис розмитої множини як множини пар $G = \{x, \xi_G(x)\}$.

Згідно з цими основними положеннями кожний показник якості системи може задаватися у вигляді розмитої множини $k_j = \{k_j, \xi_{k_j}(k_j)\}$, де $\xi_{k_j}(k_j)$ – функція належності конкретного j -го показника якості розмитій множині найкращого значення.

Такий запис окремого показника якості має високу інформативність, оскільки дає уяву про фізичну природу показника якості, конкретне його значення і цінність відносно найкращого (екстремального) значення, що характеризує функція належності. Універсальна форма функції належності, яка може бути використана як скалярна цільова функція, має такий вигляд [51]

$$U(k_1, \dots, k_m) = \frac{1}{m} \left\{ \sum_{j=1}^m [\xi_{k_j}(k_j)]^\beta \right\}^{\frac{1}{\beta}}. \quad (2.15)$$

Перевагою такої цільової функції є те, що вибором параметра β може бути реалізовано широкий клас функцій від лінійної адитивної за умови $\beta = 1$, до суцільно нелінійної при $\beta \rightarrow \infty$.

Лексографічний метод вибору оптимального варіанта за суворо впорядкованих за важливістю показників якості. Інколи для замовника системи за результатами аналізу Парето-оптимальних варіантів, а також

їх БДО виявляється бажаним отримати якомога більше значення одного з показників якості, наприклад, k_1 , навіть за рахунок погіршення інших показників якості. Це означає, що показник k_1 є важливішим порівняно з іншими показниками якості.

Можливий також випадок, коли весь набір показників якості k_1, \dots, k_m , суворо упорядкований за важливістю, тобто показник k_1 більш важливий, ніж показники k_2, \dots, k_m , показник k_2 більш важливий, ніж показники k_3, k_4, \dots, k_m і т. д. Цьому відповідає ситуація, коли під час порівняння оцінок систем використовується лексикографічне відношення переваги. Наведемо означення цього відношення та особливості використання при виборі єдиного варіанта системи.

Нехай є два вектори оцінок $\vec{v}', \vec{v}'' \in V$. Лексикографічне відношення $\vec{v}' \succ^{lex} \vec{v}''$ має місце тоді і тільки тоді, коли виконується одна з таких умов

$$\begin{aligned} \vec{v}'_1 &> \vec{v}''_1, \\ \vec{v}'_1 &= \vec{v}''_1, \quad \vec{v}'_2 > \vec{v}''_2, \\ \vec{v}'_j &= \vec{v}''_j, \quad j = 1, 2, \dots, m-1; \quad \vec{v}'_m > \vec{v}''_m. \end{aligned} \quad (2.16)$$

Для $m=1$ лексикографічне відношення збігається з відношенням $>$ на підмножині дійсних чисел. Під час виконання відношення $\vec{v}' \succ^{lex} \vec{v}''$ кажуть, що вектор \vec{v}' лексикографічно більший за вектор \vec{v}'' .

Якщо використовується лексикографічне відношення при виборі єдиної системи, то це означає, що із пари оцінок (і відповідних їм систем) перевага віддається тій оцінці (системі), в якій перша компонента вектора \vec{v}' (тобто оцінка показника якості k_1) більша, незалежно від співвідношення по інших компонентах вектора. Якщо перші компоненти оцінок однакові, то перевага віддається тій оцінці (системі), в якій більша друга компонента вектора \vec{v}' (оцінка показника якості k_2). Наступні компоненти вектора \vec{v}' можуть при цьому значно програвати відповідним компонентам вектора \vec{v}'' .

Аналогічні висновки мають місце при рівності перших двох компонент, трьох компонент і т. д. до $(m-1)$ компонент векторів \vec{v}' і \vec{v}'' . У таких випадках стверджують, що компоненти v_1, v_2, \dots, v_m , тобто оцінки показників якості системи $k_1(\phi), k_2(\phi), \dots, k_m(\phi)$ суворо упорядковані за важливістю.

У визначенні лексикографічного відношення важливу роль відіграє порядок перерахування показників якості. Зміна нумерації показників якості призводить до другого лексикографічного відношення. Крім згаданих вище

методів побудови скалярної цільової функції і вибору варіанта з множини Парето-оптимальних, існує і багато інших. Вибір підходящого методу визначається вихідними даними та типом конкретної оптимізаційної задачі. Але, як би не було, оптимальні варіанти системи треба знаходити серед Парето-оптимальних розв'язків задачі. Тобто етап Парето-оптимізації є обов'язковим під час проектування систем з урахуванням сукупності показників якості.

2.6 Програмна реалізація методів багатокритеріального вибору оптимальних проєктних варіантів систем

Для автоматизації процесу вибору оптимальних проєктних варіантів систем на основі методів багатокритеріальної оптимізації розроблена програма МСО (Multiple Criteria Optimization), інтерфейс якої наведено на рис. 2.1. Програма МСО реалізована мовою Java. Використовуючи цю програму, можна порівнювати до 100 різних проєктних варіантів системи, враховуючи при цьому до 10 показників якості. Програма дозволяє зберігати внесені дані та відкривати збережені дані для подальшої роботи з ними.

#id	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10
1	50 000	300	0,1	0,03	166	49,7	4 971	11	3,2	2,2
2	40 000	300	0,05	0,05	133	45,6	2 736	15	2,8	3,1
3	45 000	280	0,05	0,07	160	45,8	1 958	24	2,1	4,8
4	50 000	290	0,09	0,05	172	48,7	2 025	18	2,5	3,8
5	48 000	250	0,07	0,08	192	47,1	2 358	21	2,1	4,2
6	42 000	290	0,03	0,08	144	43,8	2 193	20	2,4	4
7	42 000	300	0,04	0,08	140	44,8	2 241	19	2,5	3,8
8	40 000	280	0,04	0,05	142	44,8	2 688	15	2,7	3
9	55 000	300	0,02	0,04	183	42,8	3 201	18	2,5	3,6
10	55 000	290	0,02	0,05	189	42,8	2 559	22	2,5	4,4

Рисунок 2.1 – Інтерфейс програми багатокритеріального вибору оптимальних систем

За допомогою програми МСО можна розв'язати такі задачі:

- формування множини допустимих варіантів системи (визначення кількості варіантів системи та введення числових значень основних параметрів системи);

- вибір показників якості серед заданих параметрів системи та визначення, як кожен параметр покращує систему (шляхом мінімізації чи максимізації);
- нормування і зведення показників якості до стандартного вигляду (нормування до максимального значення та за потребою інвертування);
- вибір підмножини Парето-оптимальних варіантів систем з використанням методу дискретного вибору за безумовним критерієм переваги;
- вибір методу звуження підмножини Парето до єдиного проєктного варіанта системи з використанням умовних критеріїв переваги (методу на основі функції цінності або лексикографічного методу).

Даний програмний комплекс дає можливість автоматизації вирішення задач багатокритеріального вибору оптимальних проєктних варіантів систем. Це є доцільною, оскільки за наявності значної кількості допустимих варіантів системи і вибору оптимальних варіантів з урахуванням значного числа показників якості, застосовуючи спочатку безумовний критерій переваги, а потім умовний критерій переваги в ручному режимі займає багато часу і не виключає можливості помилок.

2.7 Приклад застосування методів багатокритеріальної оптимізації під час планування СМЗ 3-го покоління

Розглянуто практичні особливості застосування методів багатокритеріальної оптимізації на етапі номінального планування систем мобільного зв'язку (СМЗ) 3-го покоління стандарту UMTS. При цьому враховано такі основні технічні параметри СМЗ:

- загальне число частотних каналів, що виділяються для розгортання СМЗ $N_k = \text{int}(\Delta F / F_k)$, де F_k – смуга частот, займана одним частотним каналом СМЗ;

- число радіочастот, необхідне для обслуговування абонентів в одному секторі кожного стільника $n_s = \text{int}(N_k / C \cdot M)$;

- величина припустимого телефонного навантаження в одному секторі одного стільника або в соті $A = n_o \left[1 - \sqrt{1 - (P_{ol} \sqrt{\pi n_o} / 2)^{1/n_o}} \right]$ при $P_{ol} \leq \sqrt{\frac{2}{\pi n_o}}$, де $n_o = n_s n_a$; n_a – кількість абонентів, які одночасно можуть використовувати один частотний канал;

– кількість абонентів, що обслуговуються БС та яке залежить від числа секторів, припустимого телефонного навантаження та активності абонентів $N_{aBTS} = M \text{ int}(A / \beta)$;

– необхідне число БС на заданій території обслуговування $N_{BTS} = \text{int}(N_a / N_{aBTS})$;

– радіус стільника, за умови, що навантаження розподілене по всій зоні рівномірно $R = \sqrt{\frac{1,21S_0}{\pi N_{BTS}}}$;

– величина захисної відстані між BTS з однаковими частотними каналами $D = R\sqrt{3C}$;

– ймовірність помилки в процесі сеансу зв'язку $P_{ош} = \frac{1}{(\sqrt{3C} - 1)^{2k}}$;

– ефективність використання радіоспектра, обумовлена числом активних абонентів, що приходяться на одиницю смуги частот $\gamma = 1,21 \frac{S_0}{\pi R^2 F_k C}$

У результаті розрахунків розроблено початковий (номінальний) частотно-територіальний план для множини із 10 варіантів СМЗ, у якому серед усіх технічних параметрів СМЗ були обрані такі показники якості: k_3 , k_5 і k_8 , що характеризують відповідно ймовірність блокування, щільність обслуговуваних абонентів і необхідну кількість базових станцій у мережі відповідно.

Для кожного варіанта СМЗ були знайдені оцінки значень вказаних показників якості, проведено їхнє нормування до максимальних значень і зведення до порівнянного вигляду. Знаходження підмножини Парето-оптимальних варіантів СМЗ виконано у критеріальному просторі оцінок вказаних показників якості. Значення показників якості для допустимої множини з 10 допустимих варіантів СМЗ наведено в табл. 2.2.

Для багатокритеріального вибору СМЗ була використана програма МСО, що описана в п. 2.6. Процедура багатокритеріального вибору Парето-оптимальних варіантів СМЗ була наступною. Варіант СМЗ включався в множину Парето, якщо серед допустимих варіантів були відсутні інші варіанти СМЗ, які домінували б за БКП – критерієм Парето. Результати вибору варіантів СМЗ, оптимальних за критерієм Парето, наведено в табл. 2.2.

Як видно з табл. 2.2, підмножина Парето-оптимальних варіантів включає 5 варіантів побудови СМЗ: № 1, № 5, № 8, № 9, № 10. Решта 5 варіантів системи є безумовно гіршими і були виключені з подальшого розгляду.

Таблиця 2.2 – Результати вибору Парето-оптимальних варіантів СМЗ

№ СМЗ	k_3	k_5	K_8	Результати Парето-оптимізації
1	1	0,135	0,458	Парето-оптимальний варіант
2	0,5	0,307	0,625	безумовно гірший варіант
3	0,5	0,166	1	безумовно гірший варіант
4	0,9	0,104	0,75	безумовно гірший варіант
5	0,7	0	0,875	Парето-оптимальний варіант
6	0,3	0,25	0,833	безумовно гірший варіант
7	0,4	0,271	0,791	безумовно гірший варіант
8	0,4	0,26	0,625	Парето-оптимальний варіант
9	0,2	0,047	0,75	Парето-оптимальний варіант
10	0,2	0,015	0,916	Парето-оптимальний варіант

Фактично перехід від значень показників якості для однієї Парето-оптимальної системи до іншої є діаграмою обміну показників якості. Кожна точка такої діаграми обміну визначає потенційно найкращі значення одного з показників, які можуть бути досягнуті при фіксованих значеннях інших показників якості.

Для вибору єдиного переважного проектного варіанта з підмножини Парето-оптимальних був використаний метод, заснований на лексикографічному підході. Спочатку весь набір показників якості був впорядкований у порядку важливості. Показник k_3 вважався більш важливим, ніж показники k_5 і k_8 , а показник k_8 вважався більш важливим, ніж показник k_5 . Під час порівняння Парето-оптимальних варіантів СМЗ було використано лексикографічне відношення. При цьому єдиним переважним варіантом виявився проектний варіант СМЗ № 9. Цей варіант СМЗ характеризується такими технічними параметрами: допустимою ймовірністю блокування ($P_{bl} = 0,02$), досить високою щільністю обслуговуваних абонентів ($N_a/S_0 = 183$ аб./км²) і відносно невеликою кількістю базових станцій ($N_{BTS} = 18$).

Контрольні запитання та завдання

1. Яка постановка задачі проектування оптимальної системи з урахуванням сукупності показників якості?
2. Вкажіть основні етапи багатокритеріального вибору оптимального проектного варіанта ситеми.

3. Перелічіть особливості ординалістичного і кардиналістичного підходів до вибору оптимальної системи.
4. Яке формулювання процедури вибору переважних проектних варіантів за безумовним критерієм переваги?
5. Охарактеризуйте методи знаходження Парето-оптимальних проектних варіантів системи.
6. Перелічіть властивості Парето-оптимальних проектних рішень.
7. Що таке багатовимірні потенціальні характеристики системи?
8. Які методи використовуються для звуження множини Парето до єдиного проектного варіанта?

3 ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ СТАТИСТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ

У даному розділі розглядаються особливості та процедури моделювання систем зв'язку на ЕОМ. Основна увага приділяється методам побудови математичних моделей детермінованих та випадкових сигналів, а також систем і мереж зв'язку.

3.1 Процедури та особливості моделювання систем зв'язку на ЕОМ

Моделювання – це метод наукового пізнання, під час використання якого досліджуваній об'єкт заміняється більш простішим об'єктом (його математичною моделлю) і, як результат вивчення моделі, виникає нова інформація про оригінал. Залежно від способу реалізації математичної моделі розрізняють математичне, фізичне (натурне) та напівнатурне моделювання. Фізичне моделювання – це спосіб дослідження, згідно з яким система заміняється фізично реалізованими елементами, зокрема, макетом системи. При напівнатурному моделюванні частина системи реалізується у вигляді фізичної моделі, а інша її частина – у вигляді математичної моделі.

Математичне моделювання – це спосіб дослідження, згідно з яким модель системи реалізується у вигляді математичних співвідношень, що характеризують структуру системи та перетворення сигналів і завад у реальній системі. Можливе використання як аналітичних, так і числових методів математичного моделювання. В ході використання аналітичних методів необхідні розв'язки та залежності отримують із математичної моделі системи шляхом послідовного застосування математичних правил та перетворень. Труднощі застосування аналітичних методів пов'язані з відсутністю повних апріорних даних для проведення перетворень, а також складний характер цих перетворень. Однак останнім часом з'явилися програми аналітичних перетворень на ЕОМ, що розширює можливості цих методів. Застосування чисельних методів зводиться до заміни математичних операцій відповідними обчислювальними операціями на математичній моделі, реалізованій на ЕОМ. Хоча числові методи дають можливість вирішувати значно більше задач, але для них характерна значна трудомісткість обчислень та в ряді випадків нестійкі розв'язки щодо похибок апроксимації та округлення.

Серед методів досліджень системи на ЕОМ широке застосування знаходять методи імітаційного моделювання, які основані на реалізації

та дослідженні математичної моделі у формі алгоритмів та програм, що відображують як структуру системи, так і процеси її функціонування у часі. В ряді випадків можливості алгоритмічних мов дозволяють отримати гнучкіші та доступніші засоби опису складних систем порівняно з мовою математичних функціональних співвідношень. При ймовірнісному підході до моделювання систем на ЕОМ використовується наближений чисельний метод досліджень – метод статистичного моделювання. При цьому математична модель системи реалізується програмно на ЕОМ, а необхідні характеристики системи отримують шляхом проведення статистичних випробувань системи на вибірках реальних чи модельних сигналів та завад, а також опрацювання результатів досліджень методами математичної статистики. Позитивна властивість цього методу – це універсальність, що гарантує принципову можливість аналізу системи довільної складності і з довільною деталізацією. Негативним є трудомісткість процесів моделювання та частинний характер результатів, отриманих для конкретних визначених умов роботи системи.

Для проведення досліджень системи методом статистичного моделювання на ЕОМ характерним є виконання таких процедур:

- формулювання задачі моделювання, що включає в себе сукупність відомостей, які необхідно отримати в результаті моделювання;
- визначення меж системи, що підлягає моделюванню, а також сукупності обмежень і допущень, згідно з якими проводитиметься моделювання;
- збір і оцінка апріорної інформації про досліджувану систему, обсяг якої має бути достатнім для побудови її математичної моделі;
- вибір критерію для кількісної оцінки результатів дослідження системи методом моделювання на ЕОМ;
- формування математичної моделі системи, яка включає неформальний і формальний опис об'єкта моделювання;
- програмне втілення математичної моделі та її реалізація на ЕОМ;
- оцінювання адекватності вибраної моделі, тобто визначення коректності функціонування моделі і її відповідності реальній системі;
- планування досліджень, тобто така організація процесу статистичного моделювання, щоб за мінімальний час отримати необхідну інформацію про систему із заданою достовірністю;
- проведення статистичних випробувань системи на відповідних вибірках сигналів та завад;
- знаходження оцінки критерію, який характеризує якість роботи досліджуваної системи;

– інтерпретація результатів моделювання системи, отриманих у результаті моделювання;

– прийняття рішень за результатами моделювання.

Отримана в результаті моделювання інформація зіставляється з поставленою метою моделювання. Якщо зіставлення задовільне, то результати моделювання фіксуються в підсумковому протоколі чи документі. Якщо результати незадовільні, то коректуються деякі процедури і процес моделювання повторюється.

3.1.1 Формальний опис та оцінювання ефективності системи

Формальний опис системи визначається математичною моделлю – наближеним описом роботи системи з використанням відповідних математичних співвідношень. Щоб скласти формальний опис системи, необхідно задати множину параметрів і операторів $\{q\}, \{A\}$, які характеризують систему.

Оператор системи – це правило, згідно з яким кожному елементу x множини вхідних фазових змінних X однозначно чи взаємно однозначно зіставляється елемент y множини вихідних фазових змінних Y . При цьому має місце операторне рівняння $y = Ax$, де A – оператор системи. В системах зв'язку маємо місце з повідомленнями, сигналами та завадами, що є функціями часу. Якщо ці функції розглядати як елементи відповідних множин, то оператор системи визначає правила перетворення вхідних сигналів у вихідні сигнали $y(t) = A[x(t)]$ системи.

Під параметрами системи розуміють сталі чи змінні у часі величини, які характеризують стан системи в даний момент часу і задають її властивості та характеристики. Уся множина параметрів системи q розбивається на чотири підмножини: підмножину фазових змінних v ; підмножину зовнішніх параметрів α ; підмножину внутрішніх параметрів системи β ; підмножину вихідних параметрів системи γ .

Фазові змінні системи – це деякі функції часу, що визначають стан системи в будь-який заданий момент часу. Наприклад, якщо розглядати систему передавання повідомлень, то в ролі фазових змінних можуть виступати: повідомлення $\lambda(t)$, модульований сигнал на виході модулятора $s(t, \lambda(t))$, завада в КЗ $\xi(t)$, адитивна суміш сигналу та завади на вході приймального пристрою $u(t) = s(t, \lambda(t)) + \xi(t)$.

Зовнішні параметри системи α – це фізичні величини, значення яких визначають характеристики вхідних фазових змінних $X(t, \alpha)$. Внутрішні

параметри системи β – це фізичні величини, значення яких визначає внутрішні фазові змінні та характеризують властивості функціональних ланок і системи в цілому $A(\beta)$. Вихідні параметри системи γ – це фізичні величини, значення яких характеризує якість роботи системи. Множина вихідних параметрів дає можливість кількісно оцінювати правильність роботи системи та якість виконання системою поставленої задачі. Часто вихідні параметри називають показниками якості системи. Вектор вихідних параметрів $\vec{\gamma} = (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_m)$ оцінюється за результатами роботи системи, зокрема, за вихідними фазовими змінними $\vec{\gamma} = F(Y(t)) = F(A, \beta, X(t, \alpha))$. У загальному випадку не вдається отримати аналітичний вираз для показників якості складної системи. Тому вихідні параметри (показники якості) оцінюють за результатами моделювання системи на ЕОМ.

Як правило, робота системи носить стохастичний характер. Тому, ефективність системи необхідно оцінювати з використанням імовірнісних показників якості. Зокрема, це такі показники, як імовірність настання такої події B , що система виконає поставлену задачу повністю $E_1 = P(B)$; математичне сподівання деякої випадкової величини (ВВ) чи випадкового процесу (ВП) на виході системи $E_2 = M(Y), E_2 = M[Y(t)]$; дисперсія ВВ або ВП $E_3 = D(Y), E_3 = D[Y(t)]$.

Для прикладу розглянемо передавання системою повідомлення $\lambda(t)$ в умовах дії завад $\xi(t)$. При цьому показником ефективності системи може служити середньоквадратична похибка передавання повідомлення

$$\overline{[\lambda(t) - \hat{\lambda}(t)]^2}, \quad (3.1)$$

що оцінюється шляхом порівняння переданого та прийнятого повідомлення, отриманих шляхом моделювання системи зв'язку на ЕОМ.

Під час моделювання системи передавання дискретних повідомлень в умовах дії завад показником ефективності системи служить середня імовірність похибки передавання, що оцінюється у вигляді

$$\hat{p}_{ou} = \hat{n}/N, \quad (3.2)$$

де \hat{n} – число випробувань, в яких відбулася похибка передавання; N – загальна кількість статистичних випробувань, що вибирається із умови забезпечення необхідної достовірності оцінки.

Під час моделювання систем на ЕОМ можуть бути вирішені різні завдання проектування, зокрема:

- дослідження систем в екстремальних умовах роботи;

- оптимізація структури і параметрів системи за заданим критерієм оптимальності;
- вибір кращого варіанта системи з множини допустимих варіантів;
- аналіз характеристик вихідних фазових змінних для різних видів вхідних фазових змінних;
- оцінка окремих показників якості та ефективності роботи системи в цілому.

Щоб побудувати формальний опис під час моделювання системи зв'язку на ЕОМ можна скористатися її функціональною схемою, яка включає інформацію про оператор системи, а також про фазові змінні. У випадку складних систем зв'язку записати вираз для оператора системи в цілому A складно. Тому виконується декомпозиція системи, за якої розриваються несуттєві динамічні, інформаційні та конструктивні зв'язки. Декомпозиція динамічних зв'язків базується на тому, що процес роботи системи може бути розділений на ряд процесів, які протікають у часі послідовно чи паралельно. Інформаційні зв'язки характеризують взаємодії окремих елементів системи. При цьому система розділяється на окремі функціональні блоки. Кожен з них виконує окремі операції над внутрішніми фазовими змінними. Як приклад можна навести декомпозицію цифрової системи зв'язку на окремі функціональні блоки: джерело повідомлення; блок дискретизації та квантування неперервних сигналів; блок завадостійкого кодування; модулятор; передавач; канал зв'язку, оптимальний приймач дискретних сигналів; декодер; цифро-аналоговий перетворювач; споживач повідомлень.

Шляхом подальшої декомпозиції окремих функціональних блоків їх можна зобразити та описати через функціональні ланки.

3.1.2 Особливості цифрового зображення сигналів

Сигнали $s(t)$ в системах зв'язку мають, як правило, неперервний характер зміни у часі, а цифрові ЕОМ працюють з дискретним часом і з дискретними значеннями величин. Тому, під час моделювання систем зв'язку на ЕОМ доводиться виконувати дискретизацію та квантування завад. При дискретизації здійснюється перехід до відліків сигналів у дискретні моменти часу $s(t) \rightarrow s(i\Delta t)$, $i = 1, 2, \dots, N$, де Δt – інтервал дискретизації сигналів за часом;

$N = \frac{T}{\Delta t}$ – дискретний інтервал часу спостереження сигналів.

Якщо вибрано інтервал дискретизації $\Delta t = \frac{1}{2F_{zp}}$, де F_{zp} – верхня частота

у спектрі сигналу, то при цьому сигнал може бути відновлений по дискретних відліках згідно з рядом Котельникова

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} s(k\Delta t) \frac{\sin 2\pi F_{zp}(t - k\Delta t)}{2\pi F_{zp}(t - k\Delta t)}. \quad (3.3)$$

При такому інтервалі дискретизації на періоді найбільш високочастотної гармоніки у спектрі сигналу береться по два відліки. Зазвичай, під час моделювання для точнішого відтворення форми сигналу дискретизація здійснюється з меншим інтервалом часу

$$\Delta t = \frac{1}{CF_{zp}}, \quad C = 5 \div 10. \quad (3.4)$$

Після дискретизації сигналів виконується квантування, що означає заміну істинних значень неперервних відліків сигналу найближчими рівнями квантування q_j , $j=1,2,\dots,L$. При цьому має місце похибка квантування, яка залежить від кроку квантування $\Delta q = q - q_{i-1}$. Величина Δq визначається максимальним значенням сигналу S_{\max} і числом рівнів квантування $\Delta q = \frac{S_{\max}}{M}$.

Таким чином, квантування сигналу призводить до виникнення шуму квантування. Якщо число рівнів квантування M достатньо велике, то дисперсія шуму квантування визначається виразом

$$\overline{\varepsilon^2} = \Delta q^2 / 12. \quad (3.5)$$

3.2 Побудова математичних моделей систем зв'язку

Застосування математичних методів та обчислювальної техніки при автоматизації проєктування систем зв'язку можливе лише у тому випадку, якщо є їхні адекватні математичні моделі. Тому розглянемо деякі особливості та методи побудови математичних моделей систем та мереж зв'язку.

3.2.1 Класифікація методів побудови математичних моделей

Під час переходу до формального опису системи за допомогою її математичної моделі дотримуються певних загальних принципів: спеціалізація математичної моделі; декомпозиція системи; обмеження діапазону зміни параметрів і вхідних фазових змінних; еквівалентування, тобто заміна складного математичного опису окремих складних блоків (ланок) системи їхніми

статистичними еквівалентами; вибір математичних моделей, що відтворюють перетворення тільки інформаційного параметра; використання для побудови математичних моделей їхніх схемних і функціональних елементів.

Розглянемо деякі з принципів докладніше. Відповідно до першого принципу будується така модель системи, що дає змогу оцінити ефективність дослідження системи згідно з вибраними показниками якості. Декомпозиція системи є засобом будувати простіші моделі, які описують роботу системи на окремих етапах її функціонування чи роботу окремих її блоків. Відповідно до наступних принципів порівняно зі змінами параметрів у реальній системі вибираються менші діапазони змін цих параметрів. Це дає можливість розглядати і будувати моделі окремих елементів системи більш простішими, зокрема, з лінійними характеристиками. Окрім того, заданий формальний опис системи спрощують, зберігаючи усі функціональні зв'язки між елементами. При цьому окремі функціональні блоки замінюються еквівалентом, або із функціональної схеми видаляють один чи кілька блоків, замінюючи їх еквівалентними впливами.

Під методами побудови математичних моделей систем розуміють методи описування алгоритмів їхньої роботи з використанням деяких математичних співвідношень. Для класифікації методів побудови математичних моделей систем зв'язку використовуються такі ознаки:

- тип схеми, на основі якої будується алгоритм: функціональна, структурна, принципова, еквівалентна;
- тип обраних моделей пристроїв (ланок) системи: лінійних (стаціонарних чи нестаціонарних) і нелінійних (інерційних і безінерційних);
- метод математичного опису перетворень сигналів у системі: метод диференціальних рівнянь, спектральний метод на базі перетворень Лапласа і Фур'є, часовий метод на базі інтеграла Дюамеля та ортогональних розкладів;
- метод зображення сигналів і завад під час їхнього проходження по ланках системи: метод несучої, метод комплексної обвідної, формульний метод;
- метод статистичних еквівалентів, коли опис ланки замінюється вхідним впливом та вихідним ефектом;
- метод структурних схем, що зводиться до побудови математичних моделей системи із заміною високочастотної частини низькочастотним еквівалентом.

3.2.2 Математичні моделі на рівні функціональних ланок системи

Розглянемо деякі особливості математичного опису функціональних ланок на прикладі лінійних інерційних ланок. Для їхнього опису часто

використовуються: імпульсна характеристика, перехідна характеристика, комплексна і частотна характеристики ланки.

В ході використання імпульсної характеристики лінійної інерційної ланки $h(\tau)$ вихідний сигнал $y(t)$ через вхідний сигнал $x(t)$ записується у вигляді інтегралу Дюамеля

$$y(t) = \int_0^{\infty} x(t - \tau)h(\tau)d\tau = \int_{-\infty}^t x(\tau)h(t - \tau)d\tau. \quad (3.6)$$

Для опису лінійної інерційної ланки може бути також використана перехідна характеристика, що зв'язана з імпульсною характеристикою таким співвідношенням

$$g(t) = \int_{-\infty}^t h(\tau)d\tau. \quad (3.7)$$

Поряд з часовим описом може також використовуватися частотний опис ланки у вигляді частотної характеристики (частотного коефіцієнта передачі) $K(\omega)$, яка однозначно пов'язана з імпульсною характеристикою $h(\tau)$ перетворенням Фур'є

$$K(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)\exp(-j\omega t)dt. \quad (3.8)$$

При цьому спектр вихідного сигналу визначається через спектр вхідного сигналу та частотну характеристику ланки

$$S_Y(\omega) = K(\omega)S_X(\omega). \quad (3.9)$$

В процесі переходу до дискретного часу та кінцевого інтервалу спостереження сигналів зв'язок між входом і виходом лінійної системи описується дискретною згорткою, яка фактично визначає роботу нерекурсивного цифрового фільтра

$$y(k) = \sum_{l=0}^{M-1} h(l)x(k-l). \quad (3.10)$$

де $x(0), x(1), \dots, x(N-1)$ – відліки вхідного дискретного сигналу, $h(0), h(1), \dots, h(M-1)$ – відліки імпульсної характеристики.

У випадку спектрального зображення сигналів відповідні перетворення у функціональних ланках виконуються згідно з (4.9). Для сигналів з дискретним часом спектр визначається через дискретне перетворення Фур'є (ДПФ)

$$S(m) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k)\exp(-j\frac{2\pi}{N}mk), m = 0, 1, \dots, N-1. \quad (3.11)$$

Відліки спектра сигналу обчислюються для дискретних значень частот

$$\omega_0 = 0, \omega_1 = \frac{2\pi}{N\Delta t}, \omega_2 = 2\frac{2\pi}{N\Delta t}, \dots, \omega_{N-1} = (N-1)\frac{2\pi}{N\Delta t}. \quad (3.12)$$

Перехід до відліків спектра $S(m)$ сигналу проводиться за допомогою оберненого дискретного перетворення Фур'є

$$x(k) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} S(m) \exp(j\frac{2\pi}{N}mk), \quad k = 0, 1, \dots, N-1. \quad (3.12)$$

Під час моделювання сигналів значної розмірності N доцільно використовувати швидкі алгоритми перетворення Фур'є, які дають можливість суттєво зменшити обсяг обчислення на ЕОМ під час виконання прямого та оберненого ДПФ.

У системах зв'язку використовуються багато різних видів лінійних та нелінійних, інерційних та безінерційних ланок. Для прикладу можна навести приклади типових ланок: генератори сигналів заданої форми; амплітудний, фазовий, частотний модулятор та детектор; інтегратор; корелятор; низькочастотний, високочастотний, полосовий, узгоджений фільтр; перемножувач частоти сигналів та ін. У табл. 3.1 наведено опис деяких функціональних ланок. Для описування ланок необхідно знати вид функційного перетворення $f[]$. Якщо вид функціонального перетворення досить складний, його апроксимують простими функціями. В ряді випадків цю функцію перетворення розкладають в ряд Фур'є, Тейлора, а потім виконують необхідні перетворення.

Таблиця 3.1 – Деякі основні типи функційних ланок

Назва ланки	Оператор перетворення	Назва перетворення	Зображення на функційній схемі
1	2	3	4
1. Лінійні безінерційні ланки	$y(t) = x(t)$ $y(t) = -x(t)$ $y(t) = kx(t)$	Повторення інвертування підсилення	
2. Лінійні інерційні ланки	$y(t) = x(t - \tau)$	затримка сигналу на інтервал τ	
	$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) d\tau$	інтегрування	
	$y(t) = dx(t)/dt$	диференціювання	
	$y(t) = \int_0^T x(\tau)h(t - \tau)d\tau$	фільтрування	

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4
3. Нелінійні безінерційні ланки	$y(t) = f(x(t))$ $y(t) = [x(t)]^2$ $y(t) = \begin{cases} kx(t), & x < x_0 \\ A, & x \geq x_0 \end{cases}$	Нелінійне функційне перетворення	
4. Генератори	$y(t) = f(t)$	Генерування сигналу $f(t)$	
5. Модулятор	$y(t) = M[f(t), x(t)]$	моделювання сигналу-носія $f(t)$ повідомленням $x(t)$	

Необхідно зазначити, що під час моделювання можуть бути використані також ймовірнісні моделі функціональних ланок та системи в цілому, що описують функціонування у реальних умовах роботи систем зв'язку.

3.3 Математичний опис сигналів під час моделювання систем зв'язку

Під час моделювання систем зв'язку важливим є опис реальних сигналів і завад їхніми математичними моделями, що базуються на основних положеннях теорії сигналів. У системах зв'язку зустрічаються різного виду детерміновані та випадкові сигнали. Зокрема, це такі сигнали: сигнал-повідомлення $\lambda(t)$ (низькочастотний, як правило, випадковий сигнал), сигнал-переносник $f(t)$ (як правило, детермінований сигнал у вигляді гармонічного коливання), модульований сигнал $u(t)$ (як правило, високочастотний вузькосмуговий сигнал), завада $n(t)$ (як правило, випадковий широкосмуговий сигнал). Таким чином, для математичного опису сигналів та завад у системах зв'язку необхідно використовувати різні детерміністські та ймовірнісні моделі. Розглянемо деякі математичні моделі детермінованих та випадкових сигналів.

3.3.1 Математична модель вузькосмугових детермінованих сигналів

Якщо переносником є гармонійний сигнал, то модульований сигнал може розглядатися за певних умов як вузькосмуговий сигнал і тоді можна використати відповідне зображення сигналу у вигляді

$$u(t) = M[f(t), \lambda(t)] = \text{Re}\{\dot{U}(t)\},$$

де $M[\]$ – оператор модуляції гармонійного сигналу-переносника;

$$\begin{aligned}\dot{U}(t) &= \dot{E}(t, \lambda(t)) \exp(j\omega_0 t) = E(t) \exp(-j\phi(t)) \exp(j\omega_0 t) = \\ &= E(t) \cos(\omega_0 t - \phi(t)) - jE(t) \sin(\omega_0 t - \phi(t)).\end{aligned}\quad (3.13)$$

Цей вираз дає можливість отримати зображенням сигналу за допомогою квадратурних компонент

$$\dot{E}(t, \lambda(t)) = E(t) \cos \varphi(t) - jE(t) \sin \varphi(t) = a(t) - jb(t), \quad (3.14)$$

де $E(t) \cos \varphi(t) = a(t)$, $E(t) \sin \varphi(t) = b(t)$ – квадратурні компоненти.

Через квадратурні компоненти можна записати вираз для амплітуди та фази комплексної обвідної сигналу у вигляді:

$$E(t) = \sqrt{a^2(t) + b^2(t)}; \quad \varphi(t) = -\operatorname{arctg} \frac{b(t)}{a(t)}. \quad (3.15)$$

Конкретний вигляд комплексної обвідної модульованого сигналу залежить від вибраного вигляду оператора модуляції $M[\cdot]$ та вигляду повідомлення $\lambda(t)$

$$\dot{E}(t, \lambda(t)) = E(t, \lambda(t)) \exp\{-j\varphi(t, \lambda(t))\}. \quad (3.16)$$

При амплітудній модуляції матиме місце зміна амплітуди комплексної обвідної, при кутовій (частотній або фазовій) модуляції – зміна фази відповідно до переданого повідомлення. Наприклад, при амплітудній модуляції вираз для амплітуди обвідної визначається так

$$E(t, \lambda(t)) = A_0(1 + m\lambda(t)), \quad (3.17)$$

де m – коефіцієнт амплітудної модуляції.

Зображення сигналів через квадратурні компоненти, зокрема, співвідношення (3.15) дає можливість також будувати математичні моделі демодуляторів систем зв'язку з різними видами модуляції.

3.3.2 Математичні моделі низькочастотних детермінованих сигналів

Для опису періодичних сигналів широко використовується ряд Фур'є

$$s(t) = \frac{1}{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \dot{C}_k \exp(j2\pi kTt), \quad (3.18)$$

$$\dot{C}_k = C_k \exp(-j\phi_k) = a_k - jb_k = 2F \int_{-T/2}^{T/2} s(t) \exp(-2\pi kFt) dt, \quad (3.19)$$

де T – період повторення сигналу, $F = 1/T$.

Спектральне зображення неперіодичних абсолютно інтегрованих сигналів визначається перетворенням Фур'є

$$s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(jf) \exp(j2\pi ft) df, \quad S(jf) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \exp(-j2\pi ft) dt \quad (3.20)$$

На практиці часто для зображення сигналів використовують узагальнений ряд Фур'є

$$s(t) = \sum_{k=1}^N C_k \varphi_k(t), \quad (3.21)$$

де $\varphi_k(t)$, $k = \overline{1, N}$ – ортонормована система базисних функцій;

$$C_k = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \varphi_k(t) dt - \text{коефіцієнти розкладу.}$$

Поряд з базисом тригонометричних функцій використовують також базисні функції Лежандра, Лагерра, Ерміта, Чебишова, Уолта, Хаара та ін.

Таким чином, моделювання детермінованих сигналів та їхніх перетворень у різних ланках системи зводиться до обчислення на ЕОМ детермінованих функцій, заданих у дискретні моменти часу. Як правило, це не викликає складності ні принципового, ні обчислювального характеру під час проведення моделювання систем на сучасних ЕОМ.

3.3.3 Математичні моделі випадкових сигналів

Однак, окрім детермінованих сигналів і перетворень, під час моделювання систем зв'язку виникає необхідність реалізувати на ЕОМ різного роду випадкові елементи – випадкові величини, випадкові сигнали і поля. Зокрема, у каналах зв'язку діють випадкові завади різного типу: флуктуаційні та імпульсні; адитивні та мультиплікативні, вузькосмугові та широкосмугові; активні та пасивні. Вони відрізняються структурою та механізмом виникнення, а також своїми імовірнісними характеристиками. Окрім того, повідомлення, як правило, також носять стохастичний характер. Тому сигнали, що передаються та приймаються в системах зв'язку в загальному випадку, треба розглядати як випадкові сигнали. Для побудови їхніх математичних моделей необхідно використовувати ймовірнісні моделі, тобто випадкові процеси з різними імовірнісними характеристиками. Випадкові процеси описуються математичним апаратом, який суттєво відрізняється від апарату детермінованих сигналів. Сучасний математичний апарат, який використовується для опису випадкових елементів, базується на теорії множин, теорії міри, теорії функцій дійсної змінної та функціональному аналізі.

Сигнал як фізичний процес, що використовується для передавання інформації в системах зв'язку, може описуватися випадковою функцією. Випадкова функція – це суттєво інший випадковий математичний об'єкт порівняно з детермінованою функцією.

Її можна визначити як параметричну множину випадкових величин, що задовольняє певні умови

$$\Xi_v(\omega) = \{\xi_v(\omega), \quad v \in V, \quad \omega \in \Omega\}, \quad (3.22)$$

де v – параметр з множини V ;

ω – елементарна подія з множини елементарних подій Ω .

Параметр v може мати різне тлумачення. Якщо v – має сенс часу $t \in T$, то випадкова функція $\Xi_t(\omega)$ – це випадковий процес

$$\Xi_t(\omega) = \{\xi_t(\omega) = \xi(\omega, t), \quad t \in T, \quad \omega \in \Omega\}. \quad (3.23)$$

Коли T – зліченна множина $Z = \{0, \pm 1, \pm 2, \dots\}$, тоді функцію (3.23) називають випадковим процесом з дискретним часом або часовою послідовністю. У кожному випадку маємо множину випадкових величин, заданих на ймовірнісному просторі (Ω, F, P) , де F – σ -алгебра; P – імовірнісна міра.

На основі (3.23) може розглядатися декілька визначень випадкового процесу. Так множину (3.23) можна розглядати по-різному: як упорядковану відносно параметра $t \in T$ сукупність випадкових величин; як сукупність числових функцій часу, кожна з яких розглядається як елементарна подія; як функцію, що залежить від двох змінних (t, ω) .

Існує протиріччя між необхідністю повного опису випадкового процесу та достатньою простотою, яка визначається необхідністю розв'язання прикладних задач. Тому, під час розв'язання багатьох прикладних задач зв'язку ідуть на спрощений опис випадкового процесу, зокрема, в рамках кореляційної теорії, коли використовуються тільки дві моментні функції випадкового процесу – кореляційна функція та математичне сподівання. Кореляційна теорія випадкових процесів містить у собі декілька зображень процесів в інтегральному вигляді та у вигляді рядів. Це, насамперед, відповідні поширення на випадкові процеси інтегрального перетворення Фур'є, рядів Фур'є і Котельникова та зображення аналітичних та вузькосмугових сигналів, що широко використовуються для зображення детермінованих сигналів.

Кореляційна теорія набула широкого поширення, проте у галузі зв'язку існують задачі, які не можуть бути розв'язані в її рамках. Такими є задачі оптимального приймання сигналів, задачі теорії інформації, декодування сигналів. Для їхнього розв'язання необхідно застосовувати повніший опис випадкового процесу з використанням функцій розподілу. Розглянемо деякі класи випадкових процесів, що можуть бути використані в ролі математичних моделей реальних фізичних процесів у системах зв'язку.

Вузькосмугові випадкові процеси. За аналогією з описом вузькосмугових детермінованих сигналів може бути використана математична модель у вигляді вузькосмугового випадкового процесу

$$U_n(t) = \dot{E}_n(t) \exp(j\omega_c t), \quad (3.24)$$

де $\dot{E}_n(t) = E(t) \exp(\varphi(t))$ – це комплексна обвідна випадкового процесу. При цьому аналогічно до детермінованих сигналів розглядаються квадратурні складові $E_n(t) \cos \varphi_n(t) = A(t)$, $E_n(t) \sin \varphi_n(t) = B(t)$, які також є випадковими процесами. Через квадратурні складові вводяться поняття амплітуди та фази випадкового процесу $E_n(t) = \sqrt{A^2(t) + B^2(t)}$, $\psi_n(t) = \arctg \frac{B(t)}{A(t)}$.

Математична модель у вигляді вузькосмугового випадкового процесу може бути використана, наприклад, для описування флуктуаційної модульованих випадковим повідомленням сигналів, а також завади у вузькій смузі частот існування сигналів, що передаються.

Білі шуми. Одним із найбільш відомих і поширених класів випадкових процесів є білий шум. Білий шум – це випадковий процес з незалежними або некорельованими значеннями. Для дискретного часу білий шум – це послідовність незалежних або некорельованих випадкових величин. Залежно від імовірнісних властивостей розглядають стаціонарний і нестаціонарний, гаусовий і негаусовий білий шум. Згідно з означенням білого шуму, він повністю визначається через одновимірні функції чи щільності розподілу. Зокрема, багатовимірна щільність ймовірності визначається як добуток одновимірних щільностей ймовірності.

Наприклад, для стаціонарного білого шуму з дискретним часом багатовимірна щільність ймовірності визначається у вигляді

$$p(\vec{x}) = \prod_{i=1}^N p(x_i) = \frac{1}{(2\pi)^{N/2} \sigma^N} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^N x_i^2\right\}. \quad (3.24)$$

Білий шум є δ -корельованим (у розумінні δ -функції Кронекера) випадковим процесом, кореляційна функція якого має вигляд

$$R(k_1, k_2) = \begin{cases} 1, & k_1 = k_2, \\ 0, & k_1 \neq k_2. \end{cases} \quad (3.25)$$

На підставі теореми Вінера-Хінчина спектральна густина білого шуму з дискретним часом рівномірна у смузі частот $[-\pi, \pi]$ і має значення $N_0/2$.

Для описування реальних фізичних процесів у системах зв'язку використовують також «негаусові» білі шуми – випадкові процеси, які мають

такі ж властивості кореляційної функції та спектральної щільності, а щільність розподілу ймовірностей відрізняється від гаусової.

Математична модель у вигляді білого шуму може бути використана для описування завад у системах зв'язку.

Марківські процеси. Модель у вигляді білих шумів не враховує зв'язків суміжних значень, які розглядаються як статистично незалежні або некорельовані. Модель у вигляді марківських процесів враховує такі зв'язки, які поширюються тільки на один крок (або на фіксоване число кроків). Це відповідно прості та багатозв'язні марківські процеси.

Зокрема, випадковий процес з дискретним часом називають простим стаціонарним марківським процесом, багатовимірною щільність розподілу ймовірностей якого визначається одновимірною щільністю ймовірностей та щільністю ймовірностей переходів

$$p_n(\vec{x}) = p(x) \prod_{i=1}^n p(x_i / x_{i-1}). \quad (3.26)$$

Співвідношення (3.26) визначає марківську властивість випадкового процесу.

Для описування реальних процесів у системах зв'язку використовується також математична модель у вигляді марківських ланцюгів – випадкових процесів з дискретним часом, що приймають зчисленну множину значень. При цьому замість щільності ймовірності, притаманної для марківського процесу, основні характеристики процесу описуються ймовірностями відповідних подій. Марківська властивість для таких процесів описується співвідношенням

$$P(t_1, K_1; t_2, K_2; \dots; t_n, K_n) = P(t_1, K_1) \prod_{i=2}^n P(t_i, K_i | t_{i-1}, K_{i-1}), \quad (3.27)$$

де $P(t_i, K_i) = P(\xi(t_i, w) = K_i)$, $\sum_i P(t_i, K_i) = 1$.

Марківські ланцюги можуть бути використані для математичного опису джерела дискретних, зокрема, телеграфних повідомлень, а також процесів обслуговування у системах комутації.

Лінійні випадкові процеси. Існують різні означення лінійних випадкових процесів. Розглянемо одне із них, що основане на інтегральному зображенні [72, 73]

$$\xi(\omega, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\tau, t) \nu(\omega, \tau) d\tau, \quad (3.28)$$

де $\varphi(\tau, t)$ – імпульсна характеристика лінійного фільтра; $\nu(\omega, \tau)$ – білий шум.

Тут лінійний процес $\xi(w, t)$ розглядається як перетворення білого шуму $\nu(\omega, \tau)$ лінійним фільтром з імпульсною характеристикою $\varphi(\tau, t)$.

При цьому можуть бути отримані лінійні процеси з різними ймовірнісними характеристиками, які визначаються видом функції $\varphi(\tau, t)$, а також видом білого шуму. Зокрема, білий шум може бути гаусовим, пуассоновим, їх сумішшю або іншими білими шумами. Лінійний фільтр у виразі (3.28) має назву формуючого фільтра, а білий шум – породного процесу. Для лінійних процесів з дискретним часом математична модель визначається відповідним співвідношенням

$$\xi(\omega, k) = \sum_{j=-\infty}^k \varphi(k-j)v(\omega, j) = \sum_{j=0}^{\infty} \varphi(j)v(\omega, k-j) \quad (3.29)$$

де $\varphi(j)$ – дискретні відліки імпульсної характеристики фільтра,

$v(\omega, t)$ – білий шум з дискретним часом.

Лінійний процес можна також зобразити у вигляді авторегресії на минулі значення. При цьому можна отримати процеси авторегресії, ковзного середнього та змішані процеси авторегресії та ковзного середнього. Зокрема, процес авторегресії p -го порядку описується рівнянням

$$\xi(\omega, k) = \sum_{j=1}^p \varphi(j)\xi(\omega, k-j) + v(\omega, k). \quad (3.30)$$

Лінійні процеси можуть бути використані як математичні моделі, зокрема, під час опису джерела мовних повідомлень, кодера мовних повідомлень, джерела корельованих завад.

Існує також багато інших математичних моделей, що мають свої характерні властивості і дають можливість враховувати особливості різних фізичних процесів у системах зв'язку під час їхнього моделювання на ЕОМ. Зокрема, це математичні моделі, що описують негаусів характер сигналів за допомогою сумішей розподілу, сукупності моментних та кумулянтних функцій, а також нестационарний характер сигналів – за допомогою періодично-корельованих випадкових процесів. Систематизований опис різних ймовірнісних моделей наведений у роботах. Деякі специфічні математичні моделі сигналів описані у наступному розділі, де розглядаються алгоритми моделювання на ЕОМ різних випадкових елементів – випадкових величин, векторів і випадкових процесів.

3.4 Особливості математичних моделей мереж зв'язку

Мережа зв'язку – це складна система більш високого ієрархічного рівня порівняно з окремою системою зв'язку, математичні моделі якої розглядалися

у попередніх підрозділах. Структура мережі, тобто її топологія, визначається сукупністю пунктів (кінцевих і вузлів комутації) та каналів (ліній) зв'язку, що їх з'єднують. Призначення мережі полягає у передаванні повідомлень від джерел до споживачів інформації. Характерним для мережі зв'язку є значна кількість джерел та споживачів інформації, а також можливих маршрутів передавання повідомлень. Тому важливим для мережі є управління процесами передавання повідомлень із оптимальними показниками якості. Модель мережі зв'язку визначається математичним описом структури мережі, а також процесів надходження заявок до кінцевих пунктів та процесів їхнього обслуговування у мережі. Обслуговування включає процеси розподілу інформації у вузлах комутації та процеси доставки повідомлень до споживачів визначеними маршрутами. При цьому через значну кількість заявок, а також обмежені фізичні можливості систем комутації та каналів (ліній) зв'язку мають місце різні способи обслуговування заявок на вузлах комутації: з втратами (коли заявка отримує відмову на обслуговування), з очікуванням (коли заявка очікує звільнення лінії чи комутуючого пристрою), з обмеженим очікуванням (коли обмежено або число заявок, що очікують, або час очікування). Таким чином, для математичного опису мереж зв'язку використовують інший математичний апарат порівняно з описуванням просто систем зв'язку, які у згаданій структурі мережі часто використовуються для з'єднання різних вузлів.

3.4.1 Математичний опис структури мережі зв'язку

Розглянемо особливості математичного опису структури мережі зв'язку з використанням мережної математичної моделі. При цьому як модель використовується граф $G = (X, A)$, де $X = \{x_i\}$ – сукупність вершин графа, які ставляться у відповідність пунктам мережі (кінцевим пунктам, вузлам комутації), а $A = A = \{a_{ij}\}$ – сукупність ребер графа, які ставляться у відповідність лініям, каналам зв'язку. Відповідно до того, що канали зв'язку можуть бути однобічними та двобічними, ребра графа можуть бути орієнтованими та неорієнтованими. Таким чином, як модель мережі зв'язку можуть бути використані орієнтовані, неорієнтовані, мішані графи, а також мультиграфи. Мережні моделі широко використовуються на практиці під час проектування систем електрозв'язку, систем космічного та радіозв'язку, телетрансляційних мереж, обчислювальних комплексів, транспортних мереж.

Мережний аналіз відіграє все більше зростаючу роль, тому що за допомогою графів можна досить просто побудувати модель не тільки мережі зв'язку, але й інших складних системи. Розширення сфери використання мережної моделі пов'язане з тим, що методи мережного аналізу дають можливість: побудувати модель складної системи як сукупність простих; скласти формально процедури для визначення якісних та кількісних характеристик системи; показати механізм взаємодії компонентів системи з метою опису останньої в термінах її основних характеристик; визначити, які дані необхідні для дослідження системи.

В ході побудови моделей мереж зручно користуватися алгебраїчним зображенням графів, що визначається топологічними матрицями та матрицями характеристик ребер графа (гілок мережі).

Топологічна матриця, що визначає структуру мережі, може задаватися у вигляді матриці суміжності та структурної матриці. Матриця суміжності (сполучення) графа G – це квадратна матриця $A = [a_{ij}]$ розміру n (n – кількість вершин графа). Вона визначається так:

$$A = [a_{ij}] = \begin{cases} 1, & \text{якщо в } G \text{ є ребро } (i, j) \\ 0, & \text{якщо в } G \text{ немає ребра } (i, j) \end{cases} \quad (3.31)$$

Елементи головної діагоналі матриці $A = [a_{ij}]$ звичайно покладають рівними нулеві $a_{ii} = 0$, за винятком випадків, коли в деяких вершинах є «петлі». Матриця $A = [a_{ij}]$ для орієнтованого графа несиметрична відносно головної діагоналі, симетричною вона буде лише для неорієнтованого графа.

Структурна матриця використовується для спрощення запису структури мережі, коли ребрам графа присвоюються спеціальні позначення, наприклад, a, b, c . Ці позначення використовуються як елементи структурної матриці. Структурна матриця графа B це – квадратна матриця розміру n , яка визначається так:

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } i = j, \\ 0, & \text{якщо в } G \text{ немає ребра } (i, j), \\ x, & \text{якщо ребро } (i, j) \text{ в } G \text{ є при } i < j, \\ \bar{x}, & \text{якщо ребро } (i, j) \text{ в } G \text{ є при } i > j. \end{cases} \quad (3.32)$$

Крім розглянутих топологічних матриць, можуть бути використані матриці інциденцій «вершини–дуги», «дуги–дуги».

Матриця кількісних характеристик ребер графа використовується для різних кількісних оцінок мережі. При цьому кожному ребру графа приписується певна вага – число, яке характеризує яку-небудь властивість

даного ребра, наприклад, довжину, вартість, пропускну здатність, каналну ємність, час передачі інформації, надійність тощо. Зазначені характеристики ребер графа подаються у формі відповідних квадратних матриць розміру n – довжин, вартостей. Якщо G – неорієнтований граф, то усі матриці симетричні відносно головної діагоналі.

Наприклад, для побудови матриці довжин шляхів $L = [l_{ij}]$ користуються таким правилом:

$$l_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } i = j; \\ \infty, & \text{якщо в } G \text{ немає ребра } (i, j); \\ \text{довжині ребра } (i, j), & \text{якщо ребро } (i, j) \text{ в } G \text{ є.} \end{cases} \quad (3.33)$$

Матрицю каналних ємностей ребер $C = [c_{ij}]$ отримують за правилом:

$$c_{ij} = \begin{cases} \infty, & \text{якщо } i = j; \\ 0, & \text{якщо в } G \text{ немає ребра } (i, j); \\ \text{кількості каналів ребра } (i, j), & \text{якщо ребро } (i, j) \text{ в } G \text{ є.} \end{cases} \quad (3.34)$$

Аналогічно отримують й інші матриці характеристик ребер графа. Дані характеристики мережі можуть бути використані під час розв'язання різних задач синтезу та аналізу мереж зв'язку, зокрема, для пошуку оптимальних шляхів передавання повідомлень. Оскільки призначення мережі зв'язку полягає у тому, щоб надавати абонентам з'єднувальні шляхи для передавання повідомлень відповідно до адреси та заданих показників якості, тому необхідно здійснювати оптимальний вибір з'єднувальних шляхів. При цьому має здійснюватися вибір таких шляхів, щоб забезпечити найефективніше використання обладнання мережі, або забезпечити мінімально можливі довжину шляхів та кількість транзитних ділянок у шляхах, або забезпечити необхідну кількість каналів у шляхах чи максимальну швидкість передавання.

Так, під час розв'язання задач проектування мереж зв'язку виникає необхідність у пошуку множини шляхів, які існують між заданою парою вузлів зв'язку (вершин графа). Всі методи пошуку множини шляхів у мережі можна поділити на два класи: матричні та мережні. Матричні методи ґрунтуються на перетворенні різних матриць – топологічних чи матриць характеристик ребер графа, а мережні методи – на присвоєнні вершинам графа позначень, що називаються позначками (чи індексами). Мережні методи визначення множини шляхів між заданими вузлами мережі є графічним еквівалентом матричних методів. Визначення множини шляхів базується на побудові дерева шляхів із фіксованої вершини-витоку (кореня дерева) до решти вершин-стоків

графа. Докладно з цими та іншими методами пошуку множини шляхів у мережі можна ознайомитися за роботами.

3.4.2 Математичні моделі потоків заявок та процесів обслуговування у мережах зв'язку

Окрім структури, математична модель мережі зв'язку має описувати потоки заявок та їхнє обслуговування у мережі. Ці процеси мають стохастичний характер. Розглянемо їхні математичні моделі, що будуються на основі теорії випадкових процесів та теорії масового обслуговування.

Основні характеристики випадкових потоків заявок. Випадковий потік заявок розглядається як послідовність випадкових величин, яка може бути задана різними способами, зокрема у вигляді:

- послідовності випадкових моментів часу появи заявки $t_i, i = 1, 2, \dots, n$;
- послідовністю випадкових інтервалів часу між заявками $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}, i = 1, 2, \dots, n$;
- послідовністю випадкових чисел $k_i, i = 1, 2, \dots, n$, що визначають кількість заявок на заданих інтервалах часу $[t_0, t_i), i = 1, 2, \dots, n$.

За перших двох способів задання потік заявок розглядається як випадковий точковий процес, а за третього – як випадковий цілочисельний процес $k(t)$ із початковим значенням $k(t_0) = 0$. Імовірнісний опис таких випадкових процесів використовує такі характеристики: закон розподілу або відповідну щільність ймовірності моментів часу появи заявок чи інтервалів часу між заявками, а також закон розподілу кількості заявок на заданих інтервалах часу.

Залежно від властивостей цих характеристик розглядаються різні типи потоку заявок: ординарний та неординарний, стаціонарний та нестаціонарний, без післядії та з післядією. Зокрема, для стаціонарного потоку закон розподілу кількості заявок не залежить від початкового моменту часу. Ординарність означає неможливість одночасного надходження двох і більше заявок. Відсутність післядії означає взаємну незалежність кількостей появи заявок на інтервалах часу, що не перекриваються.

Кількісний опис заявок використовує три основні характеристики: провідну функцію потоку, що є середньою кількістю заявок за інтервал часу (t_1, t_2) ; інтенсивність потоку, що є середньою кількістю заявок за одиницю часу; параметр потоку, що визначається імовірністю появи хоча б однієї заявки на малому інтервалі часу $(t, t + \tau)$ ($\tau \rightarrow 0$).

Однорідний стаціонарний потік без післядії називається найпростішим потоком. Інтервали часу між заявками в ньому є незалежними випадковими величинами з показниковим розподілом, для якого щільність ймовірності має вигляд

$$p(\Delta t) = \lambda \exp(-\lambda \Delta t), \quad (3.35)$$

де λ – параметр потоку.

Найпростіший потік заявок називається також пуассоновим, бо кількість заявок k на інтервалі часу тривалістю T розподілена за законом Пуассона

$$p_k(T) = \frac{(\lambda T)^k}{k!} \exp(-\lambda T), \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (3.36)$$

Під час застосування до найпростішого потоку з параметром λ операції проріджування (вилучення із нього частини заявок), отримують рекурентний потік з відновленням. Якщо при цьому m заявок підряд втрачається, а залишається тільки кожна $(m + 1)$, то проріджений потік має параметр $\lambda / (m + 1)$ та щільність ймовірності для інтервалів часу між заявками

$$p(\Delta t) = \frac{\lambda^{m+1} \Delta t^m}{m!} \exp(-\lambda \Delta t). \quad (3.37)$$

Такий розподіл носить назву розподілу Ерланга m -го порядку, а відповідні потоки називаються ерлангівськими. За допомогою розподілу Ерланга є можливість опису широкого класу потоків – від найпростішого (при $m = 0$) до детермінованого з постійною тривалістю інтервалів між заявками (при $m \rightarrow \infty$).

Основні характеристики систем масового обслуговування з втратами.

Дисципліною обслуговування з явними втратами називається така, за якої заявка, що надходить у систему, отримавши відмову в обслуговуванні, покидає систему. Під час обслуговування потоку заявок системою кожна з них займає обслуговуючий прилад (канал зв'язку) на деякий інтервал часу. Для систем розподілу інформації як одного із класів систем масового обслуговування важливе значення має сумарний час зайняття каналів під час обслуговування заявок. Тому дослідження цих систем проводиться на основі сумарного часу обслуговування заявок, що називається навантаженням. Як правило, розрізняють навантаження, що обслуговується, що надходить і що втрачається.

Навантаження $y_0(t_1, t_2)$, що обслуговується системою за інтервал часу $[t_1, t_2)$, є сумарним часом зайняття всіх каналів системи обслуговування потоку заявок, які надходять на її входи за цей інтервал часу

$$y_0(t_1, t_2) = \sum_{i=1}^V \tau_i, \quad (3.38)$$

де τ_i – сума інтервалів часу, протягом яких i -й канал був зайнятий обслуговуванням на інтервалі часу $[t_1, t_2)$;

V – кількість каналів обслуговування.

Під інтенсивністю навантаження розуміють навантаження за одиницю часу. Інтенсивність навантаження, що обслуговується, при заданій якості обслуговування характеризує пропускну здатність системи розподілу інформації. Кількісно вона оцінюється величиною середньої пропускну здатності або середнього часу використання одного каналу

$$\eta = y_0 / V . \quad (3.39)$$

Під навантаженням $y(t_2, t_2)$, що надходить у систему за інтервал часу $[t_1, t_2)$, розуміють таке навантаження, яке може бути обслужене нею за цей інтервал в умовах негайного надання обслуговування кожній заявці, яка надходить.

Навантаження $y_g(t_2, t_2)$, що втрачається системою протягом інтервалу часу $[t_1, t_2)$, становить різницю між навантаженнями $y(t_2, t_2)$ та $y_0(t_2, t_2)$. Для кількісної оцінки якості обслуговування з втратами на інтервалі $[t_1, t_2)$ використовуються такі характеристики: втрати за часом, як частина часу на цьому інтервалі, протягом якого всі доступні канали системи зайняті обслуговуванням; втрати за заявками, як відношення числа втрачених за цей відрізок часу заявок до загальної кількості заявок, що надійшли до системи; втрати за навантаженням, як відношення навантаження, що втрачається, до навантаження, що надходить за той самий інтервал часу.

Стани системи обслуговування $S(t)$ визначаються кількістю заявок, які знаходяться у системі на обслуговуванні. Для дисципліни обслуговування з втратами ця кількість збігається з кількістю зайнятих каналів системи. При цьому процес обслуговування системою заявок $S(t)$ може приймати різні значення залежно від стану системи: стан S_0 , коли вільні всі V каналів; стан S_1 , коли зайнятий один канал, а інші вільні; стан S_k , коли зайнято k каналів, а інші вільні; S_V , коли зайняті всі V каналів.

У разі найпростішого потоку заявок з параметром λ і показниковим розподілом тривалості обслуговування з функцією розподілу $F(T_{об}) = 1 - \exp(-\mu T_{об})$ фінальні ймовірності вказаних станів системи $P_j = P(S_j)$ визначаються першою формулою Ерланга

$$P_j = P_0 \frac{y^j}{j!}, \quad j = \overline{1, V}, \quad P_0 = \left[\sum_{k=0}^V \frac{y^k}{k!} \right]^{-1}, \quad (3.40)$$

де $y = \lambda / \mu$ – інтенсивність навантаження, що надходить.

Динаміка станів системи обслуговування з втратами для найпростішого або примітивного потоку та показниково розподіленої тривалості обслуговування описується дискретними марківськими процесами народження та загибелі. Під час їхнього імітаційного моделювання на ЕОМ використовуються ланцюги Маркова із $V + 1$ -м станом $S(t_i) \in \{0, 1, 2, \dots, V\}$, $i = \overline{0, n-1}$, що створюються на інтервалі часу спостереження у вигляді послідовності відліків у моменти часу $t_i = i\Delta t$. У цих ланцюгах розглядаються переходи між станами через одиничні моменти часу.

Аналогічно на основі теорії масового обслуговування будуються математичні моделі складніших систем обслуговування з очікуванням. Дисципліною обслуговування з очікуванням називається така, за якої заявка, що надходить у систему за відсутністю вільних обслуговуючих приладів (каналів), не втрачається, а ставиться до черги, очікуючи звільнення будь-якого з них. Разом із показниками завантаження каналів система обслуговування з очікуванням додатково описується такими характеристиками: ймовірність умовних втрат за часом, яка визначається середньою часткою часу, коли всі канали зайняті обслуговуванням; ймовірність затримки (очікування початку обслуговування) заявки понад заданий час; середній час очікування обслуговування; ймовірність того, що довжина черги перевищить задану величину; середня довжина черги.

Процес обслуговування описується випадковим процесом, що приймає дискретні значення і визначається кількістю заявок, які присутні у системі обслуговування. При цьому характерні такі стани системи: стан S_0 , коли вільні всі V каналів; стан S_1 , коли зайнятий один канал, а інші вільні; стан S_k , коли зайнято k каналів, а інші вільні; стан S_V , коли зайняті всі V каналів; стан S_{V+1} , коли зайняті всі V каналів та одна заявка стоїть у черзі; стан S_{V+r} , коли зайняті всі V каналів та r заявок стоїть у черзі. Довжина черги буде скінченною, якщо інтенсивність навантаження, що надходить, буде меншою за кількість каналів обслуговування у системі. Динаміка станів системи обслуговування з чергами описується дискретними марківськими процесами, зокрема ланцюгами Маркова. Докладніше ознайомитися з особливостями побудови математичних моделей різних видів потоків заявок і процесів обслуговування у мережах зв'язку можна також за роботами.

Контрольні запитання та завдання

1. Зазначте основні етапи статистичного моделювання систем на ЕОМ.
2. Як знаходяться оцінки ефективності цифрових систем зв'язку методом статистичних випробувань?
3. Зазначте етапи отримання цифрового зображення сигналів під час їхнього моделювання на ЕОМ.
4. Перелічіть особливості математичної моделі низькочастотних сигналів у вигляді рядів Фур'є.
5. Перелічіть особливості математичної моделі у вигляді вузькосмугових сигналів.
6. Які математичні моделі випадкових сигналів використовуються під час моделювання систем.
7. Охарактеризуйте математичний опис перетворень сигналів на рівні функціональних ланок системи.
8. Перелічіть особливості математичних моделей потоків заявок у мережах зв'язку.
9. Перелічіть особливості математичних моделей для описування структури мережі зв'язку.

4 МОДЕЛЮВАННЯ НА ЕОМ ВИПАДКОВИХ ВЕЛИЧИН І ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ

Під час статистичного моделювання на ЕОМ систем та мереж зв'язку виникає необхідність моделювання різних випадкових елементів – одержання на ЕОМ реалізацій випадкових величин та випадкових процесів, які описують реальні фізичні явища, події та процеси функціонування цих систем. Розглянемо основні принципи, методи та алгоритми моделювання на ЕОМ типових випадкових величин і випадкових процесів, що можуть бути використані для статистичних випробувань під час моделювання систем та мереж зв'язку на ЕОМ.

4.1 Принципи моделювання на ЕОМ випадкових елементів

Під час моделювання випадкових елементів (ВЕ) на ЕОМ розглядають три об'єкти: реальний фізичний об'єкт, його математичну модель, алгоритм моделювання на ЕОМ реалізацій ВЕ на основі вибраної математичної моделі. Наприклад, у системах та мережах зв'язку такими реальними фізичними об'єктами можуть бути повідомлення, сигнали-переносники, модульовані сигнали, завади, потоки заявок, процеси обслуговування заявок, процеси комутації. Математичні моделі цих фізичних процесів – це різні класи випадкових процесів з імовірнісними характеристиками, що відповідають реальним фізичним процесам. Результатом моделювання на ЕОМ є вибірки реалізацій процесів, що отримують за допомогою спеціальних моделюючих алгоритмів. Моделювання ВЕ базується на таких принципах:

- ВЕ визначається («конструюється») як відповідна борелівська функція від найпростіших базових випадкових величин (БВВ);
- має бути забезпечена близькість (за вибраним критерієм) імовірнісних характеристик реальних фізичних процесів та змодельованих реалізацій випадкових процесів.

БВВ отримують в результаті проведення на ЕОМ найпростішого випадкового експерименту. Експеримент полягає в «киданні точки навімання» в інтервал $[0,1)$ (рис.4. 1). Математичною моделлю такого експерименту є ймовірнісний простір $(\Omega, F, P(A))$, де $\Omega = [0,1)$ – це простір незалежних елементарних подій ω ; $\omega \in \Omega$ – це елементарна подія, яка полягає в тому, що координата кинutoї точки дорівнює ω ; F – це σ -алгебра, що породжена

напівінтервалами з простору Ω ; $P(A)$ – це імовірнісна міра, яка визначена для підмножин $A \in F$ і збігається з мірою Лебега, так що $P([0, x]) = x$, $x \in [0, 1]$.

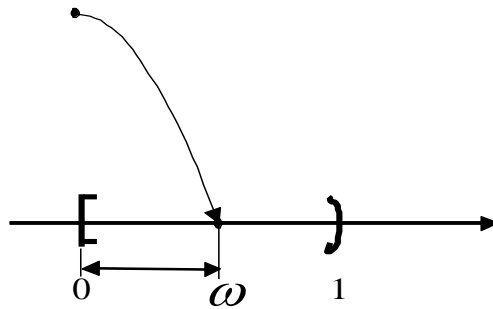


Рисунок 4.1 – Графічне пояснення найпростішого випадкового експерименту для отримання реалізацій БВВ

Випадкова величина $\alpha(\omega) = \omega$, що задана на просторі Ω , породжує інший імовірнісний простір $(R^1, F_\alpha, P_\alpha)$, де R^1 – це множина значень на числовій осі; F_α – борельова σ – алгебра, $P_\alpha(A)$ – індуктована імовірнісна міра. Фактично, $P_\alpha(A) = P(\alpha^{-1}(A))$ – це функція розподілу БВВ $\alpha(\omega)$, що у даному випадку має вигляд

$$P[0, x) = F_\alpha(x) = P\{\alpha(\omega) < x\} = \begin{cases} 0, & x < 0; \\ x, & 0 \leq x < 1; \\ 1, & x \geq 1, \end{cases} \quad (4.1)$$

Відповідна їй щільність розподілу рівномірна на півінтервалі $[0, 1]$.

На рис. 4.2 наведені графічні зображення функції і щільності розподілу БВ $\alpha(\omega)$.

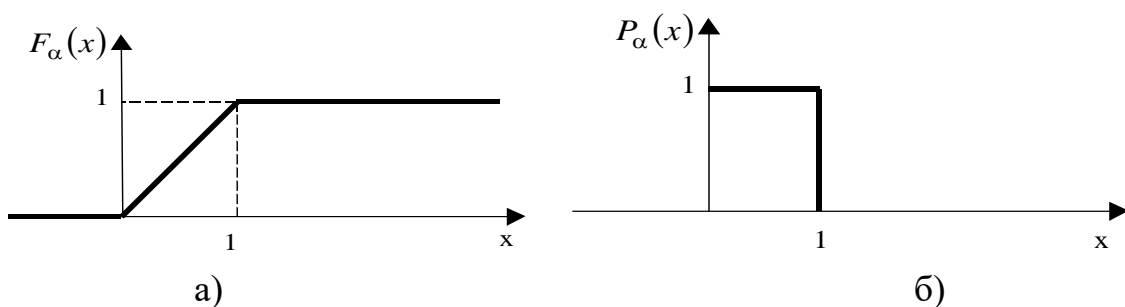


Рисунок 4.2 – Графічне зображення:
а) функції розподілу; б) щільності розподілу (б) БВВ

У кожній ЕОМ є генератори (спеціальні програми) отримання випадкових величин, що мають дані ймовірнісні характеристики. При послідовному звертанні N раз до таких програм моделюється вибірка із N незалежних

реалізацій БВВ $\alpha(\omega_1), \alpha(\omega_2), \dots, \alpha(\omega_N)$, яка в подальшому використовується для побудови ВЕ із необхідними ймовірнісними характеристиками.

Під час моделювання на ЕОМ складних ВЕ, зокрема, випадкової величини (ВВ) або випадкового процесу (ВП) із заданими ймовірнісними характеристиками розглядається складний випадковий експеримент, що полягає в проведенні r ($r \geq 1$) раз описаного вище найпростішого експерименту. Цей складний експеримент описується імовірнісним простором (Ω^r, F^r, P^r) , де Ω^r – декартовий добуток: $\underbrace{\Omega^r = \Omega \times \Omega \times \dots \times \Omega}_{r \text{ раз}}$;

F^r – найменша σ – алгебра, що побудована на Ω^r ; $P^r = \prod_{k=1}^r P_k^r(A)$ – імовірнісна міра, отримана як добуток імовірнісних мір для найпростішого експерименту.

В результаті проведення такого складного експерименту отримуємо r БВВ. Далі відповідно до першого принципу моделювання ВЕ на ЕОМ будь-який складний випадковий елемент $\Xi(\omega)$ отримується як борелівська функція від r БВВ

$$\Xi(\omega) = \varphi(\alpha_1(\omega), \alpha_2(\omega), \dots, \alpha_r(\omega)). \quad (4.4)$$

Підбирають функцію $\varphi(\cdot)$ і число r так, щоб імовірнісні характеристики отриманого ВЕ $\Xi^*(\omega)$ збігалися з імовірнісними характеристиками оригіналу, що моделюється. Існують різні критерії близькості імовірнісних характеристик ВЕ – оригіналу і ВЕ, отриманого під час моделювання, зокрема, критерій Пірсона, критерій Колмогорова.

4.2 Моделювання випадкових величин із заданими ймовірнісними характеристиками

Оскільки моделювання випадкових процесів на ЕОМ зводиться до моделювання послідовності випадкових величин із заданими ймовірнісними характеристиками, спочатку розглянемо особливості моделювання деяких випадкових величин.

4.2.1 Моделювання випадкових величин, що приймають дискретні значення

Розглянемо моделювання випадкових величин $\xi(\omega)$, що приймають n дискретних значень C_1, C_2, \dots, C_n із заданими ймовірностями P_1, P_2, \dots, P_n ,

$$\left(\sum_{i=1}^n P_i = 1\right).$$

Моделювання таких ВВ може бути зведене до моделювання повної групи n незалежних подій, які відбуваються з імовірностями P_1, P_2, \dots, P_n . Для цього використовується датчик БВВ із математичною моделлю (Ω, F, P) .

Введемо систему таких підмножин $(F_1, F_2, \dots, F_n) \in F$, щоб їх можна було розглядати як повну групу незалежних подій на Ω . При цьому мають задовольняти умови: $\bigcup_{i=1}^n F_i = \Omega$; $F_i \cap F_j = \emptyset, i \neq j$; $\sum_{i=1}^n P(F_i) = 1$. Визначимо ці підмножини так

$$F_i = \{\omega : S_{i-1} \leq \alpha(\omega) < S_i\}, \quad (4.5)$$

де S_i і S_{i-1} – це межі інтервалів, які визначаються за формулою

$$S_i = \sum_{j=1}^i P_j, \quad i = \overline{1, n}, \quad \text{причому } S_0 = 0. \quad (4.6)$$

Зважаючи на те, що БВВ розподілена рівномірно на інтервалі $[0,1)$, імовірності підмножин $P(F_i)$ визначаються через щільність розподілу БВВ відповідним співвідношенням

$$P(F_i) = \int_{S_{i-1}}^{S_i} P_\alpha(x) dx. \quad (4.7)$$

Це означає, що імовірність попадання значення БВВ в інтервал $[S_{i-1}, S_i)$ дорівнює довжині цього інтервалу (рис. 4.3).

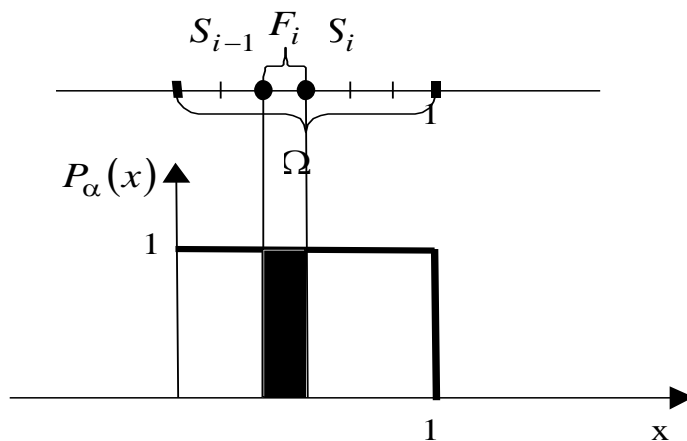


Рисунок 4.3 – Геометричне пояснення моделювання групи незалежних подій за допомогою БВВ

Таким чином, моделювання ВВ $\xi(\omega)$, яка приймає дискретні значення, полягає у виборі значення БВВ за допомогою генератора, перевірки попадання

значення БВВ до однієї з підмножин F_i і винесенні рішення про те, що модельоване ВВ приймає значення C_i

$$\xi(\omega) = \sum_{i=1}^n C_i I_{F_i}(\omega), \quad (4.8)$$

де

$$I_{F_i}(\omega) = \begin{cases} 1, & \omega \in F_i, \\ 0, & \omega \notin F_i. \end{cases} \quad (4.9)$$

– це характеристична функція множини.

4.2.2 Моделювання випадкових величин із заданими щільностями ймовірностей методом обернених функцій

Розглянемо моделювання ВВ $\xi(\omega)$ із заданою щільністю ймовірності $p(x)$ та функцією розподілу

$$F(x) = \int_{-\infty}^x p(x) dx. \quad (4.10)$$

Якщо функція $F(x)$ є суворо монотонно зростаючою, то із рівняння $F(x) = y$ можна знайти обернену функцію

$$x = F^{-1}(y). \quad (4.11)$$

Підставивши замість y БВВ $\alpha(\omega)$, можна отримати алгоритм моделювання ВВ із заданим розподілом:

$$\xi(\omega) = F^{-1}(\alpha(\omega)). \quad (4.12)$$

Таким чином, для моделювання на ЕОМ ВВ $\xi(\omega)$ із заданою щільністю ймовірності, потрібно виконати такі операції:

– знайти функцію розподілу, користуючись заданою щільністю ймовірності;

– знайти функцію, що буде оберненою до функції розподілу;

– отримати реалізації БВВ $y = \alpha(\omega)$;

– обчислювати значення ВВ $\xi(\omega)$ як значення знайденої функції

$$\xi(\omega) = F^{-1}(\alpha(\omega)).$$

Виконуючи ці операції N – разів, отримаємо вибірку реалізацій $\xi(\omega_1), \xi(\omega_2), \dots, \xi(\omega_N)$. Скориставшись нею, можна побудувати гістограму розподілу і порівняти її із заданою щільністю ймовірності.

Даний метод моделювання має недоліки, тому що не завжди вдається аналітично розрахувати для заданої щільності ймовірностей $p(x)$ інтеграл

для одержання $F(x)$, і не для будь-якої функції розподілу вдається отримати обернену функцію.

4.2.3 Моделювання випадкових величин із заданими щільностями ймовірностей методом суперпозиції

Цей метод базується на зображенні складних щільностей ймовірностей $p(x)$ через простіші. Зокрема, можна подати будь-яку щільність ймовірності випадкової величини $\xi(\omega)$ у вигляді суміші простих розподілів

$$p_{\xi}(x) = \sum_{i=1}^n p_i p_i(x), \quad (4.13)$$

де p_i – деякі коефіцієнти, причому $\sum_{i=1}^n p_i = 1$, а $p_i(x)$ – щільності розподілу ВВ,

для яких досить просто виконати моделювання на ЕОМ.

В основі моделювання лежить такий математичний апарат. Нехай існують ВВ $\xi(\omega)$ і $\nu(\omega)$ незалежні між собою і задані на тому самому ймовірнісному просторі (Ω, F, P) . Нехай $F_{\nu}(\omega)$ – це функція розподілу ВВ $\nu(\omega)$ і $P_{\xi/\nu}(x/z)$ – це умовна щільність ймовірності ВВ $\xi(\omega)$ за умови, що ВВ $\nu(\omega)$ прийняла якесь значення z

$$\nu(\omega) = z. \quad (4.14)$$

Тоді безумовна щільність ймовірності ВВ $\xi(\omega)$

$$P_{\xi}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} P_{\xi/\nu}(x/z) dF_{\nu}(z). \quad (4.15)$$

Припустимо, що $\nu(\omega)$ – це ВВ, яка приймає дискретні значення C_1, C_2, \dots, C_n з ймовірностями

$$P\{\nu(\omega) = C_i\} = P_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (4.16)$$

У цьому випадку $P_{\xi/\nu}(x/C_i) = P_i(x)$, отже приходимо до раніше наведеної суміші розподілу. У ролі щільностей ймовірності найпростішого типу можуть виступати: гаусові, прямокутні, трикутні розподіли.

На рис. 5.6 для прикладу показано, як за допомогою гаусових розподілів апроксимується щільність розподілу складнішого виду

$$p_{\xi}(x) = \sum_{i=1}^3 \frac{P_i}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-m_i)^2}{2\sigma_i^2}\right). \quad (4.17)$$

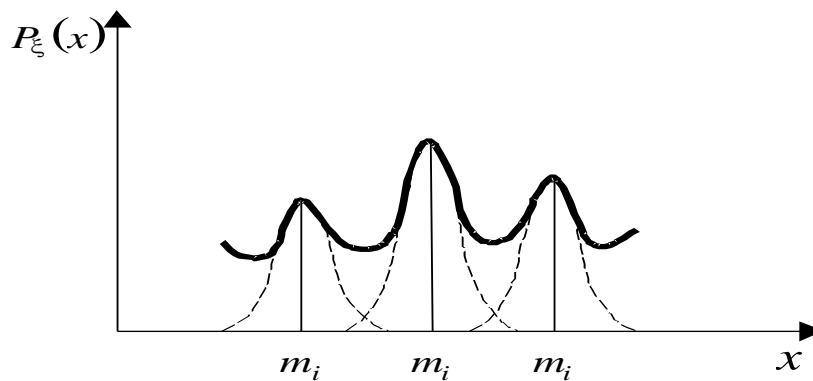


Рисунок 4.6 – Апроксимація складної щільності ймовірності за допомогою гаусових розподілів

Таким чином, алгоритм моделювання ВВ методом суперпозиції містить у собі такі етапи:

- вибір вигляду найпростішої щільності розподілу, за допомогою якої апроксимується задана щільність ймовірності;
- моделюється реалізація ВВ, яка приймає дискретні значення $C_i = i$, $i = \overline{1, n}$ із заданими імовірностями P_i ;
- для отриманого значення i моделюється реалізація ВВ з i -ю щільністю ймовірності;
- моделюється реалізація ВВ, яка приймає дискретні значення $C_i = i$;
- потім виконується процес моделювання реалізації ВВ із новим номером щільності ймовірності;
- зазначені етапи моделювання повторюються доти, доки не буде отримана вибірка реалізацій ВВ необхідного обсягу.

4.2.4 Моделювання гаусових випадкових величин методом сумачії

Введемо стандартну гаусову ВВ $\eta(\omega)$ із нульовим математичним сподіванням $\mu = 0$ і одиничною дисперсією $D = 1$

$$p(x) = N(x/0, 1), \quad (4.18)$$

де $N(\cdot)$ – символ гаусової щільності ймовірності.

У математичній статистиці доведено, що сума значного числа незалежних між собою і рівномірно розподілених ВВ має гаусовий закон розподілу. Тому стандартну гаусову ВВ можна моделювати відповідно до виразу:

$$\eta(\omega) = \frac{\sqrt{12}}{r} \left(\sum_{i=1}^r \alpha_i(\omega) - \frac{r}{2} \right), \quad (4.19)$$

де $\alpha_i(\omega)$ – незалежні між собою БВВ.

У загальному випадку довільних μ, D гаусову ВВ можна записати як

$$\xi(\omega) = \mu + D\eta(\omega), \quad (4.20)$$

де μ, D – це необхідні математичне сподівання і дисперсія ВВ.

Таким чином, алгоритм моделювання гаусової ВВ із заданими математичним сподіванням і дисперсією містить такі операції:

- отримання r незалежних реалізацій БВВ і виконання над ними перетворення відповідно до зазначеного співвідношення (4.19);
- виконання перетворень (4.20) для отримання ВВ із заданими μ, D .

4.2.5 Моделювання випадкових величин із експоненціальним розподілом та розподілом Релея

Для моделювання вказаних ВВ використовуються стандартні гаусові випадкові величини $\eta(\omega)$. Спочатку виконується моделювання ВВ згідно з виразом

$$\xi(\omega) = \sum_{j=1}^n (\eta_j(\omega))^2, \quad (4.21)$$

де $\eta_j(\omega)$ – стандартні ВВ із гаусовим розподілом ($\mu = 0, D = 1$).

Випадкова величина $\xi(\omega)$ (4.21) має χ^2 – розподіл з n ступенями свободи

$$p(x) = \frac{x^{n/2} \exp(-x/2)}{2^{n/2} \Gamma(n/2)}, \quad (4.22)$$

де $x \geq 0$, $\Gamma(\cdot)$ – це гамма-функція.

В окремому випадку $n = 2$ ця ВВ має експоненціальний розподіл з параметром $\lambda > 0$

$$p(x) = \lambda \exp(-\lambda x). \quad (4.23)$$

ВВ, що визначається співвідношенням

$$\zeta(\omega) = \sqrt{(\eta_1(\omega))^2 + (\eta_2(\omega))^2}, \quad (4.24)$$

має розподіл Релея

$$p(x) = \frac{x}{D} \exp\left(-\frac{x^2}{2D}\right).$$

Тут $\eta_1(\omega), \eta_2(\omega)$ – незалежні між собою стандартні гаусові ВВ.

Наведені співвідношення для отримання ВВ фактично є моделюючими алгоритмами, що містять такі етапи:

- моделювання n стандартних гаусових ВВ ($\mu = 0, D = 1$);

- виконання операцій обчислення ВВ згідно з 4.21) (для χ^2 – розподілу);
- для експоненційного розподілу алгоритм той самий, тільки $n = 2$;
- для розподілу Релея (4.24) моделювання згідно з (4.24).

4.3 Моделювання випадкових процесів

Випадковий процес (ВП) – це параметрична сім'я ВВ $\xi(\omega, t) = \xi_t(\omega)$, $\omega \in \Omega$, $t \in (0, T)$. Тому моделювання ВП зводиться до моделювання послідовності випадкових величин із заданими ймовірнісними характеристиками $\xi(\omega, t_1), \xi(\omega, t_2), \xi(\omega, t_3), \dots, \xi(\omega, t_n)$.

Розглянемо алгоритми моделювання різних типів ВП, що побудовані з використанням характерних властивостей різних ймовірнісних моделей.

4.3.1 Моделювання білих шумів

За означенням білий шум – випадковий процес з незалежними значеннями для різних моментів часу. Це означає, що перерізи ВП не залежать між собою, тобто багатовимірна щільність ймовірності визначається добутком одновимірних щільностей розподілу

$$p(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) = \prod_{j=1}^n p(\xi_j), \quad (4.25)$$

де $p(\xi_i)$ – одновимірна щільність ймовірності.

Отже, під час моделювання на ЕОМ білого шуму необхідно отримати послідовність n незалежних ВВ із заданою щільністю розподілу

$$\xi(\omega, t_1), \xi(\omega, t_2), \xi(\omega, t_3), \dots, \xi(\omega, t_n). \quad (4.26)$$

Для випадку гаусового білого шуму моделювання зводиться до отримання послідовності незалежних між собою гаусових ВВ. У загальному випадку негаусових білих шумів моделюються послідовності незалежних між собою ВВ з іншим довільним розподілом.

4.3.2 Моделювання корельованих випадкових процесів

На відміну від попереднього випадку, перерізи ВП між собою корельовані. Тому, для моделювання необхідно використовувати алгоритм, що враховує цю властивість. Моделювання корельованих ВП базується на таких припущеннях. Якщо існує лінійний фільтр з імпульсною характеристикою, то при подаванні на вхід БШ отримаємо на виході фільтра ВП, статистичні характеристики якого визначаються типом білого шуму

та імпульсною характеристикою фільтра (та однозначно пов'язаною з нею частотною характеристикою). Зокрема, енергетичний спектр вихідного ВП визначається через спектр вхідного ВП $G_{\eta}(f)$ та частотну характеристику фільтра $K(f)$

$$G_y(f) = G_{\eta}(f) |K(f)|^2. \quad (4.27)$$

Кореляційна функція вихідного ВП визначається через енергетичний спектр за допомогою перетворення Вінера–Хінчина

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} G_y(f) \exp(-j2\pi f\tau) df. \quad (4.28)$$

Часове зображення вихідного ВП визначається через імпульсну характеристику фільтра $h(\tau)$

$$y(\omega, t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t - \tau) \eta(\omega, \tau) d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) \eta(\omega(t - \tau)) d\tau. \quad (4.29)$$

Тут $\eta(\omega, t)$ – породний процес, $h(\tau)$ – формуючий фільтр, а вихідний ВП називається лінійним ВП.

Під час моделювання на ЕОМ здійснюється перехід від неперервного часу до дискретного, а інтеграл замінюється кінцевою сумою. При цьому моделюючий алгоритм має такий вигляд:

$$y(k) = \sum_{j=0}^p h(j) \eta(k - j), \quad k = 0, 1, 2, \dots, n, \quad (4.30)$$

де $\eta(k - j)$ – це відліки БШ, $h(j)$ – відліки імпульсної характеристики формуючого фільтра.

Таким чином, кореляційна функція ВП, який моделюється $y(k)$, визначається виглядом імпульсної характеристики фільтра, а щільність ймовірності ВП – щільністю ймовірності породного процесу $\eta(k)$. При цьому моделювання корельованих ВП зводиться до розв'язання таких задач:

- вибирають відповідну імпульсну характеристику формуючого фільтра, виходячи із необхідної кореляційної функції ВП;
- моделюють породний процес, тобто формують реалізації білого шуму із заданою одновимірною щільністю ймовірності;
- формують реалізації лінійного випадкового процесу із заданою кореляційною функцією згідно з (4.30).

Розподіл породного процесу можна вибирати будь-яким із класу безмежно подільних (гаусів, пуассонів, гамма, лапласів розподіл). Зв'язок

відліків імпульсної характеристики формуючого фільтра з параметрами типових видів кореляційних функцій, а також відповідні моделюючі алгоритми наведено у роботах.

Як приклад розглянемо алгоритм моделювання гаусового ВП, що має кореляційну функцію експоненційного типу із заданим параметром. Аналітичні вирази для кореляційної функції і відповідного енергетичного спектра ВП такі:

$$R(\tau) = \sigma^2 \exp(-\lambda|\tau|), \quad G(f) = \frac{2\sigma^2}{\lambda} \frac{1}{1+f^2}.$$

Моделюючий алгоритм має вигляд:

$$y(k) = a_0 \eta(k) + b_1 y(k-1). \quad (4.31)$$

де $a_0 = \sigma \sqrt{1 - \rho^2}$; $b_1 = \rho$, $\rho = \exp(-\gamma)$; $\gamma = \lambda \Delta t$, σ – це дисперсія ВП, який моделюється; λ – параметр, що визначає швидкість спаду кореляційної функції, $\eta(k)$ – стандартні гаусові ВВ із нульовим математичним сподіванням і одиничною дисперсією.

4.3.3 Моделювання випадкових процесів з незалежними приростами

Випадковий процес з незалежними приростами можна записати у вигляді рекурентного співвідношення, що дозволяє отримати поточний відлік процесу через попередній відлік і незалежний приріст

$$\eta(\omega, t_k) = \eta(\omega, t_{k-1}) + \delta(\omega, t_k), \quad (4.32)$$

де $\delta(\omega, t_k)$ – незалежні прирости;

$$\eta(\omega, t_0) = 0, \quad t_k = k\Delta t, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Імовірнісні характеристики ВП $\eta(\omega, t_k)$ залежать від характеристик незалежних приростів $\delta(\omega, t_k)$. Якщо прирости $\delta(\omega, t_k)$ мають гаусів закон розподілу, то маємо випадковий процес Вінера. Для його моделювання необхідно моделювати прирости у вигляді послідовності незалежних гаусових випадкових величин.

Іншим прикладом однорідних ВП із незалежними приростами є пуассонів процес (рис. 4.7), у якого прирости – це стрибки, що відбуваються у випадкові моменти часу t_k (рис. 4.7)

$$\pi(\omega, t_k) - \pi(\omega, t_{k-1}) = \delta(\omega, t_k). \quad (4.33)$$

Для однорідного пуассонівського процесу прирости $[\pi(\omega, t_k) - \pi(\omega, t_{k-1})]$ є незалежними ВВ для будь-яких моментів часу, в яких відбуваються стрибки, і мають розподіл Пуассона

$$P[\pi(\omega, t_k) - \pi(\omega, t_{k-1}) = n] = \frac{\lambda(t_k - t_{k-1})^n}{n!} \exp(-\lambda(t_k - t_{k-1})), \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (4.34)$$

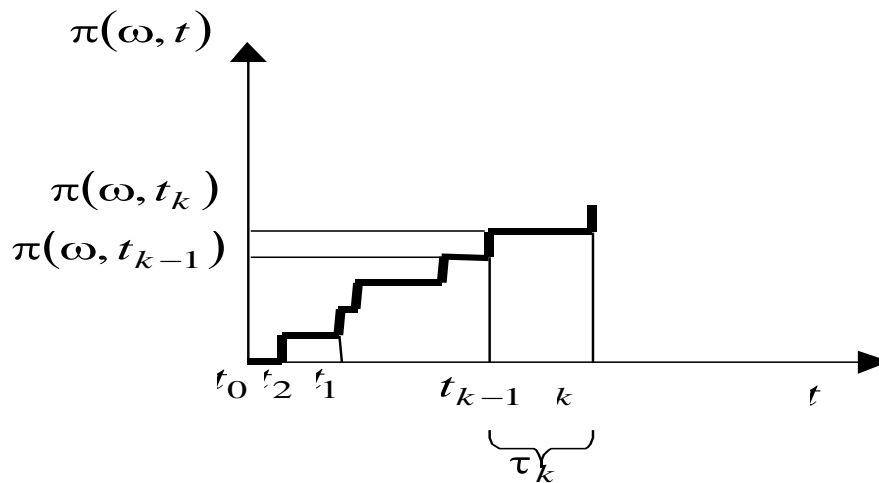


Рисунок 4.7 – Зображення реалізації пуассонівського процесу

Інтервал часу $\tau(\omega)$ між двома сусідніми стрибками пуассонівського процесу є випадковою величиною зі щільністю ймовірності

$$p_{\tau}(x) = \lambda \exp(-\lambda x). \quad (4.35)$$

Величина стрибка для простого пуассонівського процесу дорівнює 1, а для узагальненого пуассонівського ВП має довільне випадкове значення.

Алгоритм моделювання пуассонівського ВП базується на співвідношенні (4.32), де $\delta(\omega, t_k)$ – це ВВ, розподілені за законом Пуассона. Випадкові моменти часу, в які відбуваються стрибки, можуть визначатися із рекурентного співвідношення

$$t_k = t_{k-1} + \tau(\omega). \quad (4.36)$$

де $\tau(\omega)$ – ВВ, яка має щільність ймовірності (4.35).

При цьому моделювання випадкової величини $\tau(\omega)$ виконується методом оберненої функції згідно з формулою

$$\tau(\omega) = -\ln(\alpha(\omega)), \quad (4.36, a)$$

де $\alpha(\omega)$ – БВВ.

Для отриманих згідно з (4.36) випадкових моментів часу $t_k = k\Delta t$, $k = 0, 1, 2, \dots$ моделюються випадкові значення приростів шляхом моделювання ВВ із пуассонівським розподілом, причому $\pi(\omega, 0) = 0$. На інтервалі між стрибками моделювальний ВП приймає відповідні сталі значення.

Моделювання пуассонівського процесу використовується для отримання потоків заявок під час моделювання мереж зв'язку.

4.3.4 Моделювання марковських випадкових процесів

Марковський ВП – це процес, в якому багатовимірні щільності ймовірності визначаються через одновимірні щільності та щільність ймовірності значень ВП у сусідні моменти часу

$$p_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = p(x) \prod_{i=1}^n p(x_i / x_{i-1}). \quad (4.37)$$

Для дискретного часу типовим представником марковських процесів є ланцюг Маркова – ВП, що заданий у дискретні моменти часу $\xi(\omega, t_k)$, $k=0,1,2,\dots$ і який приймає один з $N-1$ дискретних станів $x_0, x_1, x_2, \dots, x_{N-1}$.

Для ланцюга Маркова вважаються заданими: ймовірності початкових станів та матриця ймовірностей переходів:

$$p\{\xi(\omega, t_0) = x_i\} = p_i, \quad [P(i/j)], \quad (4.38)$$

де $P(i/j) = P\{\xi(\omega, t_k) = x_i / \xi(\omega, t_{k-1}) = x_j\}$, $i, j = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1$ – це ймовірність такої події, що в k -й момент часу ВП матиме значення x_i за умови, що в попередній момент ВП мав значення x_j ; $\sum_{i=0}^{N-1} P_i = 1$; $\sum_{j=0}^{N-1} P(i/j) = 1$, $i = 0, \overline{N-1}$.

Ймовірності переходів задаються у вигляді матриці

$$[P(i/j)] = \begin{Bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1N} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{N1} & P_{N2} & \dots & P_{NN} \end{Bmatrix}. \quad (4.39)$$

Розглянемо алгоритм моделювання ланцюга Маркова, що містить у собі такі етапи. Для моделювання початкового стану ланцюга Маркова $\xi(\omega, t_0)$ моделюється ВВ, що приймає дискретні значення x_1, x_2, \dots, x_N із заданими ймовірностями P_1, P_2, \dots, P_N (алгоритм моделювання такої ВВ був уже розглянутий у п. 4.2.1). Далі моделюються переходи з одного стану в інший $\xi(\omega, t_0) \Rightarrow \xi(\omega, t_1) \Rightarrow \xi(\omega, t_2) \dots$, для чого необхідно сформулювати допоміжну матрицю

$$Q = [q(i/j)], \quad \text{де } q(i/j) = \sum_{k=0}^j P(i/k). \quad (4.40)$$

У сформованій матриці кожен рядок містить межі інтервалів для моделювання дискретної ВВ, що визначає номер стану на наступному кроці. Отриманий у результаті номер стану визначає для кожного наступного

моменту часу черговий номер рядка матриці Q , з якого вибираються межі інтервалів для моделювання чергового стану ланцюга Маркова. Зазначені процедури повторюють доти, доки не буде змальовано необхідну кількість відліків $\xi_0, \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ ланцюга Маркова.

Моделювання ланцюгів Маркова використовують в процесі описування процесів обслуговування заявок у мережах зв'язку.

4.3.5 Моделювання випадкових фототелеграфних та телеграфних сигналів

Випадковий фототелеграфний сигнал – це ВП, що приймає лише два значення (ξ_0, ξ_1) у випадкові моменти часу сигнал, інтервал між якими є випадковою величиною з експоненційним розподілом (рис. 4.8). Випадковий фототелеграфний сигнал може бути використаний як імовірнісна модель у системах передачі факсових повідомлень.

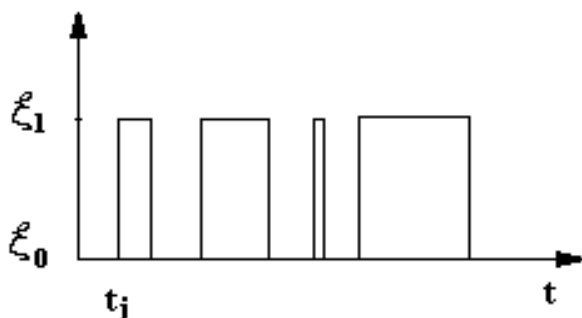


Рисунок 4.8 – Реалізація випадкового фототелеграфного сигналу

Моменти переходу від 0 до 1 у фототелеграфному сигналі є випадковими величинами, а інтервали часу між ними $\tau(\omega)$ підкоряються розподілу (4.35). Таким чином, моделювання випадкового фототелеграфного сигналу зводиться до моделювання випадкових моментів t_j часу згідно з рекурентним співвідношенням (4.36). Тут випадкова величина $\tau(\omega)$ моделюється відповідно до алгоритму (4.36, а).

Телеграфний сигнал – це випадкова послідовність нульових і одиничних посилок, зміна яких відбувається в тактові моменти часу, що визначаються тривалістю посилки (рис. 4.9). Випадковий телеграфний сигнал може служити доброю імовірнісною моделлю для опису повідомлень у системах передачі даних, а також у системах передачі телеграфних повідомлень.

Тривалість посилки τ_0 є фіксованою величиною, а зміна знаків випадкового телеграфного сигналу відбувається у фіксовані моменти часу

$$t_j = d_0(\omega) + \tau_0 m, \quad m = 0, 1, 2, \dots, \quad (4.41)$$

де $d_0(\omega)$ – це випадкова величина, рівномірно розподілена на інтервалі $(0, \tau_0)$.

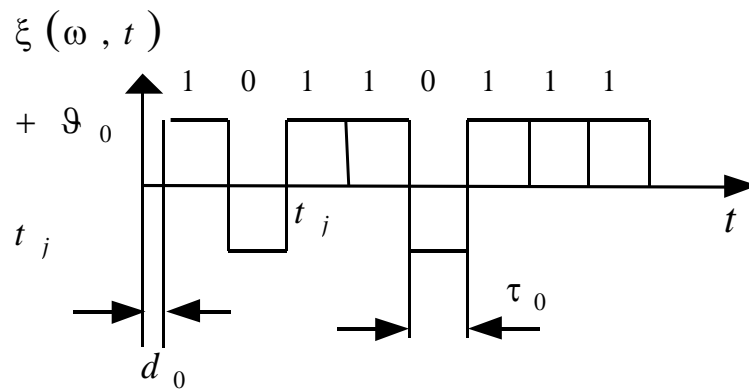


Рисунок 4.9 – Реалізація випадкового телеграфного сигналу

Для цього сигналу випадковим є також значення початкових станів телеграфного сигналу. Задаються ймовірності початкових станів сигналу

$$P(+g_0) = P_1^0, \quad P(-g_0) = P_2^0, \quad \text{причому } P_1^0 + P_2^0 = 1. \quad (4.40)$$

У кожний тактовий момент часу (4.41) випадковим чином відбувається (чи не відбувається) перехід з одного стану сигналу в інший. Задаються однокрокові ймовірності переходу (чи не переходу) сигналу в інший стан. Для симетричного випадку:

$$P_{12} = P_{21} = q, \quad P_{11} = P_{22} = p, \quad \text{причому } q + p = 1. \quad (4.43)$$

Алгоритм моделювання випадкового телеграфного сигналу містить такі етапи:

- моделювання ВВ $d_0(\omega)$ рівномірно розподіленої в інтервалі $(0, \tau_0)$, що визначається БВВ;
- моделювання початкового стану випадкового телеграфного сигналу, тобто дискретної ВВ, що приймає одне із двох значень $g_0, -g_0$ із заданими ймовірностями P_1^0, P_2^0 ;
- моделювання переходів (чи не переходів) сигналу зі стану g_0 до стану $-g_0$ і навпаки у тактові моменти часу t_j (4.41) із заданими ймовірностями $P_{12}, P_{21}, P_{11}, P_{22}$ зводиться до моделювання ланцюга Маркова з двома станами;
- формування відліків випадкового телеграфного сигналу для усіх дискретних моментів часу $k\Delta t, k = 0, 1, 2, 3, \dots$ з урахуванням вибраного інтервалу дискретизації за часом Δt та змодельованих станів сигналу у відповідні моменти часу.

4.3.6 Моделювання випадкових імпульсних сигналів

Імпульсний ВП є послідовністю імпульсів, що виникають у випадкові моменти часу t_j і мають деяку форму та випадкову амплітуду (рис. 5.10). Наприклад, нехай інтервали часу між моментами появи імпульсів є ВВ і описуються експоненційним розподілом, випадкові амплітуди імпульсів $A_j(\omega)$ мають розподіл Релея, а форма імпульсів визначається функцією $\varphi(t) = \exp(-\alpha t)$.

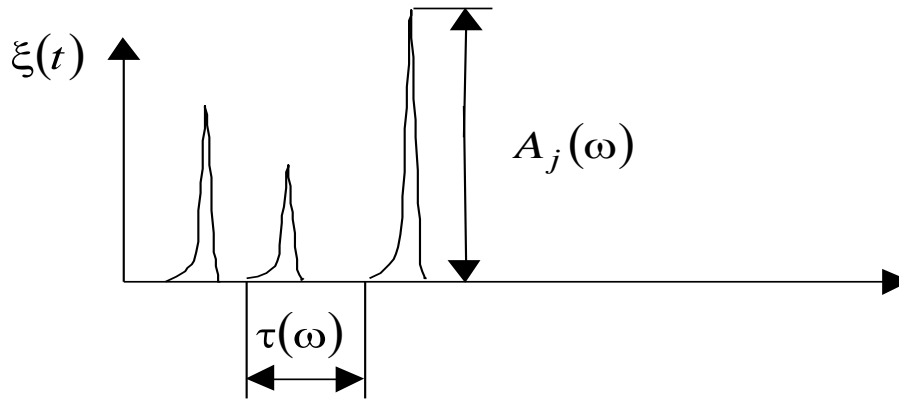


Рисунок 4.12 – Реалізація випадкового імпульсного ВП

Випадковий імпульсний процес може бути поданий у вигляді суми імпульсів з випадковою амплітудою, що виникають у випадкові моменти часу t_j

$$\xi(t) = \sum_{j=1}^N A_j(\omega) \varphi(t - t_j). \quad (4.44)$$

Це співвідношення може бути використане для отримання випадкового імпульсного процесу. Моделювання такого процесу містить такі етапи:

- отримання випадкових моментів часу $t_j = t_{j-1} + \tau(\omega)$, де $\tau(\omega)$ – це ВВ, що моделюється згідно з (4.36, а)
- обчислення ВП (4.44) у дискретні моменти часу $t_k = k\Delta t, k = 0, 1, 2, \dots$
- моделювання випадкової амплітуди імпульсу $A_j(\omega)$, що визначається

співвідношенням $\zeta(\omega) = \sqrt{(\eta_1(\omega))^2 + (\eta_2(\omega))^2}$, де $\eta_1(\omega), \eta_2(\omega)$ – стандартні гаусові ВВ, незалежні між собою;

Випадкові імпульсні процеси використовуються під час моделювання завад, що діють у деяких каналах зв'язку.

Зазначимо, що тут розглянуто моделювання на ЕОМ лише деяких ВВ та ВП, що можуть бути використані під час моделювання систем та мереж зв'язку. Більш широкий перелік алгоритмів моделювання на ЕОМ випадкових величин і випадкових процесів наведено у роботах.

Контрольні запитання та завдання

1. Вкажіть основні принципи моделювання на ЕОМ випадкових величин і випадкових процесів.
2. Наведіть ймовірнісні характеристики базових випадкових величин, що використовуються під час моделювання випадкових елементів.
3. Опишіть послідовність операцій з моделювання випадкових величин із заданою щільністю.
4. Наведіть алгоритм моделювання випадкових величин з гаусівським розподілом з використанням методу сумачії.
5. Наведіть алгоритм моделювання випадкових величин з розподілом Релея.
6. Наведіть алгоритм моделювання випадкових величин з розподілом Пуассона.
7. Наведіть алгоритм моделювання випадкових процесів з незалежними приростами.
8. Наведіть алгоритм моделювання гаусівських білих шумів.
9. Наведіть алгоритм моделювання випадкових процесів із заданою кореляційною функцією.
10. Наведіть алгоритм моделювання псевдовипадкових телеграфних сигналів.
11. Наведіть алгоритм моделювання псевдовипадкових фототелеграфних процесів.
12. Наведіть алгоритм моделювання випадкових імпульсних процесів.

5 ПРОГРАМНІ ПРОДУКТИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМ І МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ

У цьому розділі проаналізовано різні підходи до програмної реалізації на ЕОМ математичних моделей систем і мереж зв'язку. Наведено відомості про деякі існуючі пакети програм, що можуть бути використані для моделювання та оптимізації проектування систем та мереж зв'язку.

5.1 Аналіз засобів програмної реалізації математичних моделей мереж зв'язку

В ході реалізації на ЕОМ імітаційної математичної моделі мережі зв'язку вона задається множиною вузлів, кожен з яких з'єднаний хоча б з одним іншим вузлом за допомогою каналів зв'язку. Розглянемо основні властивості мережі зв'язку з комутацією пакетів, які необхідно відобразити в її моделі:

1. Структуру мережі, яка визначається кількістю вузлів, їхніми характеристиками, матрицею зв'язності, характеристиками ліній зв'язку між вузлами.
2. Принцип комутації пакетів.
3. Алгоритм обслуговування викликів, який визначається дисципліною обслуговування викликів у вузлах мережі.
4. Маршрутизацію викликів, що визначається правилами вибору маршрутів для обслуговування викликів та таблицею маршрутизації у кожному із вузлів мережі.
5. Абонентський трафік, що визначається властивостями потоків викликів, їхніми числовими характеристиками.

Виходячи із аналізу процесів передавання інформації через мережу зв'язку, можна виділити такі функціональні елементи, що мають бути описані в математичній моделі мережі: джерело даних, вузол комутації, канал зв'язку, пакет даних, модуль мережного управління, модуль зовнішньої дії на мережу.

Джерело даних забезпечує моделювання процесу надходження даних для передавання їх через мережу, зокрема, від вузла-відправника до вузла-отримувача. Джерела даних безпосередньо пов'язані з відповідним вузлом комутації.

Вузол комутації моделює роботу вузлів мережі, що забезпечують направлення пакетів даних безпосередньо від джерела даних до вузла через

канал зв'язку або між суміжними вузлами згідно з вибраною стратегією маршрутизації. При цьому враховується процедура опрацювання черг заявок у вузлах комутації з урахуванням пріоритетів.

Під час моделювання роботи каналів зв'язку між суміжними вузлами враховуються такі процеси: затримка пакетів, що зв'язана з обмеженою пропускною здатністю каналів; затримка розповсюдження електромагнітних хвиль в лініях зв'язку; процеси втрати пакетів під час передавання по каналах зв'язку та виходу із дії каналів зв'язку. Канали зв'язку це фактично одноканальні чи багатоканальні системи зв'язку, що з'єднують між собою суміжні вузли комутації.

Пакет даних є деяким об'ємом даних, які передаються через мережу. В моделі він задається заголовком, що містить необхідну інформацію для його опрацювання у вузлах зв'язку, а також довжиною пакета, що моделює наявність у ньому даних.

Модуль мережного управління дає можливість моделювати процеси управління в мережі, включаючи передавання службових пакетів з інформацією, необхідною для роботи мережі. Модуль мережного управління зв'язаний з вузлом комутації і є для нього джерелом пакетів із службовою інформацією, що передається до інших вузлів.

Модуль зовнішньої дії на мережу моделює процеси виходу із дії та відновлення працездатності вузлів і каналів зв'язку.

Таким чином, мережа зв'язку містить значну кількість елементів. Процеси в різних частинах мережі можуть протікати незалежно, послідовно чи паралельно. З урахуванням виконання певних умов можуть бути побудовані різні математичні моделі мережі на основі положень теорії випадкових потоків, теорії масового обслуговування, теорії телетрафіка.

Під час аналізу конкретної імітаційної моделі мережі можна досліджувати різні ймовірнісно-часові характеристики, зокрема, середній час затримки повідомлень, середню зайнятість лінії зв'язку при пропорційній зміні інтенсивності вхідних потоків для усіх пар «відправник-адресат».

Для реалізації на ЕОМ математичних моделей мереж зв'язку можуть бути використані як універсальні мови програмування, так і спеціалізовані пакети програм моделювання. Необхідно зазначити, що на одному краю універсальності знаходяться загальні мови програмування типу ФОРТРАН, та більш спеціалізовані мови типу *GPSS*. Вони дають можливість при достатній кваліфікації в програмуванні створити і реалізувати моделі систем та мереж будь-якої складності, але ціною значних витрат зусиль і часу. Хоча програмна

система *GPSS* і має графічні засоби маніпулювання блок-схемами, можливості використання анімації та інтерфейсу з *C++*, однак для моделювання мережних об'єктів з великою кількістю зв'язків вона є мало прийнятною.

Інший шлях забезпечення універсальності системи моделювання полягає у виявленні та реалізації базових найбільш елементарних і загальних для різних застосувань функції мережі. Такий підхід забезпечує в більшості випадків максимальну ефективність використання функціональних можливостей систем моделювання. Однак при цьому основна частина роботи перекладається на користувача, чим підвищується трудомісткість створення складних інформаційних моделей. І ще один шлях полягає в реалізації максимальної кількості різних функцій, що покриває весь діапазон можливих застосувань. Але це ускладнює роботу з такою системою моделювання. Прикладом може служити моделююча програмна система, яка містить біля десятка тисяч функцій і об'єктивно-орієнтованих класів.

На іншому краю універсальності знаходяться спеціалізовані пакети комп'ютерної математики, що дозволяють виконувати символічно-чисельне моделювання систем широкого призначення. Серед них найбільшого поширення набули такі пакети програм: *Eureka*, *Mercury*, *MathCAD*, *Derive*, *Mathematika*, *Mapl*.

Серед пакетів цього типу особливо вирізняється *MatLab*. У цьому пакеті задачі розширення можливостей вирішуються за допомогою додаткових спеціалізованих пакетів (*Toolbox*), що забезпечують можливості символічних та аналітичних обчислень, спеціальні засоби інтегрування з іншими пакетами. Нові властивості надала інтеграція з пакетом *Simulink*, що призначений для імітаційного моделювання блоково заданих динамічних систем та пристроїв. Пакет *Simulink* має широку бібліотеку математичних моделей різних за функціональним призначенням блоків. У склад створюваної моделі системи можуть включатися також генератори різного виду сигналів, віртуальні вимірювальні прилади, графічні засоби відображення результатів моделювання системи.

Вказані пакети дають можливість швидко орієнтувати їх на розв'язання задач моделювання в різних галузях: нейронних мереж і засобів телекомунікацій, проектування подійно-керуючих систем.

Однак ці універсальні програмні засоби не завжди відповідають вимогам моделювання систем у галузі зв'язку. Найбільш критичним параметром при цьому частіше всього є продуктивність. У випадку необхідності проведення значного обсягу досліджень, наявність спеціалізованого

програмного засобу чи мови моделювання може значно (інколи на декілька порядків) прискорити процес дослідження та суттєво покращити його якісні характеристики. Ця обставина призвела до появи надзвичайно великої кількості різних спеціалізованих моделюючих засобів та мов, що орієнтовані на конкретні галузі застосування.

При цьому одним із підходів до моделювання є створення спеціалізованих програмних імітаційних моделей, в яких опис моделі досліджуваної системи виконується в термінах цієї системи. У випадку моделювання мереж зв'язку під час використання даного методу, задається топологія мережі, склад і параметри обладнання у вузлах комутації та характеристики вхідних потоків інформації. Характерними представниками даного підходу є спеціалізовані пакети програм (програмні системи) *CLASS/ANKLES*, *REAL*, *NEST*, *ANSAN*, *NS*.

Зокрема, система *CLASS/ANKLES* призначена для імітаційного моделювання мереж АТМ. Особливістю її побудови є те, що вона складається із двох програмних імітаційних модулів, які дозволяють проводити моделювання досліджуваної мережі із різним ступенем деталізації. Програмна імітаційна модель *ANKLES* дає можливість проводити моделювання мережі на рівні викликів. На цьому рівні деталізації можна досліджувати ймовірність блокування викликів, маршрутизацію і протоколи управління з'єднання. Програмна імітаційна модель *CLASS* дає можливість досліджувати ймовірність втрат частини даних протоколу, розподіл часу затримки доставки, ефективність управління потоку.

Розглянута система призначена для дослідження АТМ мереж і не може бути застосована для дослідження інших типів мереж. Однак під час проектування у загальному випадку виникає необхідність проводити моделювання різних типів мереж. При цьому доцільно користуватися програмним середовищем *NS (Network Simulator)*, яке розвинулося із *REAL*. Система *NS* призначена для моделювання широкого кола мережних архітектур з використанням стека протоколів TCP/IP. Система *NS* є об'єктно-орієнтованою системою імітаційного моделювання, яка створена мовою C++ з використанням мови *OTcl*. Мова C++ зручна з точки зору значної швидкодії в ході реалізації деталей протоколів та під час роботи з великими масивами даних. Мова *OTcl* більш повільна у роботі, проте потребує меншого часу на зміни у програмі, що важливо під час дослідження впливу конфігурації, параметрів та управління мережі на її показники якості.

Водночас із згаданими вище пакетами програм під час моделювання мереж широко використовуються також пакети *NetCracker Professional (NC)* та *Cinderella (SDL)*.

NetCracker – це програмний засіб мережного проєктування та імітаційного моделювання апаратно-програмного забезпечення інформаційних мереж, за допомогою якого можна створювати статичні та динамічні моделі мереж з елементами візуалізації передавання пакетів даних у реальному і модельному часі. *NetCracker* містить бази даних з набором різних пристроїв, які дають можливість моделювати мережі різної конфігурації, технології з різною топологічною структурою. *NetCracker* можна використовувати для проєктування локальних, глобальних, корпоративних мереж зв'язку. На таких проєктах видно розташування вибраного обладнання, його технічні характеристики, за яким протоколом працює, яка технологія роботи застосовується та ін. Такі проєкти дають можливість автоматично виконати оптимальне розташування обладнання та розрахунки вартості, а також дослідити до моменту побудови основні характеристики проєктованих мереж (поточне та середнє робоче навантаження, середній час очікування, кількість переданих та загублених пакетів за певний інтервал часу, кількість заблокованих запитів та ін.).

Cinderella – програмний засіб, який дає можливість розробляти, аналізувати та моделювати процеси в динамічних системах, які описані мовою специфікацій та описів *Cinderella* в комбінації із двома іншими мовами специфікацій *ASN.1* і *MSC*. На цей час мова *Cinderella* розвинулася до об'єктно-орієнтованої мови і зараз широко використовується не тільки у телекомунікаціях, але і багатьох інших галузях. *Cinderella* призначена для моделювання процесів взаємодії, що описують протоколи передавання даних, протоколи сигналізації, вхідні та вихідні внутрішньостанційні з'єднання і багато чого іншого, що можна подати у вигляді процесів взаємодії. Мови *ASN.1* і *MSC* призначені в основному для специфікації даних і є визнаними для описування даних у протоколах, які будуються згідно із моделлю взаємодії відкритих систем.

5.2 Пакети програм моделювання і оптимізації мереж

Розглянемо особливості моделювання та можливості використання деяких пакетів програм на прикладі задачі дослідження продуктивності під час проєктування мереж зв'язку. Аналізатори протоколів незамінні для дослідження реальних мереж, але вони не дозволяють отримувати кількісні

оцінки характеристик для ще не існуючих мереж, що знаходяться в стадії проектування. У цих випадках проектувальники можуть використовувати засоби моделювання, за допомогою яких створюються моделі, що відтворюють інформаційні процеси у мережах.

Моделювання є потужним методом дослідження мереж зв'язку, під час використання якого мережа замінюється моделлю. При фізичному (натурному) моделюванні досліджувана мережа замінюється відповідною їй матеріальною системою, що відтворює властивості досліджуваної системи зі збереженням їхньої фізичної природи. Прикладом цього виду моделювання може служити пілотна мережа, за допомогою якої вивчається принципова можливість побудови мережі на основі тих чи інших комп'ютерів, комунікаційних пристроїв та операційних систем. Однак можливості фізичного моделювання мереж досить обмежені, що дозволяє вирішувати окремі задачі при задаванні невеликої кількості з'єднань досліджуваних параметрів системи. Дійсно, при натурному моделюванні мережі практично неможливо перевірити її роботу для усіх варіантів з використанням різних типів комунікаційних пристроїв – маршрутизаторів, комутаторів тощо. Перевірка на практиці біля десятка різних типів маршрутизаторів пов'язана не тільки з великими часовими витратами, але і з чималими матеріальними витратами.

Однак навіть і в тих випадках, коли при оптимізації мережі змінюються не типи пристроїв і операційних систем, а тільки їхні параметри, проведення експериментів у реальному масштабі часу для величезної кількості всіляких комбінацій цих параметрів практично неможливо за доступний для огляду час. Навіть проста зміна максимального розміру пакета в якому-небудь протоколі вимагає переконфігурування операційної системи в сотнях комп'ютерів мережі, що вимагає від адміністратора мережі проведення дуже великої роботи.

Тому, при оптимізації мереж у багатьох випадках перевага віддається використанню математичного моделювання на ЕОМ. Математична модель мережі є сукупністю співвідношень (формул, рівнянь, нерівностей, логічних умов), що визначають процес зміни стану системи залежно від її параметрів, вхідних сигналів, початкових умов і часу. Особливим класом математичних моделей є імітаційні моделі. Такі моделі є комп'ютерною програмою, що крок за кроком відтворює події, які відбуваються в реальній системі. Стосовно мереж, їхні імітаційні моделі відтворюють процеси генерації повідомлень, розбивання повідомлень на пакети і кадри конкретних протоколів, затримки, пов'язані з обробкою повідомлень, пакетів і кадрів всередині мережі, процес одержання доступу до подільного мережного середовища, процес опрацювання

пакетів і т. д. При імітаційному моделюванні мережі не потрібне коштовне устаткування – його робота імітується програмами, що досить точно відтворюють всі основні особливості та параметри такого устаткування.

Перевагою імітаційних моделей є можливість підміни процесу зміни подій у досліджуваній мережі в реальному масштабі часу на прискорений процес зміни подій у темпі роботи програми. У результаті за кілька хвилин можна відтворити роботу мережі протягом декількох днів, що дає можливість оцінити роботу мережі в широкому діапазоні варіаційних параметрів. Результатом роботи імітаційної моделі є зібрані в ході спостереження за подіями, що протікають, статистичні дані про найважливіші характеристики мережі: часи реакції, коефіцієнти використання каналів і вузлів, імовірності втрат пакетів та ін.

Існують спеціальні мови імітаційного моделювання, що полегшують процес створення програмної моделі порівняно з використанням універсальних мов програмування. Прикладами мов імітаційного моделювання можуть служити такі мови, як *SIMULA*, *GPSS*, *SIMDIS*. Існують також системи імітаційного моделювання, що орієнтуються на вузький клас досліджуваних систем і дають можливість будувати моделі без програмування. Подібні системи для обчислювальних мереж розглядаються нижче.

Такі програмні системи самі генерують модель мережі на основі вхідних даних про її топологію і використовувані протоколи, про інтенсивності потоків запитів між комп'ютерами мережі, довжини ліній зв'язку, про типи використовуваного устаткування. Програмні системи моделювання можуть бути вузько спеціалізованими і досить універсальними, що дають можливість імітувати мережі всіляких типів. Якість результатів моделювання значною мірою залежить від точності вихідних даних про мережу, переданих у систему імітаційного моделювання.

Програмні системи моделювання мереж – це інструмент, що може знадобитися будь-якому адміністратору мережі, особливо під час проектування нової мережі чи внесення кардинальних змін у вже існуючу. Продукти даної категорії дозволяють перевірити наслідки впровадження тих чи інших проєктних рішень ще до оплати устаткування, що набувається. Зазвичай, більшість з цих програмних пакетів є дуже коштовними, але і можлива економія може бути теж дуже відчутною.

Програми імітаційного моделювання мережі використовують у своїй роботі інформацію про просторове розташування мережі, кількість вузлів, конфігурації зв'язків, швидкості передачі даних, використовувані протоколи

і типи устаткування. Зазвичай, імітаційна модель будується не з нуля. Існують готові імітаційні моделі основних елементів мереж: найбільш розповсюджених типів маршрутизаторів, каналів зв'язку, методів доступу, протоколів тощо. Ці моделі окремих елементів мережі створюються на підставі різних даних: результатів тестових випробувань реальних пристроїв, аналізу принципів їхньої роботи, аналітичних співвідношень. У результаті створюється бібліотека типових елементів мережі, які можна налаштовувати за допомогою заздалегідь передбачених у моделях параметрів.

Системи імітаційного моделювання звичайно включають також набір засобів для підготовки вихідних даних про досліджувану мережу – попередньої обробки даних про топологію мережі й вимірний трафік. Ці засоби можуть бути корисні, якщо мережа, що моделюється, є варіантом існуючої мережі і існує можливість провести в ній вимірювання трафіка й інших параметрів, потрібних для моделювання. Крім того, система забезпечується засобами для статистичної обробки отриманих результатів моделювання.

У табл. 5.1 наведено характеристики декількох популярних програм імітаційного моделювання різного класу – від простих програм до потужних систем, що включають бібліотеки більшості наявних на ринку комунікаційних пристроїв і забезпечують можливість значного ступеня автоматизації дослідження мережі, яка проєктується.

Таблиця 5.1 – Програмні продукти імітаційного моделювання мереж

Назва програми 1	Призначення, стисла характеристика програми 2
<i>NetMakerXA</i>	Побудова моделей мережі з використанням обширної бібліотеки пристроїв мережі. Перевірка даних про топологію мережі; імпорт інформації про трафік, отримуваної в реальному часі.
<i>StressMagik</i>	Підтримка стандартних тестів виміру продуктивності; імітація пікового навантаження на файл-сервер.
<i>MIND</i>	Засіб проєктування, оптимізації мережі, містить дані про вартість типових конфігурацій з можливістю точного оцінювання продуктивності
<i>AutoNet/Designer</i>	Визначення оптимального розташування концентраторів у глобальній мережі, можливість оцінки економії засобів за рахунок зниження тарифної плати, зміни постачальника послуг і відновлення устаткування; порівняння варіантів зв'язку через найближчу й оптимальну точку доступу, а також через місцеву телефонну мережу

Продовження таблиці 5.1

1	2
<i>AutoNet/ MeshNET</i>	Моделювання смуги пропускання й оптимізація витрат на організацію глобальної мережі шляхом імітації ушкоджених ліній, підтримка тарифної сітки компаній AT & T, Sprint, WiTel, Bell
<i>AutoNet/Performance-1</i>	Моделювання продуктивності ієрархічних мереж шляхом аналізу чутливості до тривалості затримки, часу відповіді, а також вузьких місць у структурі мережі
<i>AutoNet/Performance-3</i>	Моделювання продуктивності багатопрокольних об'єднань локальних і глобальних мереж; оцінювання затримок у чергах, прогнозування часу відповіді, а також вузьких місць у структурі мережі; облік реальних даних про трафік, що надходять від мережних аналізаторів
<i>BONES</i>	Аналіз впливу додатків клієнт-сервер і нової технології на роботу мережі
<i>OPNET</i>	Моделювання та аналіз роботи різних типів мереж. Має бібліотеку різних мережних пристроїв, підтримує анімацію, генерує карту мережі.

OPNET Products – це серія пакетів програм для вирішення різних задач розробки мереж. Вони поєднують як прогнозує моделювання, так і всебічне розуміння технологій організації мереж, що дозволяє користувачам більш ефективно проектувати, керувати інфраструктурою мереж та мережним обладнанням. Зокрема, це такі пакети програм:

OPNET Modeler – призначений для моделювання та імітації середовища мережі, прискорює науково-дослідні роботи для проектувальників, що розробляють структуру мережі, вибирають устаткування, протоколи зв'язку та системи.

OPNET SP Guru – призначений для інтелектуального керування мереж, що дає можливість провайдерам служб більш ефективно проводити пошук помилок у конфігурації мережі, виконувати прогнозує планування та автоматизоване проектування мережі.

OPNET WDM Guru – призначений для проектування і оптимізації високопродуктивних оптоволоконних мереж, обслуговування та задавання розмірів поточних і майбутніх станів мереж, включаючи варіанти росту та відмовлення.

OPNET Netbiz– платформа, що надбудовується для автоматизації аналізу та проектування мереж і, яка включає власні алгоритми та правила проектування.

Симулятор ns-2. Це вільно розповсюджуваний програмний продукт із відкритим вихідним кодом на C++. Топологія модельованої мережі та параметри моделювання описуються користувачем у зовнішніх скриптах мовою OTcl (об'єктно-орієнтований діалект Tcl). Модель мережі будується на основі дискретних подій. Для графічного подання мережі використовується зовнішній модуль – NAM (network animator). ns-2 представляє обмежену підтримку IP-мереж, оскільки проєкт практично заморожений. Причина в тому, що спільнота розробників переключилася на розвиток і просування нової, досконалішої версії цього симулятора – ns-3.

Програма ns-3 – проєкт, розпочатий у середині 2006 року як альтернатива ns-2. На зміну OTcl у ньому прийшла підтримка моделей мовами C++ і Python. Функціональність значно розширено, поліпшено підтримку мережних пристроїв із кількома інтерфейсами, підтримується як симуляція, так і емуляція. Система здатна генерувати файли трасування у форматі pcap, які можна аналізувати зовнішніми засобами типу Wireshark.

Симулятор GNS3 (Graphical Network Simulator) – ще один симулятор мережі, що вільно розповсюджується, створений 2008 року Джеремайя Гроссманном. До 2015р. кількість завантажень цієї системи перевищила 11 млн. Популярність цього симулятора викликана тим, що він дає змогу моделювати складні мережі з великою кількістю вузлів. GNS3 надає підтримку кількох віртуальних машин, серед яких Dynamips для мережного обладнання Cisco, VMWare, VirtualBox, Docker і QEMU для маршрутизаторів і комутаторів Juniper та низки інших вендорів. Симулятор має розподілену архітектуру, що дає змогу комбінувати віртуальні та реальні пристрої, тим самим збільшуючи продуктивність і наближаючи дані моделі до показників реальних мереж. Так само, підтримуються кілька форматів файлів трасування (в т.ч. pcap).

OMNeT++ (Objective Modular Network Testbed in C++) Discrete Event Simulator – це модульна, компонентно орієнтована C++ бібліотека і фреймворк для дискретно подієвого моделювання, що використовується насамперед для створення симуляторів мереж. Просто кажучи, це «симулятор дискретних подій», що включає: IDE для створення моделей, і сам симулятор (GUI).

Atoll. Продукт з великими функціональними можливостями. Вважається одним із найкращих рішень для радіопланування та оптимізації різних радіотехнологій. Наразі діє 6000 активних ліцензій і 300 клієнтів у 100 різних країнах світу. Основні переваги. Підтримка всіх основних бездротових технологій. Повністю 64-розрядна версія програми дає змогу працювати з великими проєктами (десятки тисяч секторів), доповнюється підтримкою

розподілених обчислень. Все в цілому дає змогу об'єднати в кластер кілька серверів і проводити обчислення, використовуючи до 64 ядер одночасно.

AWE ProMan. ПЗ ProMan призначене для розрахунку зон радіопокриття та їхньої візуалізації. Підтримує стандарти: 2G/2.5G, 3G/HSDPA/LTE, WLAN, WiMAX, TETRA. Підтримуються як мережі мобільного, так і стаціонарного зв'язку, а також існують широкі можливості з побудови стільникових мереж зв'язку. А так само, підтримується розрахунок ширококомовних мереж як наземного, так і супутникового базування.

RadioPlanner. Програма RadioPlanner призначена для розрахунку та оптимізації зон радіопокриття під час проєктування мереж рухомого зв'язку, наземних систем радіо- і телевізійного мовлення в діапазоні частот від 30 МГц до 3000 МГц.

Xirio. Умовно-безкоштовний онлайн сервіс з великим функціоналом і підтримкою різних стандартів зв'язку та моделей РРЗ. Існує можливість детального налаштування передавачів (потужність, втрати в тракці тощо), антен (поляризація, ДН, висота над рівнем даху/моря тощо), приймачів (поляризація, висота, чутливість, шуми, які вносяться, тощо), приймачів (поляризація, висота, чутливість, шуми, що вносяться, та ін.). Для кожного стандарту задано деякі типові параметри передавачів і приймачів. Існує підтримка врахування впливу будівель.

Крім того, доступна можливість статистичного аналізу отриманої зони радіопокриття з погляду теорії масового обслуговування і з погляду енергетики.

WiMAP-4G є програмним забезпеченням, розробленим для планування мереж бездротового широкосмугового доступу, наприклад, на основі стандарту WiMAX або WLAN. WiMAP-4G підтримує широкий спектр застосувань: від загального огляду до детального аналізу зони радіопокриття.

Під час розрахунку враховується як пряма видимість, так і багатопроменеве поширення (різноманітні відбиття та радіотіні). Програмою підтримуються різні типи координат і топографічних карт (наприклад, SRTM), так само існує можливість завдання карти вручну (за X-Y-Z координатами), зокрема можливість ручної побудови будівель і лісових масивів на карті.

Radio Mobile – універсальна програма комп'ютерного моделювання поширення радіохвиль і зон упевненого прийому для різних бездротових мереж. Вона може використовуватися для розрахунку зон охоплення базової станції, ретранслятора або інших радіомереж. Вона створює кольорову схему зони охоплення однієї або декількох базових станцій з показом передбачуваних

рівнів прийнятих сигналів. Зона охоплення може також відображатися з використанням багатобарвного стилю оформлення з показом рівнів сигналів у різному кольорі. Продукт так само може об'єднувати карту зображення зони охоплення з дорожньою або будь-якою іншою географічною картою.

Програма *AirMagnet Survey* забезпечує оптимальну продуктивність, безпеку та сумісність мереж. AirMagnet Survey обчислює ідеальну кількість, розміщення і конфігурацію точок доступу для успішного розгортання мережі, забезпечує швидку і точну перевірку будь-яких внутрішніх і зовнішніх бездротових мереж. Це революційне ПЗ, використовуючи різноманітні методи збору інформації, автоматично отримує з корпоративної мережі критичну інформацію щодо Wi-Fi та радіочастотного спектра, включно з вимірюваннями реальної продуктивності, і створює докладні карти продуктивності мережі Wi-Fi, що полегшує розгортання мережі, її планування та оптимізацію.

EkaHau Site Survey – це програмне забезпечення для менеджерів, інженерів, що займаються бездротовими мережами, і Wi-Fi професіоналів, які планують, розгортають і підтримують життєздатність мереж 802.11 a/b/g/n. EkaHau Site Survey надає інструменти для легкого планування, швидкого дослідження, візуального подання даних, а також функції розширеного аналізу, оптимізації та звітності. Дослідження місцевості ніколи не були настільки швидкими і точними, всього за кілька хвилин можна переконатися, що Wi-Fi мережа покриває всю необхідну територію.

Програмний пакет Network Simulator (NS) призначений для імітаційного моделювання систем зв'язку різного призначення: локальні та транспортні мережі, системи космічного зв'язку. Для проведення моделювання засобами програмного пакета NS необхідно створити спеціальний файл – «скрипт», у якому описується досліджувана система зв'язку. Скрипт описується спеціальною мовою Tool Command Language (TCL). У скрипті описуються рівні моделей взаємодії відкритих систем OSI.

HP Network Simulator. З його допомогою можна було вивчити консоль і функціонал пристроїв під управлінням операційної системи HP Comware v7, а також використовувати її з метою моделювання мереж. Продукт здобув певну популярність серед людей, які працюють із мережною інфраструктурою HP, а також інженерів, які готуються до сертифікації HP Networking. HP Network Simulator еволюціонував у новий, більш зручний для використання продукт HP Comware Lab (HCL).

AnyLogic – це багатопідхідний інструмент моделювання об'єктів і процесів реального світу та технологій побудови імітаційних моделей

за методологіями системної динаміки (фізичні процеси), дискретно-подієвого моделювання (транспортні мережі, поліграфічні процеси) і пішохідної динаміки (системи масового обслуговування). AnyLogic було розроблено на основі нових ідей у галузі інформаційних технологій, теорії паралельних взаємодіючих процесів і теорії гібридних систем. Завдяки цим ідеям надзвичайно спрощується побудова складних імітаційних моделей, є можливість використання одного інструменту під час вивчення різних стилів моделювання.

Сімейство **COMNET** (фірма Compuware; SACS Products Company) – об'єктно-орієнтована система моделювання локальних і глобальних мереж. Дозволяє моделювати рівні: додатків, транспортний, мережний, каналний. Використовує всі відомі на сьогоднішній день технології та протоколи, а також системи клієнт – сервер. Легко налаштовується на модель обладнання і технологій. Є можливість імпорту та експорту даних про топологію і мережний трафік. Моделювання ієрархічних мереж, багатопрокольних локальних і глобальних мереж; врахування алгоритмів маршрутизації. Це сімейство включає такі продукти: COMNETBaseliner (збір вихідних даних про роботу мережі, необхідних для проведення моделювання);

TamoGraph Site Survey – потужний і зручний інструмент для збору, візуалізації та аналізу даних у мережах Wi-Fi. Професійне впровадження та підтримка бездротової мережі передавання даних вимагає використання програмних засобів інспектування для побудови карти покриття мережі, аналізу рівня сигналу, шумів і завад, пропускну здатності TCP і UDP, розподілу каналів, швидкості передавання даних, шифрування та інших параметрів. Всі ці завдання часто є дуже складними і ресурсомісткими.

NETSCOUT AirMagnet Survey – професійне рішення для планування і проектування локальних бездротових мереж стандартів 802.11a/b/g/n/ac. Дозволяє розрахувати ідеальну кількість, розміщення та конфігурацію точок доступу для успішного розгортання WLAN. NETSCOUT AirMagnet Survey доступний у двох комплектаціях «Express» і «PRO». AirMagnet Survey Express є полегшеною версією рішення, що дає змогу користувачам виконувати основні дії з обстеження мережі Wi-Fi з можливістю створення мапи покриття, шумів і навіть продуктивності в користувацьких завданнях. AirMagnet Survey PRO розширює можливості, представлені у версії Express, і додає потужні функції: підтримку 802.11n/ac, багатоповерхове розгортання, зовнішні обстеження, перевірку проекту мережі, обстеження та підтвердження працездатності мережі, аналіз Voice over WiFi (VoFI), аналіз радіочастотного спектра та багато іншого.

Wi-Fi Planner PRO це планувальник бездротових мереж, який забезпечує комплексну візуалізацію покриття бездротової мережі перед її фактичним розгортанням. Цей онлайн сервіс призначений для планування розгортання WLAN мереж всередині приміщень на основі Wi-Fi обладнання від компанії D-Link. Wi-Fi Planner PRO дає змогу легко розрахувати зону радіопокриття для точки доступу Wi-Fi і зробити комплексну візуалізацію покриття бездротової мережі перед її фактичним розгортанням. Використання Wi-Fi Planner PRO значно спрощує процес проєктування та побудови мережі WLAN.

Програма **Acrylic WiFi Home** – сканер бездротових локальних мереж є урізаною версією комерційного рішення компанії Tarlogic Security. Версія привертає до себе увагу, насамперед, завдяки деталізації бездротового оточення і просунутих графічних можливостей відображення зібраної інформації. Функціональність цього рішення охоплює: огляд знайдених мереж WiFi з підтримкою стандартів 802.11 a/b/g/n/ac; виявлення несанкціонованих точок доступу та відображення під'єднаних клієнтів; сканування й аналіз каналів WiFi, які використовують бездротові мережі, на частотах 2,4 ГГц і 5 ГГц; побудову графіків рівня сигналу, що приймається, і його потужності для точок доступу Wi-Fi.

Додаток **AirScout Live** від компанії Greenlee перетворить Android-смартфон на зручний і портативний аналізатор WiFi мережі. AirScout Live має сім режимів роботи, чотири з яких можна використовувати абсолютно безкоштовно без будь-яких обмежень для Android-пристроїв. Комерційна версія, на відміну від безкоштовної, сумісна з більшістю настільних комп'ютерів (Windows) і мобільних пристроїв (Android і iOS). За допомогою базового функціоналу можна швидко, мобільно і, що важливо, безоплатно вирішувати проблеми, пов'язані з недостатнім рівнем сигналу WiFi в деяких місцях вашого офісу або будинку. AirScout Live – це чудовий застосунок, який, перш за все, приваблює своєю мобільністю.

EkaHau HeatMapper – це картографічний програмний інструмент для розгортання невеликих бездротових мереж рівня будинку та визначення оптимального місця розташування встановлення точки доступу. Це спрощена безкоштовна версія професійних рішень від компанії EkaHau. Цей програмний продукт надає таку саму мережну інформацію, як і WiFi-сканер бездротових мереж, але водночас ще й генерує теплову WiFi-карту, щоб можна було наочно візуалізувати рівні сигналів. Програмне забезпечення пропонує можливість створення плану або макета об'єкта, що досліджується,

а також проектування топології бездротової мережі за координатною сіткою для приблизного орієнтування.

Iperf – консольна утиліта з відкритим вихідним кодом, призначена для вимірювання основних параметрів мережі. З її допомогою досить просто виміряти максимальну пропускну здатність мережі між сервером і клієнтом, провести навантажувальне тестування каналу зв'язку або маршрутизатора, а також перевірити придатність мережі для передавання аудіо- та відеоданих за коштами вимірювання затримки, втрати пакетів і «тремтіння».

Програма *Wireshark* – це потужний мережний аналізатор, який може використовуватися для аналізу трафіка, що проходить через мережний інтерфейс персонального комп'ютера. Це може знадобитися для виявлення та вирішення проблем із мережею, налагодження веб-додатків, мережних програм або сайтів. *Wireshark* дає змогу повністю переглядати вміст пакета на всіх рівнях.

Wireless Scanner від компанії Internet Security Systems, забезпечує всебічний аудит бездротових пристроїв. Ця система, що базується на широко відомому і найпершому у світі мережному сканері безпеки Internet Scanner, проводить інвентаризацію мережі та виявляє всі санкціоновано і несанкціоновано встановлені бездротові точки доступу і клієнти. Після цього проводиться всебічний аналіз кожного пристрою з метою визначення будь-яких слабких місць у системі захисту – недоліків у налаштуванні або помилок програмування. У базу сигнатур вразливостей *Wireless Scanner* входить велика кількість записів про дірки в рішеннях провідних гравців цього ринку – Cisco, Avaya, 3Com, Lucent, Cabletron тощо.

Система автоматизованого проектування *HTZ-Simulation* призначена для планування і вичерпного моделювання мереж радіозв'язку в діапазонах хвиль ВЧ, УВЧ і НВЧ. Система забезпечує розв'язання широкого класу задач проектування, починаючи від вибору будівельних майданчиків на місцевості, до оптимізації всієї радіомережі в цілому.

Основними задачами, що можуть бути успішно розв'язані за допомогою цієї програмної системи проектування є такі: оптимізація існуючих радіомереж при малих фінансових витратах; територіальне планування нових радіомереж; оцінка електромагнітної сумісності нових та існуючих радіомереж; проектування мікрохвильових ліній передачі для стаціонарних абонентів; частотно-територіальне планування радіомереж зі стільниковою структурою для рухомих абонентів; спільне проектування і дослідження стільникової мережі для рухомих абонентів і мікрохвильових ліній; оцінка кореляції

між результатами розрахунків і вимірів; підготовка результатів розрахунків для включення в звіти про проведені дослідження.

Побудова пілотних проєктів проєктованих мереж. Якщо для задання інформації про топологію мережі не потрібно мати реальну мережу, то для збору вихідних даних про інтенсивність джерел мережного трафіка можуть знадобитися вимірювання на пілотних мережах, що становлять натурні моделі проєктованої мережі. Ці виміри можуть бути виконані різними засобами, у тому числі і за допомогою аналізаторів протоколів.

Крім отримання вихідних даних для імітаційного моделювання, пілотна мережа може використовуватися для розв'язання самостійних важливих задач. Вона може дати відповіді на запитання, що стосуються принципової працездатності того чи іншого технічного рішення або сумісності устаткування. Натурні експерименти можуть вимагати значних матеріальних витрат, але вони компенсуються високою вірогідністю отриманих результатів.

Пілотна мережа має бути якомога більше схожа на ту мережу, що створюється, для вибору параметрів якої і створюється пілотна мережа. Для цього необхідно, передусім, виділити ті особливості створюваної мережі, що можуть вплинути на її працездатність і продуктивність. Якщо існують сумніви щодо сумісності продуктів різних виробників, наприклад, комутаторів, що підтримують віртуальні мережі чи інші поки що не стандартизовані можливості, то в пілотній мережі повинні перевірятися на сумісність саме ці пристрої і саме в тих режимах, які викликають найбільші сумніви.

Що ж стосується використання пілотної мережі для прогнозування пропускну здатності реальної мережі, то тут можливості цього виду моделювання дуже обмежені. Сама по собі пілотна мережа навряд чи зможе дати добру оцінку продуктивності реальної мережі, яка включає набагато більше вузлів підмереж і користувачів. Незрозумілим є спосіб екстраполяції результатів, отриманих у невеликій мережі, на мережі багато більших розмірів. Тому пілотну мережу доцільно використовувати разом з імітаційною моделлю мережі, у якій використовуються значення характеристик трафіка, затримок і пропускну здатності пристроїв, отриманих у пілотній мережі.

5.3 Пакети програм для моделювання і оптимізації компонентів систем зв'язку

Математичні моделі системи зв'язку мають включати моделі різних типів джерел повідомлень, кодерів і декодерів, модуляторів і демодуляторів, каналів

зв'язку. Для програмної реалізації математичних моделей різних варіантів системи зв'язку та процедури їхнього дослідження методом статичного моделювання на ЕОМ можуть бути використані універсальні мови типу *Pascal* та *C++*. На цих мовах можна описати моделі усіх складових системи зв'язку. Для організації зручного інтерфейсу під час роботи із реалізованою математичною моделлю системи можна використати можливості програмних середовищ *Delphi* та *Builder*. Як приклад можна навести пакети програм, що створені даними програмними засобами для моделювання та порівнювальних досліджень різних типів систем зв'язку.

На сьогодні існує ряд стандартних пакетів програм, що дозволяють моделювати і досліджувати системи зв'язку. Окрім пакетів програм моделювання систем, що згадані у п. 5.1, є багато інших програмних продуктів, що можуть бути використані для автоматизації проєктування окремих пристроїв та систем зв'язку в цілому. Розглянемо деякі з них.

Пакет System Wiew є «конструктором», за допомогою якого зі стандартних блоків може бути реалізована задана функціональна схема будь-якої системи зв'язку. В пакеті існує обширна бібліотека, з каталогу якої вибирається потрібний функціональний модуль, який переноситься на схему. Після з'єднання усіх функціональних модулів і підключення усіх вимірювальних приладів задаються системні параметри: тривалість інтервалу спостереження, частота дискретизації, параметри швидкого перетворення Фур'є, а потім виконується моделювання. Розраховується перетворення Фур'є в різних точках схеми, кореляційні і взаємкореляційні функції, виконуються арифметичні і тригонометричні операції, проводиться статистичне опрацювання даних моделювання і багато чого іншого.

Незважаючи на потужні засоби аналізу у пакеті *System Wiew* опрацювання отриманих у результаті моделювання даних зручніше проводити за допомогою пакета *LabView*. Це програма функціонального моделювання систем та аналізу результатів досліджень за допомогою обширної бібліотеки програм статистичного аналізу, оцінювання різних характеристик сигналів, регресійного аналізу, частотно-часового аналізу, цифрового та інших видів опрацювання сигналів.

Пакет HyperSignal Block Diagram – це програма моделювання аналогових і цифрових пристроїв, заданих функціональними схемами.

Пакети SPT і IPT виконують відповідно цифрове опрацювання сигналів і двовимірних зображень. До складу пакетів включені функції опрацювання сигналів, призначені для аналізу і перетворення часових послідовностей, а також двовимірних растрових зображень. Цей пакет включає в себе більш як

130 функцій, які розв'язують задачі цифрового опрацювання сигналів. Зокрема, функції, що виконують перетворення Фур'є і Гільберта, а також цифрову фільтрацію за допомогою цифрових фільтрів з різними частотними характеристиками. Пакет дозволяє розраховувати кореляційні функції, щільність спектральної потужності сигналів, оцінювати параметри фільтрів, використовуючи вимірювані відліки вхідного і вихідного сигналів.

Пакет APLA призначений для проектування і моделювання електричних схем і систем у часовій і частотній областях. До складу моделювальних систем можуть входити як цифрові, так і аналогові компоненти, у тому числі, високочастотні пристрої. Виконуються розрахунки: частотних характеристик, спектральної щільності та коефіцієнта шуму, перехідних процесів, спектрів сигналів, проводиться параметрична оптимізація, статистичний аналіз за методом статистичних випробувань при випадкових вхідних впливах. Важливою особливістю пакета є наявність бібліотеки значного числа елементів принципових схем і окремих блоків, що застосовуються в аналогових і цифрових системах зв'язку.

Пакет DesignLab – це інтегрований програмний комплекс для автоматизації проектування аналогових, цифрових, а також змішаних (аналого-цифрових) пристроїв, синтезу пристроїв програмувальної логіки і аналогових фільтрів. У цьому пакеті проектування починається з введення принципової схеми пристрою, її моделювання й оптимізації та закінчується створенням керуючих файлів для програматорів, а також для фотоплоттерів і свердлильних верстатів з метою створення печатних плат.

Пакет ElectronicsWorkbench – це система схемотехнічного моделювання та аналізу аналогових та цифро-аналогових систем великої складності. Пакет включає велику бібліотеку широко використовуваних схемних компонентів, параметри яких можуть мінятися в широкому діапазоні. Широкий набір вимірювальних приладів (осцилографів, аналізаторів спектра) дозволяє вимірювати різні величини та характеристики схеми.

Пакет OrCAD – це програма моделювання і наскрізного проектування аналого-цифрових електронних пристроїв та автотрасувальника *SPECTRA*.

Програма CircuitMaker належить до простих систем автоматизованого проектування. Програма має власний редактор схем, що легко настроюється та адаптується до конкретних задач проектування систем. Можливості цієї програми еквівалентні пакету *ElektronicsWorkbench*.

Пакет Micro-Cap – це пакет схемотехнічного моделювання. З його допомогою виконується графічне введення проєктованих схем і аналіз

характеристик аналогових, цифрових і аналого-цифрових пристроїв, ведеться аналіз нелінійних схем на постійному струмі, розрахунок перехідних процесів і частотних характеристик. У пакет включено велику бібліотеку компонентів, до якої входять найбільш популярні цифрові інтегральні схеми дискретної логіки й аналогові компоненти типу діодів, транзисторів, ліній передавання з втратами, кварцових резонаторів і т.д.

Програма **PSPICEA/D** найкраще підходить для вирішення більш складних задач схемотехнічного моделювання. Раніше вона входила до складу пакета *DisineLab*. Потім вона ввійшла до пакета *OrCAD*. Ця програма може виконувати різні види аналізу схем і має ряд функцій перегляду результатів моделювання. Доповнена спеціальним модулем *PSPICE Optimizier*, вона дає можливість не тільки моделювати, але й оптимізувати схеми за різними критеріями.

Система **LabVIEW** – це один з основних продуктів компанії National Instruments – система графічного програмування. Уже в назві простежується орієнтація на лабораторні дослідження, вимірювання та збір даних. На даний момент доступні дві редакції LabVIEW. Перша називається «LabVIEW 2020». Це продовження «класичної» лінійки LabVIEW, яка бере початок аж із жовтня 1986 року, але ця класична лінійка обросла величезною кількістю бібліотек і тулкітів.

Друга версія, доступна для скачування, це «LabVIEW NXG 5.0». «NXG» означає «NeXt Generation» – наступне покоління. Ця лінійка бере початок з 2017 року і у віддаленій перспективі найімовірніше має замінити «класичну» лінійку. Принципова відмінність цих двох лінійок криється також і в інструментах, використаних для розробки.

Програма **NI Multisim** – одна з найкращих програм, яку спеціально розробили для викладачів, студентів і фахівців у проєктуванні схем. Ця програма містить у собі деякі з найбільш передових інструментів галузі. Крім того, NI Multisim дає змогу перетворити будь-яку електричну схему на простий процес, з можливістю додати будь-який елемент до схеми, адже в наявності є бібліотека з понад 4000 об'єктами, а також тестова система, що вмикається і вимикається за допомогою невеликого перемикача.

Програмний модуль **SIM 99 SE** дає можливість проводити всі види параметричного аналізу схем, змінюючи одночасно дві компоненти. Цей модуль належить до пакетів *P-CAD 2002* та *Protel 99 SE*.

Програмний модуль **ViewAnalog** має стандартний набір функцій моделювання змішаних аналого-цифрових пристроїв. Він дозволяє також

моделювати поведінку програмувальних логічних схем. Цей модуль входить до пакета *ProductDesigner*.

Пакети проектування програмувальних логічних інтегральних схем. Окремою задачею автоматизації проектування систем є синтез заданих логічних схем, що визначають роботу складних пристроїв і реалізуються на програмувальних логічних інтегральних схемах. Для цих цілей можуть бути використані такі програмні продукти: програма *PeakFPGA*, модуль *PLD 99 SE*, програма *FPGAStudio*, пакет *SystemView*, програми *Fusion/SpeedWave*, *Fusion/ViewSim*, *ViewPLD*.

Необхідно зазначити, що ряд із зазначених пакетів програм дають можливість не тільки моделювати та аналізувати задані схеми пристроїв та систем, але й проектувати топологію відповідних великих інтегральних схем (ВІС), виконувати їхній аналіз електромагнітної сумісності і тепловий аналіз, а також проектувати відповідні печатні плати.

Насамкінець треба зазначити, що згадані в даному розділі мови програмування, програмні модулі та пакети програм складають далеко не повний список існуючих програмних засобів, що можуть бути використані для моделювання і оптимізації систем та мереж зв'язку.

Контрольні запитання та завдання

1. Які основні властивості мережі зв'язку з комутацією пакетів, що необхідно відобразити в її математичній моделі?
2. Які програмні засоби можуть бути використані під час імітаційного моделювання систем і мереж зв'язку?
3. Які є функціональні можливості програмного комплексу *MatLab*?
4. Для яких задач моделювання може бути використане програмне середовище *NS (Network Simulator)*?
5. Які можливості програмного засобу *NetCracker* під час проектування та імітаційного моделювання інформаційних мереж?
6. Для яких цілей моделювання раціонально використовувати програмний засіб *Cinderella*?
7. Які переваги застосування методу дослідження мереж зв'язку шляхом моделювання на ЕОМ порівняно з дослідженнями на реальних мережах?
8. Наведіть приклади та характеристики популярних програм для імітаційного моделювання мереж зв'язку.

9. Які програмні продукти можуть бути використані під час моделювання на ЕОМ радіомереж?

10. В чому полягає необхідність і особливості побудови пілотних проєктів під час проєктування мереж зв'язку?

11. Наведіть приклади програм для імітаційного моделювання систем зв'язку.

12. Наведіть можливості пакета програм System View для програмної реалізації функціональної схеми системи зв'язку.

13. Який програмний комплекс може бути використаний для автоматизації проєктування аналогових, цифрових, а також змішаних пристроїв?

6 СХЕМОТЕХНІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

На сьогодні існує велика кількість програм моделювання електронних пристроїв, розроблених різними фірмами. Однак у даному навчальному посібнику наведені найбільш поширені програмні продукти однієї з провідних компаній світу National Instruments Corporation. Основні програми схемотехнічного моделювання корпорації наведені на рис. 6.1.

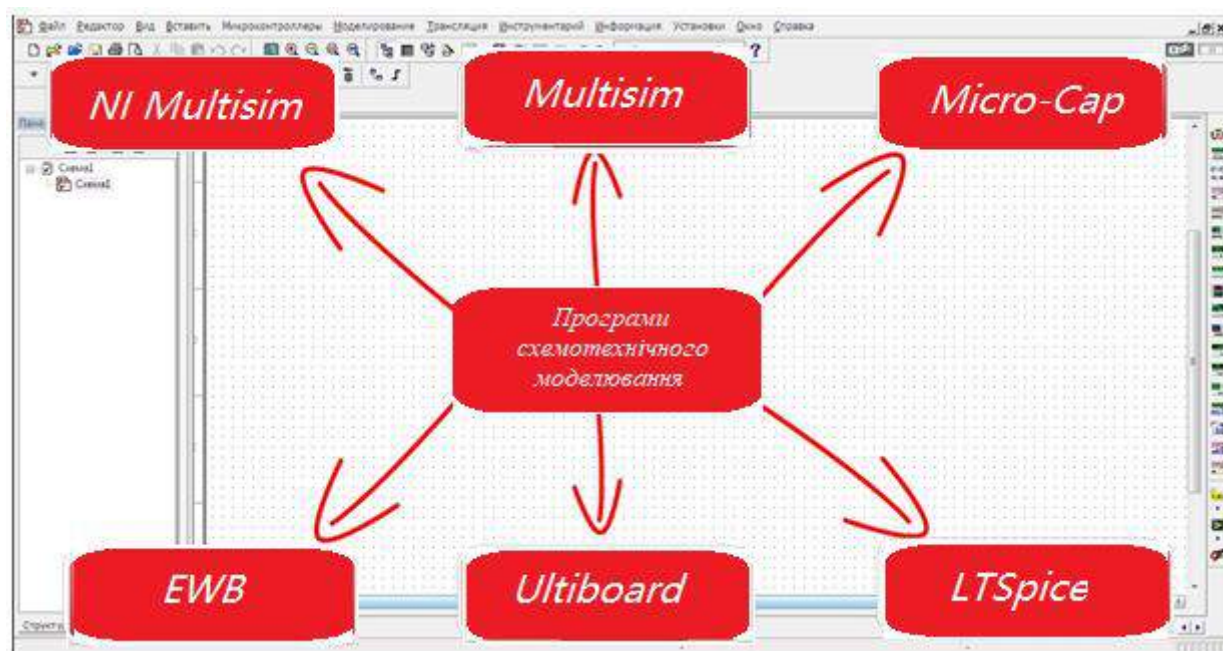


Рисунок 6.1 – Основні програмні продукти National Instruments Corporation

Навчальний посібник побудований так, що серед програм схемотехнічного моделювання багато уваги приділено програмі Electronics Workbench. Це досить проста програма, що дозволяє вирішувати складні завдання, пов'язані з моделюванням електронних пристроїв. На основі цієї програми розроблені інші професійні пакети, такі, наприклад, як NI Multisim, Circuit Design Suite і більш складні і з більшими можливостями. Однак, вміння працювати з EWB дозволяє досить легко освоїти роботу і з цими, пізнішими продуктами. У зв'язку з цим ця програма розглянута докладніше.

6.1 Програма Electronics Workbench, загальні відомості

Electronics Workbench – одна з найвідоміших програм схематичного моделювання цифрових, аналогових та аналогово-цифрових електронних пристроїв.

Перші версії склалися із двох незалежних частин – для моделювання цифрових та аналогових пристроїв. У 1996 р. обидві були об'єднані. Продукт створила компанія Electronics Workbench Group (Interactive Image Technologies) – один із першопрохідників комп'ютерної розробки пристроїв електроніки.

Сьогодні Interactive Image Technologies – це дочірня компанія, права на яку повністю належать National Instruments Corporation.

Пакет Electronics Workbench показав досить високу гнучкість та точність обчислень, знайшовши широке застосування більш ніж у 50 країнах світу як на підприємствах, так і у вишах. Програма має простий інтерфейс та ідеально підходить для початкового навчання електроніці. Бібліотеки пропонують величезний набір моделей радіоелектронних пристроїв від найвідоміших іноземних виробників із широким діапазоном значень параметрів. Крім того, є можливість створення власних компонентів. Активні елементи можуть бути показані як ідеальними, так і реальними моделями. Різні прилади (мультиметри, осцилографи, вольтметри, амперметри, частотні графобудівники, динаміки, світлодіоди, лампи, логічні аналізатори, сегментні індикатори) дозволяють вимірювати будь-які величини, будувати графіки. Electronics Workbench може провести аналіз ланцюга за постійним та змінним струмом, дослідити перехідні процеси за будь-якого зовнішнього впливу за допомогою генераторів сигналів різної форми.

При цьому експериментатор за допомогою мишки та клавіатури виконує звичні операції, а саме: збирає схему з окремих компонентів, встановлює їхні параметри у робочому діапазоні, підключає необхідні вимірювальні прилади та реєструє результати вимірювань. Віртуальні вимірювальні прилади мають зовнішній вигляд, що цілком імітують свій прототип. Така віртуальна лабораторія має дуже великі можливості під час експериментального дослідження різних схем. Програма дозволяє аналізувати весь спектр електронних схем аналогових, цифрових та змішаних.

Програма Electronics Workbench сумісна з програмою P-SPICE, тобто надає можливість експорту та імпорту схем і результатів вимірювань у різні її версії.

Програма EWB є на сьогодні однією з найбільш зручних та доступних для моделювання та аналізу електричних та електронних схем. Її переваги полягають у простоті та наочності. Вона не вимагає від користувача спеціальної підготовки, поглиблених знань з інформатики та програмування, що забезпечує мінімальний час для її освоєння, а сам процес моделювання дуже нагадує реальний експеримент.

Програмні продукти Electronics Workbench належать до «легких» засобів EDA (Electronic Design Automation), які використовуються в основному інженерами-схемотехніками та конструкторами, які починають освоювати комп'ютерне проєктування, а також у процесі навчання студентів технічних університетів і можуть змагатися з такими пакетами програм, як Micro-Cap, Circuit Maker та ін.

Цікаво зазначити протилежні тенденції розвитку САПР різного рівня. Якщо у програмне забезпечення для цілей освіти прагнуть інтегрувати модулі різного призначення, то в САПР вищого рівня спостерігається вузька спеціалізація: наприклад, P-CAD 2000 призначений для розробки друкованих плат, OrCAD 9.2 – для моделювання електронних пристроїв та розробки друкованих плат, програма Max+ Plus II – для синтезу ПЛІС, що випускаються фірмою Altera, і це цілком зрозуміло, тому що професійним розробникам потрібно пропонувати кращі рішення, а студентів доцільніше навчати на більш простих у освоєнні та дешевших програмних засобах.

На сьогоднішній день існує кілька варіантів Electronics Workbench: Pro – Professional Edition – для промислових підприємств, Personal Edition – для індивідуальних розроблювачів, Educational Edition – для навчання груп студентів, Student Edition – для індивідуальної роботи студентів, демонстраційна версія EWB. Вони відрізняються своїми можливостями, кількістю команд, закладками, налаштуванням. Нижченаведені відомості підібрані так, щоб відобразити, по можливості, найбільш повно інформацію про цю програму з обмеженим обсягом навчального посібника.

6.1.1 Інтерфейс користувача, головне меню

У всіх версіях залишається незмінним дружній інтуїтивний інтерфейс, простий, потужний графічний редактор електричних схем, чудова інтеграція з Windows системою.

Після завантаження Electronics Workbench на екрані з'являється вікно, що містить робоче поле, вище якого розташовані: рядок меню; – панелі: стандартна, компонентів і інструментів, рис 6.2.

Досліджувана схема збирається на робочому полі з наявних компонентів та приладів під час одночасного використання мишки та клавіатури.

Головне меню містить пункти File, Edit, Circuit, Analysis, Window, Help. Команди, які часто використовуються, і які входять до складу головного меню, також представлені на стандартній панелі інструментів.

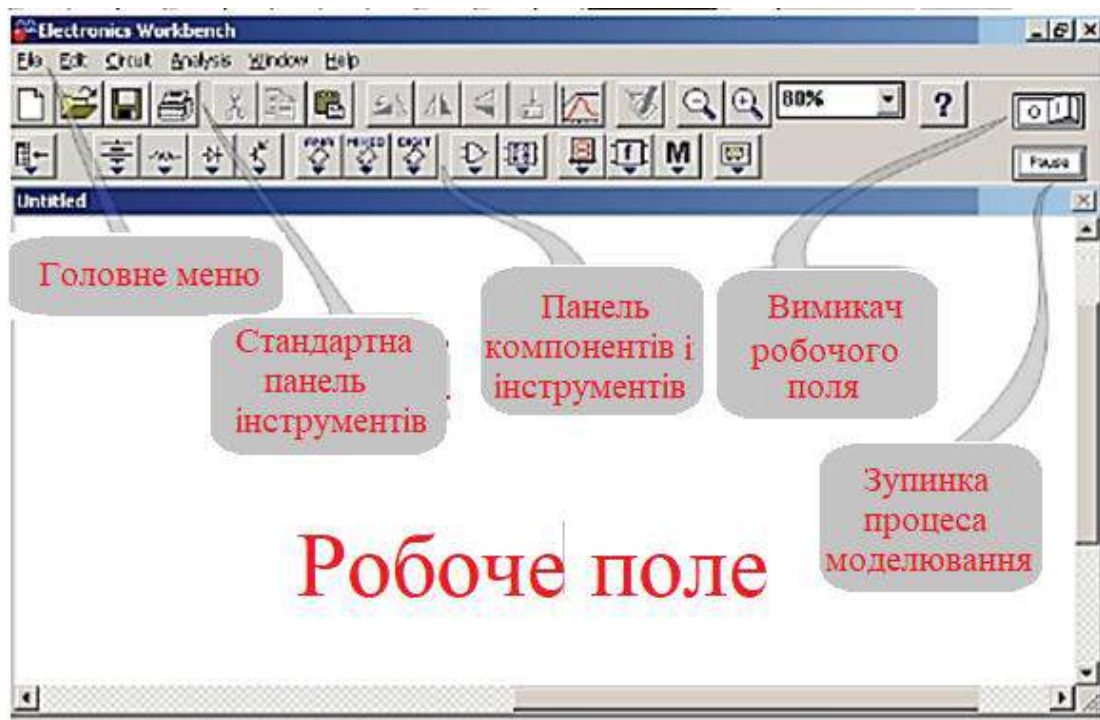


Рисунок 6.2 – Інтерфейс програми Electronics WorkBench

Меню File призначене для завантаження та запису файлів, отримання твердої копії вибраних для друку складових частин схеми, а також для імпорту/експорту файлів у форматах інших систем моделювання та програм розробки друкованих плат, рис. 6.3.

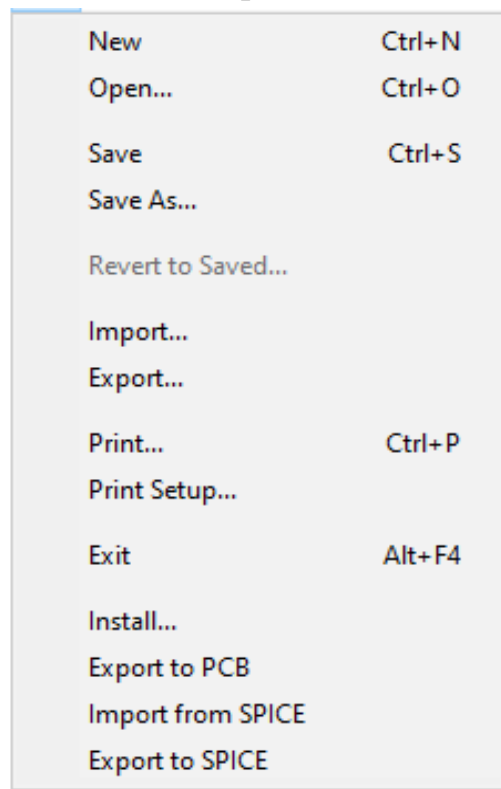


Рисунок 6.3 – Меню File

Перші чотири команди цього меню: *New*, *Open*, *Save*, *Saveas* – типові для *Windows* та пояснень не вимагають. Для цих команд є кнопки зі стандартним зображенням. Команду *New* також можна викликати одночасним натисканням клавіш **CTRL+N**.

Команду *Open* також можна викликати одночасним натисканням клавіш **CTRL+O**.

Операцію *Save* викликають одночасним натисканням клавіш **CTRL+S**.

Команда *Save as* аналогічна до операції *Save*, але зберігає потокову схему з новим ім'ям файлу, залишаючи первісну схему незмінною. Використовувати цю команду потрібно, щоб безпечно експериментувати на копії схеми без зміни оригіналу. Системні файли програми *EWB* мають розширення *.ewb*.

Команда **Import** перетворює нестандартні файли схем (розширення *.net* або *.cir*) до стандартного виду *Electronics Workbench*.

Команда **Export** зберігає файл схеми з одним з наступних розширень: *.net*, *.scr*, *.cmp*, *.cir*, *.plc*.

Команда **Print** очевидна. Операцію також можна викликати одночасним натисканням клавіш **CTRL+P**. Команда призначена для повної або часткової роздрукування схеми і/або приладів. Для виконання операції необхідно вибрати елементи, що будуть надруковані, у порядку, у якому ви хочете їх надрукувати. Команда *Print* (**CTRL + P**) надає вибір даних для виведення на принтер та має такі опції:

Schematic – схеми (опція включена за замовчуванням);

Description – опис до схеми;

Part list – перелік документів, які виводяться на друк;

Label list – перелік позначень елементів схеми;

Model list – перелік компонентів, які є наявними в схемі;

Subcircuits – підсхеми, що є частиною схеми, і є закінченими функціональними вузлами та позначаються прямокутниками з назвою в середині;

Analysis options – перелік режимів моделювання;

Instruments – перелік приладів.

Print Setup (Windows)

Ця операція призначена для настроювання принтера. Відображає стандартне діалогове вікно *Print Setup*, з якого можна вибрати встановлений принтер і визначити орієнтацію зображення, паперовий розмір, паперове джерело й інші параметри. Для схем, що по ширині більше, ніж по висоті, використовується альбомна орієнтація. Якщо схема занадто велика для друку на одній сторінці, друк автоматично вироблятиметься на декількох сторінках.

Exit

Операцію також можна викликати одночасним натисканням клавіш **ALT+F4**. Операція призначена для завершення роботи з пакетом Electronics Workbench. Якщо не були збережені зміни в схемі, то буде зроблений запит на збереження.

Install (Windows)

Операція призначена для установки додаткових компонентів Electronics workbench. Для її виконання буде запитаний диск, що містить додаткові компоненти.

Команди Export to PCB, Import from SPICE, Export to SPICE забезпечують обмін файлами між EWB та зазначеними програмами.

Меню Edit, рис. 6.4, дозволяє здійснити операції редагування.

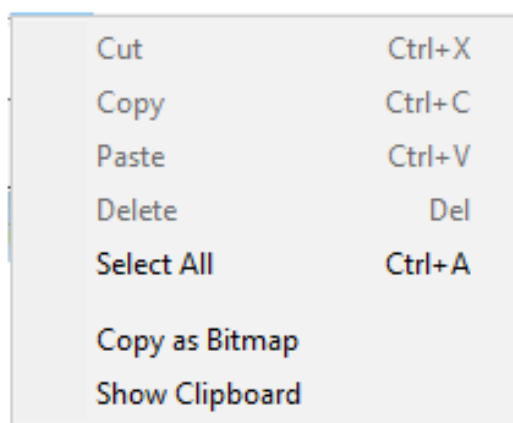


Рисунок 6.4 – Меню Edit

Cut

Операцію також можна викликати одночасним натисканням клавіш **CTRL+X**. Команда використовується для видалення обраних компонентів, схем або тексту. При цьому обране міститься в буфер обміну, звідки його можна вставляти в потрібне місце. Команда не спрацює, якщо вибір містить у собі інструментальні піктограми.

Copy

Операцію також можна викликати одночасним натисканням клавіш **CTRL+C**. Команда призначена для копіювання обраних компонентів, схеми або тексту. Копія міститься в буфер обміну. Потім можна використовувати команду **Paste**, щоб уставити копію в потрібному місці. Операція також не виконається, якщо вибір включає інструментальні піктограми.

Paste

Операцію також можна викликати одночасним натисканням клавіш **CTRL+V**. Команда поміщає зміст буфера обміну в активне вікно

(зміст залишається в буфері обміну). Для успішного виконання операції буфер має містити компоненти Electronics Workbench або текст. Зміст Буфера обміну може вставлятися тільки у вікна, здатні містити подібну інформацію. Наприклад, не можна вставити компонент електричної схеми у вікно опису.

Delete

Операцію також можна викликати натисканням клавіші **DEL**. Ця команда цілком видаляє обрані компоненти або текст. Використовувати команду Delete треба з обережністю. Вилучена інформація не може бути відновлена.

Select All

Команда вибирає всі елементи в активному вікні (вікно схеми, вікно підсхеми або вікно опису). Якщо прилад – частина вибору, команди Edit/Copy і Edit/Paste стають недоступними. Для вибору всіх, крім декількох елементів, використовується команда Select All, і потім знімається виділення із зайвих елементів, натискаючи CTRL лівою кнопкою мишки.

Copy as Bitmap

Команда призначена для копіювання растрового зображення елементів у буфер обміну. Використовують ці зображення в текстових процесорах або програмах обробки зображень.

Щоб скопіювати растрове зображення елементів, необхідно:

- а) вибрати Edit/Copy as Bitmap (курсор зміниться на crosshair),
- б) натиснути і утримувати кнопку мишки, переміщаючи курсор, щоб сформувати прямокутник, що включає необхідні для копіювання елементи,
- в) відпустити кнопку мишки.

Show Clipboard

Команда відображає зміст буфера обміну. Буфер обміну – тимчасове місце збереження для компонентів або тексту, що треба помістити пізніше в іншому місці в схемі. Можна також використовувати буфер обміну, щоб передати інформацію від Electronics workbench до іншої прикладної програми. Буфер обміну може містити графіку (компоненти або схеми) і текст. Якщо активне вікно не може містити тип інформації, що знаходиться на буфері обміну, або якщо буфер обміну порожній, команда Edit/Paste буде недоступна. Наприклад, якщо буфер обміну містить компоненти, а поточною є вікно опису, команда Paste буде недоступна. Щоб закрити буфер обміну, двічі клацають меню Control (Windows).

Меню Circuit дозволяє здійснити операції з ланцюгами, рис. 6.5. Операцію **Rotate** також можна викликати одночасним натисканням клавіш **CTRL+R**. Команда дозволяє обертати обрані компоненти на 90 градусів

за годинниковою стрілкою. Текст, зв'язаний з компонентом (мітки, значення й інформація про моделі), може бути повторно встановлений, але під час виконання команди не обертається. У разі потреби, дроти, прокладені до компонента, перенаправляються автоматично. Коли обертається амперметр і вольтметр, обертаються тільки їхні термінали.

Flip Vertical

Команда дзеркально відбиває обрану схему по вертикалі у вікні схеми. Зверніть увагу, будь-які проводи, прикладені до дзеркально відбиваного компонента перенаправляються в міру необхідності. Текст, зв'язаний з компонентом (мітки, значення й інформація про моделі), може бути повторно встановлений, але не відбиває.

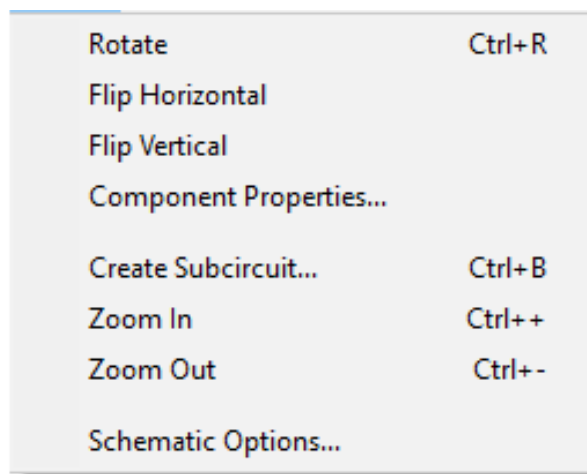


Рисунок 6.5 – Меню Circuit

Flip Horizontal

Команда дзеркально відбиває обрану схему по горизонталі у вікні схеми. Будь-які проводи, прикладені до дзеркально відбиваного компонента перенаправляються в міру необхідності. Текст, зв'язаний з компонентом (мітки, значення і інформація про моделі), може бути повторно встановлений.

Component Properties

Команда призначена для зміни властивостей обраного компонента. Також виводиться під час подвійного натискання на компоненті. При виклику за допомогою спливаючого меню, після натискання правою кнопкою мишки, призначаються властивості для всіх обраних компонентів. Це не впливає на вже розміщені компоненти.

Під час виконання команди відкривається діалогове вікно Component Properties, закладки якого залежать від типу обраного компонента.

Можливі такі типи закладок:

- Label,
- Value,
- Fault,
- Display,
- Analysis Setup.

Закладка Label

Закладку також можна викликати одночасним натисканням клавіш **CTRL+L**. Це позиційне позначення компонентів, яке в подальшому використовується під час виконання команд.

Закладка Value Tab

Закладку також можна викликати одночасним натисканням клавіш **CTRL+U**. Тут встановлюється значення компонента.

Закладка Fault (Дефект компонента)

Закладку також можна викликати одночасним натисканням клавіш **CTRL+F**. Використовується, щоб призначити такі несправності на термінал компонента:

Leakage (утечка) – поміщає значення опору, визначене в суміжних полях, паралельно з обраними терміналами. Це змушує струм проходити повз термінали на загальний дріт (ground) замість того, щоб пройти їх.

Short (коротке замикання) – поміщає дуже низький опір між двома терміналами, так що компонент не має ніякого вимірного ефекту на схемі.

Open (розрив кола) – поміщає дуже високий опір на терміналі, начебто провідне з'єднання на термінал було розбито.

Закладка Display

Закладка використовується для відображення/приховання тих або інших елементів Electronics Workbench.

Коли обрано Use Schematic Options використовуються налаштування параметрів дисплея з закладки Show/Hide діалогового вікна Circuit/Schematic Options.

Show labels, Show models, Show reference ID – коли не обрано Use Schematic Options, використовуються параметри дисплея, як вони були визначені.

Закладка Analysis Setup

Закладка використовується для налаштування робочої температури елементів.

Use global temperature – якщо обрано, використовується набір температур, встановлений у Analysis/Analysis Options. Якщо не обрано, використовуються ті температури, що були визначені.

Create Subcircuit

Команду також можна викликати одночасним натисканням клавіш **CTRL+B**. Команда поєднує обрані елементи схеми в підсхему, у дійсності створюючи інтегральну схему. Підсхема може містити так багато компонентів, скільки потрібно. Будь-яка подача дротів до інших компонентів або з'єднувачів у схемі стане терміналами на піктограмі підсхеми.

Щоб створити підсхему:

а) Виберіть елементи, які потрібно використовувати для підсхеми.

б) Виберіть Circuit/Create Subcircuit, і завершіть діалог, що з'являється:

Copy from Circuit – поміщає копію обраних компонентів у підсхемі.

Первісні компоненти залишаються, оскільки вони знаходяться у вікні схеми.

Move from Circuit – видаляє обрані компоненти зі схеми, так що вони з'являються тільки в підсхемі.

Replace in Circuit, поміщає обрані компоненти в підсхему і замінює обрані компоненти в схемі прямокутником, позначеним ім'ям підсхеми. Обрані компоненти з'являються в новому вікні, вікні підсхеми. Ім'я нової підсхеми додається до списку доступних підсхем, що відображається, коли піктограма підсхеми переміщатиметься з інструментальної панелі Favorites. Підсхема доступна тільки для поточної схеми.

Унаслідок виконання команди викликається діалогове вікно, у рядку Name якого необхідно ввести ім'я підсхеми, після чого необхідно обрати варіанти, рис. 6.6.

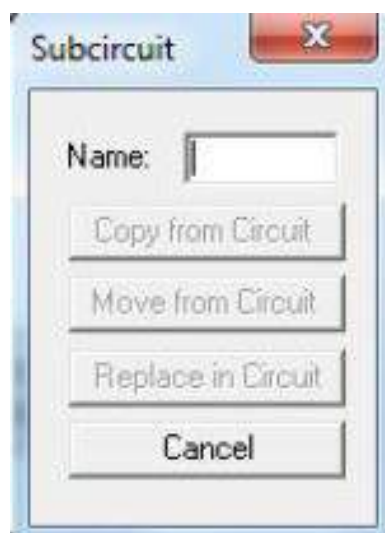


Рисунок 6.6 – Створення підсхеми

Відокремлена частина вирізається із загальної схеми та у вигляді підсхеми з привласненим ім'ям копіюється в бібліотеку; – відокремлена

частина замінюється в початковій схемі підсхемою із привласненим їй ім'ям з одночасним копіюванням у бібліотеку.

Zoom In/Zoom Out

Команда відображає підменю вибору для збільшення або зменшення розміру дисплея вікна схеми в діапазоні 50 – 200 %.

Schematic Options, рис. 6.7. Команда призначена для керування всім дисплеєм схеми. Зміни належать тільки до поточної схеми. У вікні команди виводиться набір закладок Grid, Show/Hide, Fonts, Wiring, Printing.

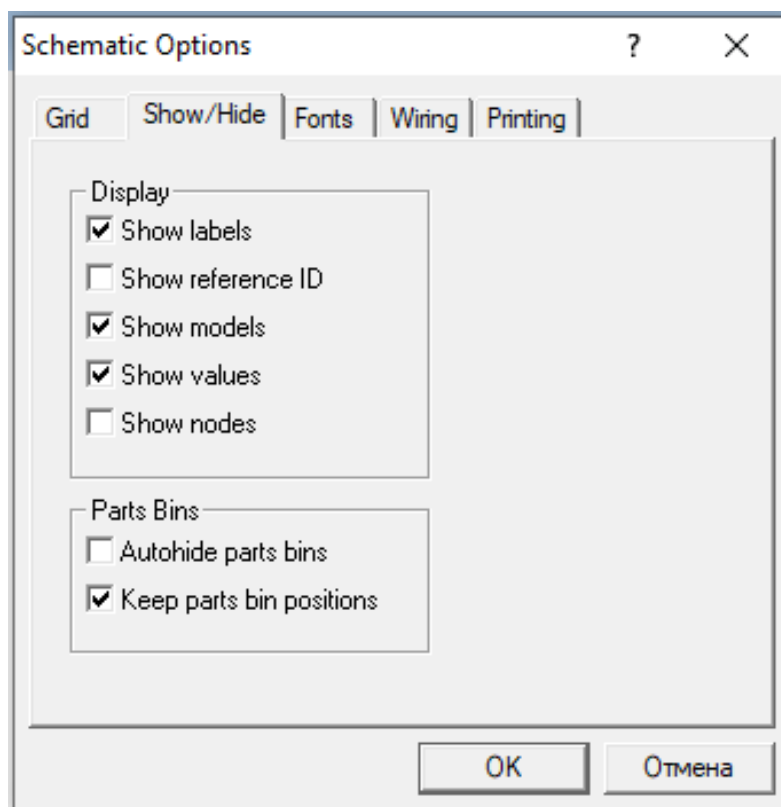


Рисунок 6.7 – Діалогове вікно команди Schematic Options

Закладка Grid

Закладка керує дисплеєм і використанням сітки, що лежить в основі вікна схеми. Використання сітки спрощує вирівнювання елементів у схемі. Можна використовувати сітку без її відображення. Відображення сітки здійснюється на задньому плані вікна схеми. Сітку зручно використовувати при розміщенні об'єктів.

Закладка Show/Hide

Для відображення інформації про відтворення сітки на екрані та відображення позиційних позначень компонентів.

Закладка Fonts

Закладка керує шрифтом, використовуваним для міток і посилань на ідентифікатори.

Закладка Wiring

Закладка керує методом з'єднання, використовуваним для елементів.

Закладка Printing

Назва говорить сама за себе.

Меню Analysis

Призначено для керування процесом моделювання. Зовнішній вигляд меню наведений на рис. 6.8. Перед виконанням кожного з них користувачу буде запропоновано заповнити параметри аналізу. Аналіз буде виконаний тільки в тому випадку, коли це можливо для даної схеми.

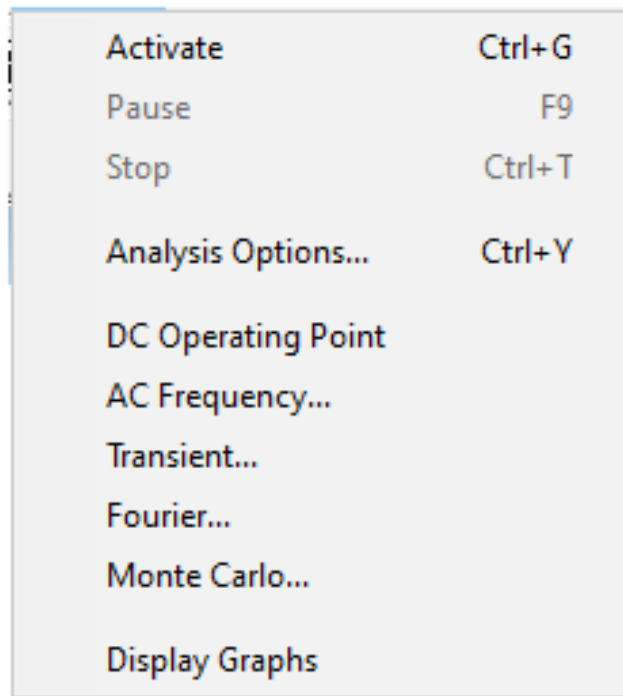


Рисунок 6.7 – Меню Analysis

Activate

Команду також можна викликати одночасним натисканням клавіш **CTRL+G**. Команда активізує схему (включає перемикач). Активізація схеми починає послідовність математичних операцій, щоб обчислити значення для тестових крапок у схемі.

Перемикач залишається включеним, доки не виключається або не припиняється моделювання.

Resume (Pause)

Команду також можна викликати натисканням клавіші **F9**. Команда тимчасово перериває або продовжує моделювання (керується кнопкою Pause/Resume). Припинення корисне, якщо треба розглянути форму хвилі (форму кривої, форму сигналу) або зробити зміни в інструментальних налаштуваннях. (Імітація простих схем може виявитися занадто швидкою для припинення.)

Stop

Зупиняє моделювання. Команду можна виконати за допомогою піктограми, а також викликати одночасним натисканням клавіш **CTRL+T**.

Analysis Options

Команда викликається одночасним натисканням клавіш **CTRL+Y**. Вона забезпечує вибір режимів моделювання в діалоговому вікні зі встановленням опцій, які згруповані на вкладках. Більшість параметрів має значення за замовчуванням.

Зкладка *Global* команди Analysis Options забезпечує налаштування загального значення, параметри якого мають такі призначення (рис. 6.9).

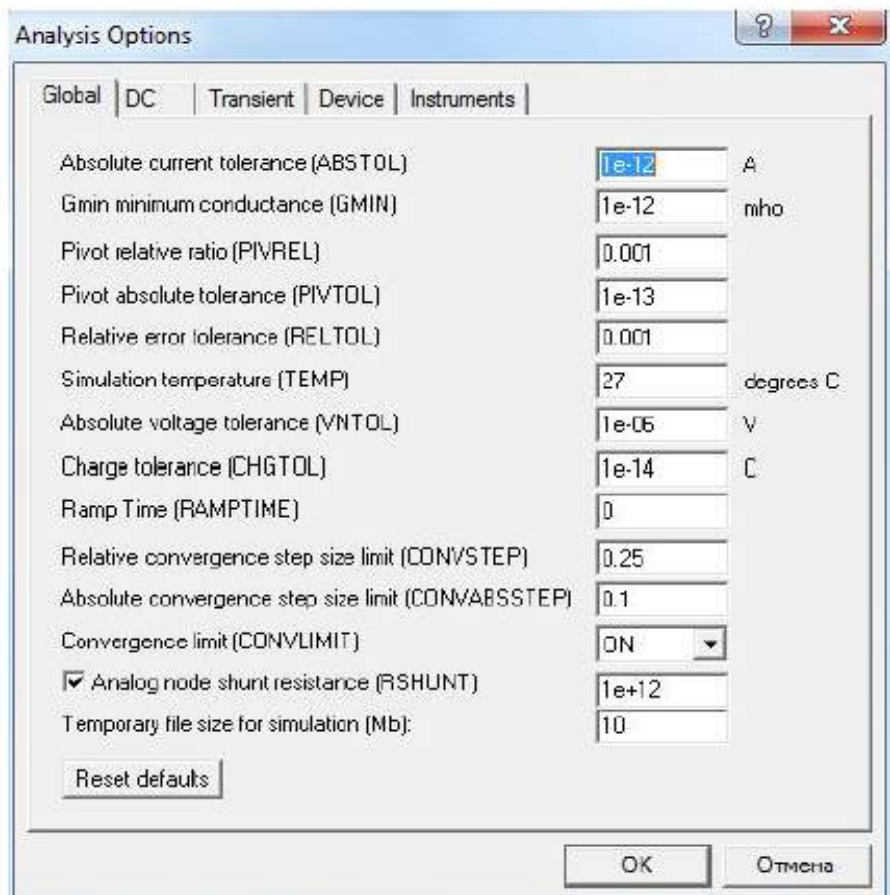


Рисунок 6.7 – Зкладка Global команди Analysis Options

ABSTROL – абсолютна помилка розрахунку струмів. Якщо струми в схемі, яка моделюється, істотно більше вказаного значення ($1e-12$), то з метою підвищення швидкодії значення *ABSTROL* доцільно збільшити згідно з необхідною похибкою розрахунку (наприклад, з урахуванням розрядності мультиметра).

GMIN – мінімальна провідність гілки кола. Вказане значення ($1e-12$) змінювати не рекомендується. Збільшення *GMIN* позначається на збіжності рішення при одночасному зниженні точності моделювання. Цей параметр використовується у разі підключення додаткового *Gmin stepping* алгоритму.

PIVREL, *PIVTOL* – відносна та абсолютна величина елемента рядка матриці вузлових провідностей для його виділення як провідного елемента. Введення такого елемента у випадку методу Гауса дає змогу підвищити точність проміжних обчислень і, відповідно, зменшити загальну кількість ітерацій. Установлені за замовчуванням значення параметрів змінювати не рекомендується:

RELTOL – відносна помилка моделювання, впливає на збіжність рішення та швидкість моделювання. Значення, що рекомендуються, є від 102 до 106.

TEMP – температура, за якої проводиться моделювання.

VNTOL – абсолютна помилка розрахунку напруги.

CHGTOL – абсолютна помилка розрахунку зарядів. Установлені за замовчуванням значення параметрів змінювати не рекомендується.

RAMPTIME – початкова точка відліку часу у процесі аналізу перехідних процесів.

CONVSTEP, *CONVABSSTEP* – відносний та абсолютний розмір автоматично контрольованого кроку ітерацій у процесі розрахунку режиму за постійним струмом.

CONVLIMIT – включення або виключення додаткових засобів, які вбудовані в моделі деяких компонентів, для забезпечення збіжності ітераційного процесу.

RSHUNT – опір витоку для всіх вузлів відносно загальної шини (заземлення). При повідомленнях про помилки «No DC path to ground» (відсутність заземлення кола) та «Matrix is nearly singular» (матриці дуже близькі, матриці L – та Up – рівней) значення параметру знаходиться в межах 106 – 109 Ом.

Temporary – обсяг дискової пам'яті для зберігання тимчасових файлів (Мбайт). У разі складних кіл значення параметру збільшується. Кнопка *Reset defaults* призначена для встановлення значень параметрів за замовчуванням

та використовується в тому разі, якщо після редагування необхідно повернутися до початкових даних.

Закладка DC Operating Point

Закладка *DC* команди *Analysis Options* забезпечує налаштування для розрахунку режиму за постійним струмом (статичний режим). У цьому режимі зі схем, які моделюються, виключаються всі конденсатори (обрив кола) та закорочуються всі індуктивності.

Параметри діалогового вікна (рис. 6.10) мають такі призначення:

ITL1 – максимальна кількість ітерацій приблизних розрахунків;

GMINSTEPS – розмір збільшення провідності у відсотках від *GMIN* (використовується за умови слабкої збіжності ітераційного процесу);

SRCSTEPS – розмір збільшення напруги живлення у відсотках від його номінального значення у разі варіації напруги живлення.

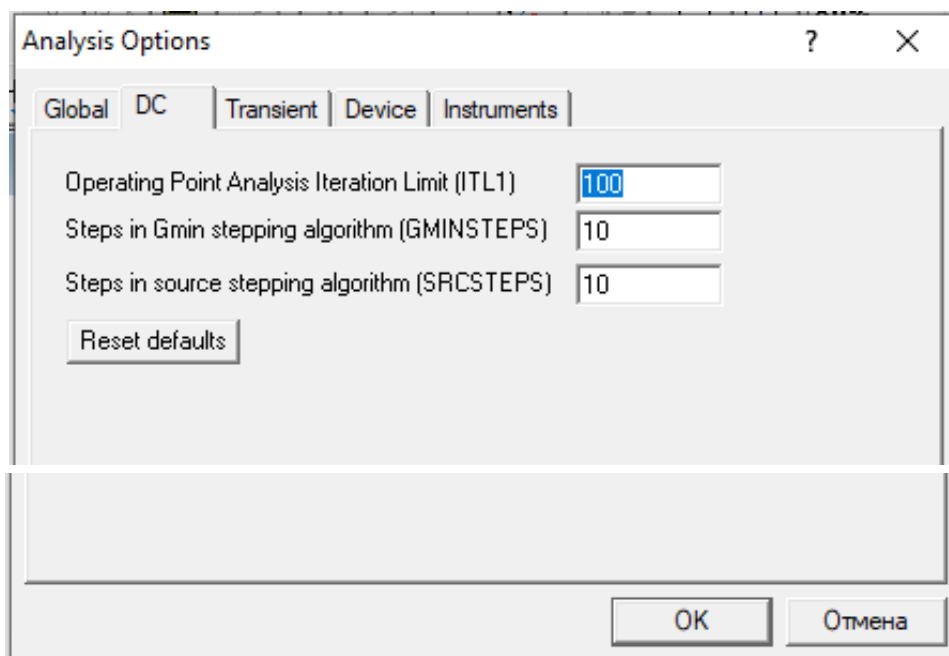


Рисунок 6.10 – Закладка DC

Закладка Transient команди *Analysis Options* налаштовує параметри режиму аналізу перехідних процесів (рис. 6.11).

Параметри цієї закладки мають такі призначення:

ITLA – максимальна кількість ітерацій для розрахунку однієї точки перехідних процесів;

METHOD – метод інтегрування системи диференціальних рівнянь;

TRAPEZOIDAL – метод Ейлера;

GEAR – метод Гіра;

TRTOL – константа, яка визначає точність розрахунків;
ACCT – дозвіл на виведення повідомлення про процес моделювання.

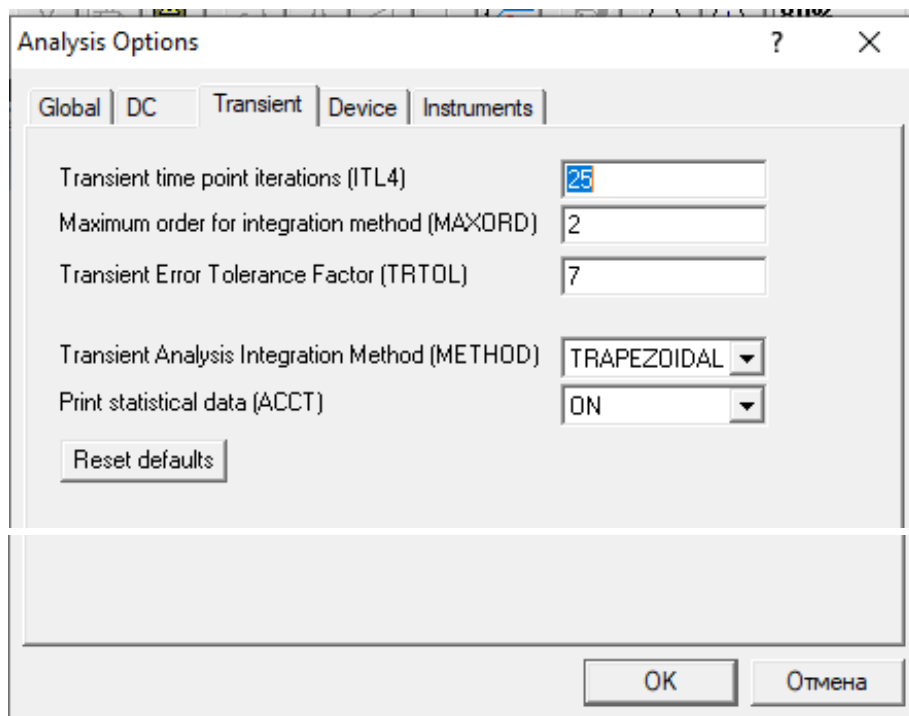


Рисунок 6.11 – Закладка Transient

Закладка Device команди Analysis Options (рис. 6.12) дає змогу обрати МОП-транзистори.

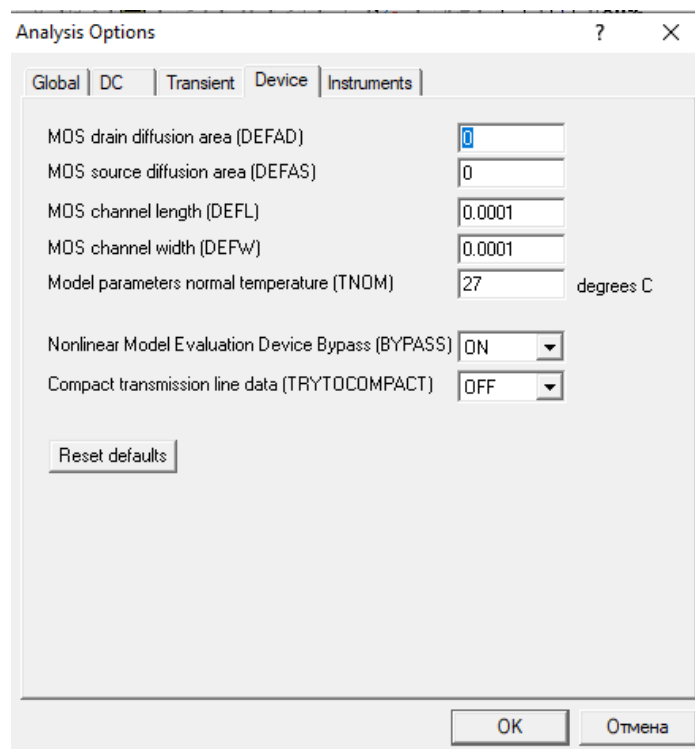


Рисунок 6.12 – Закладка Device

Параметри цієї вкладки мають такі призначення:

DEFAD – площа дифузійної області стоку, м²;

DEFAS – площа дифузійної області витoku, м²;

DEFLL – довжина каналів польового транзистора, м;

DEFW – ширина каналу, м;

TNOM – номінальна температура компонента;

BYPASS – вмикання або вимикання нелінійної частини моделі;

TRYTOSCOMPACT – вмикання або вимикання лінійної частини моделі компонента.

Закладка Instruments команди **Analysis Options** забезпечує налаштування параметрів контрольно-вимірювальних приладів і має такі параметри (рис. 6.13):

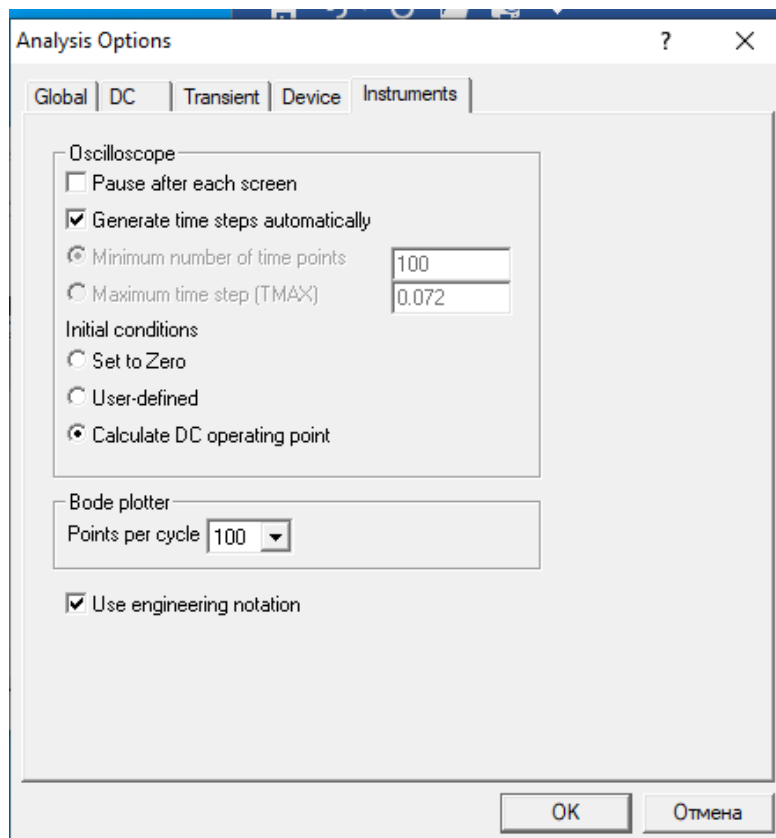


Рисунок 6.13 – Закладка Instruments

Pause after each screen – тимчасове призупинення моделювання після заповнення екрана осцилографа;

Generate time steps automatically – автоматичне установлення тимчасового кроку (інтервалу) виводу інформації на екран;

Minimum number of time points – мінімальна кількість точок, що зображуються на екрані за час спостереження (реєстрації);

TMAX – проміжок часу від початку до кінця моделювання;

Set to Zero – установлення в поточний стан контрольно-вимірювальних приладів перед початком моделювання;

User-defined – ручний пуск та зупинення процесу моделювання користувачем;

Calculate DC operating point – виконання розрахунку режиму за постійним струмом;

Points per cycle – кількість точок, що відображуються, у разі виводу амплітудно-частотних та фазо-частотних характеристик (Bode – plotter);

Use engineering notation – використання інженерної системи позначень одиниць вимірювання.

Закладка AC Frequency дає змогу розрахувати частотні характеристики (рис. 6.14).

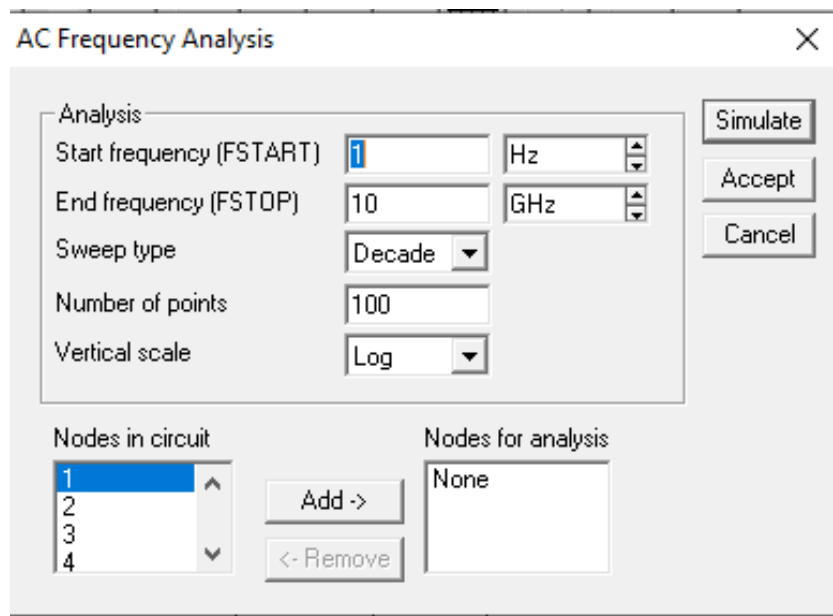


Рисунок 6.14 – Параметри закладки AC Frequency Analysis

Виконання команди починається з налаштування таких параметрів:

FSTART, *FSTOP* – межі частотного діапазону (мінімальне та максимальне значення частоти);

Sweep type – масштаб за горизонталлю;

Number of points – число точок, що розраховуються;

Vertical scale – масштаб за вертикаллю;

Nodes in circuit – перелік усіх вузлів кола;

Nodes for analysis – номери вузлів, для яких розраховуються характеристики схеми;

Simulate – кнопка запуску моделювання.

Закладка Transient розраховує перехідні процеси, вікно (рис. 6.15):

Initial conditions – устанавлення початкових умов моделювання;

Tstart – час початку аналізу перехідних процесів;

Tstop – час закінчення аналізу;

Generate time steps automatically – розрахунок перехідних процесів зі змінним кроком;

Tstep – тимчасовий крок виводу результатів моделювання на екран монітора. Команда виконує аналіз перехідних процесів (Transient).

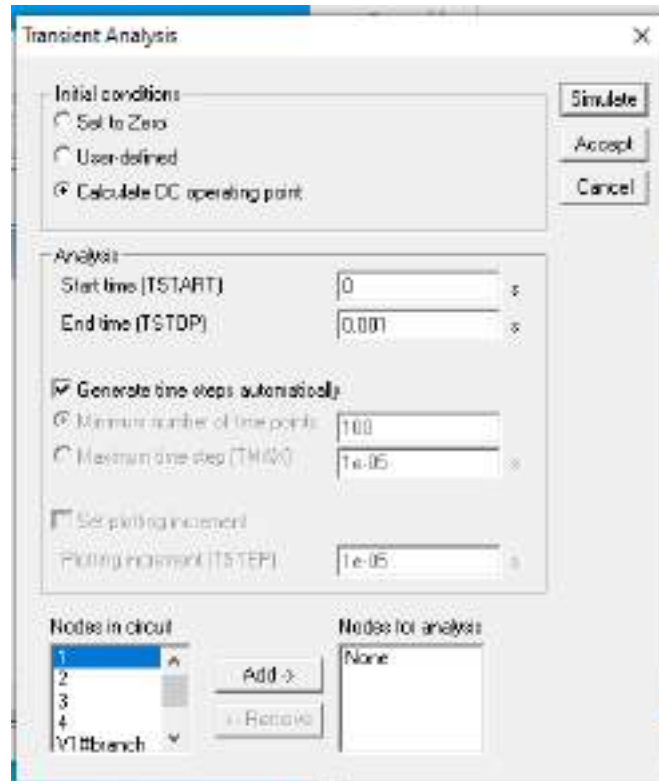


Рисунок 6.15 – Параметри закладки Transient Analysis

Закладка Fourier

Команда дає змогу проведення Фур'є-аналізу (спектрального аналізу). Діалогове вікно команди має такі пункти, (рис. 6.16).

Output node – номер контрольної точки (вузла), в якій аналізується спектр сигналу;

Fundamental frequency – основна частота коливань (частота першої гармоніки);

Number harmonic – кількість гармонік, які аналізуються;

Advanced – набір опцій для визначення структури сигналу, який аналізується за допомогою додаткових можливостей;

Result – виведення на екран розподілення фаз та амплітуд усіх гармонічних складових у вигляді безперервних функцій.

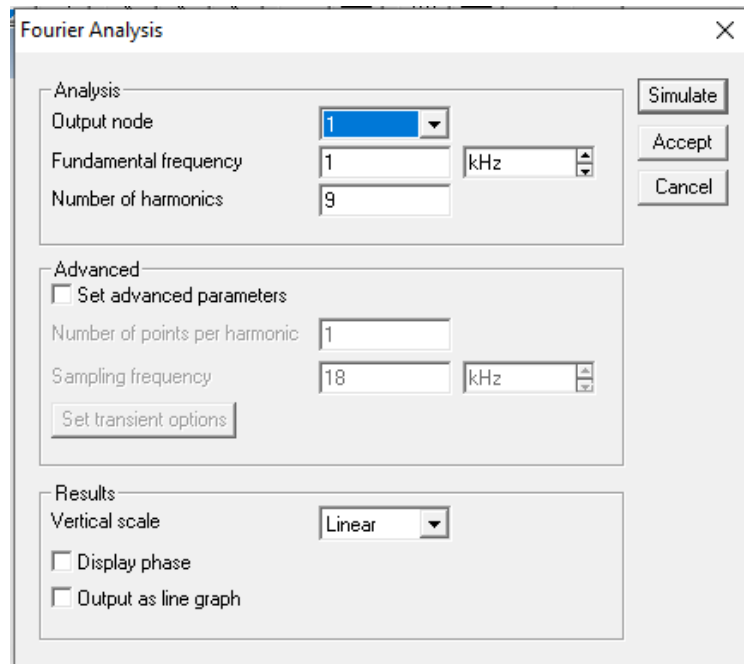


Рисунок 6.16 – Команда Фур'є-аналізу

Pole-Zero

Команда виконує розрахунок карти нулів і полюсів передавальної характеристики схеми, що моделюється. Ця команда доступна тільки у професійних пакетах. Діалогове вікно установки параметрів моделювання наведено на рис.6.17, на якому позначено:

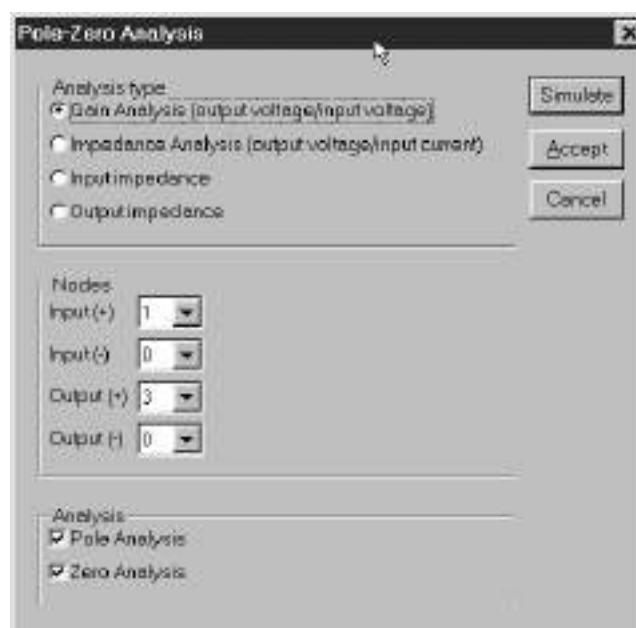


Рисунок 6.17 – Діалогове вікно команди Pole-Zero Analysis

Gain Analysis – розрахунок коефіцієнта передачі за напругою;
Impedance Analysis – розрахунок коефіцієнта передачі напруга-струм;
Input Impedance, Output Impedance – розрахунок вхідного та вихідного імпедансів (комплексних опорів);
Nodes – контрольні точки для вхідного та вихідного сигналів;
Pole Analysis – розрахунок полюсів коефіцієнта передачі;
Zero Analysis – розрахунок нулів коефіцієнта передачі.

Transfer Function

Команда виконує розрахунок передавальної функції схеми, що моделюється. Ця команда доступна тільки у професійних пакетах. У діалоговому вікні команди (рис. 6.18) задаються такі параметри:

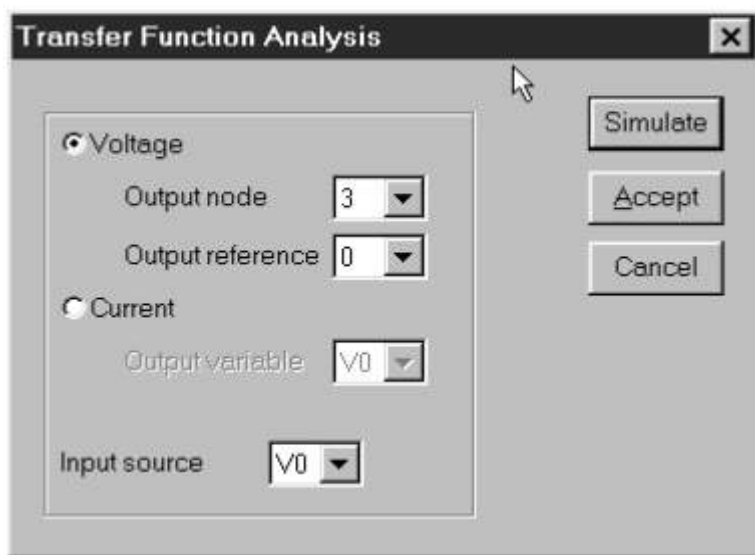


Рисунок 6.18 – Діалогове вікно команди Transfer Function

Voltage – розрахунок коефіцієнта передачі за напругою;
Output node – вибір вихідної контрольної точки (вузла);
Output reference – контрольна точка, щодо якої вимірюється напруга вихідного сигналу;
Current – розрахунок коефіцієнта передачі струму;
Output variable – вибір вихідної величини під час розрахунку коефіцієнта передачі по струму;
Input source – Вибір джерела вхідного сигналу.

За замовчуванням джерелом вхідного сигналу використовується джерело живлення VO. Отриманий при цьому коефіцієнт передачі може бути використаний для оцінки впливу завад джерела живлення (наприклад, пульсації) на вихідний сигнал.

Monte Carlo

Команда Monte Carlo призначена для проведення статистичного аналізу за методом Монте-Карло (розрахунок чутливості та розкиду характеристик схеми під час змінення параметрів компонентів). У діалоговому вікні команди, рис. 6.19, задаються такі параметри:

- *Number of runs* – кількість статистичних випробувань;
- *Global Tolerance* – відхилення параметрів резисторів, конденсаторів, індуктивностей, джерел змінного і постійного струму і напруги;
- *Seed* – початкові значення випадкової величини. Цей параметр визначає початкове значення датчика випадкових чисел і може встановлюватися в межах 1...32767;
- *Distribution type* – закон розподілення випадкової величини:
 - *Uniform* – рівноймовірне розподілення на відрізьку (–1,+ 1) та гаусове розподілення Gaussian – гаусівський розподіл на відрізьку (–1, + 1) з нульовим середнім значенням і середньоквадратичним відхиленням 0,25. Необхідний закон розподілу вибирається після натискання кнопки в полі опції, що розглядається.

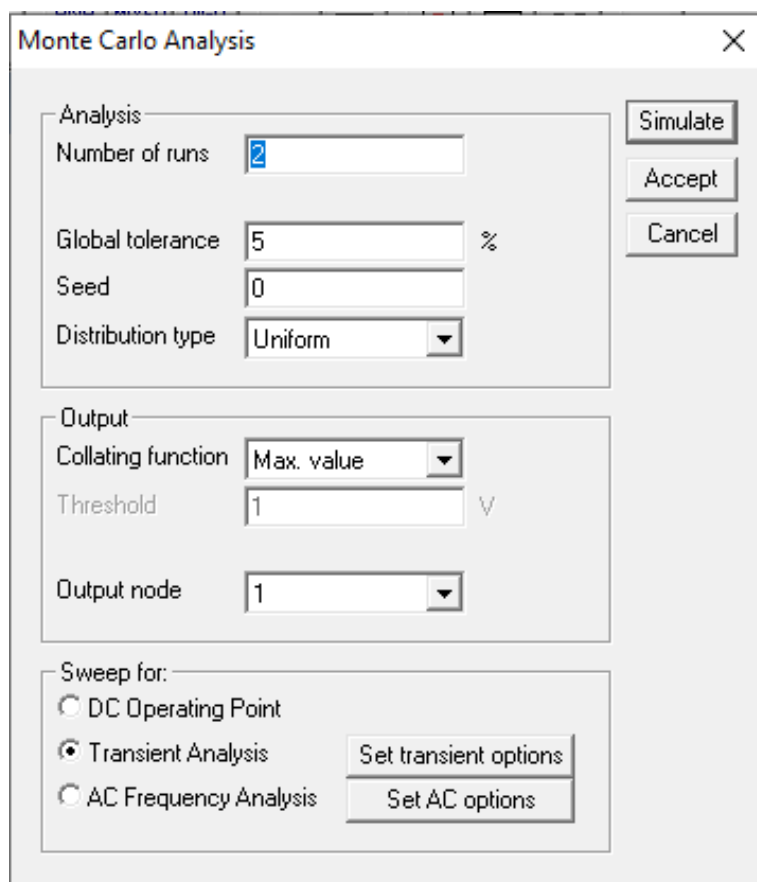


Рисунок 6.19 – Діалогове вікно команди Монте-Карло

Display Graphs

Цією командою викликаються на екран графіки результатів виконання однієї з команд моделювання. Якщо в процесі моделювання використано декілька команд цього меню, то результати їхнього виконання накопичуються і відображуються у вигляді закладок з найменуванням команд. Це дозволяє оперативню проглядати результати моделювання без його повторного проведення. Зазначимо, що виклик команди відбувається автоматично під час виконання першої команди з меню Analysis. Якщо у схемі використовується осцилограф, то після запуску моделювання та попередньо встановленої команди Display Graph у її вікні з'являється закладка Oscilloscope із зображенням осцилограми; якщо використовується вимірювач АЧХ–ФЧХ, з'являється закладка Bode із зображенням АЧХ і ФЧХ і т.д.

Меню Window, рис. 6.20, уміщує такі команди:

команда Arrange (Ctrl+ W) призначена для упорядкування інформації в робочому вікні шляхом перезапису екрана, при цьому виправляються спотворення зображень компонентів та з'єднувальних дротів;

команда Circuit призначена для виведення схеми на передній план;

команда Description (Ctrl + D) призначена для виведення на передній план опису схеми (якщо воно є) або вікна-ярлика для його підготовки.



Рисунок 6.20 – Діалогове вікно Меню Window

Меню Help

Меню Help, рис. 6.21, побудовано стандартним для Windows способом і вміщує стислі відомості за всіма командами програми, бібліотечними компонентами та вимірювальними приладами, а також відомості про саму програму.



Рисунок 6.21 – Діалогове вікно Меню Help

6.1.2 Склад бібліотек компонентів

У вкладці **Sources** наведено джерела сигналів та деякі джерела, що є керованими (рис. 6.22).

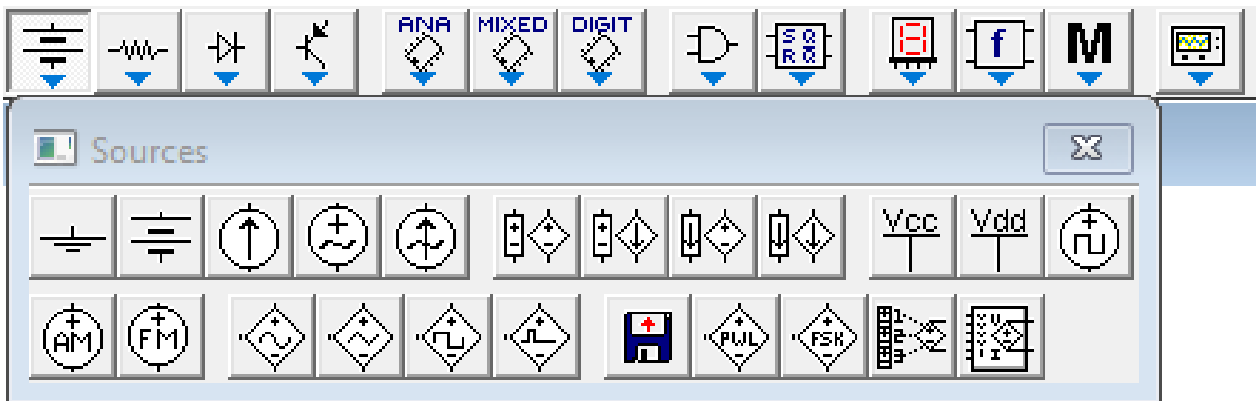




Рисунок 6.22 – Вкладка Sources

Призначення деяких джерел наведено нижче:


 *Ground* – заземлення (мітка) – загальна точка схеми;

 *Battery* – батарея – джерело постійної напруги;

 *DC Current Source* – джерело постійного струму;

 *AC Voltage Source* – джерело змінної синусоїдальної напруги;

 *AC Current Source* – джерело змінного синусоїдального струму;

Voltage-Controlled Voltage Source – джерело напруги, яке кероване напругою  (кероване джерело);

Voltage-Controlled Current Source – джерело напруги, кероване струмом (кероване джерело);

Current-Controlled Voltage Source – джерело струму, кероване напругою (кероване джерело);

Current-Controlled Current Source – джерело струму, кероване струмом (кероване джерело). *+Vcc Voltage*;

Source +Vdd Voltage Source – джерела фіксованої напруги +5 та +15 В;

Clock – генератор однополярних прямокутних імпульсів (тактових імпульсів), який виробляє послідовність прямокутних імпульсів;

AM Source – генератор амплітудно-модульованих коливань;

FM Source – генератор частотно-модульованих коливань;

Voltage – Controlled Sine Wave Oscillator – джерело напруги синусоїдальної форми, кероване напругою;

Voltage – Controlled Triangle Wave Oscillator – джерело напруги трикутної форми, кероване напругою.

Voltage – Controlled Square Wave Oscillator – джерело напруги прямокутної форми, кероване напругою;

Controlled One–Shot – мультивібратор, що очікує;

Piecewise Linear Source – джерело напруги з кусково-лінійною залежністю сигналу, що генерується, від часу, який визначається зовнішнім файлом (ім'я файла);

Voltage–Controlled Piecewise Linear Source – кусково-лінійне джерело напруги, кероване напругою;

Frequency–Shift–Keying Source – джерело синусоїдальних коливань із двома зумовленими частотами, вибір однієї з яких визначається зовнішнім сигналом (амплітуда, частота, частота);

Polynomial Source – поліноміальне джерело живлення (напруги);

Nonlinear Dependent Source – нелінійне джерело напруги;

Вкладка **Basic** – бібліотека базових компонентів, в якій зібрані всі пасивні компоненти та комунікаційні пристрої (рис. 6.23).

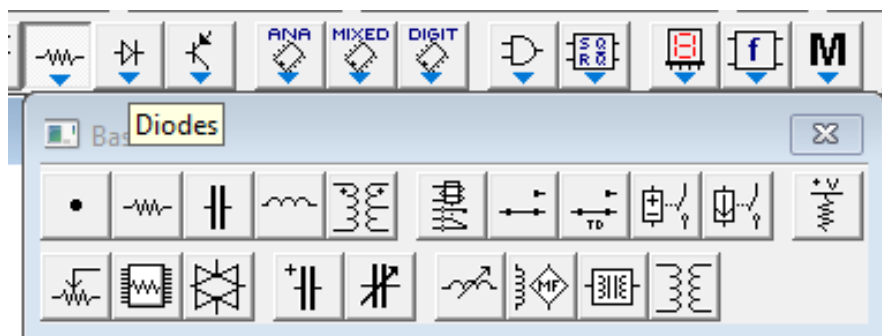





Рисунок 6.23 – Вкладка Basic

• Connector – точка з'єднання використовується для з'єднання не більше чотирьох дротів та створення контрольних точок.


 Resistor – опір резистора вимірюється в Омах і задається похідними величинами (від Ом до МОм).

 Capacitor – конденсатор (ємність). Ємність конденсатора вимірюється у Фарадах і задається похідними величинами (від пФ до Ф).

 Inductor – катушка (індуктивність). Індуктивність котушки (дроселя) вимірюється в Генрі та задається похідними величинами (від мкГн до Гн).

 Transformer– трансформатор.

 Polarized Capacitor – електролітичний конденсатор (ємність).

 Variable Capacitor – конденсатор змінної ємності, який діє аналогічно до потенціометра.

 Variable Inductor– котушка змінної індуктивності.

Вкладка **Diodes** вміщує напівпровідникові діоди



Рисунок 6.24 – Вкладка Diodes

Вкладка **Transistors** вміщує біполярні та польові транзистори

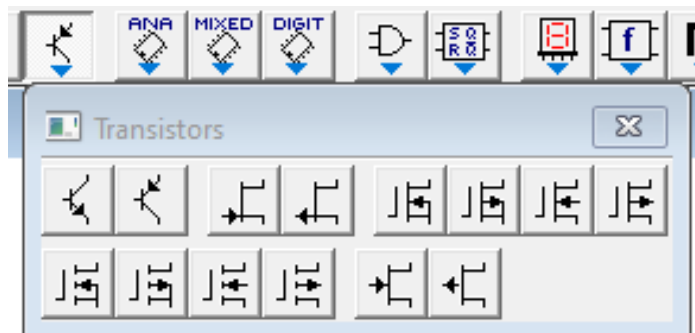


Рисунок 6.25 – Вкладка Transistors

Вкладка **Analog ICs** вміщує аналогові мікросхеми

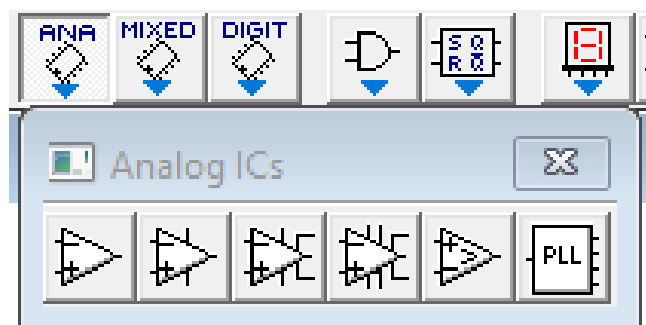


Рисунок 6.26 – Вкладка Analog ICs

Вкладка **Mixed ICs** вміщує мікросхеми змішаного типу.

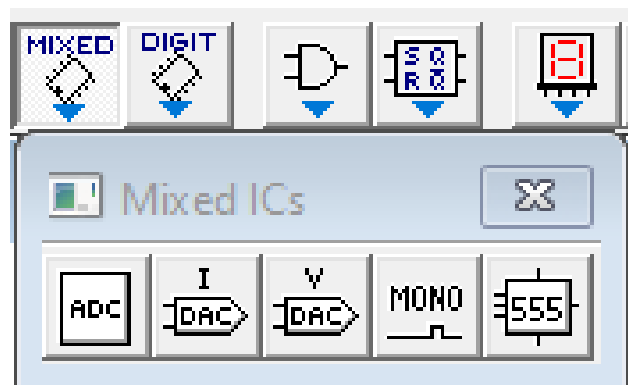


Рисунок 6.27 – Вкладка Mixed ICs

Вкладка **Digital ICs** вміщує цифрові мікросхеми.

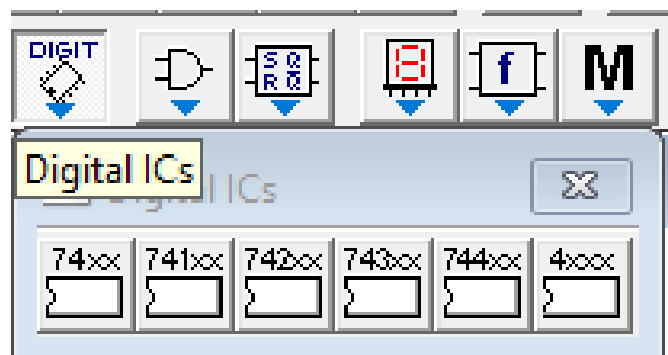


Рисунок 6.28 – Вкладка Digital Cs

Вкладка **Logic Gates** вміщує логічні елементи та логічні цифрові мікросхеми.

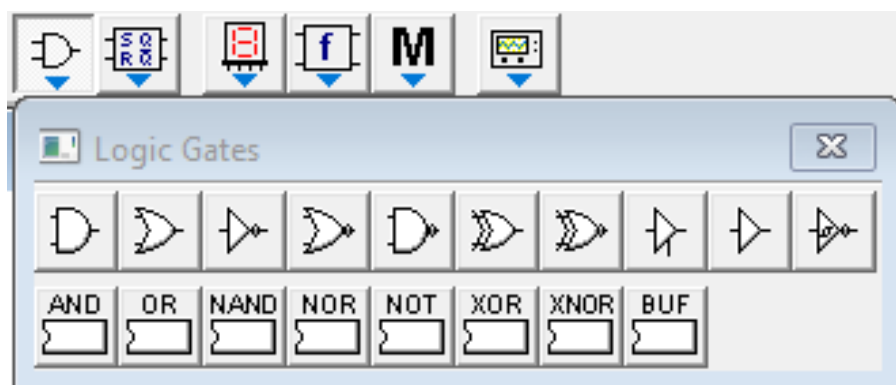


Рисунок 6.29 – Вкладка Logic Gates

Вкладка **Digital** вміщує комбіновані цифрові мікросхеми.

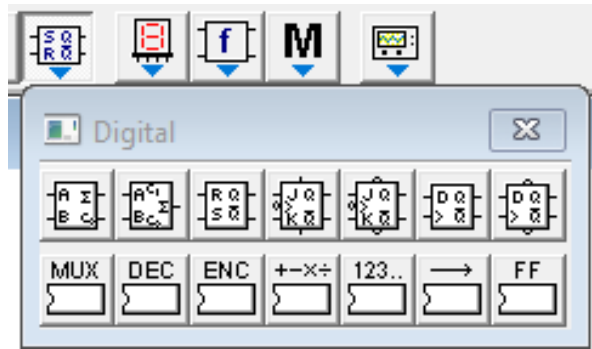


Рисунок 6.30 – Вкладка Digital

Вкладка **Indicators** вміщує цифрові амперметр та вольтметр, одиночні та багатосегментні світлоіндикатори, пристрої запису даних та звуковий сигнал.

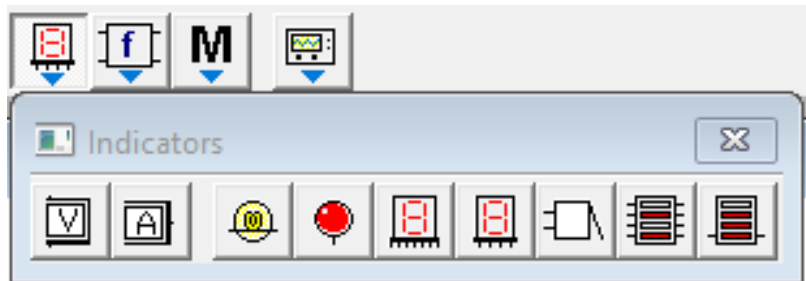


Рисунок 6.31 – Вкладка Indicators

Вкладка **Control** вміщує аналогові обчислювальні пристрої.

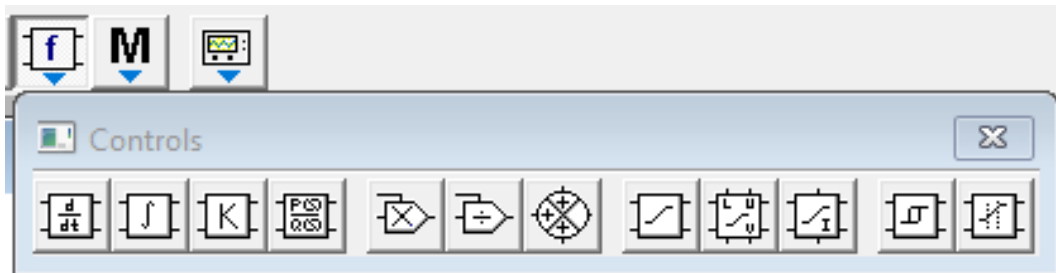


Рисунок 6.32 – Вкладка Control

Вкладка **Miscellaneous** містить компоненти змішаного типу (активні компоненти).

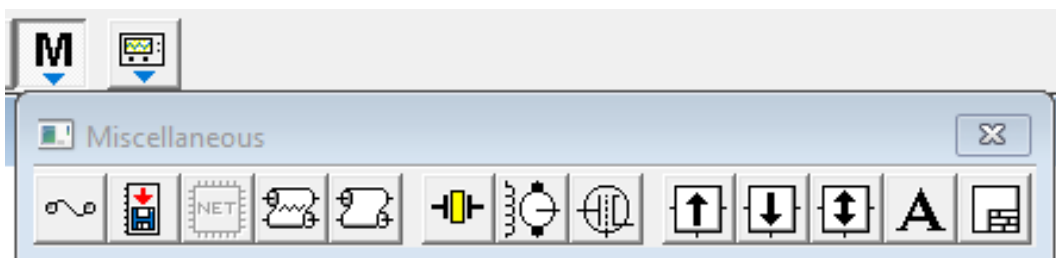



Рисунок 6.33 – Вкладка Miscellaneous

Призначення компонентів наведено нижче у напрямку зліва направо, де:

 Fuse – плавкий запобіжник – елемент, що захищає коло від протікання по ньому струму, який перевищує задану користувачем максимальну величину. Якщо в колі, в якому включений запобіжник, струм досягає встановленої користувачем величини, запобіжник розмикає коло, і струм у ньому стає рівним нулю.



Write Data – восьмирозрядний пристрій запису даних.



Netlist Component – набір макромоделей (підсхем) у форматі SPICE.



Lossy Transmission Line – лінія передачі з втратами, яка характеризується такими параметрами, як довжина лінії, опір на одиницю довжини, індуктивність на одиницю довжини, ємність на одиницю довжини, провідність на одиницю довжини, кількість послідовно ввімкнутих елементарних сегментів.



Lossless Transmission Line – лінія передачі без втрат з можливістю редагування хвильового опору, часу затримання розповсюдження сигналу в лінії, кількості послідовно ввімкнутих елементарних сегментів.



Crysta – кварцовий резонатор.



DC Motor – колекторний електродвигун постійного струму.



Triode Vacuum Tube – електровакуумний тріод.



Boost (Step-Up) Converter – імпульсний стабілізатор напруги підвищувального типу.



Buck (Step-Down) Converter – імпульсний стабілізатор напруги знижувального типу.



Buck-Boost Converter – імпульсний стабілізатор напруги.



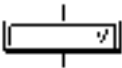
Textbox – тестовий блок.



Title Block – блок заголовка.

Вимірювальні прилади з каталогу індикаторів

Найпростішими приладами в ElectronicsWorkbench є вольтметр і амперметр, що розташовані в полі індикаторів (Indicators). Вони не вимагають налаштування, автоматично змінюючи діапазон вимірів. В одній схемі можна застосовувати кілька таких приладів одночасно, спостерігаючи струми в різних частинах ланцюга і напруги на різних елементах.

Вольтметр  використовується для виміру змінної і постійної напруги. Виділена товстою лінією сторона прямокутника, що зображує вольтметр, відповідає негативній клемі.

Подвійним натисканням клавіші мишки на зображенні вольтметра відкривається діалогове вікно для зміни параметрів вольтметра: виду вимірюваної напруги, внутрішнього опору, рис 6.34.

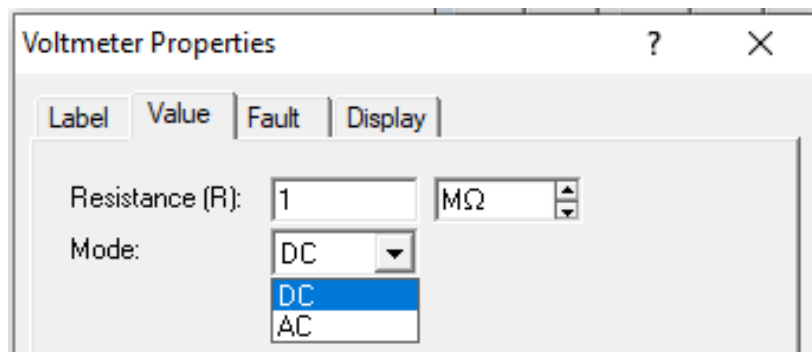
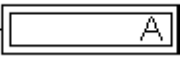


Рисунок 6.34 – Вікно параметрів вольтметра

Де R – величини внутрішнього опору. Величина внутрішнього опору вводиться з клавіатури в рядку Resistance, вид вимірюваної напруги (опція Mode) обирається зі списку. Під час вимірювання змінної синусоїдальної напруги (AC) вольтметр показуватиме діюче значення напруги.

Внутрішній опір вольтметра 1 МОм, встановлений за замовчуванням, у більшості випадків має незначний вплив на роботу схеми. Його значення можна змінити, однак використання вольтметра з дуже високим внутрішнім опором у схемах з низьким вихідним імпедансом може призвести до математичної помилки під час моделювання схеми.

Амперметр  використовується для вимірювання змінного і постійного струму. Виділена товстою лінією сторона прямокутника, що зображує амперметр, відповідає негативній клемі.

Подвійним натисканням клавіші мишки на зображенні амперметра відкривається діалогове вікно, рис 6.35, для зміни параметрів амперметра: виду вимірюваного струму, величини внутрішнього опору.

Величина внутрішнього опору вводиться з клавіатури в рядку Resistance, від вимірюваного струму (опція Mode) вибирається зі списку. Під час вимірювання змінного синусоїдального струму (AC) амперметр показуватиме його діюче значення. Внутрішній опір амперметра 1 мОм, установлене за замовчуванням, у більшості випадків не впливає на роботу схеми. Можна

знизити цей опір, однак використання амперметра з дуже низьким опором у схемах з високим вихідним імпедансом (відносно виводів амперметра) може призвести до математичної помилки під час моделювання роботи схеми.

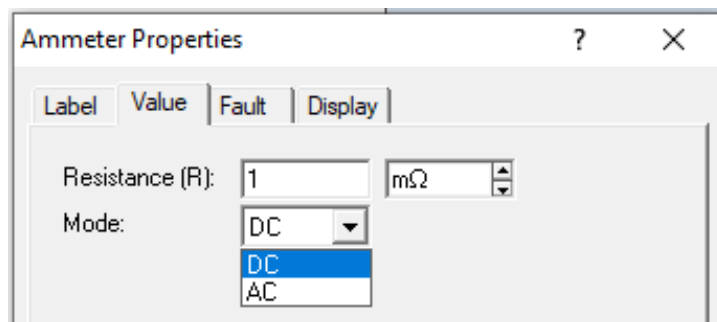


Рисунок 6.35 – Вікно параметрів амперметра

6.1.3 Вимірювальні прилади каталогу Instruments

Панель каталогу вимірювальних приладів містить 7 позицій, рис. 6.36.

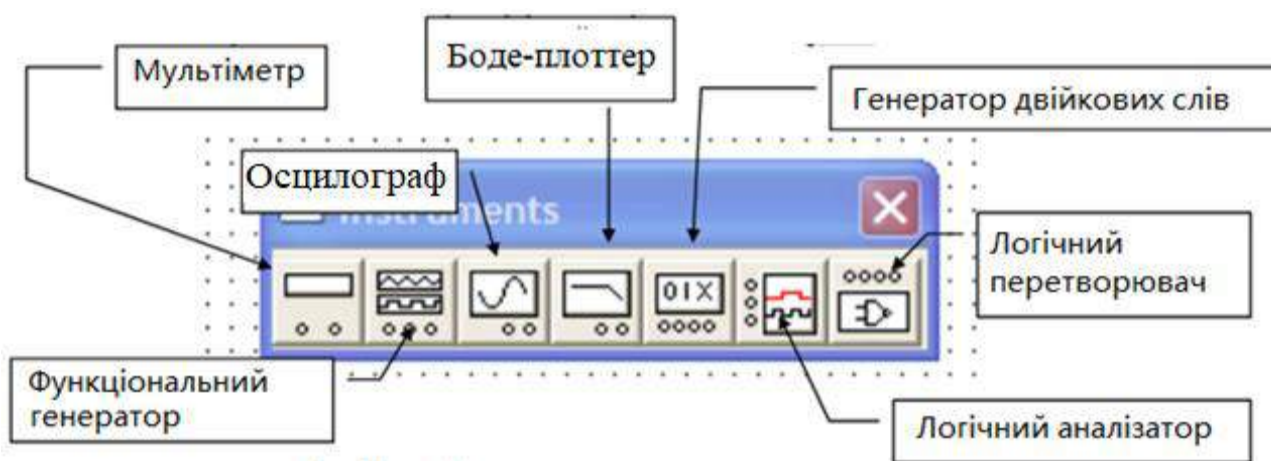



Рисунок 6.36 – Каталог вимірювальних приладів

Мультиметр  використовується для вимірювання: напруги (постійної й змінної), струму (постійного й змінного), опору, рівня напруги в децибелах. Для налаштування мультиметра потрібно подвійним клацанням мишки на його зменшеному зображенні відкрити його збільшене зображення. На збільшеному зображенні, рис. 6.37, натисканням лівої кнопки мишки вибирається: вимірювана величина по одиницях вимірювання – A , V , Ω або db ; вид вимірюваного сигналу – змінний або постійний; режим установки параметрів.

Натискання кнопки із символом «~» встановлює мультиметр для вимірювання діючого значення змінного струму і напруги, постійна

складова сигналу під час вимірювання не враховується. Для вимірювання постійних напруги і струму потрібно на збільшеному зображенні мультиметра натиснути кнопку із символом «—».



Рисунок 6.37 – Лицьова панель мультиметра

Як амперметр і вольтметр мультиметр використовується так само, як і стандартні прилади.

Мультиметр – єдиний в Electronics Workbench стандартний прилад, призначений для вимірювання опору. Для використання мультиметра як омметр його необхідно приєднати паралельно ділянці ланцюга, опір якого потрібно виміряти, на збільшеному зображенні мультиметра натиснути кнопку Ω і кнопку із символом «—», перемикання в режим вимірювання постійного струму. Включити схему. На табло мультиметра при цьому з'явиться виміряне значення опору.

Щоб уникнути помилкових показань, схема повинна мати з'єднання із землею й не мати контакту із джерелами живлення, які мають бути виключені зі схеми, причому ідеальне джерело струму має бути замінене розривом ланцюга, а ідеальне джерело напруги – короткозамкненою ділянкою.

Для вимірювання рівня напруги в децибелах на збільшеному зображенні мультиметра необхідно натиснути кнопку *db*.

Мультиметр підключається одним з виводів до точки, рівень напруги в якій потрібно виміряти, а іншим виводом – до точки, щодо якої проводиться вимір. Після включення схеми на табло мультиметра з'явиться виміряне значення рівня напруги. Рівень напруги в децибелах підраховується в такий спосіб:

$$dB = 20 \lg \frac{|U_{вх}|}{U_{оп}}$$

де $U_{вх}$ – напруга, прикладена до виводів мультиметра;

$U_{оп}$ – опорна напруга, стосовно якої вимірюється рівень напруги. За замовчуванням опорна напруга встановлена рівною 1 В. Клавішу *SETTINGS* мультиметра необхідно використовувати для налаштування параметрів, рис. 6.38.

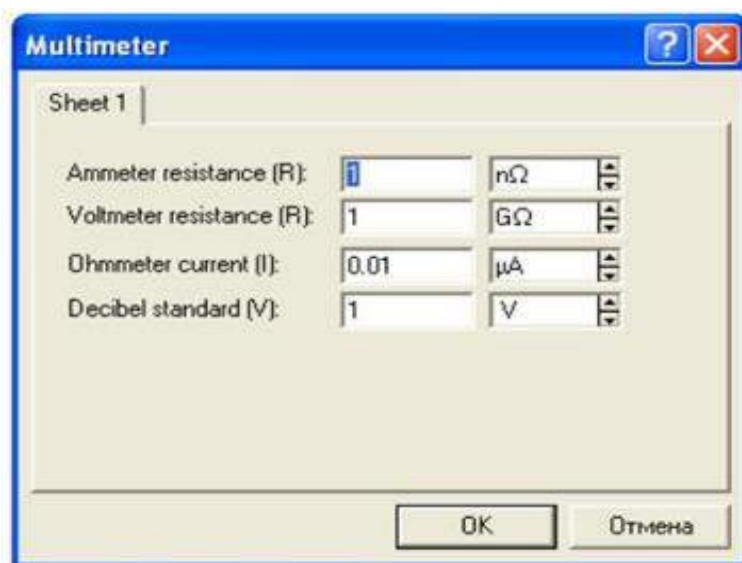



Рисунок 6.38 – Вікно параметрів мультиметра

Це стосується вхідного опору вольтметра, опору амперметра, вимірювального струму омметра, опорної напруги для відліку в децибелах.

Функціональний генератор є ідеальним джерелом напруги, що виробляє сигнали синусоїдальної, прямокутної чи трикутної форми. На екран виводиться зменшене зображення генератора . Середній вивід генератора під час підключення до схеми забезпечує загальну точку для відліку амплітуди змінної напруги. Для відліку напруги відносно нуля загальний вивід заземлюють. Крайні правий і лівий вивід використовують для подачі змінної напруги на схему. Напруга на правому виводі змінюється в позитивному напрямку відносно загального виводу, якщо напруга на лівому виводі у негативному.

Подвійним натисканням клавіші мишки на зменшеному зображенні відкривається збільшене зображення генератора, рис. 6.39, де можна задати такі параметри:

- форму сигналу;
- частоту вихідної напруги;
- шпаруватість;
- амплітуду вихідної напруги;
- постійну складову вихідної напруги.

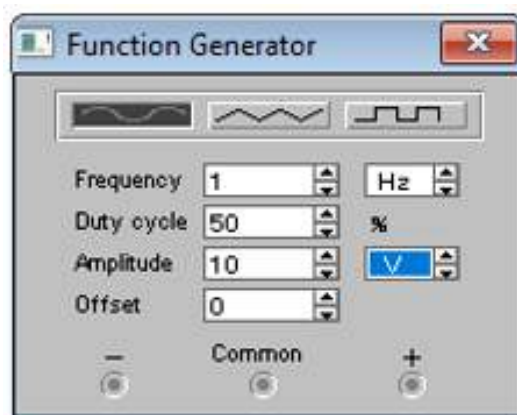


Рисунок 6.39 – Вікно параметрів


Для встановлення форми вихідного сигналу натисніть на кнопку з відповідним зображенням. Форму трикутного і прямокутного сигналів можна змінити, шляхом зменшення чи збільшення значення в полі DUTY CYCLE (шпаруватість). Цей параметр визначається для сигналів трикутної і прямокутної форми. Для трикутної форми напруги він задає тривалість (у відсотках від періоду сигналу) між інтервалом зростання напруги та інтервалом спаду. Встановивши, наприклад, значення 20, ми отримаємо тривалість інтервалу наростання 20% від періоду, а тривалість інтервалу спаду – 80%. Для прямокутної форми напруги цей параметр задає співвідношення між тривалостями позитивної і негативної частини періоду.

Частота генератора може регулюватися від 1Hz до 999MHz. Значення частоти встановлюється в рядку FREQUENCY за допомогою клавіатури і кнопок зі стрілками. У лівому полі встановлюється чисельне значення, у правому – одиниця виміру (Hz, kHz, MHz – Гц, кГц, МГц відповідно).

Амплітуда вихідної напруги може регулюватися від 0 мВ до 999 кВ. Значення амплітуди встановлюється в рядку AMPLITUDE за допомогою клавіатури і кнопок зі стрілками. У лівому полі встановлюється чисельне значення, у правому – одиниця виміру (V, m, V, k – мкВ, мВ, В, кВ відповідно).

Постійна складова змінного сигналу встановлюється в рядку OFFSET за допомогою клавіатури або кнопок зі стрілками. Вона може мати як позитивне, так і негативне значення. Це дозволяє отримати, наприклад, послідовність однополярних імпульсів.

Осцилограф, у програмі Workbench це двоканальний осцилограф і має два канали А та В з окремим регулюванням чутливості в діапазоні від 10 мкВ/діл ($\mu\text{V}/\text{Div}$) до 5кВ/діл (kV/Div) та регулюванням зміщення за вертикаллю (Y Position). Осцилограф, який імітується програмою Workbench,

є аналогом двопробеневого запам'ятовувального осцилографа і має дві модифікації: просту та розширену. Розширена адаптація апарата за своїми можливостями наближається до кращих цифрових запам'ятовувальних осцилографів. Через те, що розширена модель займає багато місця на робочому полі, рекомендується починати дослідження за простою моделлю, а для докладного дослідження процесів використовувати розширену модель. Осцилограф можна підключити до вже включеної схеми або під час роботи схеми переставити виводи до інших точок, зображення на екрані осцилографа зміниться автоматично. Шляхом подвійного натискання мишки по зображенню  відкривається зображення передньої панелі простої моделі осцилографа з кнопками керування, інформаційними полями й екраном (рис. 6.40).

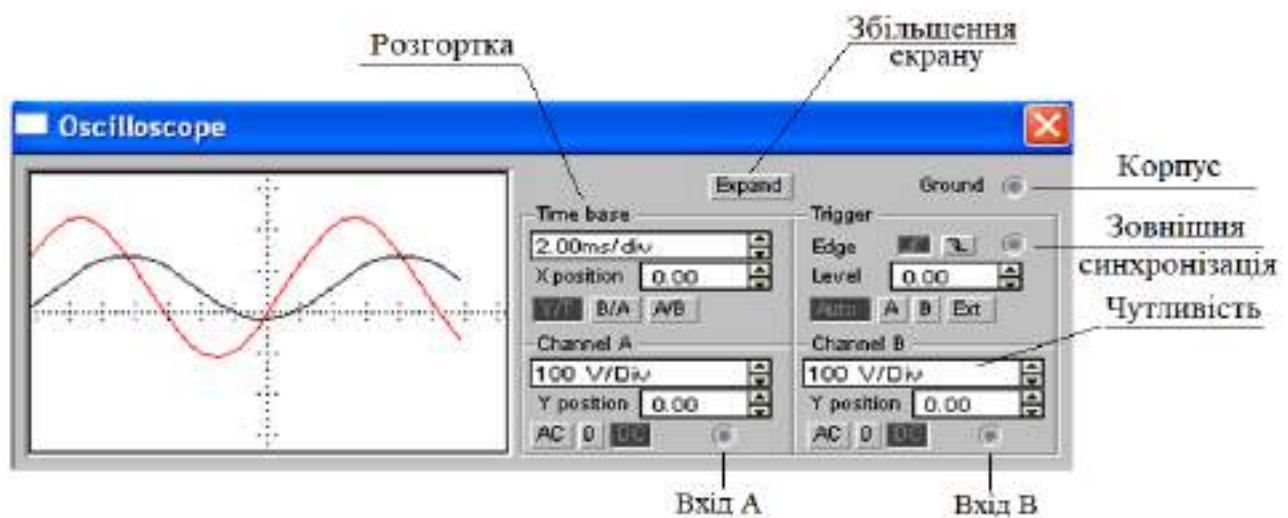


Рисунок 6.40 – Лицьова панель осцилографа

Для проведення вимірювань осцилограф потрібно налаштувати, для чого потрібно задати:

- 1) розташування осей, за якими відкладається сигнал;
- 2) потрібний масштаб розгортки по осях;
- 3) зміщення початку координат по осях;
- 4) режим роботи по входу: закритий чи відкритий;
- 5) режим синхронізації: внутрішній або зовнішній.

Налаштування осцилографа проводиться за допомогою полів керування, розташованих на панелі керування, яка має загальний вигляд і розділена на чотири поля керування:

- 1) горизонтальною розгорткою (Time base);
- 2) синхронізацією (Trigger);
- 3) каналом А;
- 4) каналом В.

Поле керування горизонтальною розгорткою (масштабом часу) служить для налаштування масштабу горизонтальної осі осцилографа у разі спостереження напруги на входах каналів А і В залежно від часу. Часовий масштаб задається в: с/діл, мс/діл, нс/діл (s/div, ms/div, ns/div) відповідно. Величину одного поділу можна встановити від 0,1 нс до 1 с. Масштаб може дискретно зменшуватися на один крок шляхом натискання мишею на кнопки праворуч від поля. За допомогою кнопок, розташованих у полі рядка X Position, можна дискретно зрушувати початок осцилограми по горизонтальній осі. Нижче цього поля розташовані три кнопки: Y/T, A/B, B/A, що дають змогу задавати різновид залежності сигналів, що відображуються (режими розгортки).

У режимі Y/T (звичайний режим, увімкнений за замовчуванням) реалізуються такі режими розгортки: за вертикаллю – напруга сигналу, за горизонталлю – час. У цьому режимі тривалість розгортки (Time Base) може бути задана в діапазоні від 0,1 нс/діл (ns/div) до 1 с/діл (s/div) із можливістю установлення зміщення в тих самих одиницях за горизонталлю, тобто по осі X (X Position).

Шляхом натискання на кнопку A/B по вертикальній осі відкладається амплітуда напруги на вході каналу А, по горизонтальній осі – каналу В, а шляхом натискання на кнопку B/A – навпаки. При цьому масштаб осей визначається за допомогою установлення відповідних каналів.

У режимах A/B і B/A можна спостерігати частотні й фазові зсуви (фігури Ліссажу), петлі гістерезису, вольт-амперні характеристики тощо.

Дві нижні частини панелі осцилографа є полями керування відображенням сигналів, поданих на входи каналів А і В відповідно. Верхнє вікно в поле дає змогу керувати масштабом осі напруги, що відображається, по вертикальній осі. Ціна ділення може дискретно встановлюватися від 10 $\mu\text{V}/\text{div}$ до 5 kV/div . Для отримання зручного для роботи зображення на екрані осцилографа перед початком експерименту потрібно встановити масштаб, відповідний очікуваній напрузі. Нижче розташовано поле, яке дає змогу дискретно зрушувати вісь X вгору або вниз. Для того щоб розвести зображення від каналів А і В, потрібно скористатися зрушенням по осі Y (Y Position) для одного або двох каналів.

Три нижні кнопки реалізують різні режими роботи осцилографа по входу. Режим AC призначено для спостереження тільки сигналів змінного струму (його ще називають режимом «закритого входу», оскільки в цьому режимі на вході підсилювача вмикається розділовий конденсатор, який не пропускає постійну складову сигналу). Шляхом натискання на кнопку 0 вхід осцилографа з'єднується із загальним виводом осцилографа, що дає змогу визначити

положення нульової позначки по осі Y. У режимі 0 вхідний затискач замикається на землю.

У режимі DC (увімкнене за замовчуванням) можна проводити осцилографічні вимірювання як постійного, так і змінного струму. Цей режим ще називають режим «відкритого входу», оскільки вхідний сигнал надходить на вхід вертикального підсилювача безпосередньо. З правої сторони від кнопки DC розташовано вхідний затискач.

Верхнє праве поле управління Trigger визначає момент початку відображення осцилограми на екрані осцилографа.

Кнопки в рядку Edge налаштовують момент запуску осцилограми по фронту або по зрізу імпульсу на вході синхронізації. Поле Level дає змогу задавати рівень, у разі перевищення якого запускається осцилограма. Значення рівня можна зрушити на три ділення вниз або вгору.

Осцилограф має чотири режими синхронізації:

1. Автоматичний режим (Auto) – запуск осцилограми проводиться автоматично під час підключення осцилографа до схеми або під час її включення. Коли «промінь» доходить до кінця екрану, осцилограма знову прописується початку екрану (новий екран).

2. Режими запуску по входу А чи В, в яких сигналом, що запускає, є сигнал, який надходить на відповідний вхід.

3. Режим «Зовнішній запуск» (EXT – external). У цьому разі сигналом запуску є сигнал, що надходить на вхід синхронізації.

Натискання кнопки Expand на панелі простої моделі відкриває вікно розширеної моделі осцилографа, рис.6.41.

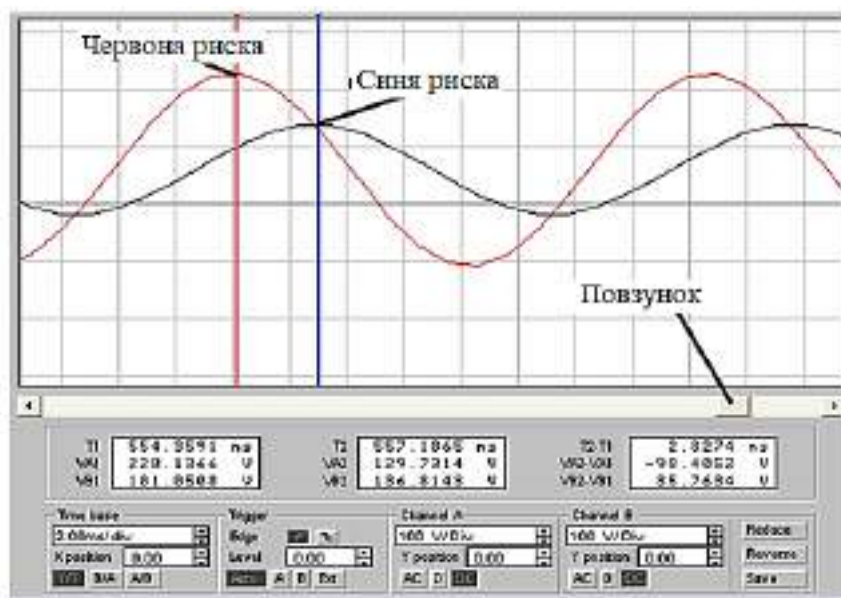


Рисунок 6.41 – Розширена лицьова панель осцилографа

Панель розширеної моделі осцилографа на відміну від простої моделі розташована під екраном і доповнена трьома інформаційними табло, на які виводяться результати вимірів. Крім того, безпосередньо під екраном знаходиться лінійка прокрутки, що дає змогу спостерігати будь-який часовий відрізок процесу від моменту включення до моменту виключення схеми. Загалом, розширена модель осцилографа це зовсім інший прилад, що дає змогу набагато зручніше і точніше проводити чисельний аналіз процесів.

На екрані осцилографа розташовані два курсора синього та червоного кольору, за допомогою яких можна виміряти миттєві значення напруг у будь-якій точці осцилограми. Для цього потрібно просто перетягнути мишкою курсори за трикутники в їхній верхній частині в необхідне положення. Координати точок перетину першого курсора з осцилограмами відображаються на лівому табло, координати другого курсора – на середньому табло. На правому табло відображаються значення різниць між відповідними координатами першого і другого курсорів. Результати вимірювань, які отримані за допомогою розширеної моделі осцилографа, можна записати у файл командою Save (Зберегти) і в діалоговому вікні ввести ім'я файла. Для повернення до колишнього зображення осцилографа, потрібно натиснути клавішу Reduce, розташовану в правому нижньому кутку.

Для зручності роботи можна змінити колір провідників, підключених до входів осцилографа. Для цього необхідно подвійним клацанням лівої кнопки мишки відкрити властивості провідника і вибрати бажаний колір. Після виконання цієї операції осцилограми матимуть колір відповідних провідників.

BodePlotter – графічний пристрій, який використовується як вимірювач амплітудно-частотних (далі АЧХ) та фазо-частотних (далі ФЧХ) характеристик схеми. Боде-плотер вимірює відношення амплітуд сигналів у двох точках схеми та фазовий зсув між ними. Відношення амплітуд сигналів може вимірюватися в децибелах. Для вимірювання Боде-плотер генерує власний спектр частот, діапазон якого можна задавати під час налаштування приладу.

Частота змінного джерела в досліджуваній схемі ігнорується, проте схема має включати будь-яке джерело змінного струму. Боде-плотер має чотири затискачі: два вхідних (IN) і два вихідних (OUT). Для вимірювання відношення амплітуд або фазового зсуву потрібно підключити позитивні виводи входів IN і OUT (ліві виводи відповідних входів) до досліджуваних точках, а два інших виводи – заземлити. Шляхом подвійного натискання мишкою по зображенню Боде-плотера відкривається його збільшене зображення (рис. 6.42).

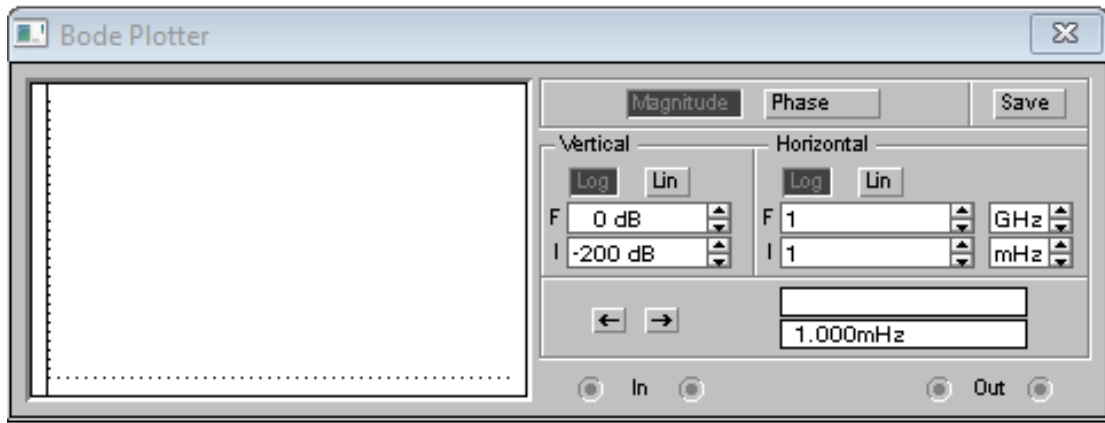


Рисунок 6.42 – Лицьова панель Боде-плотера

Верхня панель плотера задає різновид отримуваної характеристики: АЧХ або ФЧХ. Для отримання АЧХ потрібно натиснути кнопку Magnitude, для отримання ФЧХ – кнопку Phase. Ліва панель керування (Vertical) задає:

- початкове (I – initial) і кінцеве (F – final) значення параметрів, що відкладаються по вертикальній осі;
- вид шкали вертикальної осі – логарифмічна (LOG) або лінійна (LIN).

Права панель управління (Horizontal) налаштовується аналогічно.

У разі отримання АЧХ по вертикальній осі відкладається відношення напруг:

- в лінійному масштабі від 0 до $10E9$;
- в логарифмічному масштабі від -200 dB до 200 dB.

При отриманні ФЧХ по вертикальній осі відкладаються градуси від -720 до $+720$. По горизонтальній осі завжди відкладається частота в герцах або в похідних одиницях. На початку горизонтальної шкали розташований курсор, який можна переміщати натисканням на кнопки зі стрілками, розташованими праворуч від екрана, або переміщувати за допомогою мишки. Координати точки перетину курсора з графіком характеристики виводяться на інформаційних полях знизу справа. За допомогою Боде-плотера можна побудувати топографічну діаграму на комплексній площині для будь-якої схеми.

Word Generator – генератор слів (кодовий генератор) використовується для задання цифрових послідовностей у схему. Цей прилад дуже багатофункціональний і може використовуватися для вирішення різноманітних завдань – від перевірки працездатності схеми до розробки програмованих впливів на цифрову схему. Інтерфейс цього приладу показаний на (рис. 6.43).

За допомогою генератора слів можна виробити 1024 цифрових слова з розрядністю до 16. Перелік слів відображається у вікні ліворуч, там їх можна і редагувати. Адреса слова може змінюватися від 0000 до $03ff$. На схему

виводиться спочатку зменшене зображення генератора слів .

Для відкриття кодового генератора необхідно двічі натиснути на його зменшеному зображенні.

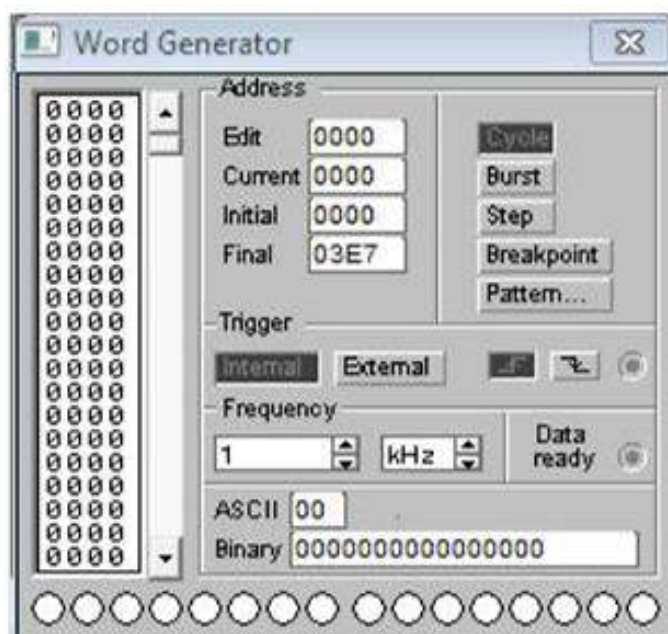


Рисунок 6.43 – Вікно кодового генератора

На шістнадцять виходів у нижній частині генератора паралельно подаються біти слова, що генерується. Послідовність слів можна вводити або вручну або вибрати одну з типових послідовностей у вікні налаштувань генератора слів.

Введення слів можна проводити у шістнадцятковій системі у вікні з переліком слів ліворуч, або у вікні *Binary*, або у вікні *ASCII* за допомогою мишки та клавіатури: шляхом натискання на ліву кнопку мишки виділяється потрібний біт, а введення значення виконується з клавіатури. Для подальшого використання встановленого набору слів (шаблону) необхідно його зберегти натисканням кнопки *Pattern...* на панелі генератора слів із подальшим вибором команди *Save* і введенням ім'я файла. Шаблон зберігається у вигляді файла з розширенням **.dri*. Для подальшої роботи з шаблоном він відкривається за допомогою команди *Pattern, Open*. Генератор може працювати в трьох режимах:

- 1) безперервний (усі слова циклічно передаються на вихід генератора протягом необхідного часу);
- 2) циклічний (на вихід генератора одноразово послідовно надходять усі слова);

3) покроковий (щоразу після подачі чергового слова на вихід генератор зупиняється).

Для зміни режиму роботи генератора необхідно натиснути кнопки *Cycle*, *Burst* та *Step*, які переводять генератор у безперервний, у циклічний та у покроковий режим.

Вікно на лівій частині генератора містить 1023 слова. Виділенням мишкою відзначається слово, активне в цей момент. Значення цього слова відображаються:

- у шістнадцятковій системі (ліве вікно),
- у двійковій системі (вікно Binary);
- у міжнародній системі кодів (вікно ASCII).

Для переривання роботи генератора необхідно ще раз натиснути кнопку *Cycle* або комбінацію клавіш *CTRL + T* на клавіатурі.

На панелі «Address» розташовані поля, в яких можна переглядати адресу змінного слова (тобто того, на якому стоїть курсор у полі лівого вікна) і адресу поточного слова в полі «Current», а також задавати початкове і кінцеве значення адреси генерованих слів у полях введення з назвами «Initial» і «Final» відповідно.

Кнопка *Cycle* – переводить генератор у циклічний режим. У цьому режимі генератор виробляє слова, розташовані за адресами від значення вказаного в полі введення «Initial» до адреси, вказаної в полі «Final». Після досягнення адреси, вказаної в полі «Final» цикл повторюється.

Кнопка *Burst* – дозволяє подати разову послідовність слів. У цьому режимі генератор також формує слова, розташовані за адресами від значення вказаного в полі введення «Initial» до адреси вказаної в полі «Final», але після досягнення адреси вказаної в полі «Final» робота генератора зупиняється.

Кнопка *Step* – дозволяє подавати послідовність слів у покроковому режимі. З кожним натисканням кнопки адреса формується, інкрементується.

Кнопка *Breakpoint* – дозволяє встановлювати точку зупинки (переривання). Щоб встановити точку зупинки, необхідно в полі зі списком слів вибрати потрібну позицію (слово) і натиснути на цю кнопку. Після досягнення точки зупинки генератор зупиняється (виконання циклу, якщо генератор працює у цьому режимі, переривається).

Вікно налаштувань генератора слів, рис. 6.44 відкривається під час натискання на кнопку *Pattern*, у ньому можна задати режим його роботи, очистити список слів, відкрити або зберегти послідовність слів у файлі.

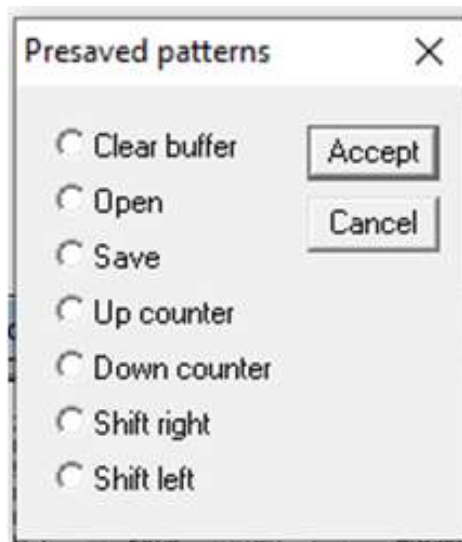


Рисунок 6.44 – Вікно налаштувань генератора слів

У вікні налаштувань містяться такі пункти:

«Clear buffer» – очистити перелік слів. Після очищення переліку слів можна ввести їхні значення вручну, або вибрати одну з чотирьох типових послідовностей (ці послідовності – «Up counter», «Down counter», «Shift right» або «Shift left»);

«Open» – відкрити послідовність слів із файла;

«Save» – зберегти поточну послідовність слів у файлі (розширення отриманого файла [*.dp]);

«Up counter» – генерація слів у режимі лічильника, що підвищує;

«Down counter» – генерація слів у режимі знижувального лічильника;

«Shift right» – циклічне зрушення одиниці вправо;

«Shift left» – циклічний зсув одиниці вліво;

Поле Frequency дозволяє встановити числове значення частоти зміни слів, в поле можна встановити множник частоти.

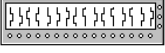
Панель керування *Trigger* визначає режим синхронізації, момент початку роботи генератора.

Для формування тактових імпульсів генератор має вихід синхроімпульсів. Сигнали на цьому виході формуються з періодом, що дорівнює одному такту лінійки цифрових послідовностей. Таким чином, генератор дозволяє отримувати синхронізовані цифрові послідовності, що мають максимальну довжину 16 тактів, після чого процес формування послідовності буде початий спочатку.

У режимі *External* (зовнішня синхронізація) передача слів на вихід генератора синхронізується за допомогою імпульсів, що надходять на вхід запуску. З приходом кожного імпульсу на виході генератору видається

одне слово. Момент запуску можна задати за позитивним або негативним фронтом імпульсу, що синхронізує.

На виході Data Ready генератора з'являється одиничний сигнал після формування чергового слова.

Logic Analyzer – Логічний аналізатор. У процесі перенесення логічного аналізатора з бібліотеки Instruments на робоче поле з'являється його зменшене зображення . При встановленні покажчика маніпулятора мишка на цьому зображенні і подвійним натисканням лівої клавіші маніпулятора відкривається інтерфейс аналізатора, рис. 6.45.

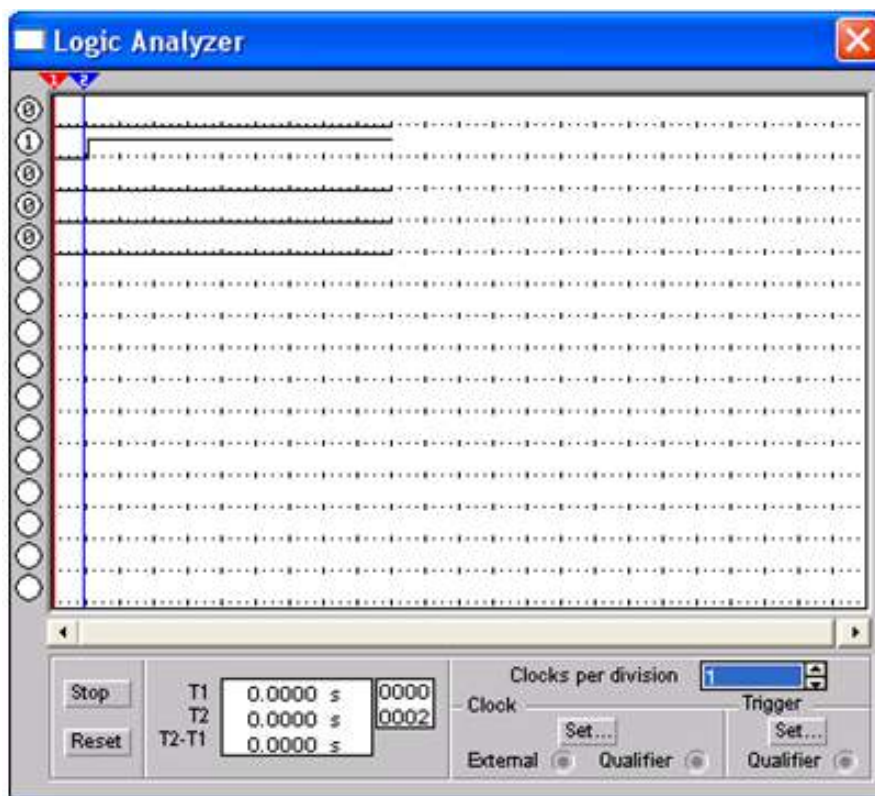


Рисунок 6.45 – Інтерфейс логічного аналізатора

Логічний аналізатор підключається до досліджуваної схеми за допомогою виводів у його лівій частині.

За аналогією з осцилографом, аналізатор забезпечений двома візирними лінійками синього та червоного кольору, за допомогою яких можна виміряти миттєві значення часу у будь-якій точці осцилограми. Для цього потрібно просто перетягнути мишкою курсори за трикутники в їхній верхній частині в необхідне положення, що дозволяє отримувати точні відліки часових інтервалів T1, T2 і T2–T1, які відображаються у спеціальному полі на панелі приладу. Аналізатор також має лінійку прокручування по горизонталі, що дозволяє аналізувати процеси на великому часовому інтервалі.

В пункті «Clocks per division» можна вибрати, скільки вибірок припадатиме на один поділ. Число вибірок на поділ може бути: 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 і 128.

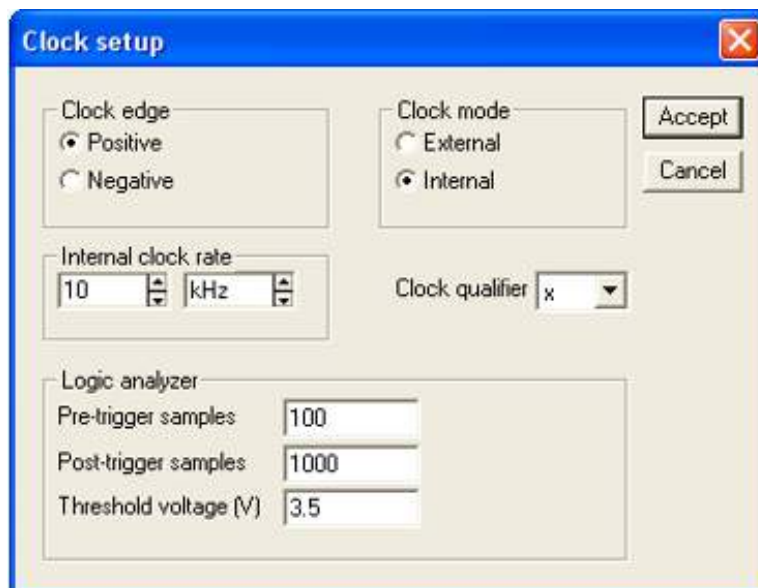


Рисунок 6.46 – Меню Set

У блоці *Clock* є клеми для підключення як звичайного (*External*), так і виборчого (*Qualifier*) джерела сигналів, що запускають, параметри яких можуть бути встановлені за допомогою меню, викликаного кнопкою Set, рис. 6.46.

Запуск генератора можна проводити за переднім (*Positive*) або заднім (*Negative*) фронтом сигналу (*Clock edge*) з використанням зовнішнього (*External*) або внутрішнього (*Internal*) джерела (*Clock mode*). У вікні *Clock qualifier* керування синхронізацією логічного аналізатора по входу *qualifier* можна встановити значення логічного сигналу (0, 1 або X), за якого проводиться запуск аналізатора. У вікні *Internal clock rate* – встановлюється частота проходження імпульсів внутрішнього джерела синхросигналів.

Блок «*Logic analyzer*» – це налаштування логічного аналізатора. На цій панелі можна встановити три режими:

- «*Pre-trigger samples*» – розмір pre-буфера;
- «*Post-trigger samples*» – розмір post-буфера;
- «*Threshold voltage*» – Порогова напруга.

Правий нижній вхід на панелі «*Trigger*», рис. 6.45, використовується для подачі синхронізувальних імпульсів. Під час натискання на кнопку Set на панелі «*Trigger*» з'явиться вікно «*Trigger patterns*» («Властивості тригера»), рис. 6.47.

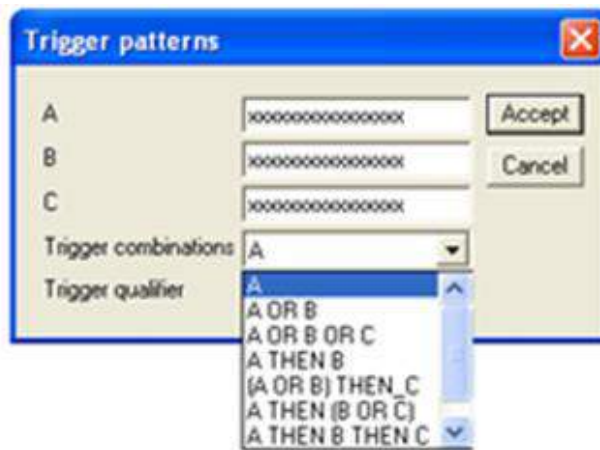


Рисунок 6.47 – Встановлення опцій тригера

Тут можна налаштувати властивості тригера.

Додаткові умови запуску аналізатора вибираються за допомогою цього діалогового вікна. У вікні в каналах А, В і С можна задати потрібні бінарні 16-розрядні комбінації сигналів і потім у рядку *Trigger combinations* встановити додаткові умови відбору. Перерахуємо деякі з них:

A OR B – запуск аналізатора від каналу А або В;


A OR B OR C – запуск аналізатора від каналу А або В або С;

A THEN B – запуск аналізатора від каналу А, якщо сигнал у каналі В дорівнює 1;

(A OR B) THEN C – запуск аналізатора від каналу А чи В, якщо сигнал у каналі С дорівнює 1.

A THEN (B OR C) – запуск аналізатора від каналу А, якщо сигнал у каналі В або С дорівнює 1.

Часові діаграми сигналів на екрані 16-канального логічного аналізатора зображуються у вигляді прямокутних імпульсів. Крім того, круглі вікна в лівій частині аналізатора показують поточний стан входів аналізатора. Кожне вікно відповідає одному з його входів. Рівні сигналів, які в поточний момент надходять на вхід аналізатора, відображаються на екрані праворуч.

Logic Converter – логічний перетворювач  – це прилад, який не має аналогів у реальному житті, і призначений для виконання різних функціональних перетворень у схемі. За допомогою логічного перетворювача можна здійснювати такі операції:

- 1) отримання таблиці істинності досліджуваної схеми;
- 2) перетворення таблиці істинності в логічний вираз;
- 3) перетворення логічного висловлювання на таблицю істинності;
- 4) створення логічних схем за заданим логічним виразом;

5) синтез логічних схем на елементах I–III за заданим логічним виразом.

На екран виводиться зменшене зображення логічного перетворювача



, яке може бути розгорнуте, (рис. 6.48).

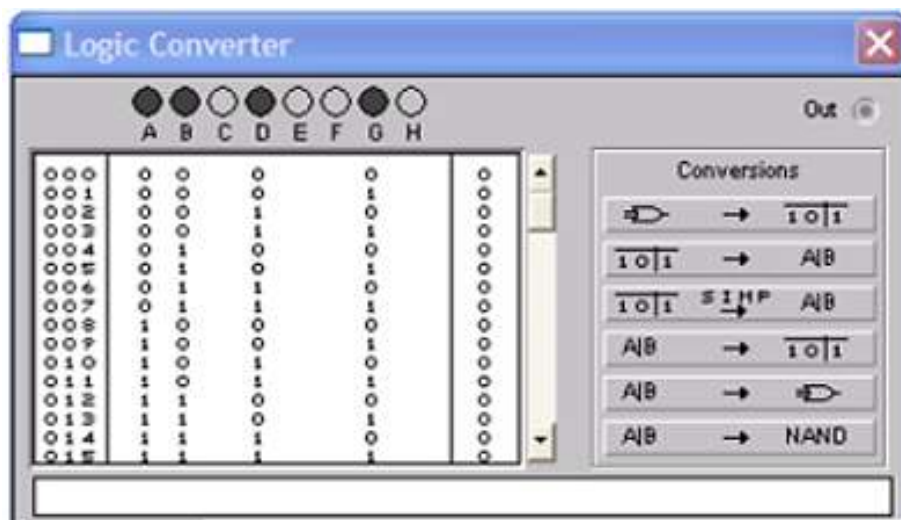




Рисунок 6.48 – Зображення логічного перетворювача

Перетворювач працює наступним чином.

Шляхом натискання на кнопці  створюється таблиця істинності схеми.

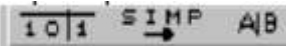
Для отримання таблиці істинності схеми необхідно підключити входи A, B, C, D, E, F, G, H логічного перетворювача до входів досліджуваної схеми (не більше восьми), а вихід OUT логічного перетворювача з'єднати з виходом схеми.

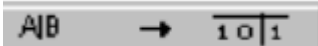
Шляхом натискання на кнопці  виконується введення та перетворення таблиці істинності.


Для того щоб створити таблицю істинності, необхідно в лівій верхній частині приладу вибрати потрібне число змінних з рядка довжиною від A до H (натиснути на відповідну букву лівою кнопкою мишки). Уся ліва половина екрану заповниться комбінаціями нулів та одиниць, які визначають початкові вхідні умови.

Стовпець вихідних значень OUT (реакція на вхід, правий стовпець вікна) на початку процесу заповнений нулями. Змінюючи в правій колонці нулі на одиниці або X (байдужий стан), можна описати стан виходу для будь-якої початкової умови. Натискання на вище вказаній кнопці призведе до появи логічного виразу.

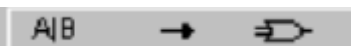

Шляхом натискання на кнопці  виконується спрощення виразів булевої алгебри. Якщо таблиця істинності містить велику кількість

змінних, то логічний вираз функції виходить громіздким і для його перетворення в компактну форму потрібно натиснути кнопку 

Шляхом натискання на кнопки  виконується введення та перетворення логічного виразу. Для отримання таблиці істинності функції, заданої логічним виразом, необхідно:

- 1) ввести в рядок перетворювача за допомогою клавіатури логічний вираз;
- 2) натиснути кнопку .

Під час введення виразів інверсія позначається апострофом, логічне додавання знаком «+». Логічне множення не позначається.

Шляхом натискання на кнопки  виконується синтез схеми за логічним виразом. Після натискання цієї кнопки на робочому полі Electronics Workbench з'явиться еквівалентна логічному виразу схема. Усі елементи в схемі будуть виділені червоним кольором. Якщо потрібно використовувати для побудови схеми тільки елементи І–НІ, то необхідно скористатися кнопкою .

6.1.4 Створення та моделювання електронних схем

Елементи електронної схеми розміщуються перетягуванням їх курсором з відповідних бібліотек на робоче поле програми. Точна установка елемента здійснюється виділенням його лівою кнопкою мишки і переміщенням під час натискання лівої кнопки. Якщо є потреба, то до елемента можна застосувати операції, які знаходяться у вікні, що з'явилося, під час натискання правої кнопки мишки, покажчик мишки має бути заздалегідь вміщений на відповідному елементі. Після цього елементи треба з'єднати відповідно до електронної схеми, яка досліджується.


Для установки значень параметрів елементів схеми потрібно установити покажчик мишки на відповідний елемент схеми і двічі натиснути ліву кнопку мишки. При цьому на екрані з'явиться діалогове вікно, де і потрібно встановити необхідний параметр.


Також потрібно встановити необхідні параметри задіяної контрольно-вимірювальної апаратури.



Для включення режиму моделювання треба встановити покажчик маніпулятора мишки на кнопку *Вимикач* у правому верхньому кутку інтерфейса і натиснути ліву кнопку мишки.


Вибір потрібного компонента проводиться з поля компонентів; потрібне поле компонентів вибирається натисканням лівої кнопки мишки на одній

з піктограм панелі компонентів. При цьому в полі компонентів з'являються зображення відповідних компонентів. Після вибору поля компонентів потрібний компонент за допомогою мишки переміщається на робоче поле.

Виділення об'єкта здійснюється за допомогою мишки (під об'єктом розуміють як один компонент, так і групу компонентів). При виборі компонента потрібно встановити покажчик мишки на потрібний компонент (при цьому зображення покажчика зміниться на ) й клацнути лівою кнопкою мишки. Для вибору групи компонентів покажчик мишки встановлюється в один з кутів прямокутної області, що містить групу, і, натиснувши ліву кнопку мишки, розтягти рамку до необхідних розмірів, після чого відпустити кнопку. Обраний об'єкт змінює свій колір на червоний. Зняти виділення можна клацанням мишки в будь-якій точці робочого поля.

Об'єкт можна повертати на кут, кратний 90° . Для цього об'єкт потрібно попередньо виділити, а потім вибрати команду *Rotate* з меню *Circuit*, натиснути *Ctrl + R* або на робочій панелі натиснути кнопку . При цьому об'єкт повернеться на 90° за годинниковою стрілкою. При повороті групи компонентів на 90° повертається кожний компонент, а не вся група цілком.

Копіювання об'єктів здійснюється за допомогою команди з меню *Edit*, натисканням *Ctrl + C* або на робочій панелі натисканням кнопки . Перед копіюванням об'єкт потрібно виділити. Після виконання команди виділений об'єкт копіюється в буфер. Для вставки вмісту буфера на робоче поле потрібно вибрати команду *Paste* з меню *Edit*, або натиснути *Ctrl + V*, або на робочій панелі натиснути кнопку . Після виконання команди вміст буфера з'явиться на робочому полі й буде виділено кольором.

Видалення об'єкта здійснюється командами *Cut* (на робочій панелі кнопка ) і *Delete*. Відмінність в тому, що під час виконання команди *Cut* об'єкт вставляється в буфер і може бути потім вставлений назад на робоче поле, а під час виконання команди *Delete* об'єкт видаляється зовсім. Перед видаленням об'єкт також має бути виділений.

Для з'єднання компонентів провідниками потрібно підвести курсор мишки до виводу компонента. При цьому на виводі компонента з'явиться чорна точка (див. рисунок нижче). Натиснувши ліву кнопку мишки, перемістіть курсор до виводу компонента, з яким потрібно з'єднатися, і відпустіть кнопку мишки. Після відпускання кнопки, з'являється чорна крапка, що вказує на появу електричного контакту. Виводи компонентів з'єднуються провідником (рис 6.49).

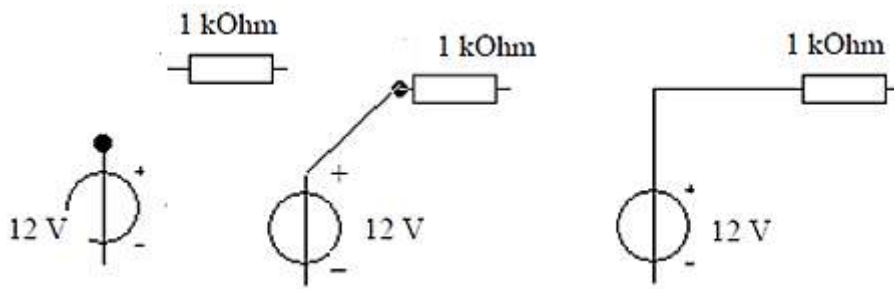


Рисунок 6.49 – Зображення з'єднування елементів схеми

Усі провідники в Electronics Workbench за замовчуванням чорного кольору, але колір провідника можна змінити. Для цього подвійним клацанням на зображенні провідника відкрити вікно, наведене на рис. 6.50, і у вікні мишкою вибрати необхідний колір.

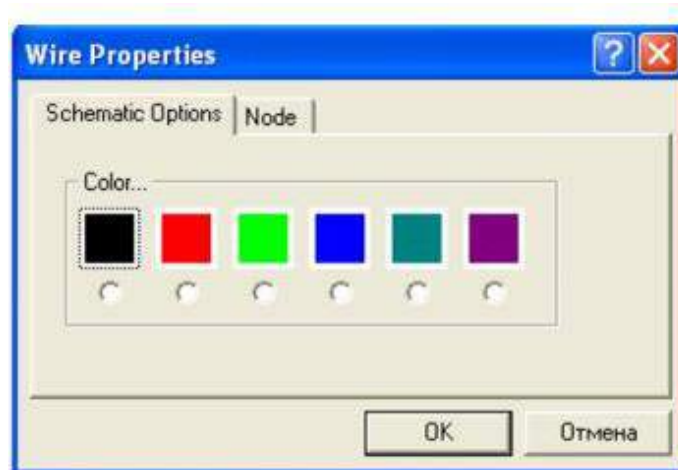


Рисунок 6.50 – Вікно властивості дроту

Якщо в схемі компоненти розміщені неакуратно, то може знадобитися спрямити провідники, що з'єднують компоненти. Це можна зробити, перемістивши компоненти так, щоб провідники відображалися прямими лініями.

Після того, як схема побудована, можна вставити в неї додаткові компоненти. Для цього потрібно мишкою перемістити компонент у необхідну точку схеми і, помістивши його над провідником, відпустити кнопку мишки. Компонент автоматично вставиться в коло.

Якщо схема не поміщається на екрані монітора, будь-яку її ділянку можна переглянути за допомогою лінійок прокручування, розташованих праворуч і під робочим полем.

Установка значень параметрів компонентів

Установка значень параметрів компонентів проводиться в діалоговому вікні властивостей компонента, що відкривається подвійним натисканням

мишки по зображенню компонента чи командою *Value* з меню *Circuit* (при цьому компонент має бути виділений). У діалоговому вікні за допомогою клавіатури і мишки потрібно ввести необхідні значення параметрів компонента і натиснути *Accept* чи *Cancel* для підтвердження / скасування установки значень. Вибір моделі компонента здійснюється в діалоговому вікні вибору моделі компонента, що відкривається подвійним натисканням мишки по зображенню компонента командою *Model* з меню *Circuit*. У діалоговому вікні можна вибрати модель компонента і відредагувати значення її параметрів. Для редагування значень параметрів моделі потрібно натиснути кнопку *Edit*. При цьому відкриється вікно властивостей моделі, у якому за допомогою мишки і клавіатури можна змінювати значення її параметрів. Збереження введених значень параметрів здійснюється натисканням кнопки *Accept*. Після цього відбувається повернення до попереднього вікна. Після побудови схеми можна кожному компоненту привласнити позиційне позначення, яке-небудь просте ім'я. Це можна зробити за допомогою команди *Label* з меню *Circuit* чи натисканням *Ctrl + L*, попередньо виділивши компонент. Після цього відкриється діалогове вікно, у якому потрібно ввести позначення ім'я компонента і натиснути клавішу *Enter*.

Якщо електронна схема дуже велика, то з нею важко працювати. Ситуація спрощується коли в ній можна виділити функціонально окрему частину, яку можна використовувати як підсхему. Команда *Create Subcircuit* (*Ctrl + B*) забезпечує перетворення відокремленої частини схеми у підсхему. Унаслідок виконання команди викликається діалогове вікно, у рядку *Name* якого необхідно ввести ім'я підсхеми, після чого необхідно обрати варіанти (рис. 6.51):

- підсхема копіюється з указаною назвою в бібліотеку без внесення змін у початкову схему;
- відокремлена частина вирізається із загальної схеми та у вигляді підсхеми з привласненим ім'ям копіюється в бібліотеку;
- відокремлена частина замінюється в початковій схемі підсхемою із привласненим їй ім'ям з одночасним копіюванням у бібліотеку.

Після побудови схеми і підключення приладів аналіз її роботи починається натисканням вимикача в правому верхньому куті вікна програми.

Зробити паузу під час роботи схеми можна натисканням кнопки *Pause* під вимикачем. Відновити процес можна повторним натисканням кнопки *Pause*. Повторне натискання вимикача в правому верхньому куті припиняє роботу схеми.

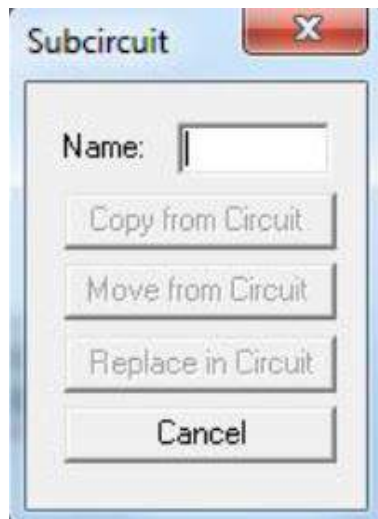


Рисунок 6.51 – Створення підсхеми

6.2 Система MULTISIM

6.2.1 Інтерфейс користувача і загальні налаштування

Multisim (мультисим) – це унікальний інтерактивний емулятор, що забезпечує введення електричних принципових схем, моделювання змішаних аналого-цифрових пристроїв, текстовий опис цифрових пристроїв мовами високого рівня VHDL та Verilog, їхнє моделювання та синтез ПЛІС різного рівня складності.

Multisim – єдиний загально цільовий пакет моделювання для використання з частотами понад 100 MHz, де SPICE зазвичай стає непрацездатним. Радіочастотний набір програми Multisim включає спеціальну бібліотеку деталей, майстер створення радіочастотних моделей, радіочастотні віртуальні інструменти та радіочастотні аналізатори.

До складу програмної системи входить графічний редактор електричних схем (Schematic Capture), бібліотека моделей елементів (Component Database) і власне імітатор (Simulation), який здійснює управління моделюванням (рис. 6.52).

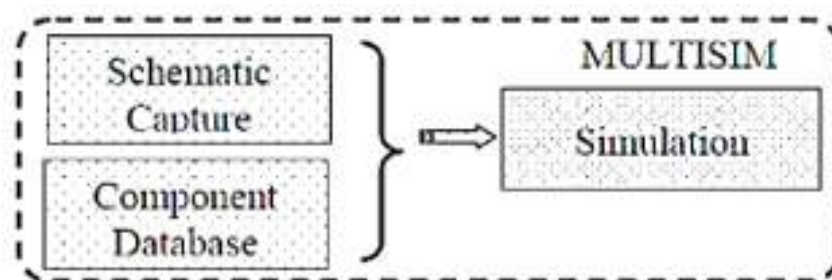


Рисунок 6.52 – Взаємодія програмних засобів Multisim

Програмний модуль Component Database включає великий набір стандартних елементів і вузлів електричних кіл, а також електронних пристроїв. Вбудована бібліотека містить прості елементи та складні електронні блоки. До простих елементів належать: незалежні та керовані джерела, резистивні, індуктивні, ємнісні схемні компоненти, напівпровідникові прилади, цифрові логічні схеми. До складних електронних блоків належать: операційні підсилувачі, аналого-цифрові перетворювачі, цифрові суматори, лічильники, мультиплектори.

Наявний Multisim набір елементів дозволяє реалізувати безліч різних електричних схем. За необхідності можна за допомогою майстра моделей створити додаткові бібліотеки необхідних користувачеві елементів із заданими властивостями. Для розширення можливостей схемотехнічного моделювання пристроїв у бібліотеку поряд зі схемними елементами включені блоки, що виконують різні математичні операції: підсумовування, множення, розподіл, інтегрування, диференціювання, а також блоки, що реалізують нелінійні функції.

Для виконання моделювання необхідно попередньо підготувати еквівалентну електричну схему досліджуваного пристрою у вигляді набору типових елементів, що є в бібліотеці. Вибрані елементи розміщуються на екрані дисплею та з'єднуються між собою згідно з електричною схемою.

У міру введення елементів їм ставляться у відповідність інтеграційні моделі. Під час виконання з'єднань елементів, тобто їхнє підключення до певних вузлів, автоматично формуються рівняння введеної електричної схеми і проводиться її часткова перевірка.

Отримана система рівнянь вирішується тим чи іншим чисельним методом, залежить від вибору виду аналізу схеми.

Крім того, є ще ціла низка можливостей дослідження процесів в електричній схемі, серед яких розрахунок вихідних величин під час зміни параметрів елементів ланцюга та температури, аналіз передавальних функцій пристрою, обчислення спектральних характеристик вихідних величин.

Особливість програми Multisim полягає у можливості імітації функціонування контрольно-вимірювальних приладів: осцилографів, мультиметрів, ватметрів. Зображення передніх панелей вимірювальних приладів з відповідними органами управління розміщуються на екрані монітора разом із досліджуваною схемою. Зовнішні дії задаються за допомогою генераторів. У результаті підключення до схеми генераторів і вимірювальних приладів створюється схема обчислювального експерименту. Наступне виконання моделювання процесів у пристрої аналогічно проведенню експериментальних досліджень електронних пристроїв за допомогою вимірювального обладнання.

При цьому є можливість зміни умов експерименту (наприклад, підключення додаткових джерел і споживачів), а також одночасної реєстрації безлічі змінних. Результати дослідження відображаються на екранах приладів.

Графічний інтерфейс програми у вигляді системи вікон зі спадними і розгортаючими меню і панелями мало відрізняється від подібних інтерфейсів інших Windows-додатків (наприклад, Word, Excel).

Запуск програми здійснюється клацанням лівої кнопки мишки (ЛКМ) на кнопці Пуск. Під час запуску на екрані монітора з'являється головне вікно з меню команд і панелями управління (рис. 6.53).

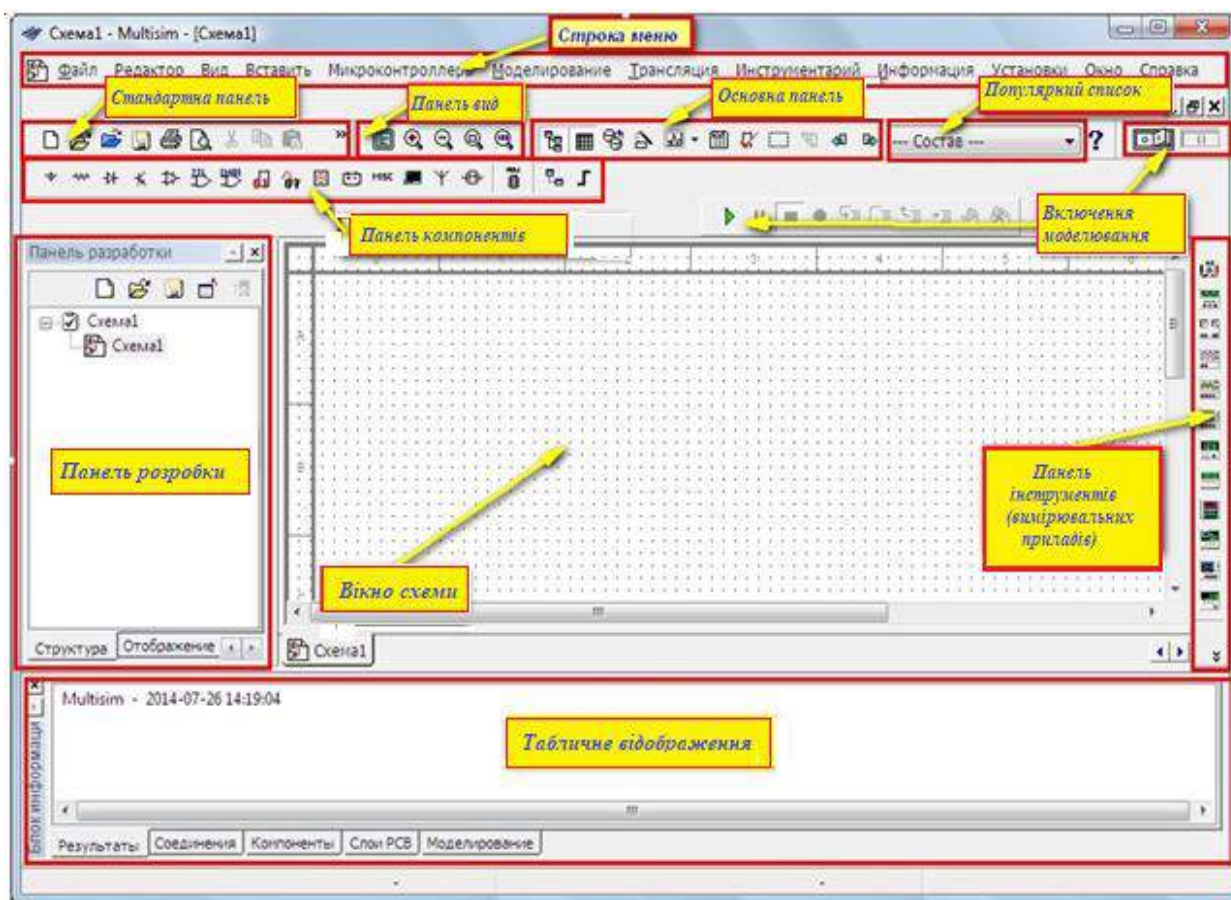


Рисунок 6.53 – Інтерфейс програми Multisim

Інтерфейс користувача складається зі смужки меню, панелей, на які винесені команди, панель компонентів, робочої області, де найчастіше використовуються команди, і де відображається сама схема. Панель інструментів, куди поміщені віртуальні контрольно-вимірювальні прилади, розташована вертикально біля правого краю вікна інтерфейсу. Також можна додати електронну таблицю, що відображає історію побудови, або повністю перебудувати інтерфейс під свої вимоги з винесенням посилань на певні команди на кнопки швидкого запуску.

У верхній частині вікна розміщується стандартне меню команд. Нижче розміщені панелі інструментів, де знаходяться кнопки для кожного інструменту окремо, а також панель компонентів. Під час натискання на елемент панелі з'являється вікно вибору інструмента або компонента бази даних Multisim для розміщення в робочій області. Вікно Проектованої Схеми – область для складання принципової схеми шляхом додавання окремих її елементів і зв'язків між ними.

Рядок стану відображає корисну інформацію поточної операції та опис елемента, до якого зараз підведено курсор. Вікно розробки дозволяє керувати іншими типами файлів у проєкті (схеми, РСВ, повідомлення), розглядати ієрархію схеми.

Електронна таблиця внизу відображає історію побудови та допускає швидкий перегляд та редагування параметрів, включаючи компонентні, такі елементи як, наприклад, атрибути та проєктні обмеження. Користувач може змінювати параметри для деяких або всіх компонентів за один раз і виконує багато інших функцій.

Можна модифікувати практично будь-яке значення параметрів Multisim, включаючи кольори, що використовуються в ланцюзі, розмір сторінки, масштаб, інтервал автоматичної синхронізації, кодування символів (ANSI або DIN) та установки принтера, а також повністю перебудувати інтерфейс під свої вимоги.

Налаштування параметрів зберігаються індивідуально з кожним файлом ланцюга, так що можна, наприклад, мати одну колірну схема для одного ланцюга та іншу для іншого ланцюга. Можна також анулювати настановні параметри для індивідуальних прикладів (наприклад, змінити один конкретний компонент від червоного до помаранчевого) або для цілого ланцюга.

Налаштування здійснюється через діалогове вікно параметрів, яке використовується для встановлення загальних параметрів. Ці переваги можуть змінюватися від однієї робочої станції до іншої.

Вікно властивостей сторінки використовується, для встановлення параметрів активного листа. Ці переваги збережені в самому файлі ланцюга, щоб при відкритті ланцюга на іншій робочій станції, вона використовувала ті ж установчі параметри.

6.2.2 Система меню, панелі інструментів і компонентів

Сукупність команд програми Multisim має ієрархічну структуру. Кожна група команд головного меню програми має своє призначення:

File – вибір файлів та їхнє перетворення (зберігання, копіювання, друк даних);

Edit – керування розміщенням об'єктів на екрані (копіювання, вставка, видалення, поворот);

View – оформлення виду схеми на екрані (розмір об'єктів, наявність координатної сітки);

Place – вибір об'єктів, що розміщуються на екрані (компоненти, провідники, шини, підсхеми);

Simulate – управління процедурами моделювання (вибір вимірювальних приладів або видів аналізу, встановлення параметрів);

Transfer – організація передачі;

Tools – набори компонентів та редагування їхнього опису;

Reports – вибір фрагментів для складання звітів;

Options – встановлення загальних параметрів оформлення схем та елементів;

Windows – вибір розміщення частин проєкту на екрані;

Help – вибір способу отримання допомоги.

Кожна сукупність команд відіграє свою роль під час підготовки та виконання моделювання схем і буде докладніше розглянута в наступних розділах опису роботи з програмою. Принципово можливе використання у програмі установок за замовчуванням.

Меню File складається з таких елементів:

New/Schematic Capture (Ctrl+N) – створити новий файл;

Open (Ctrl+O) – відкрити файл для редагування та аналізу; Open Samples – відкрити папку з прикладами;

Close – закрити вікно;

Close All – закрити усі відкриті вікна;

Save (Ctrl+S) – зберегти поточну схему у файл, додається до назви файла автоматично;

Save As – зберегти поточну схему у файл з новою назвою за вказаним шляхом;

Save All – зберегти усі відкриті файли;

New Project – створити новий проєкт;

Open Project – відкрити проєкт;

Save Project – зберегти проєкт;

Close Project – закрити відкритий проєкт;

Version Control – створити резервну копію чи відновити проєкт;

Print (Ctrl+P) – відкрити стандартне діалогове вікно виведення на друк;

Print Preview – попередній перегляд схеми перед друком;

Print Options/Print Circuit Setup – налаштування виведення на друк для поточної схеми;

Print Options/Print Instruments – вивести на друк лицьову панель вибраного віртуального приладу;

Recent Designs – показати список з восьми останніх схем, що відкриваються або збережені;

Exit (Alt+F4) – вийти із програми

У меню Edit містяться такі команди:

Undo (Ctrl+Z) – скасувати останню команду редагування (відкочування назад);

Redo (Ctrl+Y) – повторити останню скасовану команду (відкочування вперед);

Cut (Ctrl+X) – перемістити виділений об'єкт у буфер обміну;

Copy (Ctrl+C) – копіювати виділений об'єкт у буфер обміну;

Paste (Ctrl+V) – вставити вміст буфера обміну в місце розташування курсору мишки;

Delete (Delete) – видалити виділену ділянку схеми;

Select All (Ctrl+A) – виділити всі елементи у поточному вікні;

Delete Multi-Page – видалити багатосторінковий файл;

Paste as Subcircuit – вставити виділену частину схеми у вигляді окремого блоку (підсхеми);

Find (Ctrl+F) – відкрити діалогове вікно пошуку;

Graphic Annotation містить команди, що дозволяють змінювати налаштування графічних елементів, додавання елементів графіки здійснюється за допомогою меню Place/Graphics;

Order – перемістити графічні елементи на задній/передній план;

Assign to Layer – перемістити вибраний елемент на інший шар;

Layer Settings – відкрити діалогове вікно Visibility, доступне з меню Options/Sheet Properties;

Title Block Position – змінити позицію блоку заголовка, блок заголовка містить таку інформацію, як назва проекту, ім'я автора, ім'я редактора, дата останньої зміни, кількість сторінок тощо;

Orientation – Змінити орієнтацію виділених елементів схеми;

Symbol/Title Block – змінити вміст блоку заголовка;

Font – змінити налаштування фону;

Comment – редагувати контекст елемента comment (коментар);

Questions – викликати редактор Edit Form до створення тестових форм;

Properties (Ctrl+M) – показати властивості виділеного елемента.

У меню View містяться такі команди:

Full Screen – розгорнути вікно редагування на весь екран;

Parent Sheet – показати батьківське вікно для поточної підсхеми;

Zoom In (F8) – збільшити масштаб схеми у відсотковому співвідношенні;

Zoom Out (F9) – зменшити масштаб схеми у відсотковому співвідношенні

Zoom Area (F10) – відобразити виділений за допомогою курсору мишки ділянку схеми на всю область робочого вікна;

Zoom Fit to Page (F7) – показати весь робочий простір схеми;

Zoom to magnification (F11) – вибрати масштаб відображення робочої області;

Zoom Selection (F12) – відобразити виділену частину схеми на всю робочу область;

Show Grid – показати/приховати сітку розмітки;

Show Border – показати/приховати рамку;

Show Page Bounds – показати/приховати межі аркуша;

Ruler Bars – показати/приховати масштабну лінійку зліва та зверху робочої області;

Status Bar – показати/приховати рядок стану;

Design Toolbox – показати/приховати панель розробки, панель містить такі закладки:

Visibility (Видимість) – показати/приховати шари схеми робочої області;

Hierarchy (Ієрархія) – показати відкритий проєкт у вигляді ієрархії файлів;

Project (Проєкт) – показати інформацію про відкритий проєкт;

Spreadsheet View – показати/сховати панель Spreadsheet View, панель відображається у вигляді таблиці для швидкого перегляду та редагування різних параметрів компонентів схеми;

Circuit Description Box (Ctrl+D) – показати/приховати тестову форму;

Toolbars – додати/видалити кнопки на панелі інструментів для швидкого доступу до команд та елементів меню;

Show Comment/Probe – показати/приховати коментарі;

Grapher – показати/приховати результати моделювання у графічному чи символічному вигляді.

Меню Place складається з команд розташування елементів у вікні редагування схеми:

Component (Ctrl+W) – відкрити вікно доступу до баз даних компонентів Master Database, Corporate Database та User Database;

Junction (Ctrl+J) – додати елемент «вузол» у вікно редагування схеми;

Wire (Ctrl+Q) – додати елемент «провідник» (з'єднувальна лінія), за допомогою цього елемента здійснюється з'єднання виводів елементів та вузлів схеми;

Bus (Ctrl+U) – додати елемент «шина», шини дозволяють замінити велику кількість провідників і можуть використовуватися в межах робочої області (сторінки), між сторінками, та у вкладених схемах (підсхеми та вкладені блоки); шина може функціонувати у двох режимах: мережному (net mode) та інформаційному (busline mode);

У режимі мережі шина – набір з'єднань. При кожному новому підключенні до шини з'єднання здійснюється з уже наявним виводом шини або формується новий вивід, що відповідає назві провідника. В інформаційному режимі можна заздалегідь визначити номер та назву кожної лінії шини.

Connectors – додати елемент «з'єднувач» (перехідник), у програмі використовується чотири види з'єднувачів;

New Hierarchical Block – створити схему, що відображається у батьківському вікні у вигляді прямокутного блоку з виводами. Створена схема не має елементів і знаходиться на один рівень нижче в ієрархічній структурі.

Меню MCU.

У програмі Multisim є можливість підключення модуля імітації роботи сучасних мікроконтролерів, що комбінують у собі центральний процесор, пам'ять даних, пам'ять програми та периферійні пристрої на єдиному фізичному кристалі. У меню MCU знаходяться команди для забезпечення написання та налагодження програми з урахуванням особливостей пристрою, що розробляється.

Меню Simulate.

У цьому меню містяться такі команди:

Run (F5) – запустити/відновити моделювання;

Pause (F6) – призупинити процес моделювання з можливістю продовження моделювання з моменту припинення;

Stop – зупинити процес моделювання;

Instruments – додати віртуальний контрольно-вимірювальний прилад;

Interactive Simulation Settings дозволяє встановлювати налаштування за замовчуванням для приладів, які засновані на аналізі перехідних процесів (таких як осцилограф, спектроаналізатор та логічний аналізатор);

Digital Simulation Settings дозволяє вибирати між оптимізацією за точністю і швидкістю моделювання за наявності цифрових компонентів у схемі.

Analysis містить команди налаштування параметрів і виконання аналізу схеми;

Postprocessor – відкрити діалогове вікно Postprocessor, яке дозволяє об'єднати кілька досліджень і відобразити результати моделювання в графічному вигляді. Для використання Postprocessor необхідно провести щонайменше одне дослідження;

Simulation Error Log / Audit Trail – показати / приховати журнал реєстрації подій;

XSpice Command Line Interface – відкрити вікно введення Xspice-команд, таких як SOURCE, PLOT, SAVE, TAN та ін.;

Load Simulation Settings – завантажити раніше збережені параметри моделювання;

Save Simulation Settings – зберегти налаштування параметрів моделювання;

VHDL Simulation – запустити модуль імітації VHDL;

Dynamic Probe Properties – відобразити діалогове вікно Probe Properties, призначене для зміни налаштувань інструменту Measurement Probe (вимірювальний пробник);

Reverse Probe Direction – змінити напрямок виділеного вимірювального пробника;

Clear Instrument Data – очистити дані моделювання вимірювальних приладів, таких як осцилограф;

Auto Fault Option – додати помилки у моделі компонентів схеми;

Use Tolerances – увімкнути/вимкнути встановлені допустимі відхилення для компонентів схеми.

Transfer Menu. У меню Transfer знаходяться команди імпорту/експорту даних у форми файлів інших програм.

Tools Menu. У меню Tools є такі команди:

Component Wizard – викликати фахівця створення компонентів;

Database/Database Manager – дозволяє додати групу компонентів, редагувати, копіювати та видаляти компоненти;

Database/Save Component to DB – зберегти виділений компонент у базі даних;

Database/Convert Database – конвертувати компоненти з корпоративної або користувальницької бази даних у базу даних пакета Multisim;

Database/Merge Database – викликати діалогове вікно Merge Database для об'єднання вмісту користувацьких та інших баз даних;

Circuit Wizards/555 Timer Wizard – дозволяє створювати автоколивальний або оікуючий мультивібратор на таймері 555;

Circuit Wizards/Filter Wizard – дозволяє створювати різні типи фільтрів із необхідними характеристиками;

Circuit Wizards/Opamp Wizard – дозволяє створювати різні схеми на операційному підсилювачі;

Circuit Wizards/CE BJT Amplifier Wizard – дозволяє створювати схему підсилювача на біполярному транзисторі із загальним емітером та з необхідними характеристиками;

Variant Manager – відкрити діалогове вікно Variant Manager для створення кількох варіантів схем;

Set Active Variant – вибрати варіант схеми та зробити його поточним;

Rename/Renumber Components – змінити нумерацію компонентів схеми, що відображаються на екрані;

Replace Components – замінити виділений компонент схеми;

Update Circuit Components – оновити компоненти схеми, створеної у більш ранній версії Multisim;

Electrical Rules Check – перевірити наявність та коректність сполучних елементів схеми;

Toggle NC Marker – встановити мітку «ні з'єднання» (маркер помилки) для виводів компонентів схеми;

Clear ERC Markers – видалити маркери помилок;

Symbol Editor – викликати редактор умовно-графічного відображення елементів користувача;

Title Block Editor – викликати редактор блоку заголовка;

Description Box Editor – запустити редактор поля Circuit Description Box, призначеного для опису проєкту;

Edit Labels – додати/видалити мітку у полі Circuit Description Box; Capture Screen Area – копіювати частину екрана у буфер обміну.

Reports Menu. Меню Reports містить такі команди:

Bill of Materials – вивести перелік елементів схеми;

Component Detail Report – показати діалогове вікно опису компонентів, доступних у базі даних Multisim;

Netlist Report – вивести інформацію про провідників схеми;

Cross Reference Report – вивести список елементів поточної схеми;

Schematic Statistics – вивести статистичну інформацію про схему (кількість елементів, кількість з'єднувачів тощо);

Spare Gates Report – вивести список незадіяних секцій інтегральних елементів.
 MenuWindow. У меню Window містяться команди організації віконного інтерфейсу програми:

- New Window – створити копію відкритого поточного вікна;
- Close – закрити поточне вікно;
- Close All – закрити усі вікна;
- Cascade – розташування відкритих вікон каскадом;
- Tile Horizontal – послідовне розташування відкритих вікон по горизонталі;
- Tile Vertical – послідовне розташування відкритих вікон по вертикалі;
- Windows – закрити/зробити вікно поточним.

Help Menu







Меню Help містить команди виклику файла допомоги з деталізацією можливостей програми, докладний опис сімейств компонентів, а також інформацію про останню версію програми Multisim.

Панелі інструментів. Панель інструментів є елементом графічного інтерфейсу програми, що поєднує різні кнопки для швидкого доступу до команд меню. Це панелі Standart, Main, View, Simulation, Simulation Switch, Components. За замовчуванням відображаються групи кнопок певного призначення.






Панель Standart – стандартна панель, яка включає кнопки швидкого доступу до меню File (табл. 6.1).



Таблиця 6.1 – Панель Standart

Кнопка	Опис елемента
1	2
	New створює новий файл
	Open відкриває існуючий файл
	Open Sample відкриває папку, що містить зразки та запускає файли
	Save зберігає активну на даний момент схему
	Print Circuit виводить на друк активну на даний момент схему
	Print Preview виводить на екран функцію попереднього перегляду




Продовження таблиці 6.1.

1	2
	Cut видаляє вибрані елементи та поміщає їх у буфер обміну
	Copy копіює вибрані елементи та поміщає їх у буфер обміну
	Paste вставляє вміст буфера обміну в місце розташування курсору
	Undo скасовує останню виконану дію
	Redo робить заново скасовану останню виконану дію

Панель Main – головна панель, що включає такі кнопки, як вибір режиму аналізу, створення компонента користувача, запуску Postprocessor та ін. (табл. 6.2).



Таблиця 6.2 – Кнопки панелі Main

Кнопка	Опис елемента
	Toggle Design Toolbox включає або вимикає вікно Design Toolbox
	Toggle Spreadsheet View включає або вимикає вікно електронної таблиці
	Database Manager викликає діалогове вікно менеджера баз даних
	Create Component натискання викликає майстри створення компонентів
	Grapher/Analyses відображає графіки, а також виконує аналіз ланцюга
	Postprocessor викликає діалогове вікно Postprocessor
	Electrical Rules Checking перевіряє правильність з'єднання елементів згідно з правилами прийнятими заздалегідь
	Capture Screen Area захоплює область екрану
	Back Annotate from Ultiboard створює зміни в ланцюзі, зроблені в Ultiboard
	Forward Annotate передає зміни, зроблені в Multisim, у існуючий файл друкованої плати Ultiboard
	Help викликає довідку

Панель View – панель масштабування включає кнопки, що найчастіше використовуються, для швидкого доступу до команд меню View, таблиця 6.3.



Таблиця 6.3 – Кнопки панелі View

Кнопка	Опис елемента
	Toggle Full Screen включає режим повноекранного перегляду ланцюга
	Increase Zoom збільшує масштаб відображення ланцюга
	Decrease Zoom зменшує масштаб відображення ланцюга
	Zoom Area збільшує масштаб на вибраній області ланцюга
	Zoom Fit to Page змінює масштаб для відображення всього ланцюга

Панель Simulation – панель моделювання, що включає кнопки керування процесом моделювання Run, Stop тощо (таблиця 6.4).

















Таблиця 6.4 – Кнопки панелі Simulation

Кнопка	Опис елемента
	Run/resume simulation запускає моделювання процесів у ланцюгу
	Pause simulation зупиняє моделювання процесів у ланцюгу
	Stop simulation зупиняє моделювання процесів у ланцюгу
	Pause at Next MCU Instruction Boundary зупиняє моделювання процесів у ланцюзі на наступному кордоні модуля MCU
	Step Into здійснює перехід до вибраного елемента модуля MCU
	Step Over здійснює перехід до останнього елемента модуля MCU
	Step Out завершує роботу з модулем MCU
	Run to Cursor здійснює перехід до елемента модуля MCU, обраного курсором
	Toggle Breakpoint включає або вимикає контрольні точки
	Remove All Breakpoints видаляє всі контрольні точки







Панель Components – включає кнопки доступу до окремих груп компонентів бази даних Multisim







Таблиця 6.5 – Кнопки панелі Components

Кнопка	Опис елемента
	Source викликає вікно браузера з вибором джерел живлення
	Basic викликає вікно браузера з вибором основних елементів
	Diode викликає вікно браузера з вибором діодів
	Transistor викликає вікно браузера з вибором транзисторів
	Analog викликає вікно браузера з вибором аналогових компонентів
	TTL викликає вікно браузера із вибором компонентів TTL
	CMOS викликає вікно браузера із вибором компонентів CMOS
	Miscellaneous Digital викликає вікно браузера з вибором різних цифрових компонентів
	Mixed викликає вікно браузера з вибором змішаних компонентів
	Power Components викликає вікно браузера із вибором силових компонентів
	Indicator викликає вікно браузера з вибором індикаторів
	Miscellaneous викликає вікно браузера з вибором інших компонентів
	Electromechanical викликає вікно браузера з вибором електромеханічних компонентів
	RF викликає вікно браузера із вибором компонентів RF
	Place Advanced Peripherals викликає вікно браузера з вибором периферійних компонентів
	Place MCU Module вставляє у вікно модуль MCU

Таблиця 6.6 – Кнопки виклику панелей інструментів віртуальних елементів










Кнопка	Опис елемента
1	2
	Show Power Source Components викликає панель інструментів вибору віртуальних джерел живлення
	Show Signal Source Components викликає панель інструментів вибору віртуальних джерел сигналів
	Show Basic Components викликає панель інструментів вибору основних віртуальних компонентів
	Show Diode Components викликає панель інструментів вибору віртуальних діодів
	Show Transistor Components викликає панель інструментів вибору віртуальних транзисторів
	Show Analog Components Bar викликає панель інструментів вибору віртуальних аналогових компонентів

Продовження таблиці 6.6

1	2
	Show Miscellaneous Components Bar викликає панель інструментів вибору інших віртуальних компонентів
	Show Measurement Components Bar викликає панель інструментів вибору вимірювальних елементів
	Show Rated Virtual Components Bar викликає панель інструментів вибору номінальних компонентів
	Show 3D Components Bar викликає панель інструментів вибору віртуальних тривимірних компонентів

Панель Graphic Annotation – включає кнопки для малювання

Таблиця 6.7 – Кнопки панелі Graphic Annotation

Кнопка	Опис елемента
	Picture поміщає малюнок у робочу область
	Polygon кнопка для малювання багатокутника
	Arc кнопка малювання дуги
	Ellipse кнопка малювання еліпса
	Rectangle кнопка для малювання прямокутника
	Multiline кнопка для малювання ламаної лінії
	Line кнопка малювання лінії
	Place Text розміщує текст у робочій області
	Place Comment розміщує коментар у вибраній області

Програма Multisim дозволяє розширювати панель інструментів, додавши кнопки або групи кнопок для швидкого доступу до будь-яких команд меню.

Компоненти Multisim – це основа будь-якої схеми, тобто. елементна база, з якої складається схема. У Multisim робота здійснюється з двома категоріями компонентів: віртуальними (virtual) (рис. 6.54, а) і реальними (real) (рис. 6.54, б).

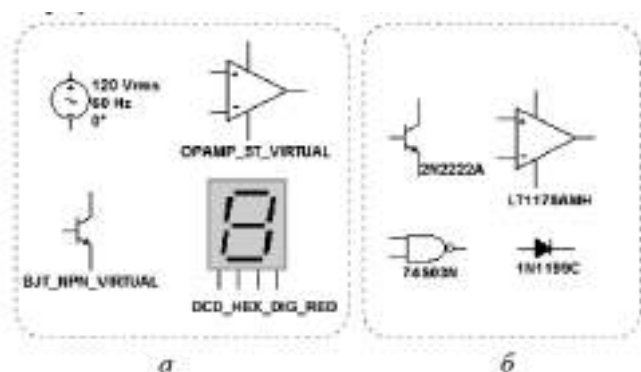







Рисунок 6.54 – Компоненти Multisim: віртуальні (а). реальні (б)


Реальні компоненти є повними аналогами компонентів, що випущені радіоелектронною промисловістю. Віртуальні компоненти є математичними моделями сімей (Family) компонентів (резистори, конденсатора і т.д.) з будь-якими довільними параметрами, властивими даній категорії (наприклад опір, що дорівнює 3,89736 Ом).


Додавання компонентів у схему здійснюється з меню Place чи панелі інструментів Components.


Розглянемо основні групи компонентів баз даних Multisim.


Група Sources  (Джерела). У цій групі містяться моделі джерел живлення  (однофазне джерело живлення постійної (DC_POWER) і змінної напруги (AC_POWER), трифазні джерела живлення, джерела живлення постійного струму, а також заземлення (GROUND)), джерел напруги  прямокутного сигналу (CLOCK_VOLTAGE), кусково-лінійного сигналу (PWL Voltage) та джерел струму  тощо.


Група Basic  (Базові компоненти). До базової групи належать моделі резисторів, конденсаторів, індуктивностей, трансформаторів, віртуальних механічних ключів тощо.


Група Diodes  (Діоди). У цій групі містяться моделі компонентів, таких як діод, стабілітрон (zener), світлодіод, діодний міст (FWB), діод Шоттки, тиристор та ін.


Група Transistors  (Транзистори). У цій групі знаходяться моделі біполярних транзисторів (BJT), польових транзисторів (JFET), МОП-транзисторів та ін.

Група Analog  (Аналогові компоненти) містить моделі операційних підсилювачів (OPAMP), компараторів (COMPARATOR) та ін.

Група TTL  (цифрові мікросхеми технології TTL). У цій групі містяться моделі мікросхем серій 74Sxx, 74LSxx, 74ALSxx та ін.

Група CMOS  (цифрові мікросхеми за технологією КМОП) містить моделі мікросхем серії 74HCxx, NC7Sx (Tiny Logic) та ін.

Група Misc Digital  (Цифрові пристрої) включає ідеальні моделі цифрових пристроїв (TIL) (логічні елементи, тригери, регістри, лічильники, мультиплектори, декодери, елементи арифметико-логічних пристроїв та ін.), мікросхеми цифрової обробки сигналів (DSP), логічні інтегральні схеми, мікросхеми пам'яті, мікроконтролери та ін.

Група Indicators  (Індикаторні пристрої) включає такі моделі компонентів: індикатори напруги і струму, логічні пробники, семисегментні індикатори, звукові індикатори та ін.

6.2.3 Віртуальні вимірювальні прилади

Віртуальні прилади Multisim – це програмні моделі контрольно-вимірювальних приладів. Додавання віртуального приладу в схему здійснюється за допомогою мишки та панелі приладів (рис. 6.55) або меню Place.



Рисунок 6.55 – Приладова панель

Панель приладів (на рис. 6.55 зображена горизонтально з написами, що пояснюють) містить:

- цифровий мультиметр (Multimeter);
- аналізатор спотворень гармонійного сигналу (Distortion Analyzer);
- функціональний генератор (Function Generator);
- вимірювач активної потужності та коефіцієнта потужності (Wattmeter);
- осцилограф двоканальний (Oscilloscope);
- частотомір (Frequency Counter);
- функціональний генератор фірми Agilent Technologies 33120A (Agilent Generator);
- чотиріканальний осцилограф (4 Channel Oscilloscope);
- вимірювач АЧХ та ФЧХ (Bode Plotter);
- вимірювач вольт-амперних характеристик (IV Analyzer);
- генератор слів (Word Generator);
- логічний перетворювач (Logic Converter);
- логічний аналізатор (Logic Analyzer);
- осцилограф фірми Agilent Technologies 54622D (Agilent Oscilloscope);
- мультиметр фірми Agilent Technologies 34401A (Agilent Multimeter);
- спектральний аналізатор (Spectrum Analyzer);
- прилад для аналізу електричних кіл, насамперед, високочастотних – хвилеводів, смужкових ліній тощо (Network Analyzer);

- осцилограф фірми Tektronix TDS 2024 (Tektronix Oscilloscope);
- пробник струму або струмовий зонд (Current Probe);
- набір інструментів (LabVIEW Instruments), створений у середовищі LabVIEW: мікрофон (Microphone), динамік (Speaker), генератор та аналізатор сигналів (Signal Analyzes, Generator);
- вимірювальний пробник, що дозволяє визначати миттєве (instantaneous) значення струму та напруги, розмах (peak to peak), середньо-квадратичне значення (RMS value), постійну складову (DC) струму та напруги, частоту, а також співвідношення вимірюваних значень постійної, змінної складової напруги та фаз двох пробників (Measurement Probe).

Навіть просте перерахування приладів, що надаються в розпорядження користувача пакетом Multisim, показує, що він має величезні можливості з дослідження схем, що моделюються. Застосування тих чи інших приладів, режимів їхньої роботи визначається, перш за все, досліджуваною схемою, завданнями, які стоять перед дослідником, досвідом його роботи з тим чи іншим обладнанням.

Для схеми, що моделюється, можливе також застосування різних методів математичного аналізу сигналів, наприклад, перетворення Фур'є, методів Монте-Карло та ін, включених у пакет.

Крім того, сигнали, отримані в результаті моделювання, можуть бути оброблені за допомогою постпроцесора, включеного також у пакет. У зв'язку з цим вибір приладів для дослідження, режимів їхньої роботи, методів обробки сигналів є досить складним завданням. Вона раціонально може бути вирішена тільки при грамотному виборі набору характеристик, що підлягають дослідженню, приладів і методів, що дозволяють визначити потрібні характеристики, досвід роботи з приладами і методами досліджень, включеними в пакет Multisim.

Розглянемо деякі моделі контрольно-вимірювальних приладів.

Мультиметр (Multimeter). Зовнішній вигляд та лицьова панель мультиметра наведено на рис. 6.56.



Рисунок 6.56 – Мультиметр

Вибір режиму роботи здійснюється натисканням кнопок на панелі приладу відповідно до рис. 6.56.

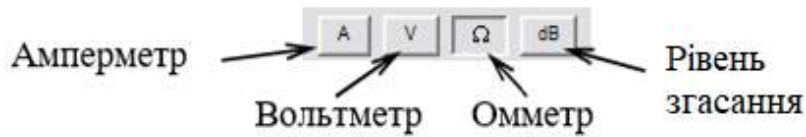


Рисунок 6.57 – Режим роботи

Налаштування мультиметра здійснюється за допомогою вікна Multimeter Settings, рис. 6.58

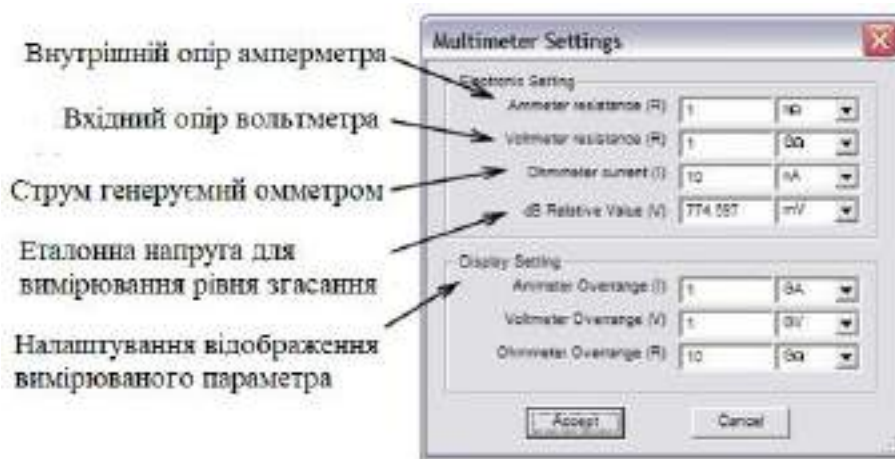


Рисунок 6.58 – Вікно налаштування параметрів мультиметра

Функціональний генератор (Function Generator) Функціональний генератор є джерелом сигналу синусоїдальної, трикутної або прямокутної форми. Зовнішній вигляд та лицьова панель генератора показані на рис. 6.59.

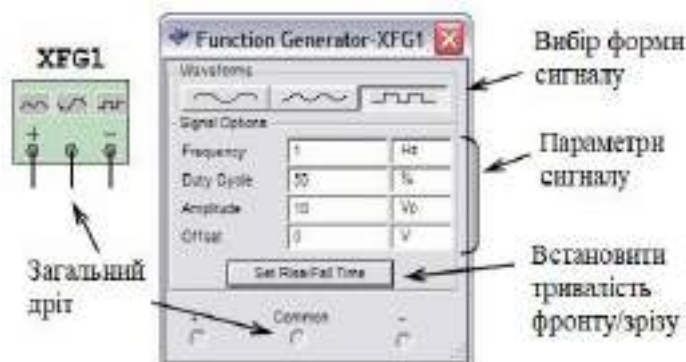


Рисунок 6.59 – Функціональний генератор

Налаштування параметрів сигналу, що генерується, здійснюється за допомогою органів управління, об'єднаних у групу Signal Options:

- Frequency (Частота) – встановлення частоти вихідного сигналу в діапазоні від 10–15 Гц до 10+15 Гц;

– Duty Cycle – встановлення коефіцієнта заповнення в діапазоні від 1% до 99%, для імпульсних сигналів це відношення тривалості імпульсу до періоду повторення (величина зворотна шпаруватості), опція недоступна для синусоїдального сигналу;

– Amplitude – встановлення амплітуди вихідного сигналу в діапазоні від 10^{-15} до 10^{+15} В;

– Offset – встановлення величини постійної складової вихідного сигналу в діапазоні від 10^{-15} до 10^{+15} В.

Ватметр (Wattmeter). Ватметр Multisim дозволяє проводити вимірювання потужності постійного та змінного струму, що розсіюється в навантаженні, та коефіцієнта потужності (Power Factor). Зовнішній вигляд та лицьова панель ватметра наведені на рис. 6.60. Приклад підключення ватметра в схему показано на рис. 6.61.

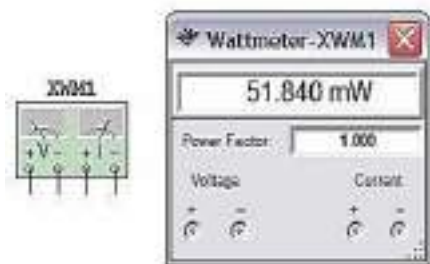


Рисунок 6.60 – Ватметр

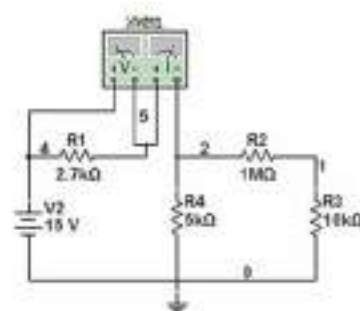


Рисунок 6.61 – Підключення ватметра

Осцилограф (Oscilloscope). Осцилограф дозволяє проводити аналіз сигналів у часовій області. Зовнішній вигляд та лицьова панель осцилографа показані на рис. 6.62.

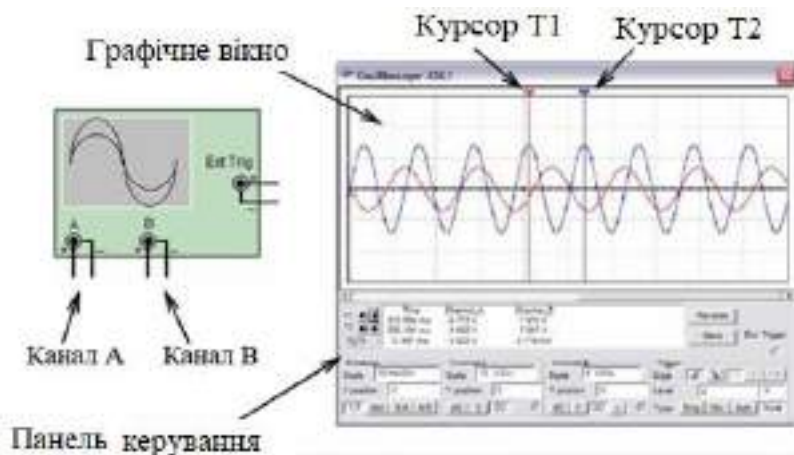


Рисунок 6.62 – Двоканальний осцилограф

Модель має два канали А і В з роздільним регулюванням чутливості в діапазоні від 10 – 15 В/діл до 1015 В/діл, регулюванням зміщення

по горизонталі та по вертикалі. Кожен канал крім сигнального входу має контакт заземлення. Якщо не використовувати контакт заземлення, осцилограф все одно буде заземлений, оскільки він у програмі Multisim заземляється автоматично.

Для налаштування відображення вимірюваного сигналу використовується панель керування осцилографом (рис. 6.63).



Рисунок 6.63 – Панель керування осцилографом

Вибір режиму роботи з входу здійснюється натисканням кнопок «AC», «0», «DC», «←» (інверсний режим – тільки для каналу В). Режим AC дорівнює введенню ємнісного фільтра в ланцюг сигналу, при цьому відображається лише змінна складова сигналу. У режимі 0 вхідний канал замикається на землю. У режимі DC відображаються обидві компоненти сигналу. В інверсному режимі сигнал інвертується щодо положення нуля.

Для вибору режиму розгортки використовуються кнопки Y/T, Add, V/A, A/V. У режимі Y/T реалізується часова розгортка для кожного каналу, тобто. горизонтальна вісь є віссю часу, а сигнал каналу А та/або В відкладається по вертикальній осі. Тривалість розгортки задається в полі Scale (Масштаб) параметра Timebase і варіюється в діапазоні від 10 – 15 с / діл до 10 + 15 с / діл. У режимі Add відображується сумарний сигнал каналів А і В. Для побудови передавальної характеристики досліджуваної схеми використовуються режими V/A та A/V. У режимі V/A відображується сигнал каналу В щодо сигналу каналу А. У режимі A/V – навпаки.

Осцилограф Multisim має три режими синхронізації – Single (Одноразовий), Normal (Звичайний), Auto (Автоматичний).

У режимі Normal сигнал на екрані осцилографа відображується після надходження сигналу синхронізації. Далі осцилограма залишається нерухливою до моменту приходу наступного сигналу синхронізації.

Режим Single працює аналогічно режиму Normal за винятком того, що на екрані формується лише одна крива. При активації опції Single осцилограф переходить у режим очікування сигналу синхронізації.

У режимі Auto сигнал синхронізації створюється автоматично, а не шляхом порівняння заданого значення та рівня тригера. Режим автоматичної синхронізації використовується, коли неможливо створити сигнал запуску у звичайному чи одиночному режимі.

У всіх цих режимах використовується одне з джерел синхронізації: канал А, канал В або External Trigger (Зовнішня синхронізація). Опція Edge (Фронт) дозволяє вибрати запуск по фронту або зрізу сигналу синхронізації при регульованому рівні (Level) запуску.

Під час вимірювання напруги постійного струму вибирається режим None (синхронізація відсутня), оскільки напруга не змінюється і вимірюваний сигнал не може перетнути рівень запуску.

Зазвичай осцилографи створюють сигнали синхронізації за допомогою сигналів, що вимірюються на каналах А або В. Однак під час вимірювання невеликих сигналів можуть виникнути труднощі зі створенням сигналу синхронізації, і в результаті осцилограми безладно переміщатимуться по екрану. Щоб уникнути цього, використовується канал зовнішньої синхронізації (Ext. Trigger).

Чотириканальний осцилограф. Робота з чотириканальним осцилографом практично не відрізняється від роботи з двоканальним. Для зменшення розмірів поля, на якому розміщуються вікна керуючих параметрів, чотириканальний осцилограф забезпечений перемикачем каналів (канали А, В, С, D), що дозволяє встановлювати масштаб відтворення зображень по осі Y (рис. 6.64) окремо для кожного каналу.

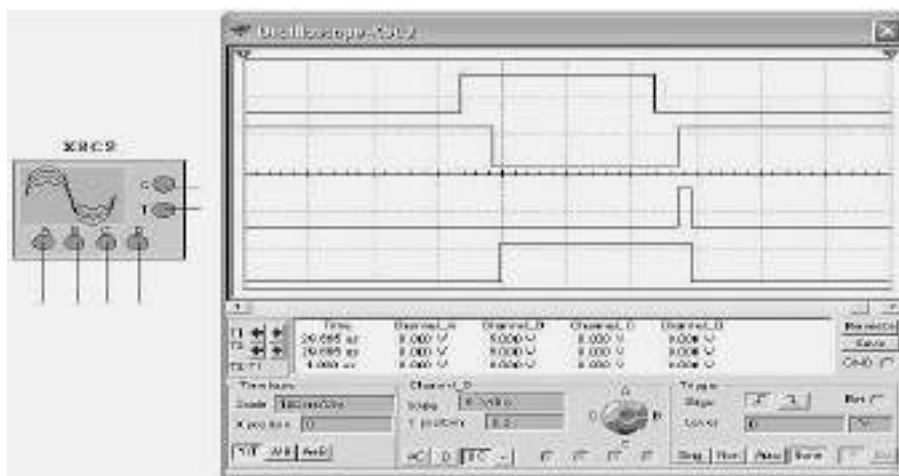


Рисунок 6.64 – Чотириканальний осцилограф

Вибір каналу здійснюється мишкою шляхом поєднання покажчика зі світлою смужкою на перемикачі та переміщення смужки у потрібне положення при натиснутій лівій клавіші. За замовчуванням у розділі Time base на кнопках керування режимом розгортки та підсумовуванням сигналів нанесено A/V та A+V.

Під час натискання правою клавішею мишки по цих кнопках з'являються контекстні меню, що дозволяють на місце каналів A або V підставити будь-який (разом з вихідним дванадцять варіантів). У вибраній комбінації, наприклад, A/V, перший символ – вісь Y, другий символ – вісь X.

Осцилограф також має два візери, які оцифровуються для чотирьох каналів. У рядках T1, T2, T2–T1 під іменами каналів Canal_A (B, C, D) відтворюються значення напруг, позначені першим і другим візерами, та його різниця. Якщо якийсь канал не підключений, то в колонці під його найменуванням нічого не відтворюється. У колонці Time відображуються час, позначений першим і другим маркером, і різниця оцифрованих моментів часу.

Для осцилографів фірм Tektronix і Agilent Multisim емулює повністю їхній зовнішній вигляд – всі органи управління, входи, аж до кнопки включення живлення осцилографа. Порівняно з розглянутими раніше, ці прилади мають ширші можливості та розраховані на роботу професіоналів.

Вимірювач вольт-амперних характеристик призначений для визначення вольт-амперних характеристик (ВАХ) діодів, біполярних та МОП транзисторів. Умовне позначення IV Analyzer: I означає струм, V – напруга. Умовне позначення та вигляд лицьової панелі аналізатора показано на рис. 6.65.

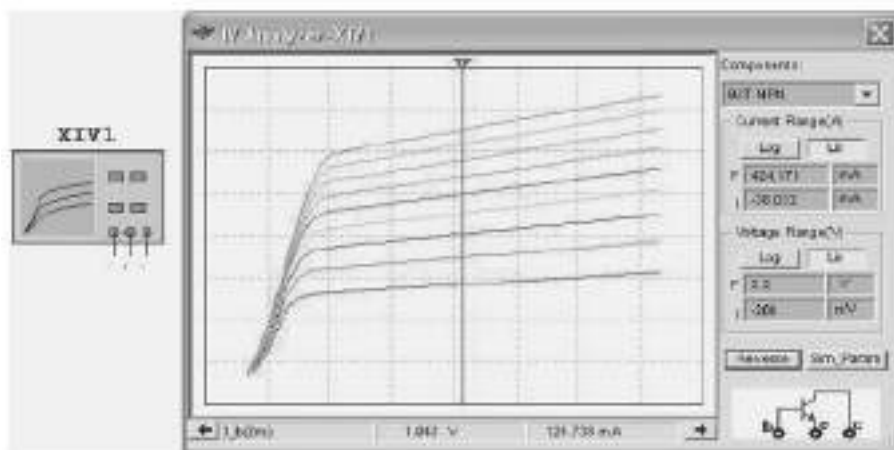


Рисунок 6.65 – Вимірювач вольт-амперних характеристик

Прилад має простий та зрозумілий інтерфейс. Для визначення ВАХ у верхній частині лицьової панелі у вікні досліджуваних елементів (Components) вибирається зі списку тип досліджуваного елемента:

- діод (Diode);

- біполярний транзистор типу n–p–n або p–n–p (BJT, NPN, BJT PNP);
- МОП транзистор з каналом типу p або n (PMOS, NMOS).

При цьому внизу відтворюється умовне позначення досліджуваного елемента, показуючи, до яких виводів приладу необхідно підключати виводи досліджуваного елемента.

Далі встановлюються параметри, за яких проводиться визначення характеристики. Для цього натискають кнопку Sim_Param (значення досліджуваних параметрів). Відкривається однойменне вікно діалогу Simulate Parameters (рис. 6.66), в якому користувач встановлює необхідні параметри або погоджується з параметрами вимірювань, запропонованими пакетом.

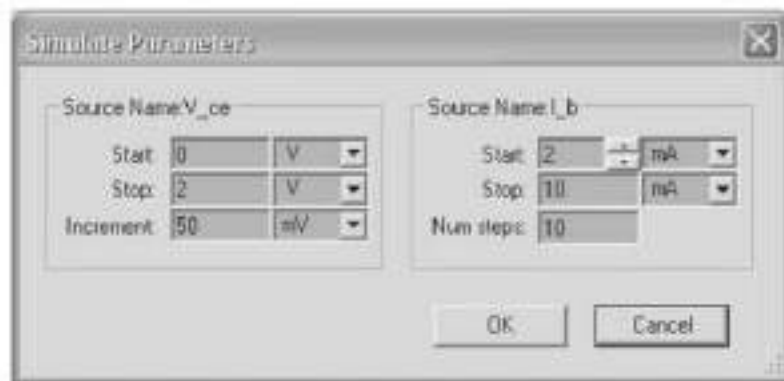


Рисунок 6.66 – Вікно діалогу встановлення значень досліджуваних параметрів

Вигляд вікна діалогу залежить від досліджуваного елемента. Для діодів визначаються початкове – Start, кінцеве – Stop значення, крок зміни напруги – Increment. Для біполярних (польових) транзисторів визначаються аналогічні значення напруги колектор – емітер V_{ce} (витік – стік) та керуючого струму бази I_b (напруги затвор – витік).

Число кривих у сімействі вихідних характеристик не може перевищувати 10. Для транзисторів типу *p-n-p* (PMOS) у вікні установки параметрів відтворюється вимикач, при активному стані якого збільшуються негативні значення напруг і відкладаються зліва направо.

Після виконання зазначених установок запускають процес моделювання і на екрані приладу отримують характеристику. По осі X відкладається напруга, по осі Y – струм. Користувач може вибрати логарифмічний або лінійний масштаб (Log – Lin), змінити мінімальне (початкове – Initial) або кінцеве (Final) значення струму та напруги (Current Range – A та Voltage Range – V), для яких на екрані формуються графіки, що забезпечує наочніше відтворення необхідних фрагментів параметрів.

Для довідки в рядку стану вікна діалогу правіше кнопки зі стрілкою вліво за замовчуванням відтворюється початкове значення керуючого струму, що відповідає найнижчій кривій. За допомогою візира значення цієї кривої можуть бути оцифровані. Результати оцифровки відображаються у рядку стану.

Для оцифрування будь-якої іншої кривої її треба попередньо вибрати, клацнувши по ній або використовуючи команду контекстного меню Select Trace ID. Переміщення візира здійснюється традиційними способами: переміщенням прапорця, кнопками зі стрілками або командами контекстного меню. Як і у всіх приладах з екранами, колір фону можна змінити на протилежний (кнопка Reverse).

Пробник струму. Призначений для контролю виду і значень струмів, що протікають у ланцюгу, на яку поміщений пробник. Пробник струму перетворює струм у напругу відповідно до масштабу (відношення напруги до струму), встановленим користувачем у вікні діалогу властивостей пробника. За допомогою пробника просто контролювати напругу та струм у деякому ланцюзі. На рис. 6.67 показано можливе застосування пробника струму.

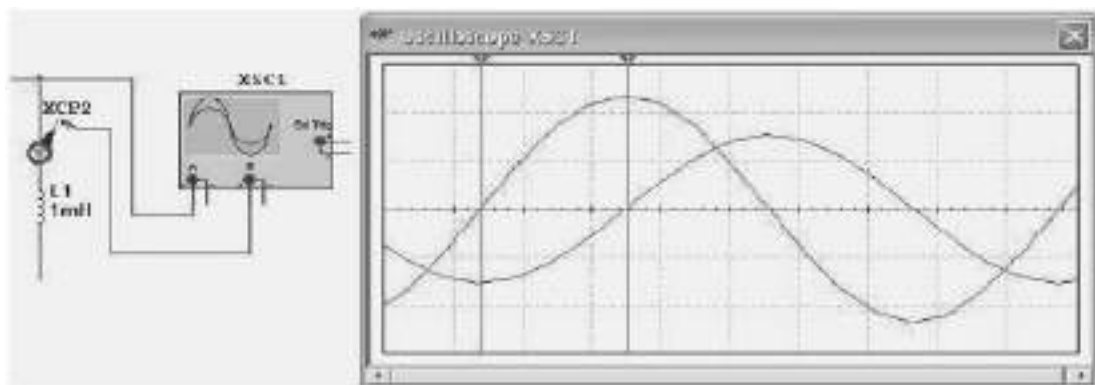


Рисунок 6.67 – Застосування пробника струму спільно з осцилографом

Канал А дозволяє контролювати напругу на індуктивності, за допомогою пробника канал відтворює струм у ній. Струм у індуктивності зміщений (відстає) щодо напруги на чверть періоду. За замовчуванням масштаб конвертування напруги в струм (Ratio of Voltage to Current) дорівнює 1 V/mA. Для його зміни треба подвійним клацанням по пробнику викликати вікно діалогу Current Probe Properties і встановити необхідний масштаб.

Вимірювач АЧХ та ФЧХ (Bode Plotter) Лицьову панель приладу показано на рис. 6.68.

Вимірювач призначений для аналізу амплітудно-частотних і фазо-частотних характеристик та представлення їх у лінійному або логарифмічному масштабі.

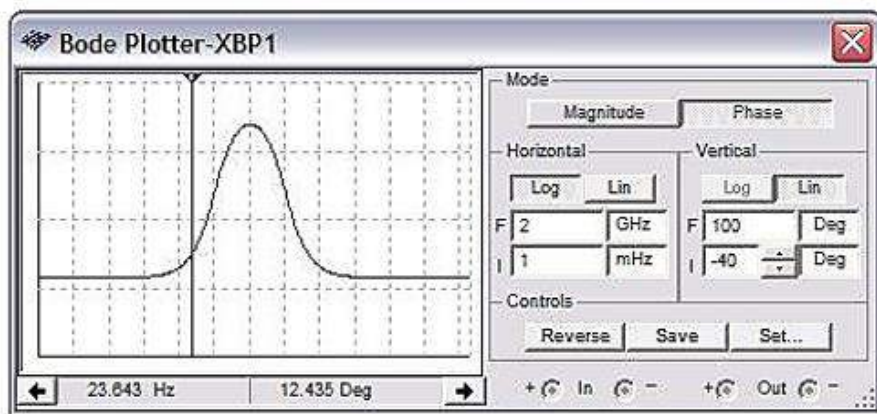


Рисунок 6.68 – Вимірювач АЧХ і ФЧХ

Аналізатор спектра сигналів. Призначений для визначення інтенсивності гармонійних складових у досліджуваному сигналі і подання результату досліджень у вигляді спектра – залежності амплітуд гармонійних складових від частоти. Умовне позначення та зовнішній вигляд приладу показано на рис. 6.69.

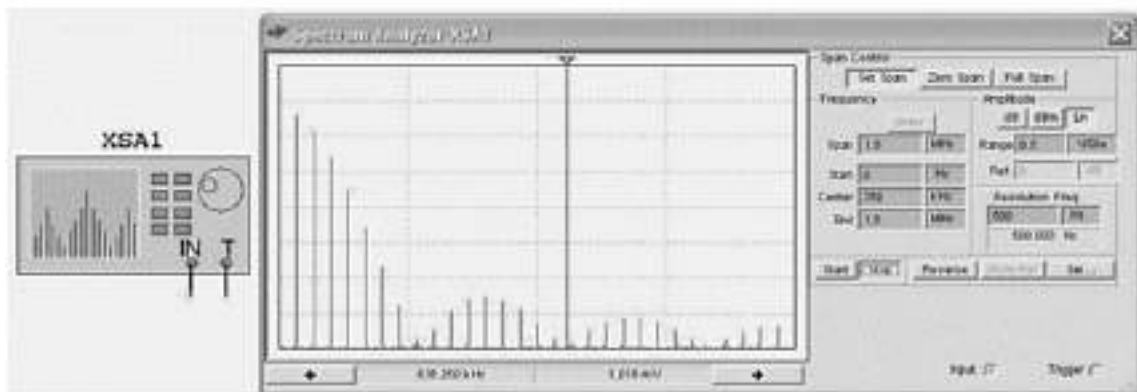


Рисунок 6.69 – Аналізатор спектра сигналів

У більшості випадків для проведення досліджень достатньо підключити інформаційний вхід аналізатора (In) до джерела сигналу, визначити діапазон (Set Span) частот (Frequency), в якому проводитиметься дослідження завданням початкового (Start) і кінцевого (End) значень частот. У ході зміни цих значень, діапазону частот чи середнього значення (Center) стає активною кнопка введення (Enter), натискання на яку призводить до обчислення (корекції) інших значень з урахуванням параметрів, введених раніше.

Запустивши процес моделювання (Run) та аналізатор (Start) на лицьовій панелі аналізатора, отримаємо спектр досліджуваного сигналу.

Перетягуючи візир за верхній прапорець або за допомогою кнопок зі стрілками вліво-вправо, можна оцифрувати значення амплітуди та частоти

гармонік. Кнопка Stop дозволяє зупинити процес моделювання та зміни установки аналізатора.

Для зручного сприйняття результатів досліджень у розділі Amplitude необхідно підібрати масштаб відтвореного зображення за амплітудою (Range), а також спосіб представлення амплітуд гармонік – лінійний (Lin) у вольтах або логарифмічний у децибелах ($\text{dB} = 20\log_{10}(V)$; $\text{dBm} = 10\log_{10}(0.775^2)$), де V – амплітуда гармоніки.

Для логарифмічного способу подання можна задати лінію відліку (Ref), яку можна за допомогою кнопки (Show Ref/Hide Ref) відтворити або приховати на екрані аналізатора. Якщо в розділі управління діапазоном досліджуваних частот встановити перемикач Zero Span (Центральна частота), то користувач може встановити тільки середню частоту (Center). При активному перемикачі Full Span (Повний діапазон) гармоніки визначаються в діапазоні від 0 Гц до 4 МГц.

Можна також встановити роздільну здатність приладу за частотою (Resolution Freq). Мінімальне значення дозволу за замовчуванням дорівнює кінцевій частоті, поділеній на 1024 (кількість точок, на основі яких здійснюється швидке перетворення Фур'є, FFT Points). Натиснувши кнопку Set у вікні діалогу, можна змінити число точок, вибравши одне зі значень розкритого списку з однойменною назвою. У цьому вікні діалогу також можна визначити джерело синхронізуючих сигналів – зовнішній (External) або внутрішній (Internal); спосіб синхронізації (Trigger mode) – безперервний або одиночний сигнал (Continuous – Single), а також задати поріг синхронізуючого сигналу (Threshold).

Аналізатор спотворень сигналів. Прилад призначений для визначення спотворень синусоїдального сигналу, тобто відмінності форми досліджуваного сигналу від гармонійного. Умовне позначення та вид лицьової панелі приладу показані на рис. 6.70.

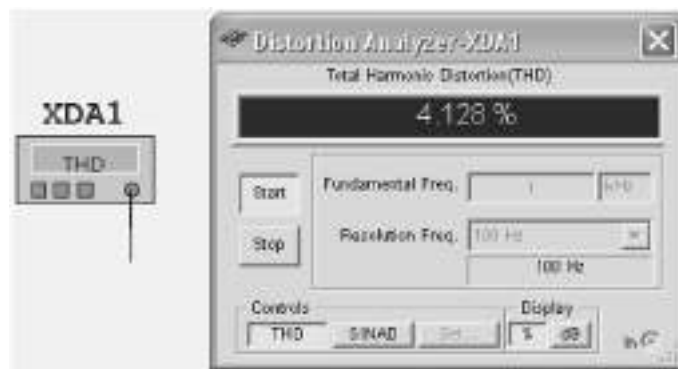


Рисунок 6.70 – Аналізатор спотворень сигналів

Прилад має єдиний вхід, до якого підключається досліджуваний сигнал. Для сигналу, що не містить шумів, визначається сумарний коефіцієнт гармонік – THD (Total Harmonic Distortion), а результат виражається у відсотках. Якщо сигнал містить шум, то визначаються спотворення, що вносяться шумом і відмінністю досліджуваного сигналу від гармонійного – режим SINAD (Signal Plus Noise and Distortion), а результат виражається в децибелах. Для аналізу встановлюються частота досліджуваного сигналу (Fundamental Freq), яка може приймати значення від одиниць герц до десятків гігагерц, і дискретність зміни частоти гармонік, з урахуванням яких обчислюється спотворення (Resolution Freq).

Дискретність зміни частоти гармонік залежить від частоти основного коливання і вибирається зі списку. Потім натискається кнопка Start. Величина спотворення сигналу визначається як відношення кореня квадратного із суми квадратів діючих значень гармонійних складових досліджуваного сигналу до значення основної гармоніки цього сигналу (методика IEEE).

Натиснувши кнопку Set, у вікні діалогу можна змінити методи обчислення спотворення, число гармонік і число відліків досліджуваного сигналу, на основі яких, з використанням швидкого перетворення Фур'є, проводиться аналіз. За методикою ANSI/IEC спотворення визначається як відношення кореня квадратного із суми квадратів діючих значень гармонічних складових досліджуваного сигналу до кореня квадратного із суми квадратів діючих значень, включаючи основну гармоніку досліджуваного сигналу.

Генератор слів (Word Generator) Генератор слів призначений для генерації 8192 32-розрядних двійкових слів. Зовнішній вигляд та лицьову панель генератора показано на рис. 6.71.

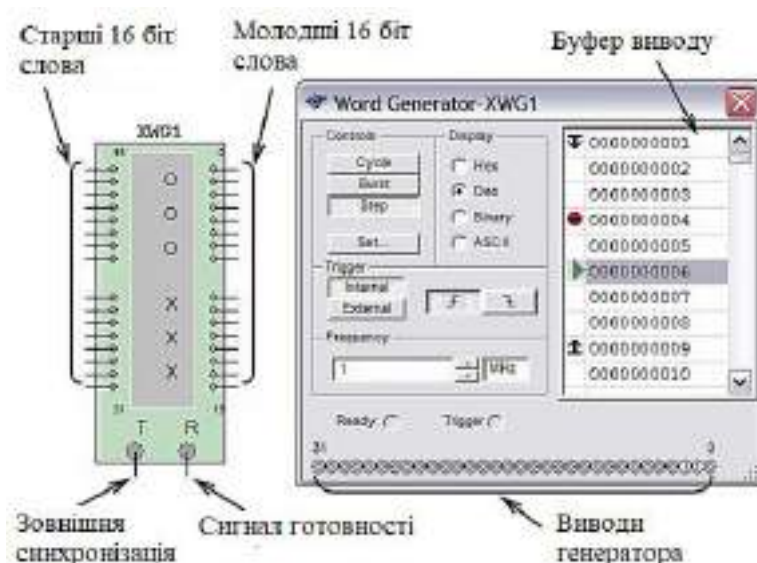


Рисунок 6.71 – Генератор слів

Введення слів, що генеруються, проводиться у буфері введення. Формат відображення кодів слів вибирається за допомогою групи кнопок Display (Hex – шістнадцятковий, Dec – десятковий, Binary – двійковий, ASCII – символний). Частота генерації кодів слів визначається у вікні Frequency (Частота) і лежить у діапазоні від 1 Гц до 1000 МГц. У процесі роботи на кожному виводі генератора з'являється логічний рівень згідно з розрядом двійкового кодового слова, при цьому генератор працює в трьох режимах:

Step (Покроковий) – щоразу при подачі чергового слова на вихід моделювання зупиняється;

Burst (Пакетний) – генерується послідовність кодів слів, починаючи з початкової позиції і закінчуючи кінцевою позицією, моделювання зупиняється при досягненні кінцевої позиції;

Cycle (Циклічний) – на виводах генератора послідовно з'являються логічні рівні згідно з комбінацією слів, генерування здійснюється доти, доки не буде зупинено моделювання або досягнуто точки переривання (Breakpoint).

Під час моделювання курсор у вікні «буфер виведення» вказує на поточне слово, що генерується. Зупинивши моделювання, можна змінити положення курсору, початкову позицію, кінцеву позицію, і навіть точку переривання.

Під час натискання кнопки Set відкривається діалогове вікно властивостей буфера (рис. 6.72, а).

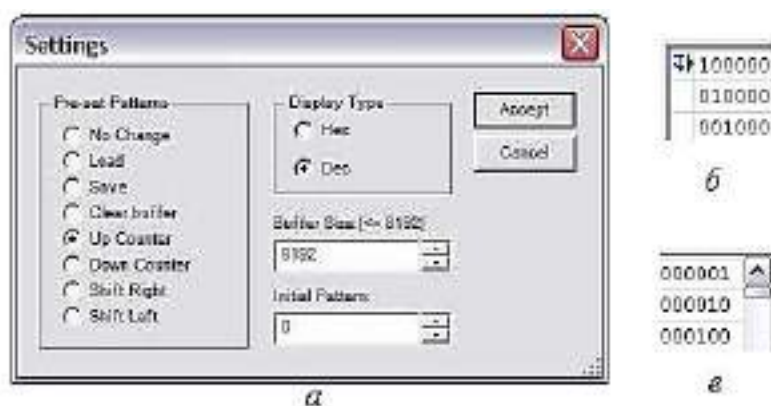


Рисунок 6.72 – Вікно властивостей буфера (а) та його заповнення (б, в)

Вікно має установки:

- No Change – залишити без змін;
- Load – завантажити кодові слова із файлу (з розширенням .dp);
- Save – зберегти кодові слова у файл;
- Clear buffer – обнулити зміст буфера;
- Up Counter – заповнити буфер кодів словами, починаючи з коду, вказаного в полі Initial Pattern (за замовчуванням 0x0000), з подальшим збільшенням на 1 у кожному наступному рядку;

– Down Counter – заповнити буфер кодovими словами, починаючи з коду, вказаного в полі Initial Pattern (за замовчуванням 0x0400), з подальшим зменшенням на 1 у кожному наступному рядку;

– Shift Right – заповнити буфер кодovими словами, починаючи з коду, вказаного в полі Initial Pattern (за замовчуванням 0x80000000), з наступним двійковим зрушенням праворуч на 1 розряд у кожному наступному рядку (рис. 6.72 , б);

– Shift Left – заповнити буфер кодovими словами, починаючи з коду, вказаного в полі Initial Pattern (за замовчуванням 0x0001), з наступним двійковим зрушенням вліво на 1 розряд у кожному наступному рядку (рис. 6.72, в);

Запуск генератора може синхронізуватися як внутрішнім (Internal), так і зовнішнім (External) сигналом синхронізації. На вихід Ready подається сигнал готовності.

Логічний аналізатор (Logic Analyzer). Логічний аналізатор (ЛА) – пристрій, призначений для діагностики цифрових схем. ЛА дозволяє відстежувати та записувати стани логічних елементів цифрових електронних пристроїв, аналізувати та візуалізувати їх. Зовнішній вигляд та лицьову панель ЛА показано на рис. 6.73.

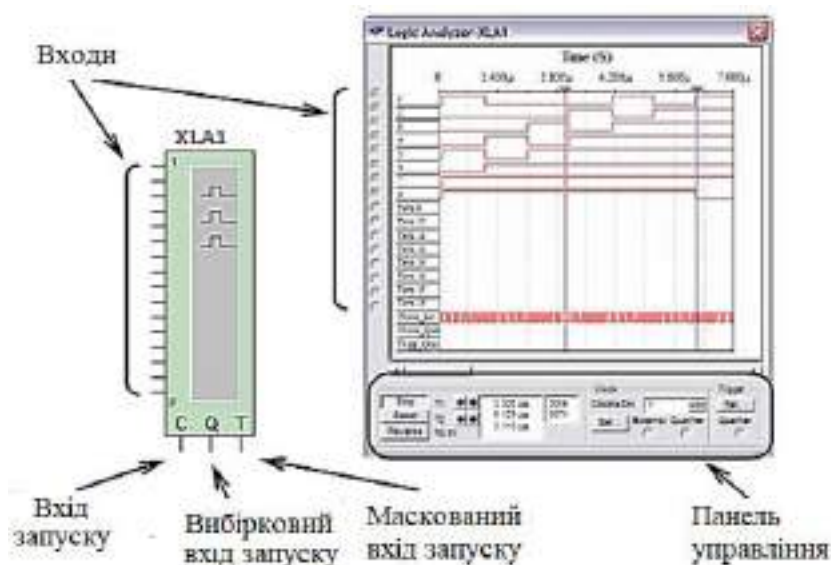


Рисунок 6.73 – Логічний аналізатор

ЛА має 16 каналів для знімання сигналів, а також кілька входів запуску. Крім цього, прилад забезпечений двома курсорами, які дозволяють проводити вимірювання в часовій області. Якщо вхід 1 вважати молодшим розрядом, а вхід 16 – старшим, то стан усіх входів може бути представлено 16-розрядним двійковим кодом. Код, що відповідає позиції курсору, відображається у полі «вхідний код» (рис. 6.74).



Рисунок 6.74 – Панель керування логічного аналізатора

Під час натискання кнопки «Set» у групі Clock (тактовий генератор) відкривається діалогове вікно налаштування параметрів тактування вхідних сигналів (рис. 6.75).

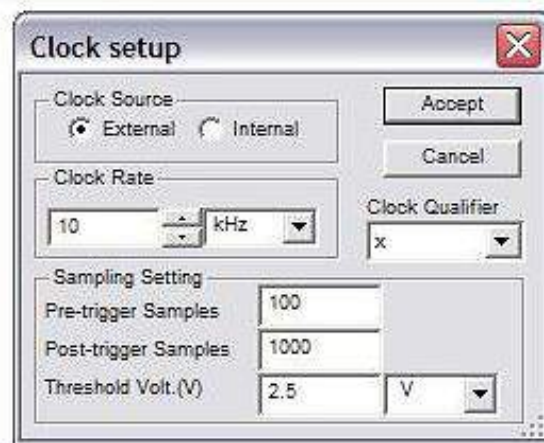


Рисунок 6.75 – Налаштування параметрів синхронізації

Тактування сигналів здійснюється з використанням зовнішнього (External) або внутрішнього (Internal) джерела. У полі Clock Qualifier встановлюється активний рівень сигналу синхронізації. У полі Clock Rate встановлюється частота вибірки аналізатора.

У групі Sampling Setting задаються параметри вибірки сигналів:

- Pre-trigger Samples – збір даних здійснюється до надходження імпульсу запуску;
- Post-trigger Samples – збір даних починається після надходження імпульсу запуску і продовжується доти, доки не буде набрано задану кількість відліків;
- Threshold Volt (V) – порогова величина.

Додаткові умови запуску аналізатора здійснюються за допомогою діалогового вікна Trigger Settings (рис. 6.76).

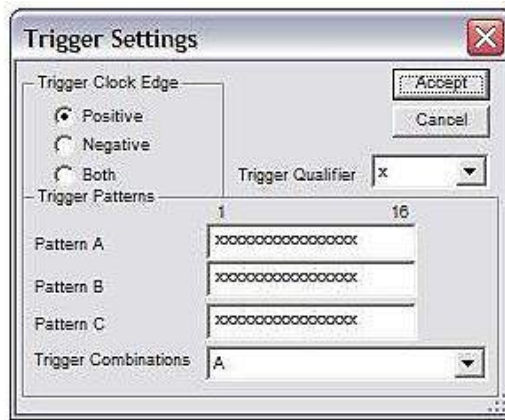


Рисунок 6.76 – Налаштування додаткових параметрів синхронізації

У цьому вікні налаштовується маска, за якою здійснюється фільтрація логічних рівнів і синхронізація вхідних каналів.

Логічний перетворювач (Logic Converter). Логічний перетворювач призначений для виконання функціональних перетворень у схемі. Зовнішній вигляд умовного позначення логічного перетворювача показано на рис. 6.77.

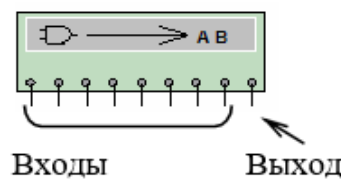


Рисунок 6.77 – Умовне позначення логічного перетворювача

Логічний перетворювач має вісім входів (A, B, ..., H) і один вихід (Out), екран для відображення таблиці істинності досліджуваної схеми, рядок для відображення її логічного виразу, панель вибору перетворення (Conversions). Лицьова панель пристрою показана на рис. 6.78.

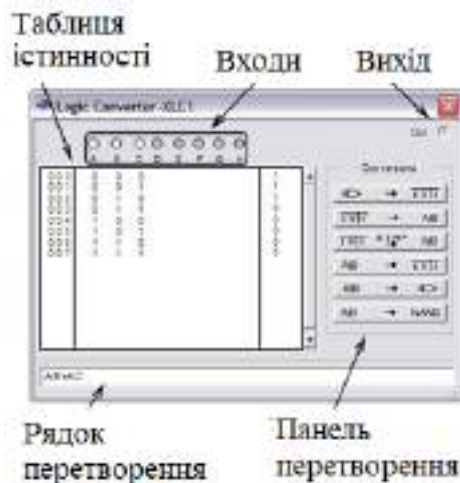


Рисунок 6.78 – Лицьова панель логічного перетворювача

За допомогою перетворювача можна здійснювати наступні операції.

Отримання таблиці істинності схеми. Для отримання таблиці істинності необхідно підключити входи логічного перетворювача до входів досліджуваної схеми, вихід логічного перетворювача з'єднати з виходом схеми, запустити перетворення натисканням кнопки, рис. 6.79.

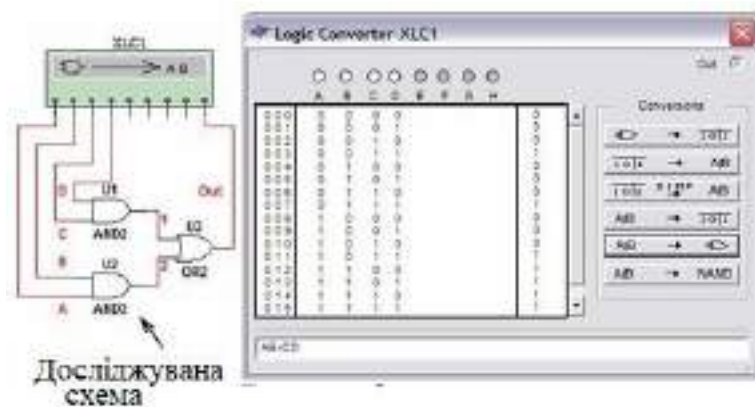


Рисунок 6.79 – Отримання таблиці істинності

Отримання логічного виразу за таблицею істинності. Для цього необхідно задати кількість аргументів і для кожного набору задати значення функції алгебри логіки. Завдання кількості аргументів здійснюється за допомогою екранних кнопок над літерами на лицьовій панелі приладу. Отримати логічний вираз у диз'юнктивній нормальній формі можна натисканням кнопки $\overline{101} \rightarrow \text{IMP } A|B$.

Отримання таблиці істинності за логічним виразом. Для цього необхідно в рядок перетворення ввести логічний вираз. Натиснути кнопку $A|B \rightarrow \overline{101}$. Під час введення виразу інверсія позначається апострофом «'», логічне додавання знаком «+», логічне множення не позначається.

Синтез логічного пристрою за логічним виразом. Для отримання схеми, що реалізує функцію, задану логічним виразом, необхідно ввести вираз у рядку перетворення і натиснути кнопку $A|B \rightarrow \text{AND}$. Для побудови схеми в базисі Шеффера (I-NE) натиснути кнопку $A|B \rightarrow \text{NAND}$.

6.2.4 Створення електричних схем пристроїв

Створення схеми для дослідження на екрані дисплея включає такі операції:

- вибір елементів із бібліотеки та їхнє розміщення на робочому полі;
- завдання розрахованих значень параметрів елементів;
- поєднання виводів елементів провідниками;
- коригування імен і номерів елементів та вузлів;
- нанесення необхідних написів.

Бібліотека програми Multisim містить описи більше десяти тисяч елементів, включаючи аналогові та цифрові компоненти та вузли, а також функціональні блоки, що виконують математичні операції. Для зручності користувача всі бібліотечні компоненти розподілені за кількома групами, які можна переглянути, виконавши з головного меню команду Tools\Database\Database Manager, рис. 6.80.

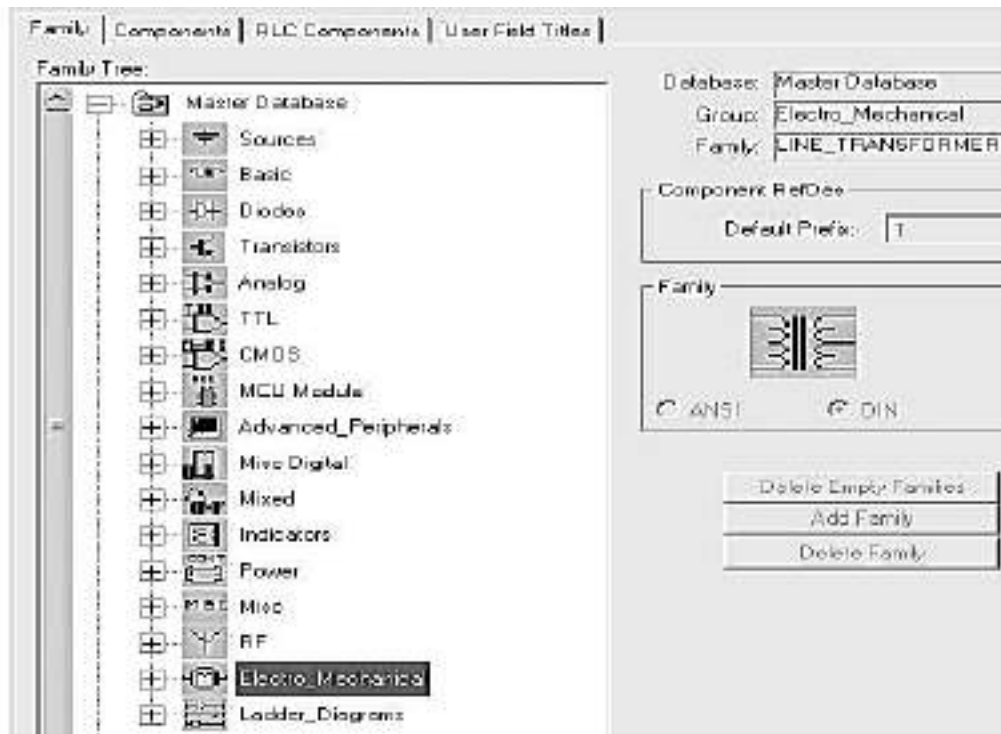


Рисунок 6.80 – Групи вбудованих бібліотечних елементів

Кожен елемент має найменування, умовне графічне позначення, математичну модель, зовнішні конструктивні параметри.

Доступ до даних бібліотеки для вибору необхідних елементів можна здійснити з головного меню за допомогою команди Place\Component, виконання якої призведе до появи панелі Select a Component, рис. 6.81.

Розкриття підменю «Group», що містить список груп елементів, і виділення обраної групи, наприклад, діодів (Diodes) призводить до появи вікна з назвами (Family) всіх елементів цієї групи.

Виділення в групі необхідних елементів необхідного виду, наприклад, напівпровідникових випрямляючих діодів (DIODE) призводить до появи в середньому вікні списку наявних у цій підгрупі елементів.

При виборі необхідного приладу (наприклад, діода 1N448) його графічне позначення відображується у вікні «Symbol» правої частини панелі. Натискання кнопки ОК дозволяє зробити буксування компонента у вибрану область робочого поля і фіксування за допомогою клацання ЛКМ (лівою кнопкою мишки).

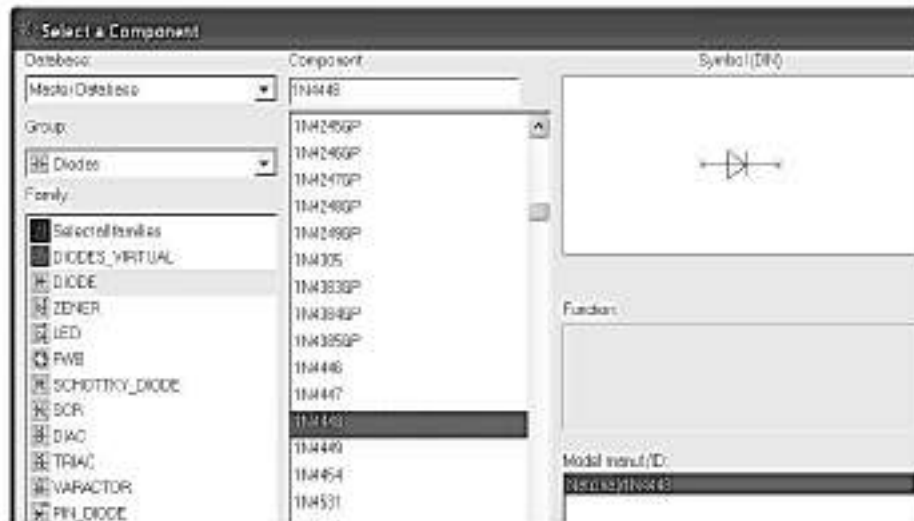


Рисунок 6.81 – Панель для вибору бібліотечних елементів

Так само проводиться робота і з групою елементів (BASIC), рис. 6.82.

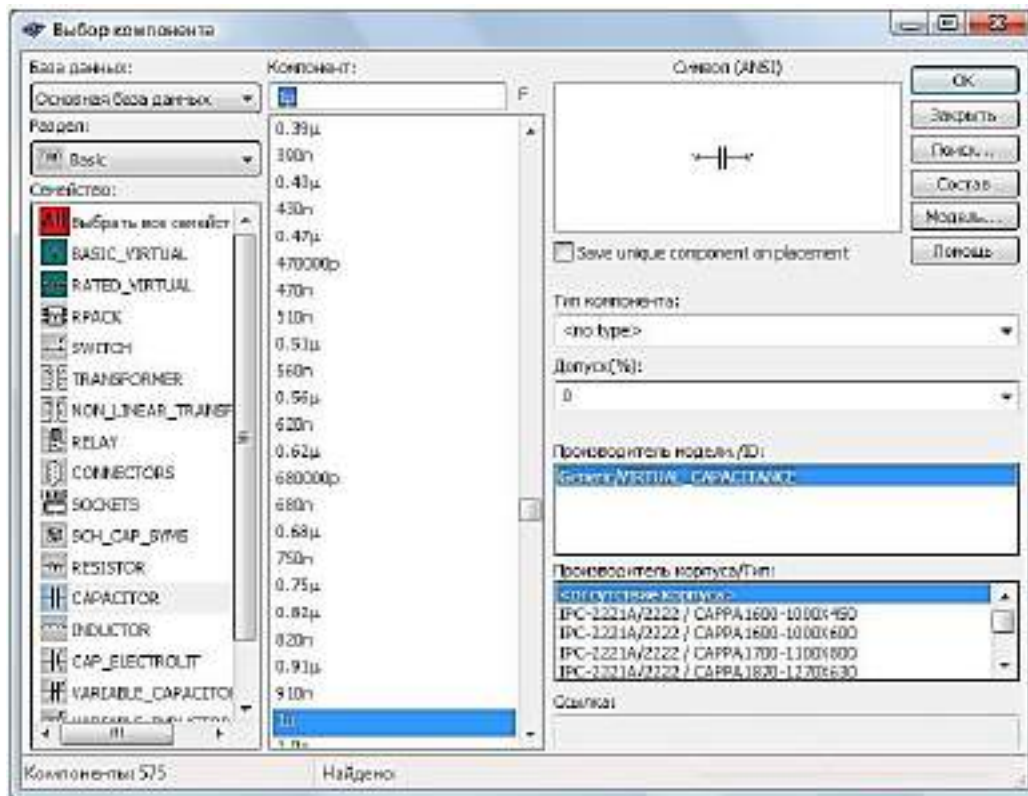


Рисунок 6.82 – Робота з групою елементів (BASIC)

Особливий вид бібліотечних елементів становлять, так звані, віртуальні компоненти, наприклад, `Diodes_VIRTUAL`, які відрізняються лише тим, що не є промислово виробленими, тобто покупними виробами.

Дані елементи з встановлюваними користувачем параметрами зручно застосовувати під час дослідження пристроїв, що розробляються. Елементи

для цієї групи виділені зеленим кольором у бібліотеці і, крім того, для зручності розміщені на окремій панелі, рис. 6.83, а.



Рисунок 6.83 – Панель віртуальних елементів (а)
та розташування елемента корпус (б)

У кожній групі міститься набір віртуальних компонентів, ярлики і назви яких з'являються у вікнах, що відкриваються. Елементи досліджуваної схеми вибираються з бібліотеки або панелі віртуальних компонентів і розміщуються на робочому полі згідно з ескізним кресленням. За необхідності розмір робочого поля і елементів можна змінити за допомогою відповідних команд меню View. При розміщенні чергових елементів або блоків програма автоматично надає кожному індивідуальні позначення, наприклад, V1, V2, R1, R2, R3, ... C1.

Обов'язковим компонентом схеми є корпус або земля (Ground), якому автоматично надається нульовий потенціал. Ярлик елемента розташований на панелі віртуальних елементів у групі Power Source (рис. 6.83, б).

Натисканням ПКМ (правою кнопкою мишки) на робочому полі відкривається панель для додавання графічних об'єктів та текстових пояснень (рис. 6.84, а).

Можлива також зміна загальних установок оформлення схеми. Для цього клацанням ЛКМ на кнопці Properties відкривається панель Sheet Properties. Для переміщення або повороту елемента на робочому полі його необхідно виділити за допомогою клацання ЛКМ на зображенні (вибраний елемент оточується пунктирним прямокутником).

Для повороту виділеного елемента потрібно клацанням ПКМ на вільному місці робочого поля відкрити панель редагування орієнтації символу виділеного елемента (рис. 6.84, б).

При повороті елемента за допомогою наведених на панелі команд треба звертати увагу на переміщення вхідних (початкових) і вихідних (кінцевих) затискачів, тому що вони характеризують прийняті Spice позитивні напрямки струмів і напруг. Переміщення символу виділеного елемента здійснюється натисканням на його зображенні ЛКМ (символ прив'язується до курсора)

та транспортуванням його в нове місце. Переміщати можна як елементи загалом, так і їх етикетки, попередньо їх виділивши.

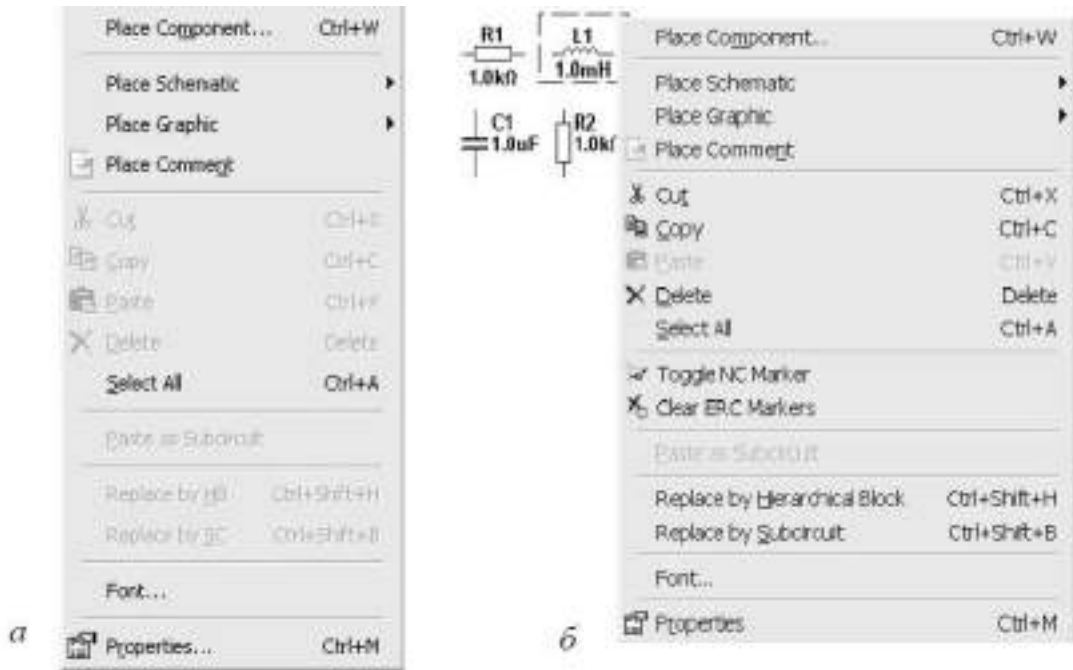


Рисунок 6.84 – Панелі команд розміщення графіків, пояснень (а) та редагування орієнтації символу виділеного елемента (б)

Наступний етап створення схеми на екрані полягає у виконанні з'єднань провідниками відповідних виводів елементів. Для цього необхідно підвести курсор мишки (стрілку) до одного з виводів і потім при натиснутій ЛКМ вести провід (лінію) до іншого виводу. При відпусканні ЛКМ проводиться фіксація створеного з'єднання.

Внаслідок нульового опору провідника, що з'єднує виводи елементів і, отже, еквіпотенційності всіх його точок, провідник ідентифікується з вузлом. При включеній опції «Show Nodes» на схемі з'являється порядковий номер введеного вузла, рис. 6.85, а.

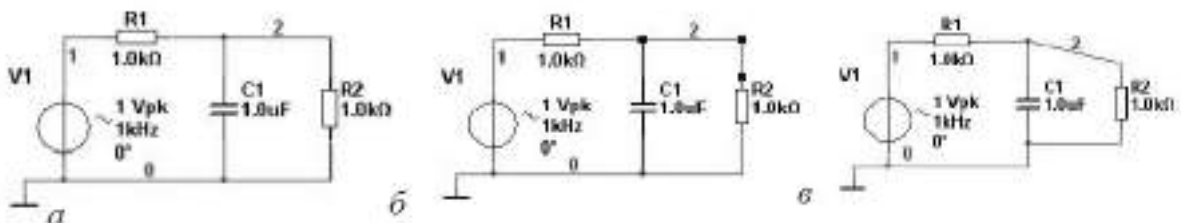


Рисунок 6.85 – З'єднання елементів провідниками (а), виділення провідників (б) та зміна конфігурації схеми (в)

Під час проведення провідника між затискачами він автоматично обходить місця розташування інших елементів. Є також можливість вибору

користувачем траєкторії провідника за допомогою виконання клацань ЛКМ у певних точках, в яких фіксується його положення.

Під час підключення провідника до іншого дроту утворюється та відображується точка з'єднання. Початок дроту можна помістити в будь-яку точку робочої області, виконавши в ній подвійне клацання ЛКМ. Крім того, з використанням команд Place Junction, Place Wire, Place Bus на схему можна нанести вузол з'єднання, провідник або шину, до яких підключаються виводи елементів.

Для зручності та наочності розміщення елементів та з'єднань на робоче поле можна нанести сітку. Це виконується за допомогою команди головного меню View>Show Grid.

Конфігурацію схеми можна відкоригувати за допомогою зміни розташування провідників. Для цього необхідно виділити провідник клацанням на ньому ЛКМ. При цьому фіксовані на робочому полі точки позначаються темними квадратами, рис. 6.85, б. Поміщення курсору (стрілки) на квадрат дає можливість переміщення вузла в будь-яку точку робочого поля.

Крім того, під час переміщення курсора на прямолінійний відрізок виділеного провідника з'являється подвійна стрілка, за допомогою якої можна переміщати цей відрізок і змінити конфігурацію провідників (рис. 6.85, в).

У процесі оформлення схеми є можливість зміни кольору провідників, а також номерів вузлів (назв провідників). Під час виконання клацання ПКМ на виділеному провіднику відкривається панель команд управління (рис. 6.86, а).



Рисунок 6.86 – Панелі команд керування кольором (а)
та найменуванням провідників (б)

Щоб змінити колір провідників, необхідно відкрити команду Change Color або Segment Color і вибрати відповідний колір. При виборі команди Properties відкривається панель, у вікні якої можна записати нову назву провідника (рис. 6.86, б).

Після повного складання та оформлення на робочому полі схеми дослідження необхідно для кожного елемента замінити його параметри

на розраховані користувачем на стадії підготовки моделювання. Для цього на вибраному елементі здійснюється подвійне клацання ЛКМ і у вікні, що відкрилося, вносяться відповідні зміни. Наприклад, для елемента R1 на рис. 6.87, а з'явиться зображення панелі Resistor з параметрами резистора, (рис. 6.87, б).

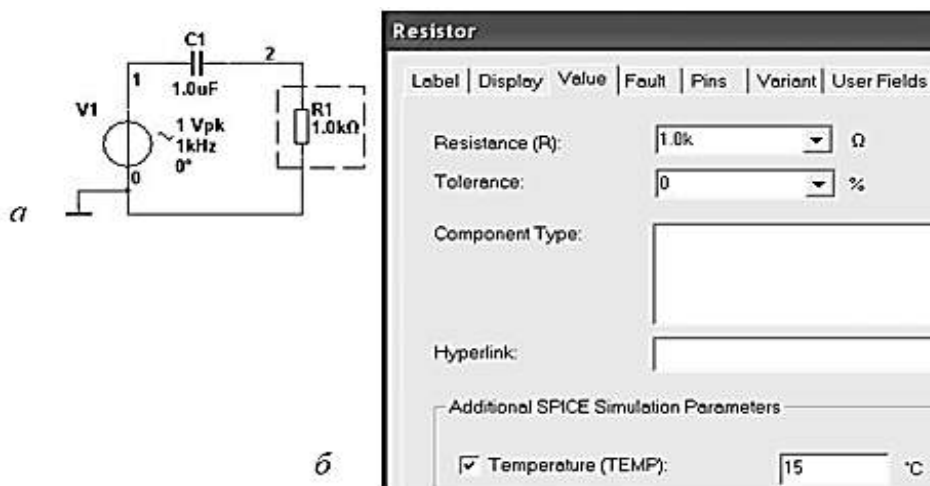


Рисунок 6.87 – Схема (а) та панель з параметрами резистора на робочому полі (б)

Вибираючи відповідні команди, можна у вікнах встановити нове ім'я елемента (Label), вказати атрибути позначень (Display), ввести значення (Value), попередньо розраховані (Resistance, Temperature) та ін. Аналогічно необхідно встановити параметри всіх елементів схеми.

Еквівалентні схеми електротехнічних пристроїв, як правило, містять велику кількість елементів, які дуже складно, а часто і просто неможливо розмістити на одному аркуші робочого простору. Під час використання багатосторінкового уявлення втрачається наочність і можуть виникнути труднощі під час виконання моделювання. У цьому випадку загальну схему зручно подати у вигляді окремих функціонально завершених блоків. У програмі застосовуються такі методи організації елементів: підсхема (Subcircuit) і блок (Hierarchical Block), які дуже схожі. Основна відмінність в тому, що підсхеми зберігаються разом з основною схемою, а блоки під своїми іменами в окремих файлах, на які посилається основний файл вихідної схеми. Підсхеми більш зручні в роботі, тому що не можуть бути відокремлені від основної схеми і поміщені в інші файли. Ієрархічні блоки зручні під час використання їх у кількох схемах. Підсхема створюється за допомогою команди з головного меню Place New Subcircuit, в результаті виконання якої на робочому полі відкривається панель Subcircuit Name (рис. 6.88, а).

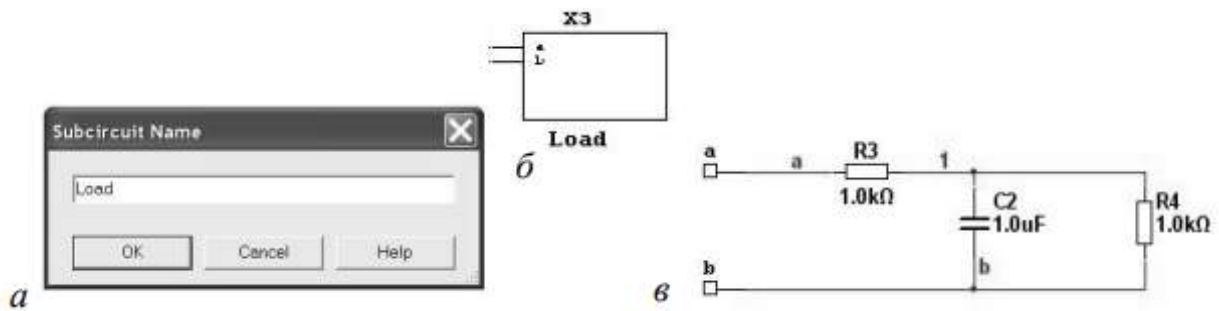


Рисунок 6.88 – Панель введення імені підсхеми (а), позначення підсхеми (б) та електрична схема (в)

У вікні панелі необхідно задати ім'я підсхеми, наприклад, Load. Підтвердження введення назви натисканням клавіші «ОК» призводить до створення у робочому полі зображення етикетки підсхеми (рис. 6.88, б). Подвійним клацанням ЛКМ на етикетці відкривається робоче поле, у якому формується електрична схема блоку, рис. 6.88, в. Потім необхідно створити зовнішні затискачі підсхеми, за допомогою яких вона з'єднується з іншими частинами схеми, що досліджується. Це виконується з основного меню командою Place\Connectors\HB/SC Connector. Ця операція повторюється всім зовнішнім затискачам підсхеми. Далі можна описаним раніше способом змінити найменування відповідних вузлів підсхеми та зовнішніх затискачів. Створена підсхема міститься у задану область робочого поля досліджуваної схеми. Ієрархічний блок створюється з основного меню командою Place New Hierarchical Block. При цьому відкривається діалогова панель Hierarchical Block Properties (рис. 6.89, а).

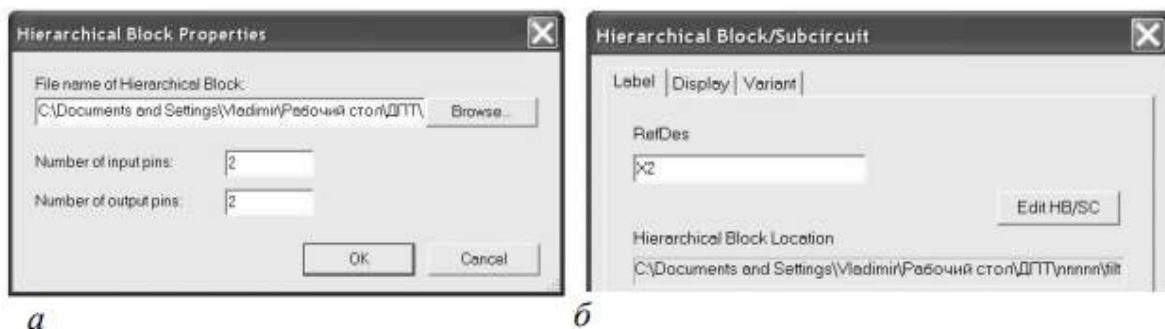


Рисунок 6.89 – Панелі введення параметрів блоку (а) та редагування його параметрів (б)

За замовчуванням створений блок зберігається у файлі програми Multisim. З точки зору користувача зручніше зберігати всі файли досліджуваної схеми в зовнішній папці по відношенню до програмних файлів Multisim.

Для цього необхідно вибрати команду Browse, визначити папку для розміщення блоку, ввести прийняте ім'я блоку та підтвердити це за допомогою команди «Зберегти». Це призводить до повернення до панелі Hierarchical Block Properties, у вікна якої необхідно ввести числа вхідних та вихідних зовнішніх затискачів блоку. Підтвердження введення даних кнопкою ОК створює у робочому полі етикетку блоку. Подвійним клацанням ЛКМ на етикетці відкривається панель Hierarchical Block/Subcircuit, рис.6.89, б. Вибір команди Edit HB/SC відкриває новий аркуш робочого поля, у якому створюється еквівалентна схема блоку, наприклад, під назвою detector (рис. 6.90).

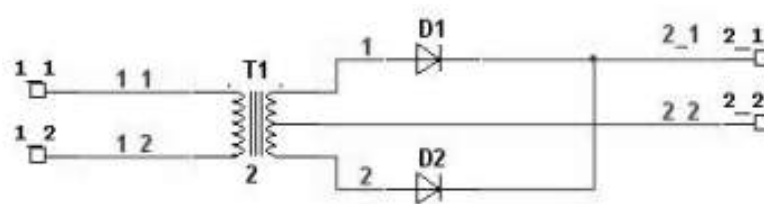


Рисунок 6.90 – Схема блоку detector

На рис. 6.91 наведено приклад аналогічної побудови блоку фільтра, filter.

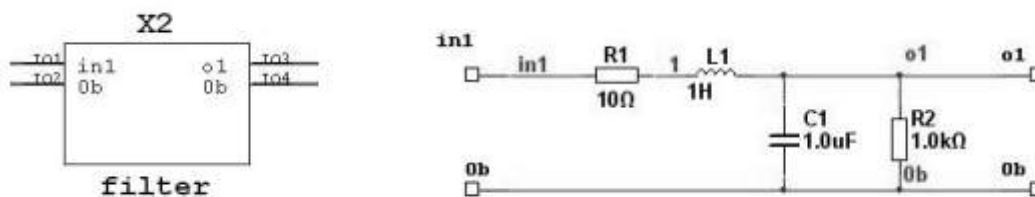


Рисунок 6.91 – Схема блоку filter

Отримані таким чином блоки можна використовувати для створення моделей відповідних електромагнітних пристроїв. Наприклад, на рис. 6.92 наведена блок-схема вторинного джерела електроживлення, яка складена на основі розглянутих раніше блоків detector, filter та Load (рис. 6.90, 6.91, 6.88). Повна схема джерела вторинного електроживлення утворюється за допомогою з'єднання зовнішніх затискачів окремих блоків та підсхем, до яких підключається джерело напруги синусоїдної V1 (рис. 6.92).

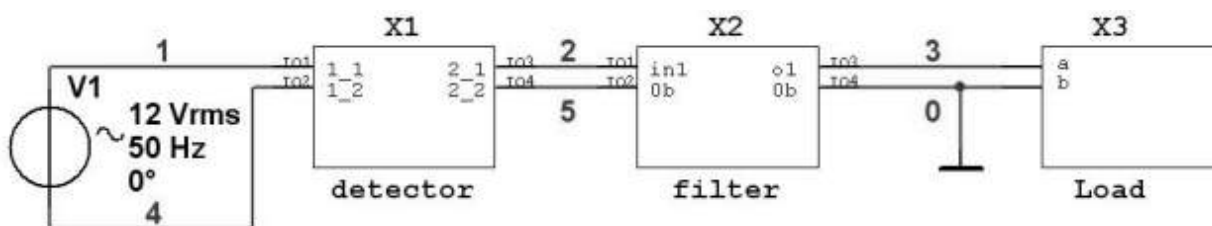


Рисунок 6.92 – Схема моделі вторинного джерела електроживлення

Моделювання отриманого таким чином пристрою дозволяє дослідити співвідношення між змінними на зовнішніх затискачах окремих підсхем. Фактично за такої постановки підсхеми необхідно розглядати як елементи досліджуваного пристрою.

6.2.5 Методи аналізу та їхня реалізація в Multisim

Після складання електричної принципової схеми радіоелектронного пристрою прямує етап моделювання її. Однак, у деяких випадках, перед проведенням досліджень необхідно визначити умови моделювання та аналізу процесів у досліджуваній схемі.

У пакет Multisim, окрім вимірювальних приладів, убудовані засоби, що реалізують різні математичні методи обробки результатів моделювання. Ці засоби представлені в меню Simulate командами Analysis та Postprocessors. Перелік доступних методів аналізу (команди меню) показано на рис. 6.93.

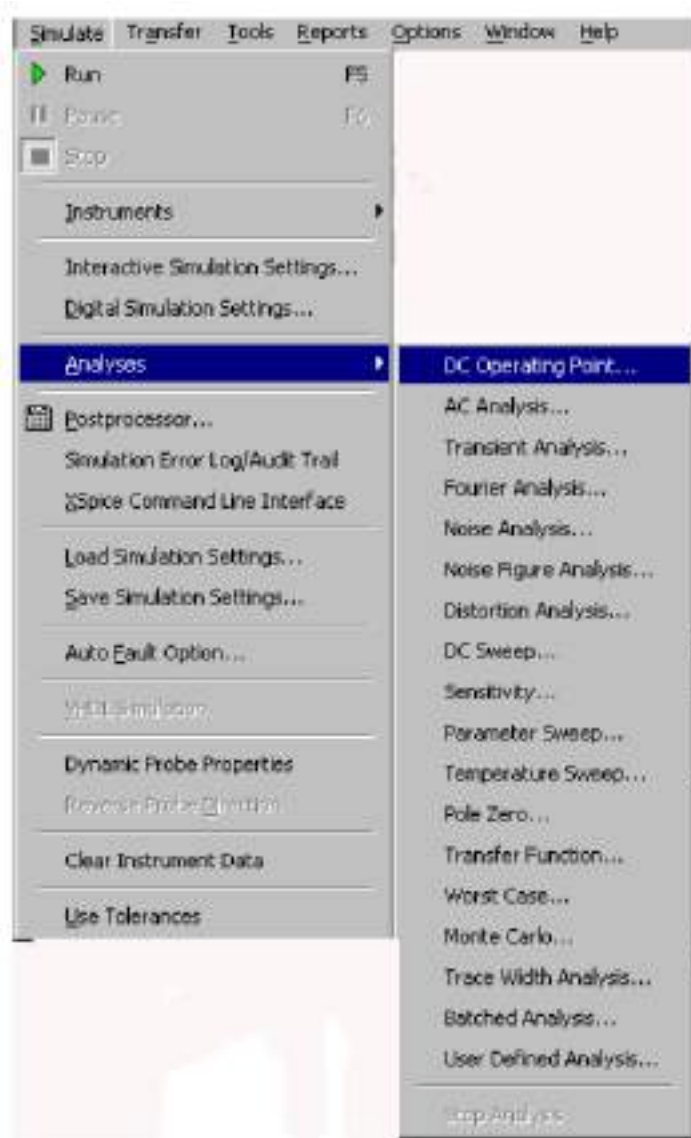


Рисунок 6.93 – Перелік методів аналізу

Результати досліджень відображаються у вікні переглядача (плотера) – Grapher View, яке відкривається автоматично після завершення аналізу. Результати аналізу можна переглянути, використовуючи команду View → Grapher. Перелічені у списку методи суттєво відрізняються один від одного, проте для кожного з них є загальні процедури:

- визначення ланцюга, на який проводяться обчислення (аналог місця підключення приладу),
- встановлення параметрів аналізу,
- запуск та зупинка процесу обчислень, обробка та збереження результатів.

Для визначення умови моделювання необхідно користуватися командою Interactive Simulation Settings (Визначення параметрів моделювання), з меню Simulate. При цьому викликається однойменне вікно (рис. 6.94).

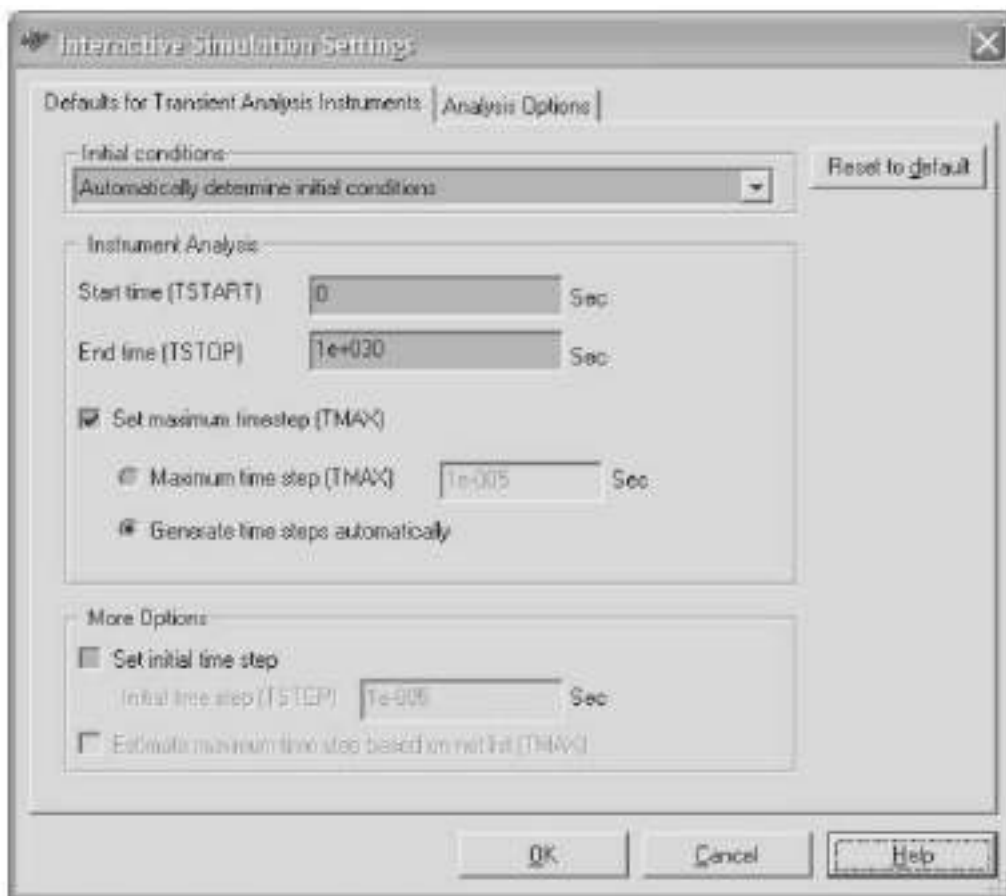


Рисунок 6.94 – Встановлення параметрів для оцінки перехідних процесів

На вкладці параметри для оцінки перехідних процесів, прийняті за замовчуванням, (Defaults for Transient Analysis Instruments), користувач може змінити:

1. Початкові умови (Initial Conditions) – вибирається один з варіантів списку, що розкривається: нульові (Set to Zero), що визначаються користувачем

(User-Defined), обчислені за постійним струмом (Calculate DC Operating Point), або автоматичне визначення початкових умов (Automatically Determine Initial Conditions). У режимі роботи за постійним струмом аналіз проводиться без урахування джерел змінної напруги, при замкнених індуктивностях і виключення ланцюгів, що містять конденсатори.

2. Час початку аналізу (Start time) (TSTART) – встановлюється більше нуля і менше, ніж кінцевий час.

3. Час закінчення аналізу (End time) (TSTOP) – встановлюється більше, аніж час початку.

4. Максимальний крок (Maximum time step) (TMAX), або це значення може бути обчислено пакетом – Generate time steps automatically (Генерувати час кроків автоматично) при включенні опції Установка максимального кроку (Set maximum time step) (TMAX). Крок обчислень може бути змінним, що задовольняє припустиму помилку обчислень.

5. Значення початкового кроку (Initial time step) (TSTEP) при включенні опції Set initial time step. При визначенні користувачем максимального кроку – TMAX може бути скоригований залежно від досліджуваної схеми – Estimate maximum time step based on net list (TMAX).

На час (швидкість) та збіжність результатів моделювання впливає багато параметрів. Проте найважливіший – TMAX. Чим менше значення TMAX, тим точнішими будуть результати моделювання. Природно, отримання таких результатів займе більше часу. Якщо схема цифрова, час кроку визначається часом зміни (перемикання) стану елементів і, отже, TMAX може встановлюватися більше. Якщо процес моделювання відбувається швидше, ніж у реальному часі, він штучно занижується до нашого часу. При виборі «Generate time steps automatically» TMAX встановлюється відповідно до найвищої частоти джерела AC power у схемі або найменшою роздільною здатністю приладу.

На вкладці Analysis Options (Параметри аналізу) (рис. 6.95) користувач може погодитися з пропонованими пакетом параметрами моделювання (Use Multisim Defaults) або скоригувати їх (Use Custom Settings), відключити або зберегти встановлену за замовчуванням опцію Perform Consistency check before starting analysis (Перевірка перед аналізом логічності складання схеми).

Крім того, тут можна визначити максимальну кількість обчислюваних значень (Maximum number of points), а також поведінку системи під час обчислення числа значень більше встановленого, зберігати в пам'яті початкові значення (Discard plots to save memory) або продовжувати моделювання

без збереження початкових значень (Continue without discarding previous plots). Якщо вибрано параметр Use Custom Settings (Використовувати параметри, встановлені користувачем), натисніть кнопку Customize (Визначити). На вкладках вікна Custom Analysis Options потрібно проаналізувати значення параметрів, пропоновані пакетом, і скоригувати необхідні з них.

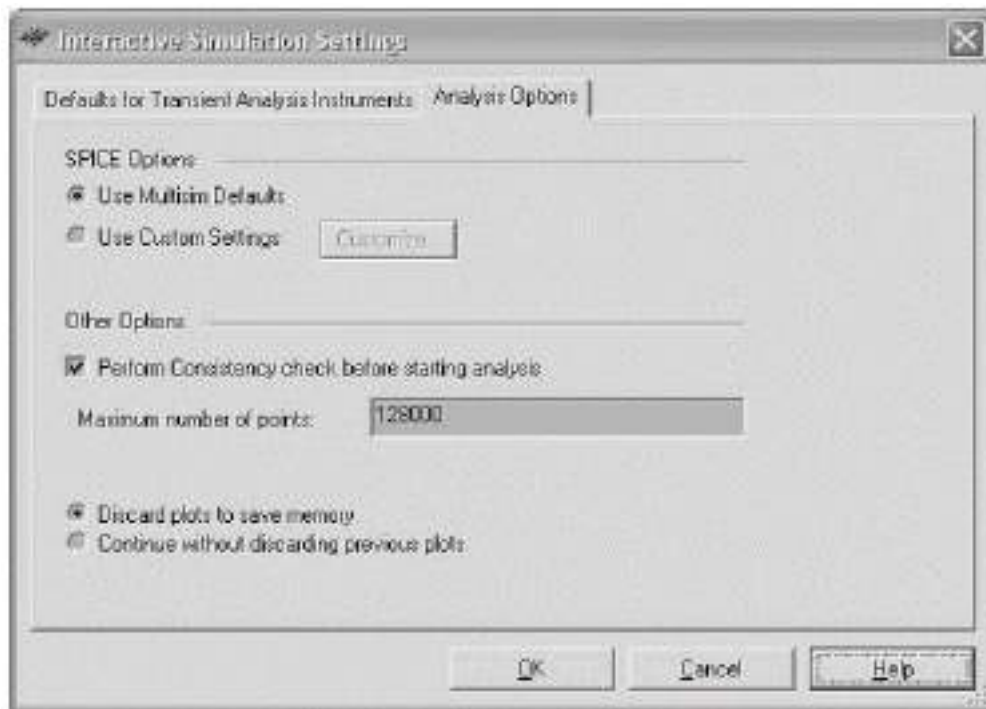


Рисунок 6.95 – Установка параметрів аналізу

Вікно містить п'ять вкладок: Global (головна – Налаштування загального характеру); DC (Постійний струм); Transient (Перехідні процеси); Device (Елементи); Advanced (Розширені можливості). Для корекції доступні такі параметри (після активізації відповідного вимикача).

На вкладці Global (Налаштування загального характеру) можна визначити ряд параметрів, рис. 6.96.

Це:

- Absolute error tolerance (ABSTOL) – припустима абсолютна помилка розрахунку струмів;
- Voltage error tolerance (VNTOL) – припустима абсолютна помилка розрахунку напруги;
- Charge error tolerance (CHGTOL) – припустима абсолютна помилка розрахунку зарядів.

Крім того, користувач може встановити:

- Relative error tolerance (RELTOL) – відносна припустима помилка розрахунку струмів і напруг;

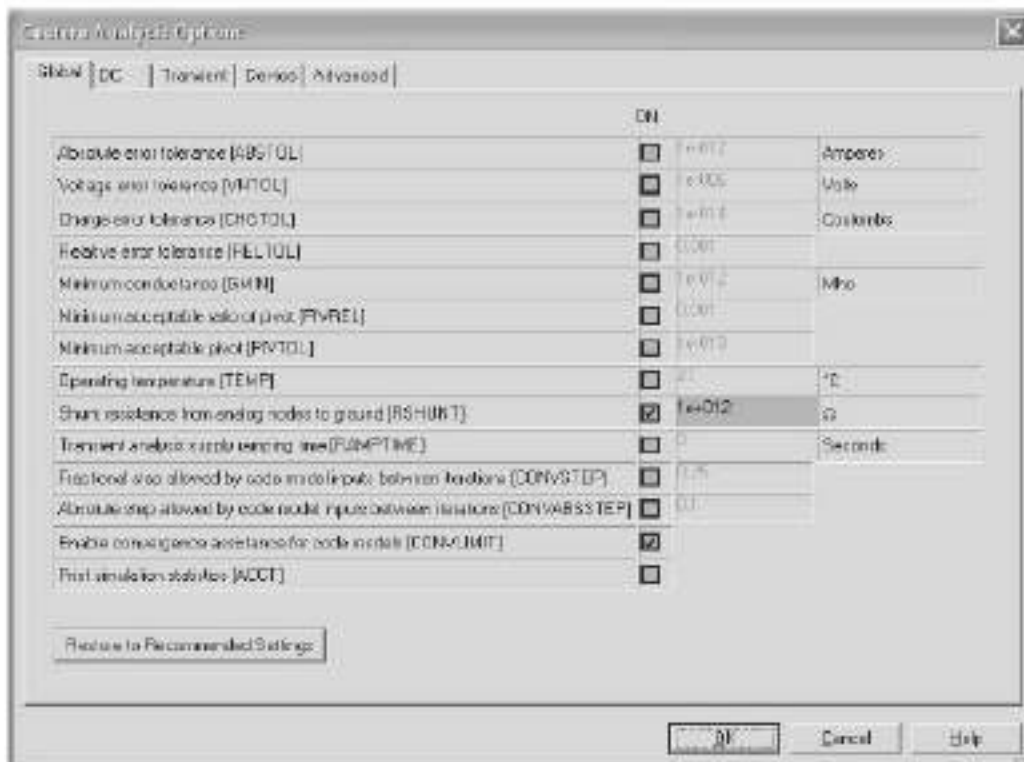


Рисунок 6.96 – Налаштування користувача загального характеру

– Minimum conductance (GMIN) – мінімальна провідність гілки ланцюга (найменша провідність дорівнює нулю);

– Minimum acceptable ratio of pivot (PIVREL), Minimum acceptable pivot (PIVTOL) – відносне та абсолютне мінімально прийнятне значення елемента (для вибору елементів матриць). Тут можна змінити умови моделювання:

Operation temperature (TEMP) – робочу температуру, Shunt resistance from analog nodes to ground, (RSHUNT) – опір між выводами аналогових елементів і «землею», встановити активну опцію Transient analysis supply ramping time (RAMPTIME) – аналіз перехідних процесів і задати початок його оцінки.

Опції Fractional step allowed by code modelin puts between iterations (CONVSTEP) та Absolute step allowed by code modelin puts between iterations (CONVABSSTEP) – дозволяють встановити відносний та абсолютний розмір кроку ітерації, Enable convergence assistance on code models (CONVLIMIT) – дозволити зміну алгоритму обчислень для забезпечення збіжності результатів обчислень.

Нарешті, включена опція Print simulation statistics (ACCT) – виведення всіх результатів моделювання дозволяє зберігати в графічному блоці попередні результати моделювання.

На всіх вкладках вікна діалогу, що розглядається, при активізації вимикача для чисельних значень параметрів праворуч, для орієнтації, відтворюється

значення, яке встановлено розробниками пакета за замовчуванням. Клавіша Restore to Recommended Settings дозволяє відновити рекомендовані параметри.

На вкладці DC (Розрахунок постійного струму) користувач може визначити ряд параметрів, рис. 6.97:

- DC iteration limit (ITL1) – максимальна кількість ітерацій під час розрахунку;
- DC transfer curve iteration limit (ITL2) – кількість ітерацій під час розрахунку перехідного процесу;
- Number of source steps (ITL6) – кількість кроків для алгоритму Source Stepping;
- Number of Gmin steps (GMINSTEPS) – кількість кроків для алгоритму Gmin Stepping та Go directly to Gmin stepping (NOOPITER) – використання алгоритму Gmin Stepping.

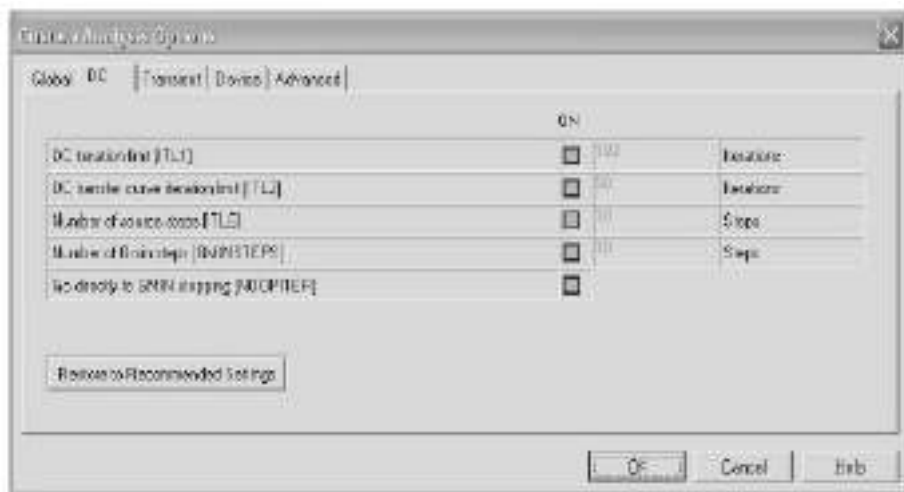


Рисунок 6.97 – Налаштування користувача за постійним струмом

На вкладці Transient (Перехідні процеси) можна модифікувати чотири параметри, рис. 6.98:

- Upper transient iteration limit (ITL4) – максимальна кількість ітерацій;
- Maximum integration order (MAXORD) – максимальний порядок інтегрування (від 2 до 6);
- Truncation error overestimation factor (TRTOL) – помилка округлення;
- Integration method (METHOD) – метод інтегрування.

Дослідити вплив температури (Nominal temperature), фізичних характеристик, в основному конструктивних геометричних розмірів елементів польового транзистора (area of drain, area of source, length, width), на його параметри дозволяють опції вкладки Device (Елементи). Тут же користувач може встановити режим моделювання з використанням меншого обсягу даних

(втратою рядків – Try compaction for LTRA lines), або вирішити змінити послідовність обходу постійних елементів (Allow bypass of unchanging elements).

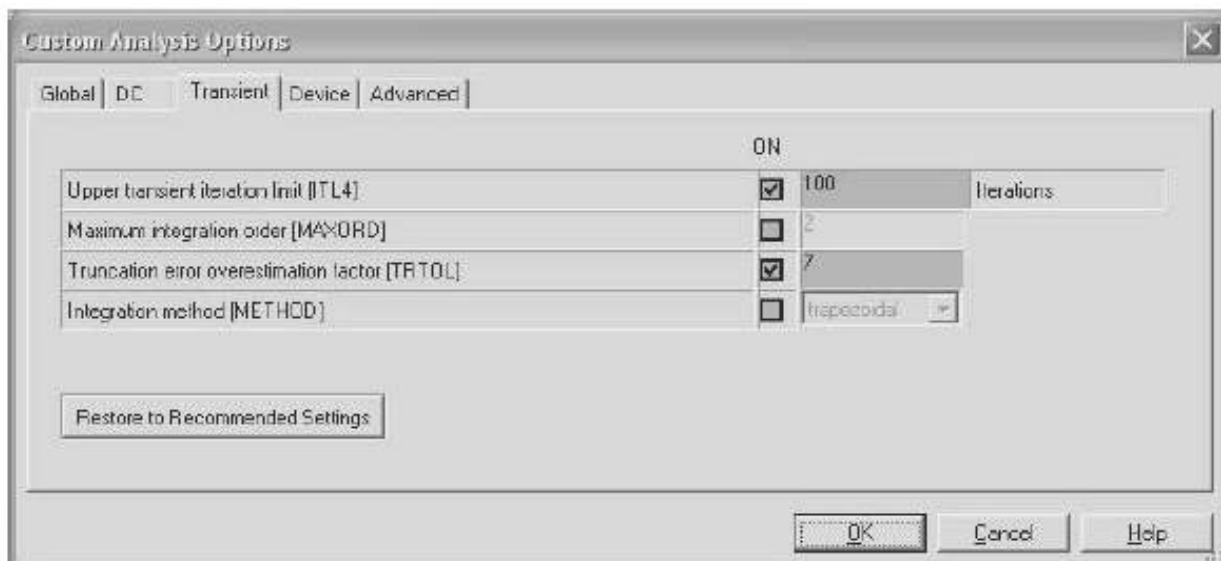


Рисунок 6.98 – Налаштування користувача аналізу перехідного процесу

Вкладка Advanced дозволяє скористатися розширеними можливостями. Є можливість також переглянути журнал помилок та імітувати відмови елементів. Якщо з якоїсь причини моделювання не може бути виконано, то пакет виводить вікно діалогу Simulation Error Log/Audit trail (Журнал помилок/Контрольний запис), в якому вказується проблема (ланцюг, елемент або умови), через яку моделювання не може бути проведено, рис. 6.99).

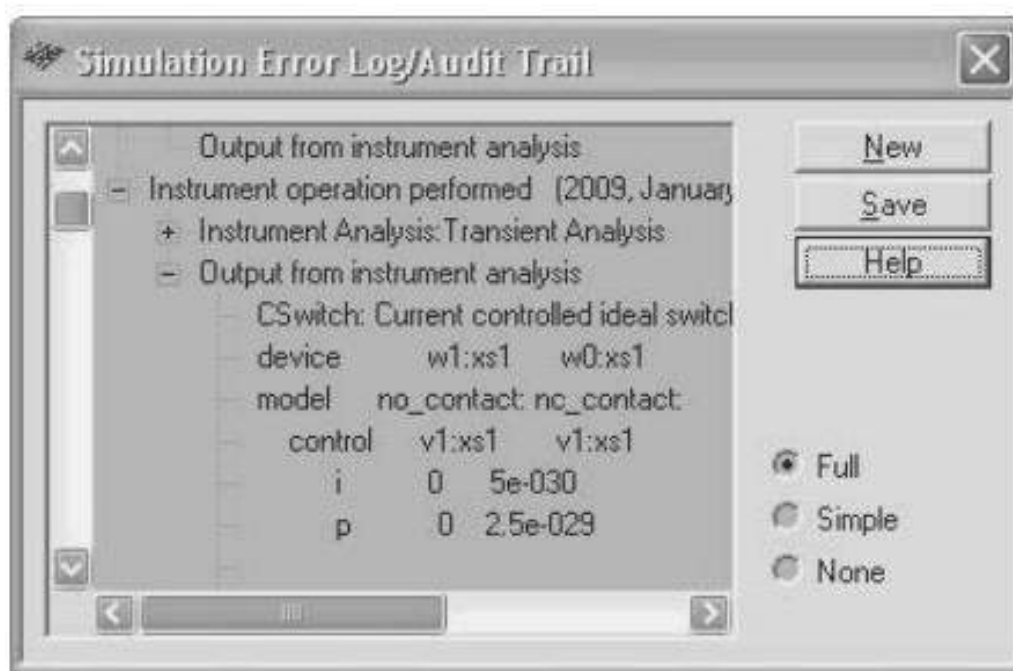


Рисунок 6.99 – Журнал помилок / Контрольний журнал

Для вирішення зазначеної у вікні діалогу проблеми доцільно скористатися довідковою системою. Журнал помилок/Контрольний запис може бути виведений користувачем однойменною командою в меню Simulate і за відсутності проблем моделювання. Користувач може переглянути контрольний журнал процесу моделювання за будь-якого стану перемикача (Full, Simple, None), який визначає обсяг інформації, що виводиться. В контрольному журналі відображаються всі запуски із зазначенням дати і часу моделювання. Якщо перемикач встановити в стан Full (Повне), то в контрольному журналі відображаються результати контролю всіх елементів, що входять до схеми під час кожного запуску процесу моделювання. Журнал може бути збережений з розширенням *.log (кнопка Save) і надалі відкритий за допомогою будь-якого найпростішого текстового редактора або очищений (кнопка New). Після завершення роботи з пакетом зміст журналу не зберігається.

В ході моделювання створеної схеми користувач може поставити дефекти використовуваних елементів. Командою Auto Fault Option викликається вікно діалогу Auto Fault (Автоматичне включення відмов) рис. 6.100.

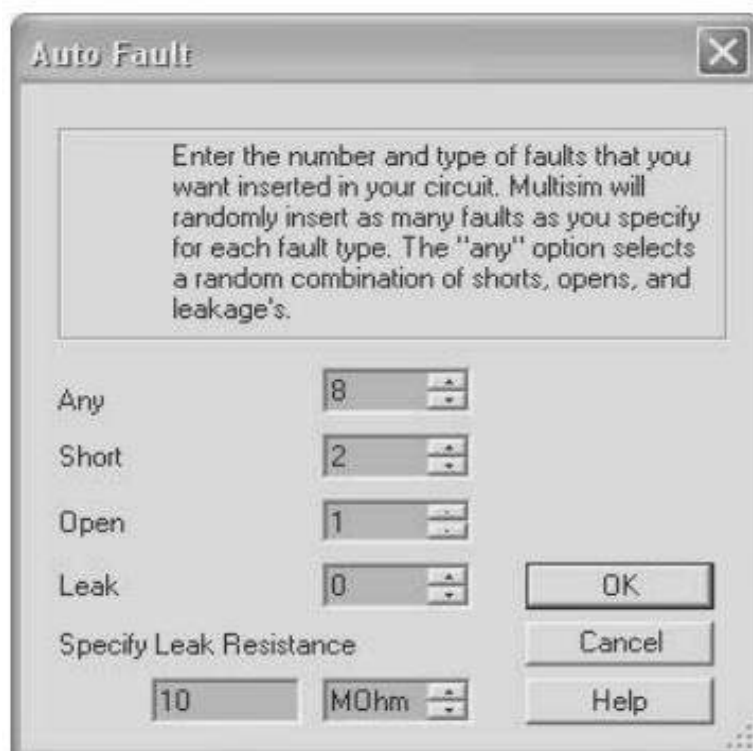


Рисунок 6.100 – Введення дефектів

У ньому встановлюється загальна кількість відмов – Any і за типами: Short – коротке замикання, Open – розрив та Leak – опір витoku. Встановлення числа відмов здійснюється за допомогою стрілок вгору – вниз. Максимальна

загальна кількість залежить від досліджуваної схеми, а кількість відмов різного типу не має перевищувати загальної кількості відмов. У вікні Specify Leak Resistance визначається значення опору витoku. Пакет випадковим чином вибирає число і тип (типи) відмов, що не перевищують загального числа і за окремими типами, і моделює роботу схеми в режимі самовідновлюваних відмов. В разі відмови пристрою через моделювальні відмови елементів пакет перериває моделювання і у вікні повідомлень Errors During Netlist Generation вказується причина зупинки. У журналі помилок (вікно діалогу Simulation Error Log/Audit trail) факт та причина переривання моделювання дублюються. Далі, як правило, необхідно змінити число і тип відмов елементів. Нагадаємо, що детерміновані відмови будь-якого з елементів можна задати і після подвійного клацання по елементу у вікні діалогу з ім'ям вибраного елемента на вкладці Fault. Крім розглянутих команд, пакет містить безліч засобів аналізу даних, отриманих під час моделювання. Ці засоби викликаються командами Analysis та Postprocessor у меню Simulate

6.2.6 Синтез та моделювання схем цифрових пристроїв

На початку ХХ сторіччя фізик-теоретик Пауль Ернфест, який працював у Росії, вперше відзначив можливість застосування апарату алгебри логіки, розробленого в середині ХІХ ст. ірландським математиком Джорджем Булем, у техніці, зокрема до електричних «розподільчих мереж». Використання алгебри логіки у дослідженні релейно-контактних схем виявилось можливим тому, що кожній схемі можна поставити у відповідність деяку формулу булевої логіки, і навпаки, кожену формулу можна висловити за допомогою деякої схеми.

Контактні схеми стали першими в історії технічними засобами, за допомогою яких можна було реалізувати булеві функції. Надалі з'явилися й інші пристрої, які використовують апарат алгебри логіки. Найбільш актуальним додатком алгебри логіки в техніці є цифрові інтегральні мікросхеми (цифрові мікросхеми), вони широко використовуються у пристроях електронно-обчислювальних машин (ЕОМ), системах автоматики тощо.

Цифрові мікросхеми, а також пристрої на їхній основі, використовуються для перетворення та обробки сигналів, що змінюються за законом дискретної функції. Сигналом називають зміну характеристики матеріального носія інформації. Наприклад, у контексті електричного струму сигналом може бути зміна частоти або амплітуди електричних коливань.

Сигнал, що змінюється за законом дискретної функції, або дискретний (цифровий) сигнал – це сигнал, що є переривчастим і приймає якесь значення

з кінцевого списку можливих значень. Сьогодні поширені двійкові цифрові сигнали, які можуть приймати два значення – «0» чи «1». Використання двійкових сигналів пов'язано, переважно, з простотою кодування.

Аналіз цифрових пристроїв зручно проводити за допомогою алгебри логіки, що оперує тільки з двома поняттями: логічна 1 і логічний 0. В результаті функції, що відображають інформацію, приймають у кожний момент часу тільки значення 0 або 1. Такі функції називають логічними, а сигнали (вхідні та вихідні змінні) – двійковими (бінарними). Під час використання двійкових сигналів різниця між мінімальним значенням і максимальним значенням напруги буде значною, і завади не впливатимуть сильно, тобто двійкові цифрові сигнали мають також властивість завадостійкості.

Схемні елементи, у яких здійснюється перетворення двійкових сигналів, які потрапили на їхні входи і безпосереднє виконання передбачених логічних операцій, називають логічними пристроями.

У загальному випадку логічний пристрій може мати n входів і виходів. Розглядаючи вхідні сигнали x_1, x_2, \dots, x_n як аргументи, можна відповідні вихідні сигнали подати як функції $y_i = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ за допомогою операцій алгебри логіки.

Функції алгебри логіки (ФАЛ), іноді звані перемикачами, зазвичай подають в алгебраїчній формі (у вигляді математичного виразу), наприклад, $y_i = (x_0 \wedge x_1) \vee (x_1 \wedge x_2)$, або у вигляді таблиць істинності (комбінаційних таблиць).

Фізично цифрова мікросхема може складатися, наприклад, з декількох транзисторів (або одного транзистора), які розміщують на підкладці з напівпровідникового матеріалу (її ще називають кристалом), тому про такі схеми стверджують, що вони засновані на транзисторно-транзисторній логіці. Існують й інші типи.

На логічному рівні така схема складається з набору логічних елементів, що реалізують різні логічні (бульові) функції (кон'юнкцію, диз'юнкцію, інверсію, запам'ятовування та ін.). Такі логічні елементи називають базовими логічними елементами.

Основні елементи алгебри логіки. У булевій алгебрі виділяють, як вже згадувалося, три основні функції: кон'юнкція, диз'юнкція, інверсія (заперечення). Інші функції є похідними від наведених вище. Основні логічні операції складаються з наступних елементарних перетворень двійкових сигналів.

Логічне додавання, або диз'юнкція, що позначається символом « \vee » (або « $+$ ») називається також операцією АБО. При цьому кількість аргументів

(доданків x) може бути будь-яким. Ця операція для функції двох змінних x_1 та x_2 описується у вигляді логічної формули: $y = x_1 \vee x_2 = x_1 + x_2$.

Це означає, що y істинно (рівно 1), якщо істинно (рівно 1), хоча б один із доданків x_1 або x_2 . І тільки у випадку, якщо всі доданки x дорівнюють 0, результат логічного додавання у таке ж дорівнює 0.

Логічне множення, або кон'юнкція, що позначається символом \wedge (або « \cdot ») також називається операцією І. При цьому число аргументів (множників x) може бути будь-яким. Ця операція для функції двох змінних x_1 та x_2 описується у вигляді логічної формули: $y = x_1 \wedge x_2 = x_1 \cdot x_2 = x_1 x_2$.

Це означає, що y істинно (рівно 1), якщо істинні (рівні 1), співмножники x_1 та x_2 . У разі, якщо хоча б один із співмножників дорівнює 0, результат логічного множення дорівнює 0.

Логічне заперечення, або інверсія, що позначається рисочкою над змінною, і називається операцією НІ. Ця операція записується як $y = \bar{x}$. Це означає, що y істинно (рівно 1), якщо x хибно (рівно 0), і навпаки. Очевидно, що операція y виконується над однією змінною x і її значення завжди протилежне цій змінній.

Основні логічні операції АБО, І і НІ дозволяють аналітично описати, а логічні елементи АБО (диз'юнктор, суматор), І (кон'юнктор, помножувач) і НЕ (інвертор) – створити комбінаційний пристрій будь-якого ступеня складності, тобто операції мають функціональну повноту і складають функціонально повний набір.

Базові логічні елементи. Особливого значення у цифровій електроніці мають універсальні (базові) логічні елементи, здатні утворити функціонально повний набір, за допомогою якого можна практично реалізувати синтез пристроїв будь-якої складності. Тому базові логічні пристрої становлять основу більшості цифрових ІМС.

Найпоширенішим способом завдання логічних функцій є таблична форма. Таблиці істинності дають можливість повно і однозначно встановити всі наявні логічні зв'язки. Математичний вираз логічної функції отримують із таблиці істинності так: для кожного набору аргументів, на якому функція дорівнює 1, записують елементарні здобутки змінних, причому змінні, значення яких дорівнюють нулю, записують з інверсією. Отримані здобутки, що називаються мінтермами, підсумовують.

Таблиця істинності містить всілякі комбінації (набори) бінарних значень вхідних змінних з відповідними бінарними значеннями вихідних змінних;

кожному набору вхідних сигналів відповідає певне значення вихідного сигналу – значення логічної функції y_i . Максимальна кількість можливих різних наборів (рядків) залежить від числа вхідних змінних n і дорівнює $2n$.

Фізичний пристрій, що реалізує одну з алгебраїчних операцій логіки або найпростішу логічну функцію, називається логічним елементом. Схема, складена з кінцевого числа логічних елементів за певними правилами, називається логічною схемою.

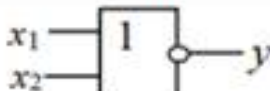
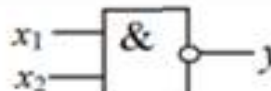
Умовні позначення базових логічних елементів та їхньої таблиці істинності наведено у таблиці 6.8.

Таблиця 6.8 – Форми відображення основних логічних функцій

Найменування функції	Диз'юнкція	Кон'юнкція	Інверсія																																				
Символічна	\vee АБО +	\wedge І •	\bar{x}																																				
Буквенна	АБО	І	НІ																																				
Умовно графічна																																							
Аналітична	$y = x_1 \vee x_2 = x_1 + x_2$	$y = x_1 \wedge x_2 = x_1 x_2$	$y = \bar{x}$																																				
Таблиця істинності	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td>x_1</td><td>x_2</td><td>y</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	x_1	x_2	y	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td>x_1</td><td>x_2</td><td>y</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	x_1	x_2	y	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td>x</td><td>y</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td></tr> </table>	x	y	0	1	1	0
x_1	x_2	y																																					
0	0	0																																					
0	1	1																																					
1	0	1																																					
1	1	1																																					
x_1	x_2	y																																					
0	0	0																																					
0	1	0																																					
1	0	0																																					
1	1	1																																					
x	y																																						
0	1																																						
1	0																																						

На практиці, з міркувань зручності, до цих основних логічних функцій І, АБО, НІ додають ще дві. Це І-НІ та АБО-НІ, які наведені у таблиці 6.9.

Таблиця 6.9 – Відображення логічних функцій

Позначення	АБО-НІ	І-НІ																														
Умовно графічне																																
Аналітичне	$y = \overline{x_1 \vee x_2} = \overline{x_1 + x_2}$	$y = \overline{x_1 \wedge x_2} = \overline{x_1 x_2}$																														
Таблиця істинності	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td>x_1</td><td>x_2</td><td>y</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> </table>	x_1	x_2	y	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	<table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td>x_1</td><td>x_2</td><td>y</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> </table>	x_1	x_2	y	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0
x_1	x_2	y																														
0	0	1																														
0	1	0																														
1	0	0																														
1	1	0																														
x_1	x_2	y																														
0	0	1																														
0	1	1																														
1	0	1																														
1	1	0																														

Асортимент мікросхем, що реалізують перелічені операції, досить великий і включає не тільки двовходові, але і ті, які мають більшу кількість входів, три, чотири.

Подання логічних функцій математичними виразами. Найбільш поширеним способом завдання логічних функцій є таблична форма (табл. 6.10). Таблиці істинності дозволяють повно та однозначно встановити всі існуючі логічні зв'язки.

При табличному поданні логічних функцій їх записують в одній з канонічних форм: досконалої диз'юнктивної нормальної форми (ДДНФ) або досконалої кон'юнктивної нормальної форми (ДКНФ).

Математичний вираз логічної функції в ДДНФ отримують з таблиці істинності так: для кожного набору аргументів, на якому функція дорівнює 1, записують елементарні добутки змінних, причому змінні, значення яких дорівнюють нулю, записують з інверсією. Отримані добутки, які називають мінтермами, підсумовують.

Запишемо логічну функцію у трьох змінних a , b та c , подану у вигляді таблиці 6.10 у ДДНФ:

$$y(a, b, c) = \bar{a}bc + a\bar{b}c + ab\bar{c} + abc.$$

Таблиця 6.10 – Логічна функція у трьох змінних

№	a	b	c	y
0	0	0	0	0
1	0	0	1	0
2	0	1	0	0
3	0	1	1	1
4	1	0	0	0
5	1	0	1	1
6	1	1	0	1
7	1	1	1	1

Досконалою кон'юнктивною нормальною формою називають логічний добуток елементарних сум, у кожному з яких аргумент або його заперечення входять один раз.

При цьому для кожного набору аргументів таблиці істинності, на якому функція дорівнює 0, складають елементарну суму, причому змінні, значення яких дорівнює 1, записують із запереченням. Отримані суми, які називаються

макстермами, об'єднують операцією логічного множення. Для функції ДКНФ вона має вигляд $y(a, b, c) = (a + b + c)(a + b + \bar{c})(a + \bar{b} + c)(\bar{a} + b + c)$.

Логічні функції, отримувані безпосередньо з таблиці істинності, не є оптимальними. Той самий результат може бути отриманий за допомогою більш простого виразу. Для спрощення використовують перетворення, що базуються на законах та правилах булевої алгебри.

Основні формули алгебри логіки

Закони комутативності $A \wedge B = B \wedge A$
 $A \vee B = B \vee A$.

асоціативності $(A \vee B) \vee C = A \vee (B \vee C)$
 $(A \wedge B) \wedge C = A \wedge (B \wedge C)$.

ідемпотентності $A \vee A = A$
 $A \wedge A = A$.

дистрибутивності $A \wedge (B \vee C) = (A \wedge B) \vee (A \wedge C)$
 $A \vee (B \wedge C) = (A \vee B) \wedge (A \vee C)$.

Формули, що дозволяють спрощувати логічні вирази

$\overline{A \vee B} = \bar{A} \wedge \bar{B}$	$\overline{A \wedge B} = \bar{A} \vee \bar{B}$
$A \wedge \bar{A} = 0$	$A \wedge 0 = 0$
$A \wedge 1 = A$	$A \vee 1 = 1$

Перехід від логічної функції до логічної схеми. Логічна схема – логічне уявлення пристрою, який обробляє дискретну інформацію, сукупність логічних елементів, пов'язаних між собою за певними правилами: вихід одного елемента може бути з'єднаний лише з входом іншого елемента.

Комбінаційними схемами (або комбінаційними логічними пристроями) називають такі логічні схеми, вихідні сигнали яких однозначно визначаються сигналами на входах. При цьому в схемі не мають бути зворотні зв'язки, це обов'язкова умова.

Кінцевими автоматами (або схемами з пам'яттю, або послідовними пристроями) називаються такі логічні схеми, вихідні сигнали яких визначаються як вхідними сигналами, так й передісторією їхньої роботи. Для зберігання цієї передісторії використовуються елементи пам'яті, тобто у схемі обов'язково мають місце зворотні зв'язки.

Для побудови логічної схеми необхідно логічні елементи, призначені для виконання логічних операцій, розташовувати, починаючи від входу, у порядку, зазначеному у булевому виразі.

Побудуємо структуру логічного пристрою, що реалізує логічну функцію трьох змінних: $y = (a+b+c)(a+b+\bar{c})(\bar{a}+b+c)(\bar{a}+\bar{b}+c)$.

Зліва маємо входи a , b і c з відгалуженнями на три інвертори, потім чотири тривхідні елементи АБО і, нарешті, чотиривходовий елемент І на виході, рис. 6.101.

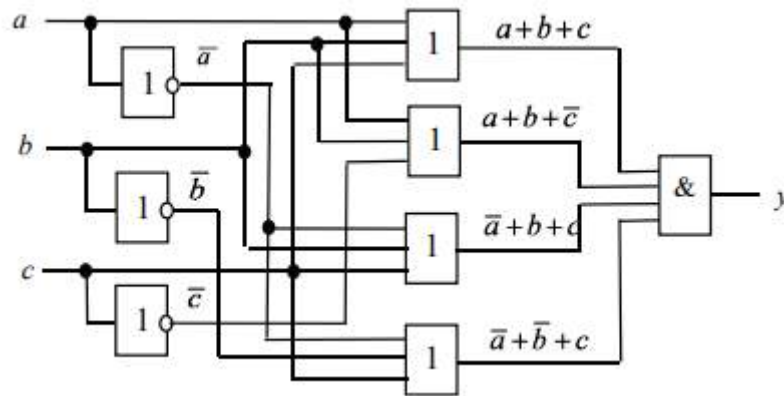


Рисунок 6.101 – Структура логічного пристрою

Отже, будь-яку логічну функцію можна реалізувати безпосередньо за виразами, поданими у вигляді ДДНФ чи ДКНФ. Однак отримана таким чином схема, як правило, не оптимальна з точки зору її практичної реалізації: вона громізка, містить багато логічних елементів, у тому числі неінформативних (зайвих), і виникають труднощі у забезпеченні її високої надійності.

Алгебра логіки дозволяє перетворити формули, що описують складні висловлювання, у спрощенні, тобто мінімізують кількість доданків і змінних в логічній функції. Це допомагає зрештою визначити оптимальну структуру того чи іншого логічного пристрою, що реалізує будь-яку складну функцію. Під оптимальною структурою прийнято розуміти таку побудову логічного пристрою, за якого кількість елементів, що входять до його складу, мінімальна.

Процедуру мінімізації можна розглядати як стадію загального процесу оптимізації синтезованого комбінаційного пристрою. Мінімізацію простих булевих функцій роблять алгебраїчно із застосуванням правил алгебри логіки (поглинання, склеювання, закону де Моргана), та деяких додаткових співвідношень, або графічно з використанням карт Карно. Для складних пристроїв скорочення логічної функції виконують регулярними методами, що допускають алгоритмізацію та застосування ЕОМ (наприклад, методом Квайна).

Основним методом мінімізації логічних функцій є операція попарного неповного склеювання та елементарного поглинання. Операція попарного склеювання здійснюється між двома членами, що містять однакові змінні,

входження яких (прямі та інверсні) збігаються всіма змінними, крім однієї. У цьому випадку всі змінні, крім однієї, можна винести за дужки, а пряме та інверсне входження однієї змінної, що залишилася в дужках, піддати склеюванню. Наприклад:

$$\bar{X}_1 X_2 X_3 X_4 \vee \bar{X}_1 X_2 \bar{X}_3 X_4 = \bar{X}_1 X_2 X_4 (X_3 \vee \bar{X}_3) = \bar{X}_1 X_2 X_4.$$

Можливість поглинання впливає з очевидних рівностей

$$A \vee \bar{A} = 1; A\bar{A} = 0.$$

Таким чином, головним завданням при мінімізації є пошук членів, придатних до склеювання з подальшим поглинанням, що для великих форм може виявитися досить складним завданням.

Сутність аналітичного методу визначення скорочених форм логічних функцій полягає в наступному. Якщо в логічних функціях зробити всі можливі операції неповного склеювання, а потім усі можливі операції поглинання, то буде отримана скорочена логічна функція. Причому той самий член вихідного виразу може склеюватися з кількома з інших членів. Тому необхідно зробити всі можливі склеювання кожного члена з рештою. Розглянемо логічну функцію

$$F(X, Y, Z) = \bar{X} \bar{Y} \bar{Z} + \bar{X} \bar{Y} Z + X \bar{Y} \bar{Z} + XY \bar{Z} + XYZ.$$

Зробимо склеювання першого члена з усіма іншими.

$$\text{Перший і другий члени } \bar{X} \bar{Y} \bar{Z} + \bar{X} \bar{Y} Z = \bar{X} \bar{Y} ((\bar{Z} + Z)) = \bar{X} \bar{Y}.$$

$$\text{Перший і третій члени } \bar{X} \bar{Y} \bar{Z} + X \bar{Y} \bar{Z} = \bar{Y} \bar{Z} (\bar{X} + X) = \bar{Y} \bar{Z}.$$

Склеювання першого члена можливо лише з другим та третім членом.

Склеювання другого члена з іншими членами виявилось неможливим.

Склеювання третього члена з іншими членами.

$$X \bar{Y} \bar{Z} + XY \bar{Z} = X \bar{Z} (\bar{Y} + Y) = X \bar{Z}.$$

Склеювання третього члена виявилось можливим лише з четвертим.

Склеювання четвертого члена із п'ятим.

$$XY \bar{Z} + XYZ = XY(\bar{Z} + Z) = XY.$$

Таким чином, після мінімізації логічна функція має вигляд

$$F(X, Y, Z) = \bar{X} \bar{Y} + \bar{Y} \bar{Z} + X \bar{Z} + XY.$$

Але це проміжний, більш оптимальний, але не остаточний варіант.

Операція мінімізації логічних функцій передбачена як у симуляторі EWB, так і Multisim. Для цього служить логічний перетворювач. Перевіримо з його допомогою правильність раніше проведених операцій.

Після активації вхідних змінних у верхньому рядку, вводимо логічний вираз у нижньому рядку, де лапки означають операцію НІ. Вибираємо команду побудови таблиці істинності і $A|B \rightarrow \overline{1|0|1}$ рис. 6.102.

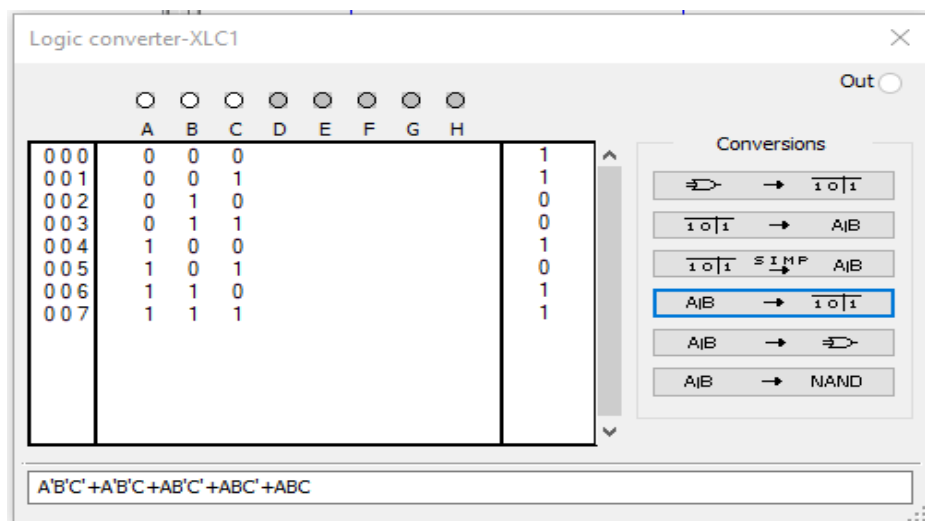


Рисунок 6.102 – Введення логічної функції

Отримуємо таблицю істинності. Вибираємо команду $\overline{1|0|1} \xrightarrow{SIMPL} A|B$ мінімізації логічного виразу та отримуємо його в нижньому рядку панелі логічного перетворювач, рис 6.103 у вигляді $A'B' + AC' + AB$

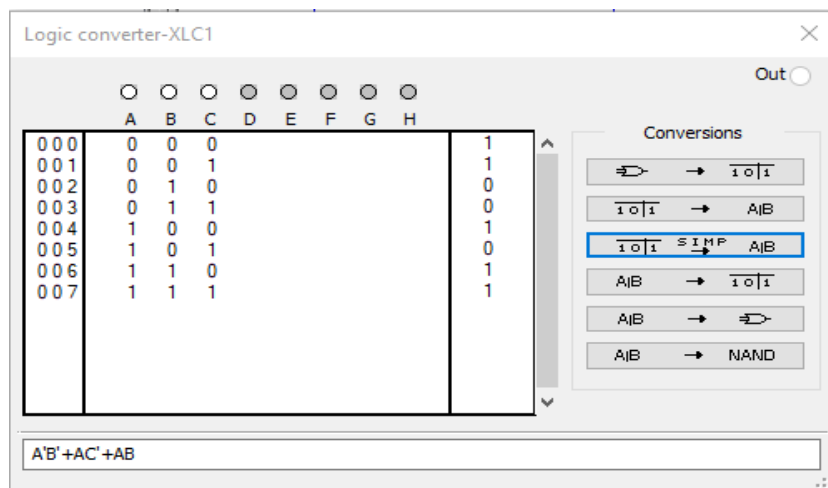


Рисунок 6.103 – Отримання оптимального виразу з вихідної функції

Цілком очевидно, що апаратна реалізація такого логічного виразу буде набагато простішою за первинного. Однак мінімізований вираз не збігається з тим, який був отриманий шляхом аналітичних перетворень. Справа в тому, що в цьому випадку мінімізація була проведена не до кінця. Отриманий шляхом аналітичних перетворень вираз може бути мінімізований ще. Однак це вже

пов'язано із деякими труднощами. Переконаємося у цьому шляхом його мінімізації за допомогою логічного перетворювача. Вводимо логічну функцію, отриману шляхом аналітичної мінімізації та перевіримо таблицю істинності. Як бачимо, вона не змінилася, рис. 6.104.

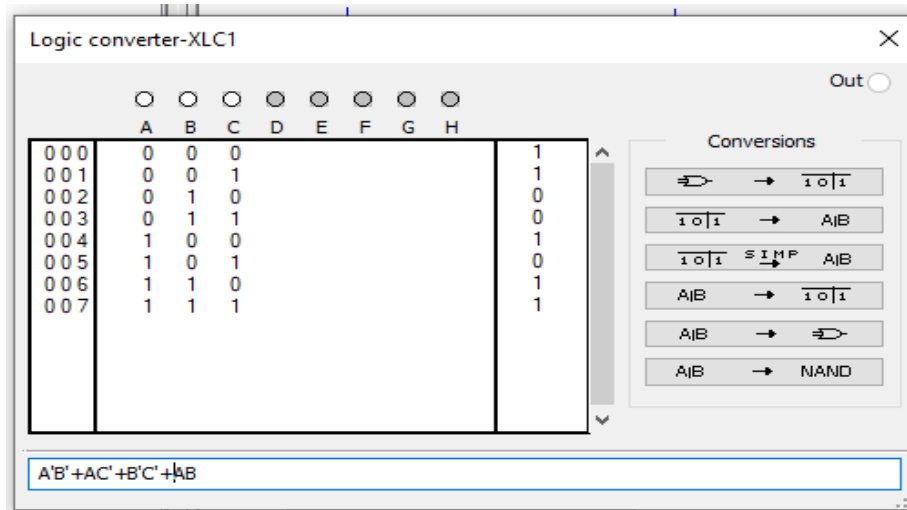


Рисунок 6.104 – Введення проміжного виразу

Отже, під час аналітичних перетворень помилок не було. Далі проводимо мінімізацію виразу відповідною командою $\overline{A}B \xrightarrow{\text{SIMP}} AB$, рис.6.105.

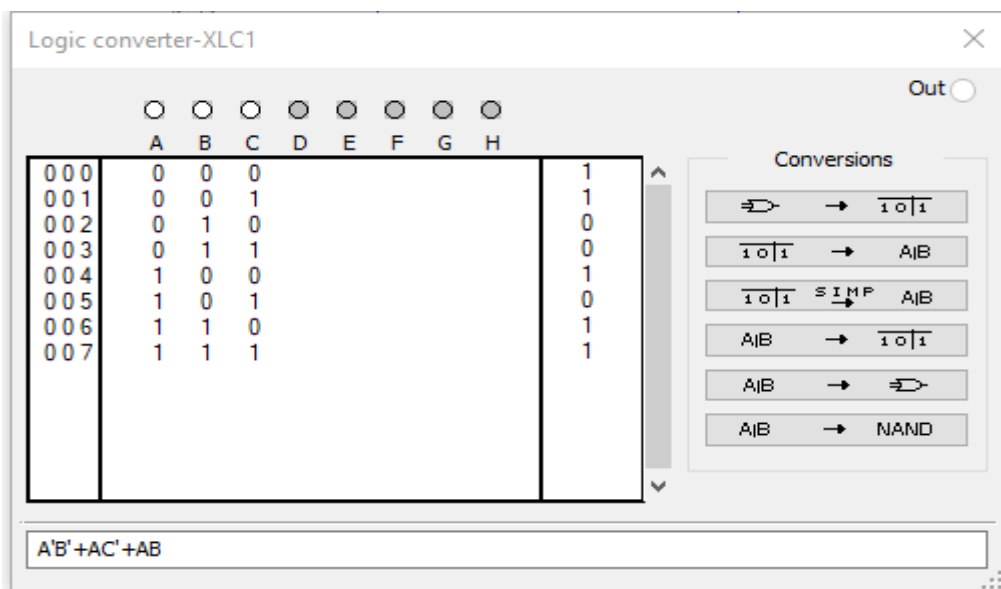


Рисунок 6.105 – Оптимізація проміжного виразу

В результаті маємо оптимальний вираз, отриманий раніше за допомогою логічного перетворювача з первинного.

Контрольні запитання та завдання

1. Як здійснювати вимірювання за допомогою мультиметра?
2. Як здійснювати вимірювання за допомогою осцилографа?
3. Як проводити аналіз схеми?
4. Що таке підсистема, для чого вона потрібна, і як її створити?
5. Як задати колір провідника та сигналу?
6. Як розірвати з'єднання?
7. Як можна розмістити необхідний компонент на робочому полі?
8. Як задати параметри елемента?
9. Як можна під'єднати провідник до виводу компонента?
10. Як здійснювати вимірювання за допомогою амперметра?
11. Як здійснювати вимірювання за допомогою вольтметра?
12. Як під'єднати схеми до логічного конвертора.
13. Перелічіть основні функції генератора слів.
14. Назвіть основні меню програми Multisim.
15. Назвіть основні команди основних меню Multisim.
16. Які команди містить Панель інструментів?
17. Які прилади включає програма Multisim?
18. Перелічіть органи керування та відображення двоканального осцилографа.
19. Перелічіть органи керування та відображення побудовника частотних характеристик.
20. Назвіть основні групи компонентів.
21. Поясніть процес створення схеми в середовищі Multisim.
22. Як змінити колірне рішення схеми?
23. Які віртуальні прилади використовуються для аналізу схем за струмом?
24. Як можна відредагувати ланцюги?
25. Які типи дешифраторів є в БД Multisim?
26. Розкажіть про особливості роботи генератора слів.
27. Розкажіть про особливості роботи логічного аналізатора.
28. Як можна отримати логічний вираз за таблицею істинності?
29. Яке призначення симулятора Multisim?
30. Як може бути використаний логічний перетворювач під час розроблення та тестування цифрових пристроїв?
31. З якою метою використовується багатоканальний осцилограф?

7 ВІЗУАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ

7.1 Загальні відомості про систему MATLAB

Пакет розширення Simulink системи MATLAB є ядром інтерактивного програмного комплексу, призначеного для математичного моделювання лінійних і нелінійних динамічних систем і пристроїв, поданих своєю функціональною блок-схемою, яку називають S моделлю, або просто моделлю. При цьому можливі різні варіанти моделювання: у часовій області, у частотній області, з подієвим керуванням, на основі спектральних перетворень Фур'є, з використанням методу Монте-Карло (реакція на впливи випадкового характеру) і т.д. Для побудови функціональної блок-схеми модельованих пристроїв Simulink має велику бібліотеку блокових компонентів і зручний редактор блок-схем. Він заснований на графічному інтерфейсі користувача і є типовим засобом візуально орієнтованого програмування. Використовуючи палітри компонентів (набори блоків), користувач за допомогою мишки переносить потрібні блоки з палітр на робочий стіл пакета Simulink і з'єднує лініями входи і виходи блоків. Таким чином, створюється діаграма (блок-схема) системи або пристрою, тобто модель. S модель фактично є програмою, яку можна переглянути за допомогою текстового редактора або за допомогою редактора файлів системи MATLAB. Файли моделі мають розширення .mdl. Однак необхідно зазначити, що ці файли дуже громіздкі й навіть для досить простих моделей можуть містити тисячі рядків програмного коду. Це типова властивість візуально орієнтованих систем програмування. У зв'язку з цим надалі робота моделей розглядатиметься тільки на рівні діаграм і блоків, без розгляду програмних кодів моделей. Simulink автоматизує наступний, найбільш трудомісткий етап моделювання: він складає і розв'язує складні системи алгебраїчних і диференціальних рівнянь, що описують задану функціональну схему (модель), забезпечуючи зручний і наочний візуальний контроль за поведінкою створеного користувачем віртуального пристрою. Достатньо уточнити (якщо потрібно) вид аналізу і запустити Simulink у режимі симуляції створеної моделі системи або пристрою. Simulink практично миттєво змінює математичний опис моделі під час введення нових блоків, навіть у тому

випадку, коли цей процес супроводжується зміною порядку системи рівнянь і призводить до істотної якісної зміни поведінки системи.

Цінність Simulink полягає і у великій, відкритій для вивчення модифікації, бібліотеці компонентів (блоків). Вона охоплює джерела впливів (сигналів) із практично будь-якими часовими залежностями, масштабовальні, лінійні та нелінійні перетворювачі з різноманітними формами передавальних характеристик, квантований пристрій, блоки, які інтегрують і диференціюють. У бібліотеці є цілий набір віртуальних реєструвальних пристроїв – від простих вимірювачів, вольтметра або амперметра до універсальних осцилографів, які дають змогу переглядати часові залежності вихідних параметрів модельованих систем, наприклад, струмів і напруг тощо. Є навіть графобудівник для створення фігур, заданих параметрично і в полярній системі координат, наприклад, фігур Ліссажу і фазових портретів коливань. Simulink має засоби анімації та звукового супроводу. А в додаткових бібліотеках можна відшукати й такі «дорогі прилади», як аналізатори спектра складних сигналів, багатоканальні самописці та засоби анімації графіків.

Можливості Simulink охоплюють завдання математичного моделювання складних динамічних систем у фізиці, електро- та радіотехніці, у біології та хімії – словом, у всіх галузях науки і техніки. Цим пояснюється популярність цього пакета як в університетах та інститутах, так і в наукових лабораторіях.

Необхідно зазначити також можливість моделювання пристроїв і систем у реальному масштабі часу. Як програмний засіб Simulink – типовий представник візуально орієнтованих мов програмування. На всіх етапах роботи, особливо під час підготовки моделей систем, користувач практично не має справи зі звичайним програмуванням. Програма в кодах автоматично генерується в процесі введення обраних блоків компонентів, їхніх з'єднань і завдання параметрів компонентів. Важлива перевага Simulink – це інтеграція не тільки з системою MATLAB, а й з низкою інших пакетів розширення, що забезпечує, по суті, необмежені можливості застосування Simulink для розв'язання практично будь-яких завдань імітаційного та подієвого моделювання.

Розробники зосередили свою увагу на розв'язанні важливого і складного завдання – моделюванні блокових динамічних систем і пристроїв довільного призначення. Запустивши MATLAB, на екрані з'являється графічний інтерфейс (рис. 7.1).

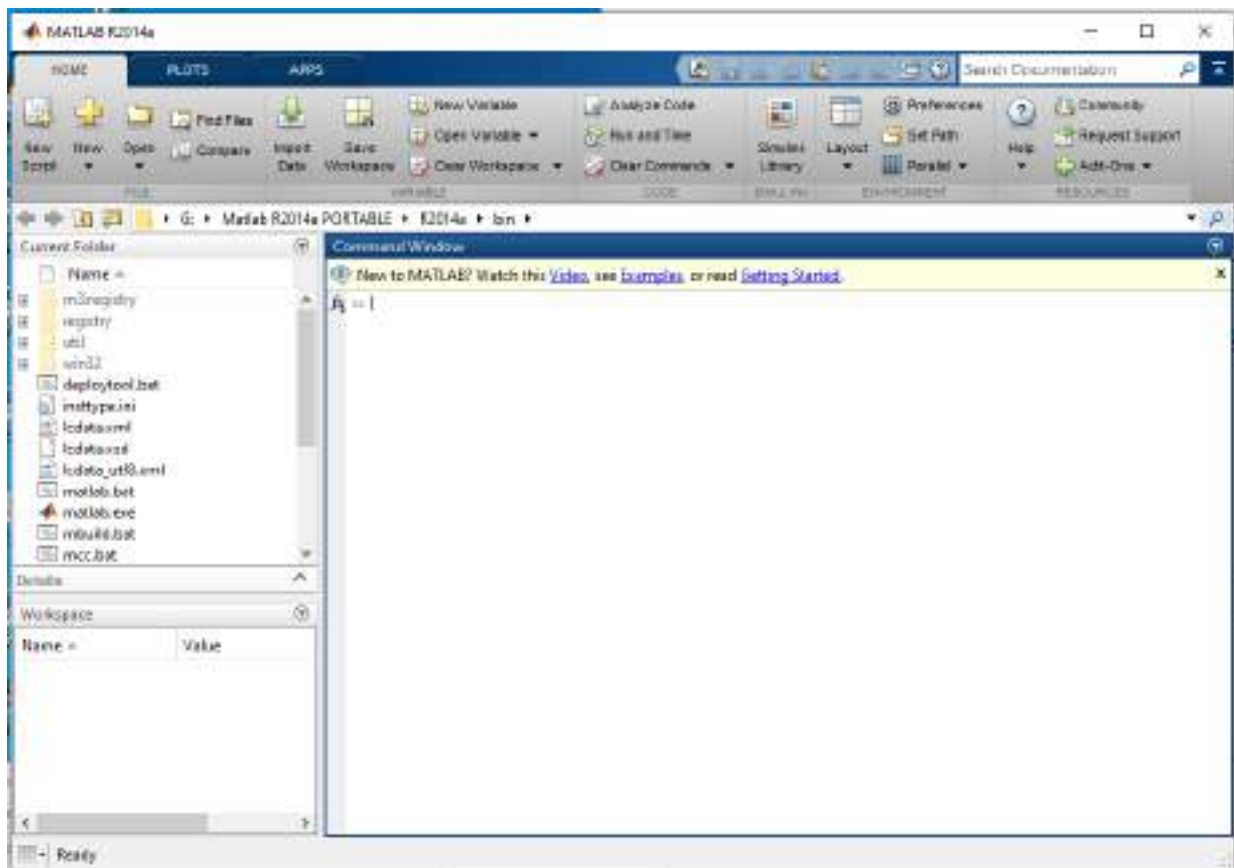


Рисунок 7.1 – Графічний інтерфейс, MATLAB

7.2 Пакет візуального моделювання SIMULINK

7.2.1 Каталог бібліотеки Simulink

Далі необхідно запусити Simulink, натиснувши кнопку Simulink Library. І тут відкриється вікно Simulink Library Browser (каталог бібліотеки Simulink) (рис. 7.2).

У лівій панелі вікна наведено список бібліотек Simulink. Права панель містить три вкладки: Library Simulink (Зміст бібліотеки), Search Results (Результати пошуку), Frequently Used Blocks (Найчастіше використовувані блоки).

У вкладці Library Simulink відображаються елементи бібліотеки, вибраної у лівій панелі вікна блоку Simulink. Надалі ці елементи можуть бути використані для створення нової моделі. Для прискорення пошуку потрібного блоку необхідно використовувати пошукову систему (Enter search term). Результати пошуку відображаються у другій вкладці правої панелі (Search Results). У процесі роботи в Simulink формується набір найчастіше використовуваних блоків, який відобразатиметься в третій вкладці правої панелі (Frequently Used).

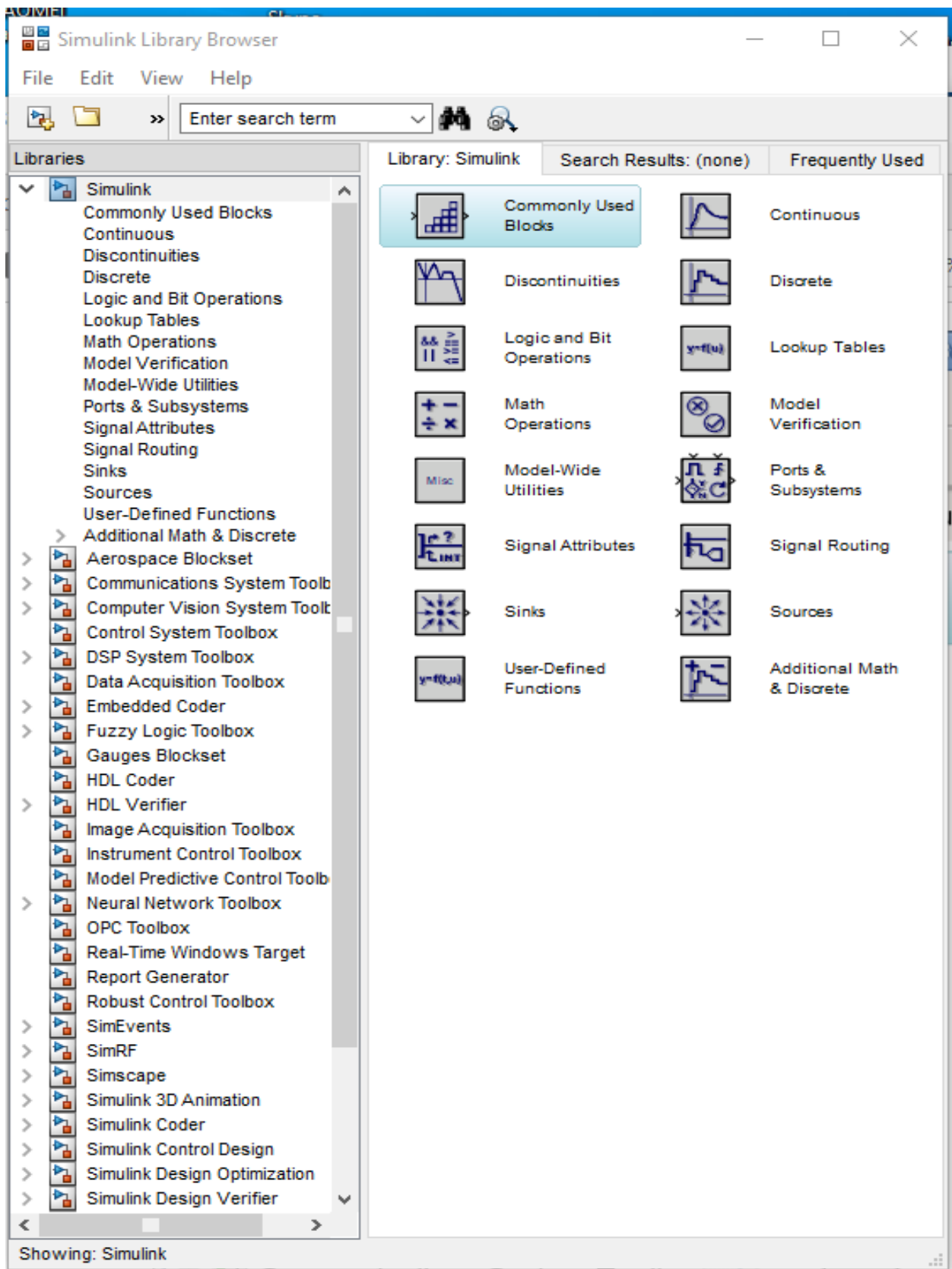


Рисунок 7.2 – Каталог бібліотеки Simulink

Під час подвійного натискання лівою кнопкою мишки по блоку, що цікавить, відкривається вікно параметрів, в якому наведено стислий опис

блоку та перераховано його параметри. На даному етапі параметри блоку доступні тільки для читання. Після переміщення блоку в модель з'явиться можливість їхньої зміни.

Розглянемо деякі каталоги бібліотеки пакета Simulink.

Формування сигналів Simulink здійснюється за допомогою генераторів сигналів підкаталога Sources (рис .7.3).

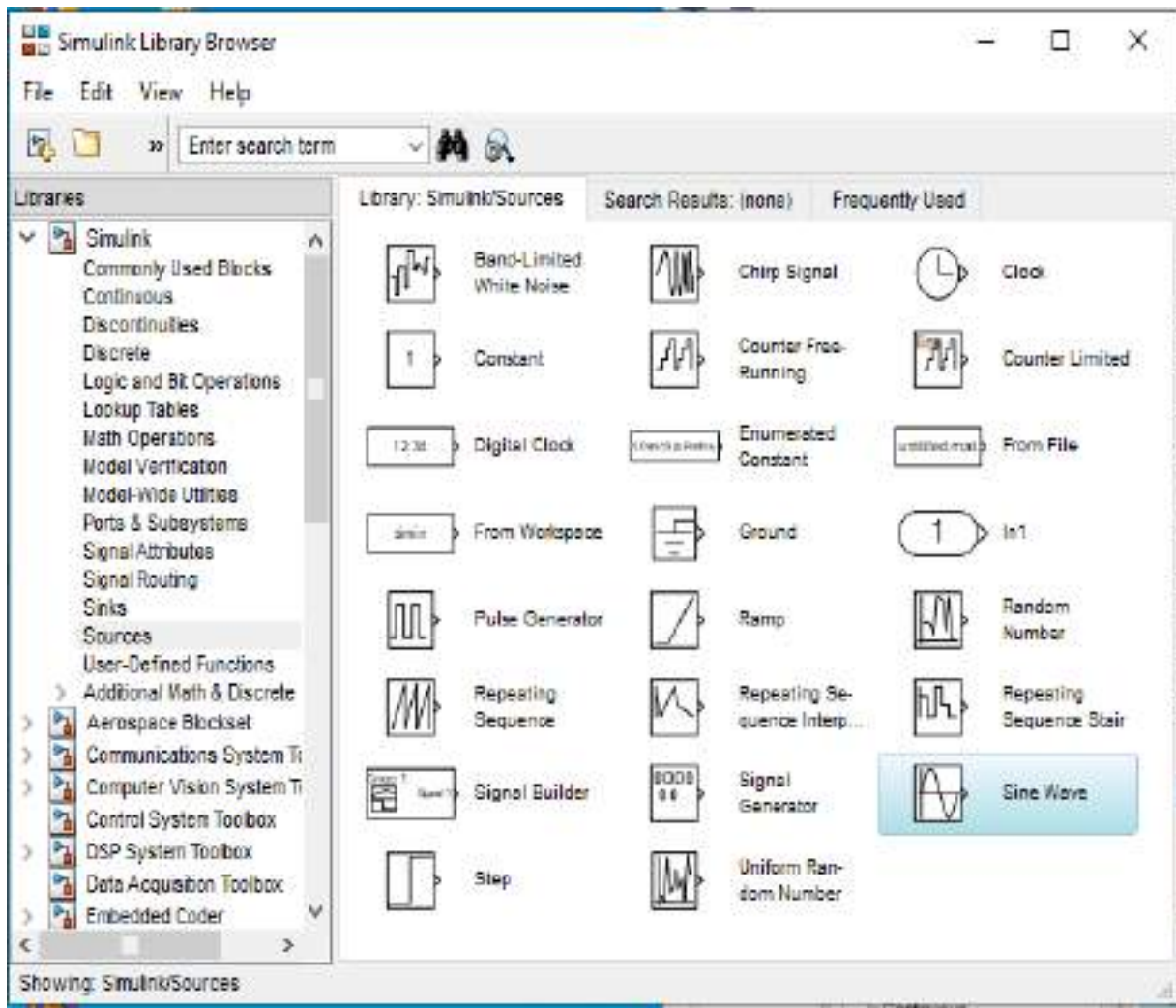


Рисунок 7.3 – Підкаталог Sources

Сюди входять такі блоки:

- Band-Limited White Noise – генератор нормального білого шуму з рівномірною фінітною спектральною щільністю потужності та заданим часом кореляції для аналогових систем;
- Chirp signal – генератор синусоїдального коливання з лінійно збільшеною миттєвою частотою;
- Clock – формувач аналогового сигналу поточного часу моделювання (відповідно до кроку моделювання);

- Constant – джерело постійного сигналу;
- Counter Free-Running – формувач сигналу на основі N-розрядного лічильника та зі скиданням з переповнення;
- Counter Limited – формувач сигналу на основі лічильника з довільним значенням скидання;
- Digital Clock – формувач дискретного сигналу поточного часу моделювання (відповідно до кроку моделювання);
- From File – блок імпорту сигналу із mat-файлів;
- From Workspace – блок імпорту сигналу із області пам'яті Workspace;
- Ground – формувач нульового сигналу;
- In – вхідний порт сигналів підсистем;
- Pulse Generator – генератор періодичних прямокутних імпульсів;
- Ramp – генератор сигналу, що лінійно змінюється;
- Random Number – генератор нормального білого шуму із заданим математичним очікуванням та дисперсією;
- Repeating Sequence – генератор періодичного сигналу за заданим вектором з лінійною інтерполяцією;
- Repeating Sequence Interpolated – генератор періодичного сигналу за заданим вектором із заданою інтерполяцією;
- Repeating Sequence Stair – генератор періодичного сигналу за заданим вектором і періодом дискретизації;
- Signal Generator – генератор сигналів гармонійного, трапецеїдального, пилкоподібного і випадкового;
- Sine Wave – генератор гармонійного сигналу;
- Step – генератор ступінчастої дії;
- Uniform Random Number – генератор рівномірного білого шуму із заданим максимальним і мінімальним значеннями випадкової величини.

Аналіз сигналів Simulink здійснюється за допомогою блоків підкаталога Sinks (рис. 7.4).

До підкаталога входять такі блоки:

- Display – блок відображення чисельних значень сигналів;
- Out – вихідний порт сигналів підсистем;
- Scope – осцилограф;
- Stop Simulation – блок переривання процесу моделювання під час надходження на вхід ненульового сигналу;
- Floating Scope – блок осцилографа, здатного в процесі моделювання підключатися до різних сигналів;

- Terminator – навантаження для сигналів, що не використовуються;
- To File – експорт сигналу в mat-файл;
- To Workspace – експорт сигналу до Workspace;
- XY Graph – двокоординатний осцилограф.

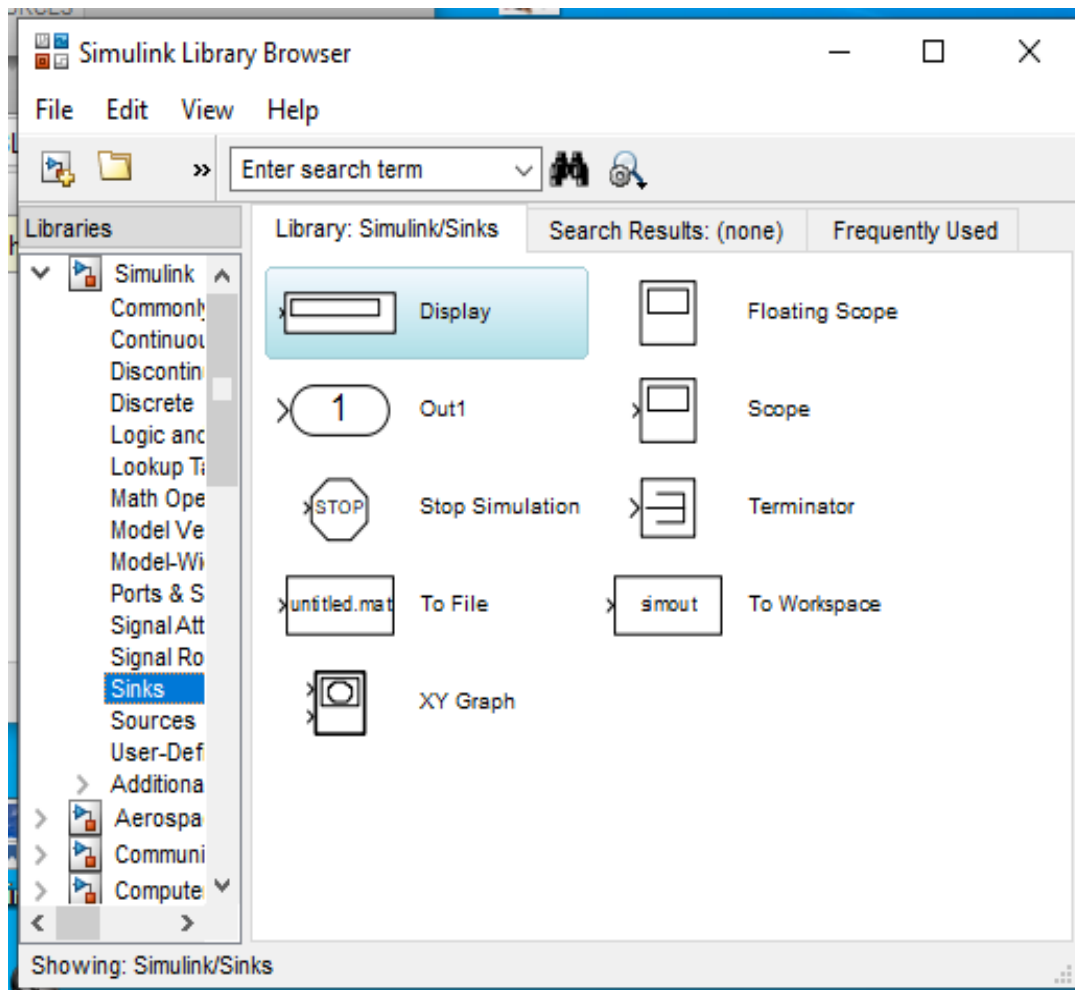


Рисунок 7.4 – Підкаталог Sink

Виконання математичних перетворень здійснюється за допомогою блоків підкаталога Math Operations (рис. 7.5).

До підкаталога входять такі блоки:

- Abs – блок формування модуля сигналу;
- Add – блок матричного або поелементного складання;
- Bias – блок додавання постійної складової до вхідного сигналу;
- Complex to Real-Imag – блок виділення реальної та уявної складових комплексного сигналу;
- Divide – блок матричного або поелементного поділу;
- Dot product – блок обчислення скалярного добутку векторів;

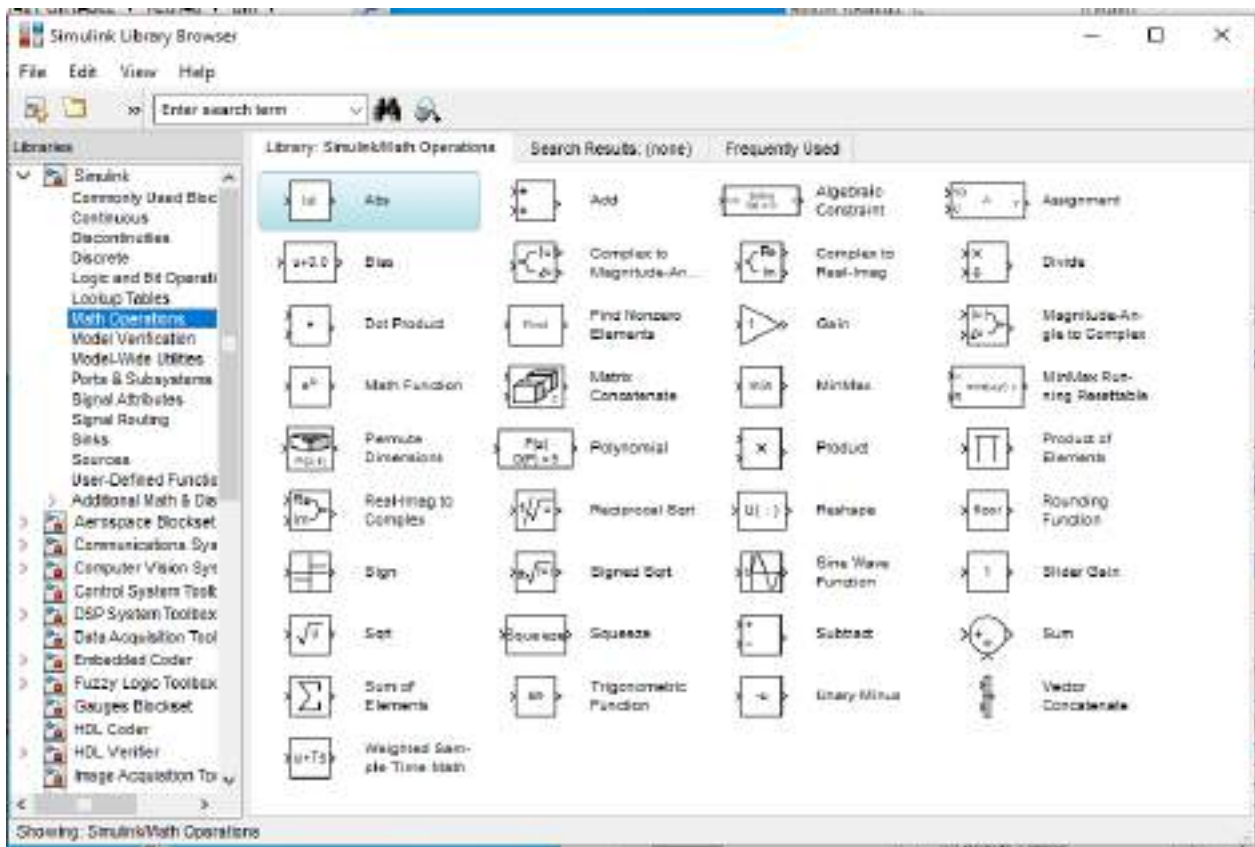


Рисунок 7.5 – Бібліотека блоків математичних перетворень

- Gain – блок поелементного або матричного множення на коефіцієнт (скаляр, вектор чи матрицю);
- Magnitude–Angle to Complex – блок перетворення сигналів, амплітуди та кута вектора на комплексній площині на комплексний сигнал;
- Math Function – блок обчислення математичної функції (експонента, логарифм, підняття до степеня та ін.);
- Product – блок виконання матричного або поелементного множення;
- Product of Elements – блок обчислення добутку елементів матриці;
- Real–Imag to Complex – блок перетворення реального та уявного сигналів у комплексний сигнал;
- Rounding Function – блок округлення;
- Sign – блок обчислення знаку вхідного сигналу;
- Slider Gain – блок множення на константу, значення якої задається положенням повзунка;
- Subtract – блок матричного або поелементного віднімання;
- Sum – блок матричного або поелементного додавання;
- Sum of Elements – блок обчислення суми елементів матриці;
- Trigonometric Function – блок обчислення тригонометричних функцій;
- Unary Minus – блок інверсії вхідного сигналу.

На рис. 7.6 показано засоби керування сигналами у Simulink.

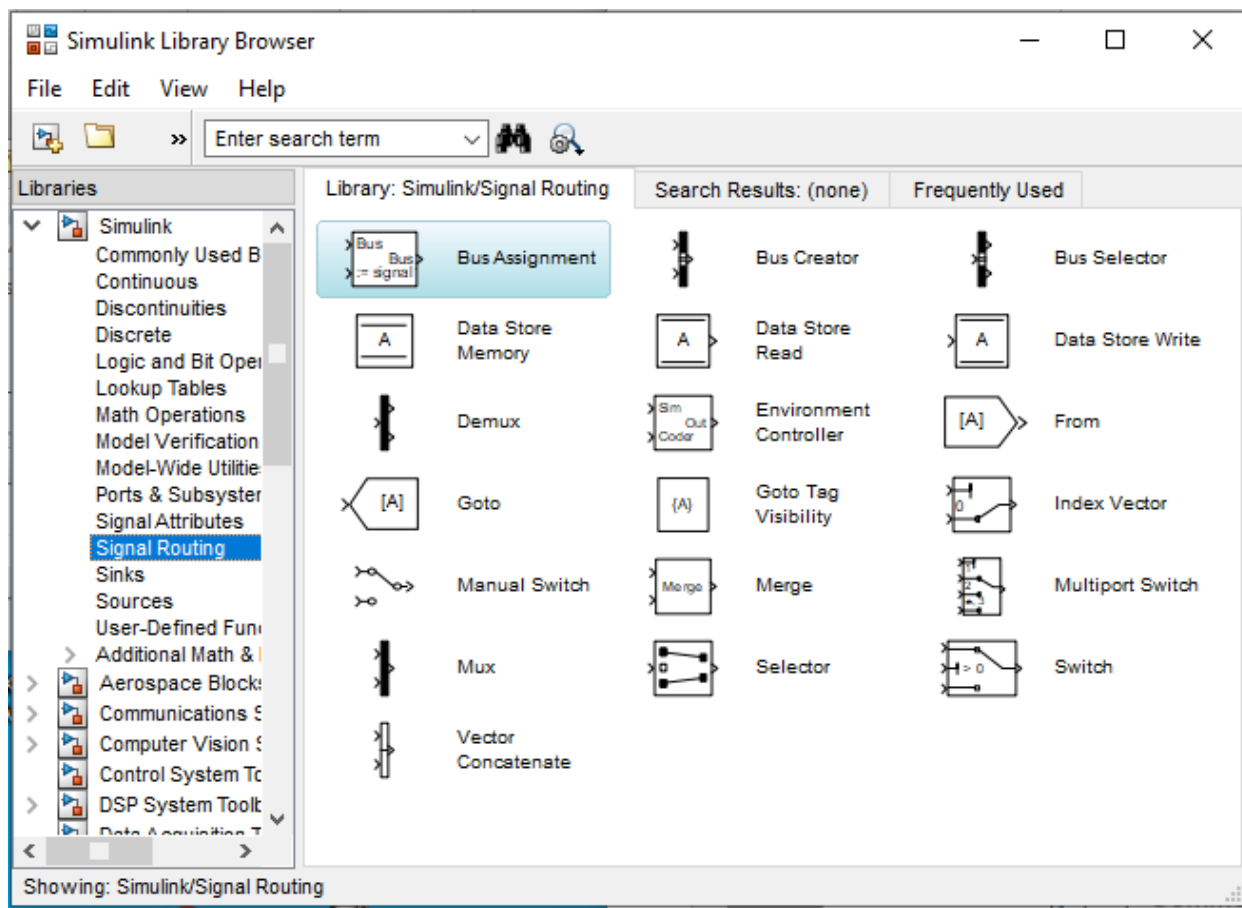


Рисунок 7.6 – Засоби керування сигналами Simulink

Найчастіше використовувані блоки підкаталогу Signal Routing:

- Bus Creator – поєднання різних сигналів у шині;
- Bus Selector – виділення сигналів із шини;
- Mux – поєднання скалярних сигналів у векторний сигнал;
- Demux – виділення із векторного сигналу скалярів та/або векторів;
- Goto – блок бездротової передачі сигналів до From;
- From – блок прийому сигналів Goto;
- Manual Switch – ручний перемикач сигналів;
- Switch – автоматичний перемикач сигналів;
- Selector – блок виділення елементів вектора або матриці та їхнього переупорядкування.

Підсистемою (Subsystem) Simulink називають подану у вигляді одного блоку модель, що складається з декількох блоків. У найпростішому випадку створення підсистем дозволяє більш компактно подавати моделі складних систем. На рис. 7.7 показано елементи бібліотеки організації підсистем.

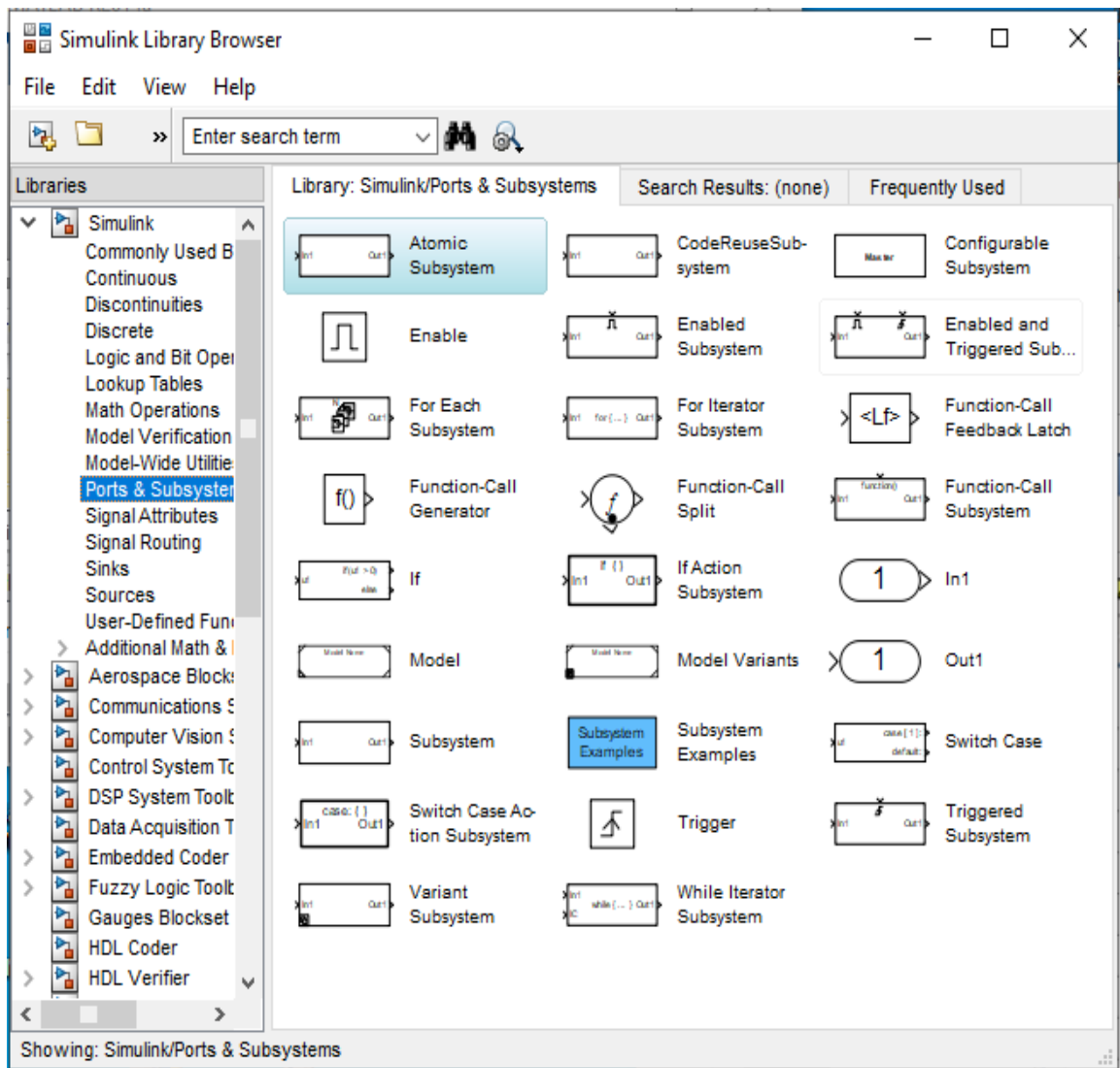


Рисунок 7.7 – Елементи бібліотеки для організації підсистем у Simulink

Блок Subsystem дозволяє створити просту підсистему з необхідною кількістю вхідних та вихідних портів (In та Out). За потреби управління підсистемою може бути організовано за допомогою елементів Enable та Trigger. Позитивний сигнал Enable дозволяє роботу підсистеми. За наявності елемента Trigger система запускається по передньому фронту керуючого сигналу.

Стандартна бібліотека Simulink містить велику кількість блоків лінійної обробки сигналів (Continuous) (рис. 7.8).

Під час створення систем автоматичного регулювання часто використовуються регулятори з трьома паралельно включеними ланками – пропорційним, інтегральним і диференціальним (ПІД-регулятори). Для моделювання таких систем у Simulink є окремий блок – PID Controller.

Стандартна бібліотека Simulink містить також велику кількість блоків нелінійної обробки сигналів (Discontinuous) (рис. 7.9).

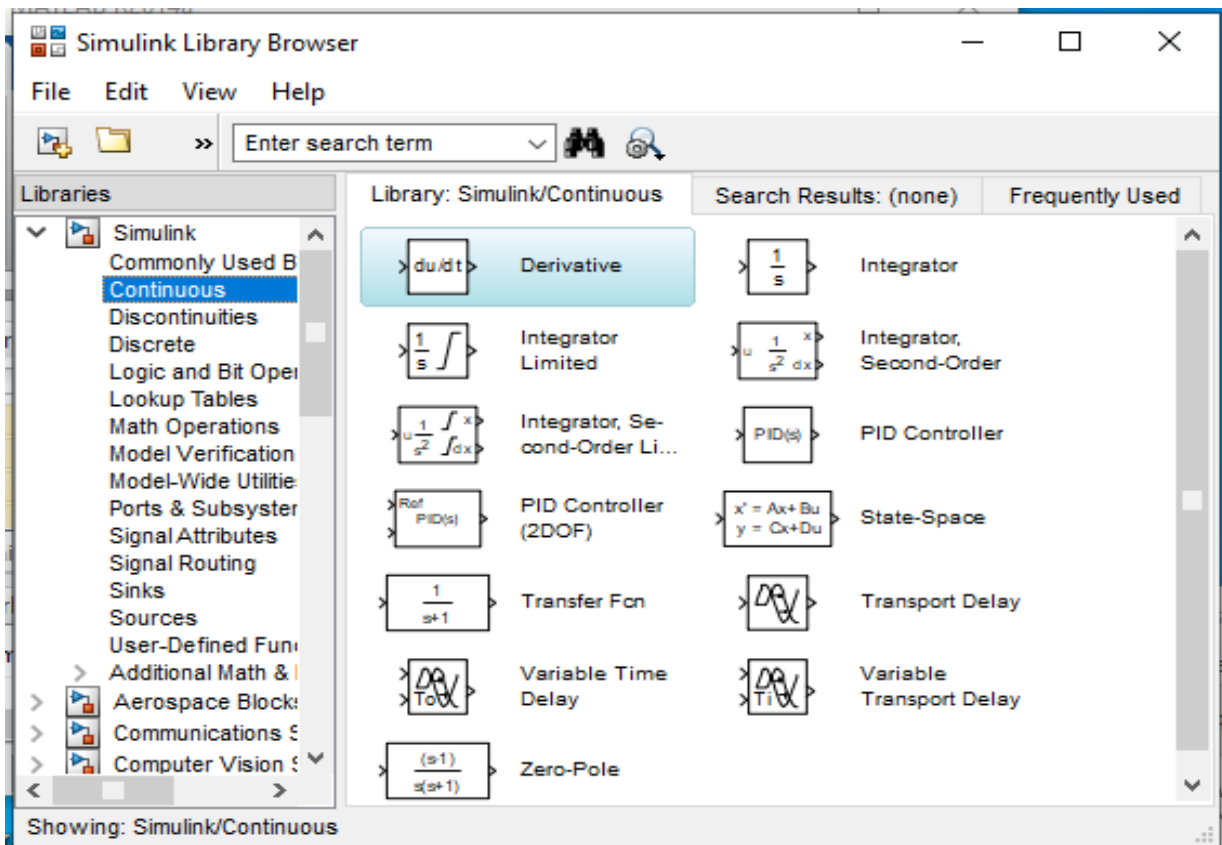


Рисунок 7.8 – Блоки лінійної обробки сигналів

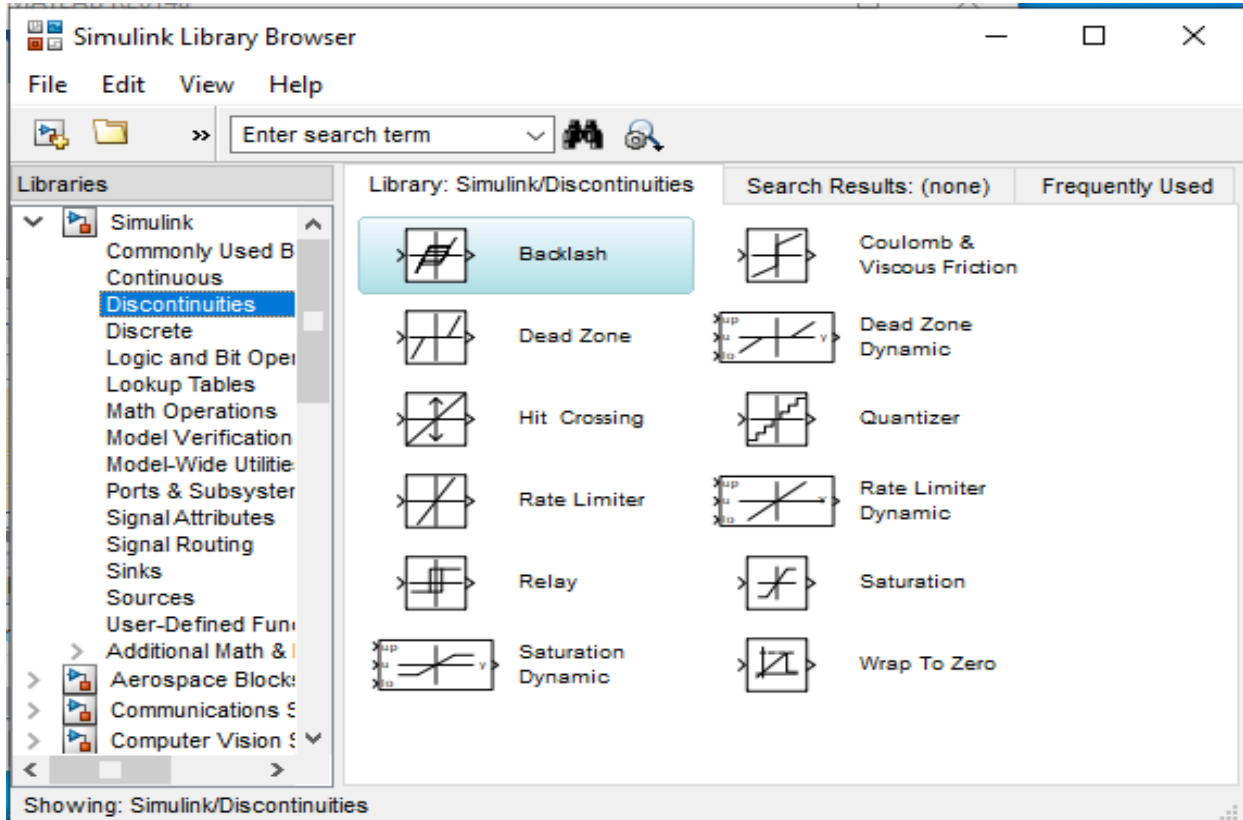


Рисунок 7.9 – Блоки нелінійної обробки сигналів

Одними з найчастіше використовуваних нелінійних блоків є блок обмеження сигналу Saturation і блок квантування сигналу за рівнем Quantizer (рис. 7.9). Доступні операції очевидні і відображені на умовних зображеннях блоків.

На рис. 7.10 показано блоки обробки дискретних сигналів.

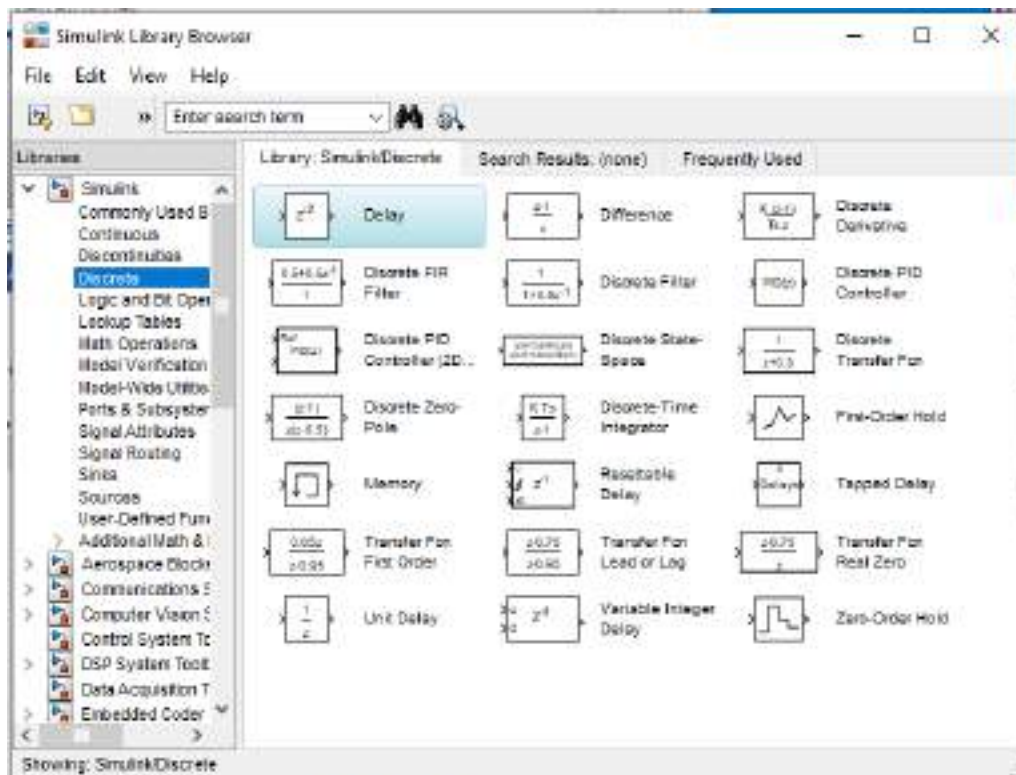


Рисунок 7.10 – Блоки обробки дискретних сигналів

Найчастіше використовуваним блоком у цій групі є блок затримки сигналу Delay, за допомогою якого можна затримати сигнал на N тактів.

На рис. 7.11 показано блоки логічних операцій над цифровим сигналом.

Найчастіше використовуються такі блоки:

- Bit Clear – скидання i-го біта вхідного сигналу;
- Bit Set – установка i-го біта вхідного сигналу;
- Bitwise Operator – побітова логічна операція;
- Combinatorial Logic – реалізація елементів комбінаторної логіки на основі таблиці істинності;
- Compare to Constant – блок порівняння вхідного сигналу із заданою константою;
- Compare to Zero – блок порівняння вхідного сигналу із нулем;
- Logical Operator – блок реалізації логічних елементів;
- Relational Operator – блок порівняння.

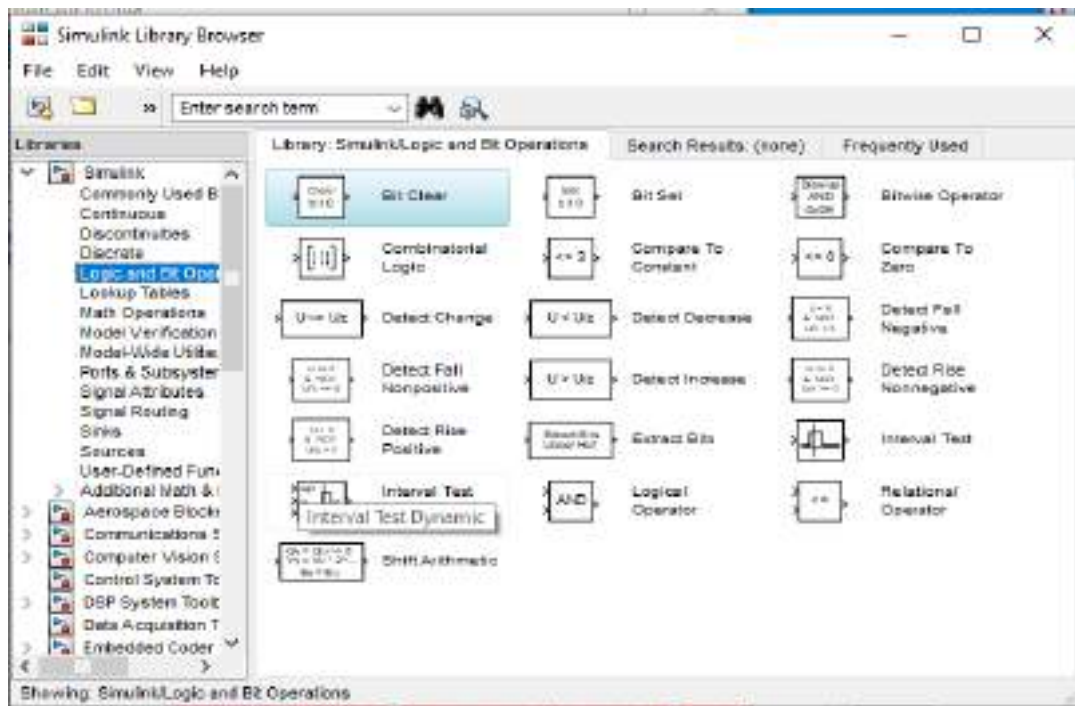


Рисунок 7.11 – Блоки логічних операцій

7.2.2 Вікно моделі Simulink

Щоб створити нову модель, треба виконати команду головного меню File, New, Model у вікні Simulink Library Browser (каталог бібліотеки Simulink). За командою відкриється нове безіменне (Untitled) вікно моделі, у робочій області якого створюється блок схема досліджуваного пристрою (рис. 7.12).

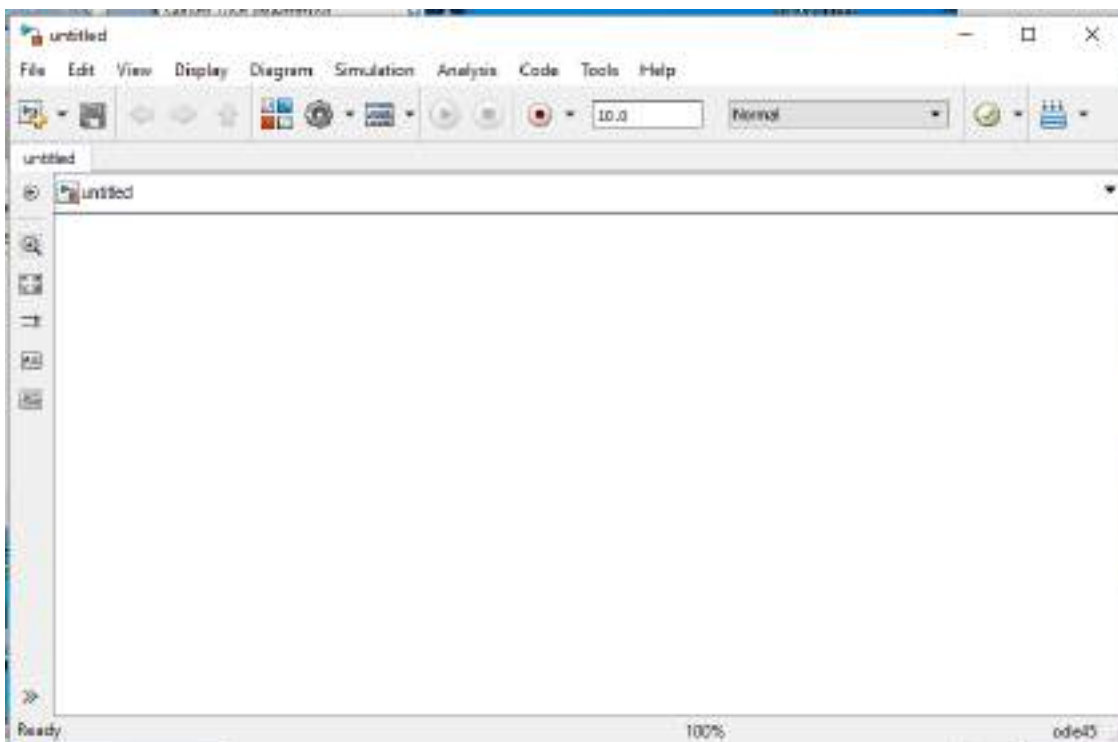


Рисунок 7.12 – Вікно моделі

Вікно моделі містить такі елементи:

1. Заголовок з назвою вікна. (У знову створеному вікні надається ім'я Untitled з відповідним номером).
2. Меню з командами File, Edit, View тощо.
3. Панель інструментів.
4. Вікно створення схеми моделі.
5. Рядок стану, що містить інформацію про поточний стан моделі.

Меню вікна містить команди для редагування моделі, її налаштування та управління процесом розрахунку, роботи файлами:

- File (Файл) – використання файлів моделей.
- Edit (Редагування) – зміна моделі та пошук блоків.
- View (Вид) — керування показом елементів інтерфейсу.
- Simulation (Моделювання) – встановлення налаштувань для моделювання та управління процесом розрахунку.
- Format (Форматування) – зміна зовнішнього вигляду блоків і моделі загалом.
- Tools (Інструментальні засоби) – застосування спеціальних засобів для роботи з моделлю (налагоджувач, лінійний аналіз тощо).
- Help (Довідка) – виведення вікон довідкової системи.

7.2.3 Налаштування параметрів моделювання

Перш ніж приступати до створення моделі, необхідно налаштувати параметри моделювання. Для цього треба виконати команду головного меню Simulation, Model Configuration Parameters (Моделювання, Параметри конфігурації) або натиснути Ctrl+E і перейти до вікна рис. 7.13.

По-перше, встановлюється початковий та кінцевий час моделювання. Спочатку рекомендується залишити параметри конфігурації за замовчуванням, змінюючи лише праву межу часу моделювання. За потреби можна детальніше ознайомитися з параметрами конфігурації в довідковій системі MATLAB Simulink, вказаними нижче.

Під час вибору параметрів розрахунку необхідно вказати спосіб моделювання (Type) і метод розрахунку нового стану системи. Для параметра Type доступні два варіанти – з фіксованим (Fixed-step) або зі змінним (Variable-step) кроком. Як правило, Variable-step використовується для моделювання безперервних систем, а Fixed-step – для дискретних. Список методів розрахунку нового стану системи містить кілька варіантів. Перший варіант (discrete) використовується для розрахунку дискретних систем. Решта методів використовуються для розрахунку безперервних систем.

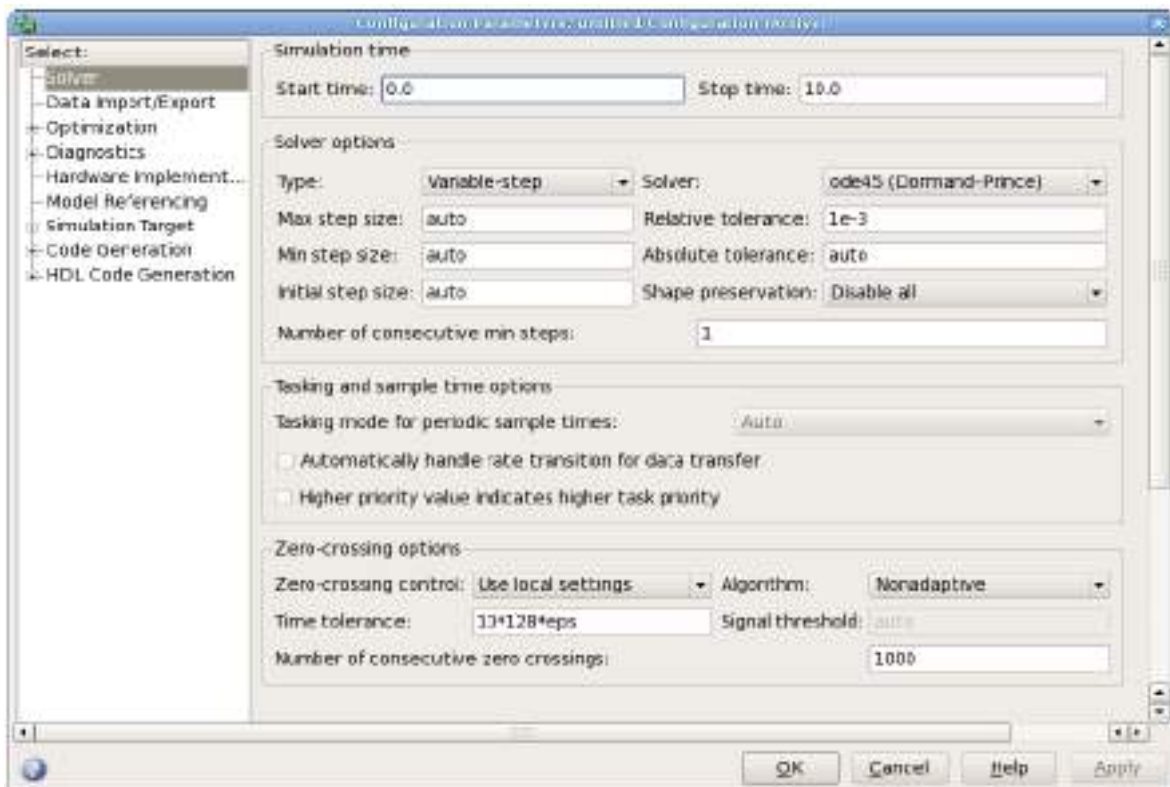


Рисунок 7.13– Параметри конфігурації

Ці методи різні для змінного (Variable-step) і для фіксованого (Fixed-step) кроку часу, але, по суті, є процедурами розв’язання систем диференціальних рівнянь. Детальний опис кожного з методів розрахунку станів системи наведено у вбудованій довідковій системі MATLAB.

Нижче двох списків Type, що розкриваються, знаходиться область, вміст якої змінюється залежно від обраного способу зміни модельного часу. У разі вибору Fixed-step у цій області з’являється текстове поле Fixed-step size (величина фіксованого кроку), що дає змогу вказувати величину кроку моделювання.

Величина кроку моделювання за замовчуванням встановлюється системою автоматично (auto). Необхідна величина кроку може бути введена замість значення auto або у формі числа, або у вигляді обчислюваного виразу (те саме стосується і всіх параметрів, що встановлюються системою автоматично).

Під час вибору Fixed-step необхідно також задати режим розрахунку (Mode).

Для параметра Mode доступні три варіанти:

- Multi Tasking (Багатозадачний) – необхідно використовувати, якщо в моделі присутні підсистеми, що працюють паралельно, і результат

роботи моделі залежить від часових параметрів цих підсистем. Режим дає змогу виявити невідповідність швидкості та дискретності сигналів, що пересилаються блоками один одному.

– Single Tasking (Однозадачний) – використовується для тих моделей, у яких недостатньо сувора синхронізація роботи окремих складових не впливає на кінцевий результат моделювання.

– Auto (Автоматичний вибір режиму) – дає змогу Simulink автоматично встановлювати режим Multi Tasking для тих моделей, у яких використовуються блоки з різними швидкостями передачі сигналів і режим Single Tasking для моделей, у яких містяться блоки, що оперують однаковими швидкостями.

У разі вибору Variable–step в області з’являються поля для встановлення трьох параметрів:

– Max step size – максимальний крок розрахунку. За замовчуванням він встановлюється автоматично (auto) і його значення в цьому разі дорівнює $(\text{Stop Time} - \text{Start Time})/50$. Досить часто це значення виявляється занадто великим, і спостережувані графіки є ламаними (а не плавні) лініями. У цьому разі величину максимального кроку розрахунку необхідно задавати явно.

– Min step size – мінімальний крок розрахунку.

– Initial step size – початкове значення кроку моделювання.

Під час моделювання безперервних систем із використанням змінного кроку необхідно вказати точність обчислень: відносну (Relative tolerance) і абсолютну (Absolute tolerance). За замовчуванням вони дорівнюють відповідно 10^{-3} і auto.

Процес налаштування полягає в заданні параметрів вирішального модуля (Solver):

Simulation time (Час моделювання) – задається часовий інтервал моделювання в секундах. Ліва межа за замовчуванням дорівнює нулю, права може приймати будь-яке значення, в тому числі і нескінченність (inf). Якщо початкове та кінцеве значення збігаються, буде виконано лише один крок моделювання.

Solver Options (Параметри вирішального модуля) – параметри модуля, реалізує одне із методів чисельного інтегрування звичайних диференціальних рівнянь. Виділяються два типи (Type) вирішальних моделей: з фіксованим кроком моделювання (Fixed–step) і зі змінним кроком моделювання (Variable–step). Вибір другого варіанта дозволяє системі адаптивно змінювати тимчасовий крок моделювання в процесі роботи.

7.2.4 Створення та налаштування моделі

Після налаштування параметрів моделювання треба створити модель пристрою, який потрібно дослідити. Додати вибраний блок можна декількома способами, перетягнувши його на аркуш моделі або вибравши пункт Add To Untitled контекстного меню, натиснувши правою кнопкою мишки на блоці.

З'єднання блоків між собою може здійснюватися двома способами. Ручний спосіб: направивши курсор на вихід першого блоку, затисніть ліву кнопку мишки і проведіть лінію до входу другого блоку. Автоматичний спосіб: виділивши блок джерела сигналу одноразовим натисканням лівої кнопки мишки, затисніть Ctrl і натисніть лівою кнопкою мишки на другий блок, з'єднання буде виконано автоматично.

Для видалення блоку необхідно вибрати блок (вказати курсором на зображення і натиснути ліву клавішу мишки), а потім натиснути клавішу Delete на клавіатурі.

Для зміни розмірів блоку потрібно вибрати блок, встановити курсор в один з кутів блоку і, натиснувши ліву клавішу мишки, змінити розмір блоку (курсор при цьому перетвориться на двосторонню стрілку).

Далі, якщо це потрібно, можна змінити параметри блоку, встановлені програмою «за замовчуванням». Для цього необхідно двічі клацнути лівою клавішею мишки, вказавши курсором на зображення блоку. Відкриється вікно редагування параметрів даного блоку. При заданні чисельних параметрів треба зважати на те, що як десятковий роздільник має використовуватися точка, а не кома. Після внесення змін потрібно закрити кнопкою ОК.

Запуск розрахунку здійснюється за допомогою вибору пункту меню Simulation/Run або інструмента  на панелі інструментів, рис. 7.14.

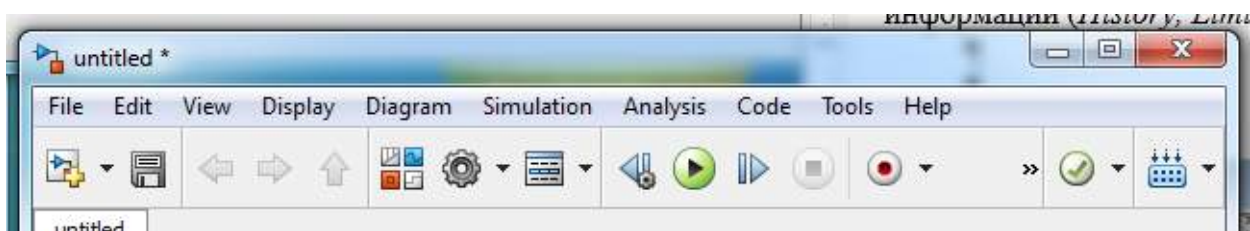



Рисунок. 7.14 – Меню та лінійка інструментів вікна моделі

Процес розрахунку можна завершити достроково, вибравши інструмент .

Розглянемо керування параметрами найпоширеніших блоків.

Каталог Sinks – приймачі сигналів

Осцилограф Scope. Призначення:

- Будує графіки досліджуваних сигналів функції часу.
- Дозволяє спостерігати за змінами сигналів у процесі моделювання.

Зображення блоку та вікно для перегляду графіків показано на рис. 7.15.

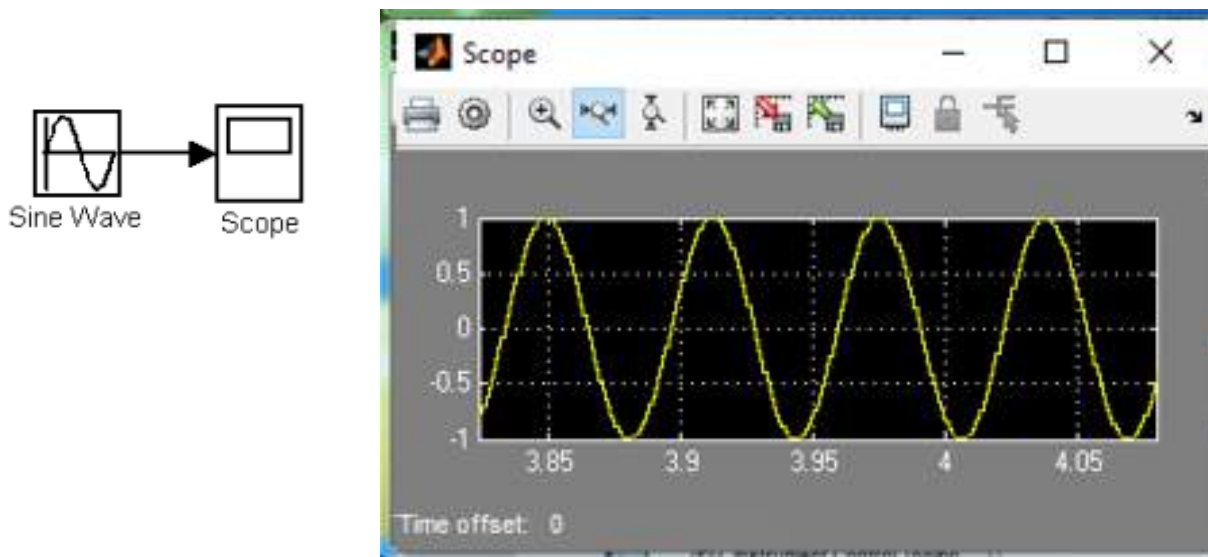


Рисунок. 7.15 – Інтерфейс осцилографа



Вікно для спостереження за сигналами (вікно осцилограми) відкривається подвійним клацанням ЛКМ по піктограмі «Scope», що виконується на будь-якій фазі моделювання (до початку, у процесі та після закінчення процесу моделювання).

Налаштування вікна осцилографа виконується за допомогою панелей інструментів, рис. 7.16.




Рисунок 7.16 – Панель інструментів блоку Scope

Панель інструментів містить 11 кнопок:

1. Print – друк вмісту вікна осцилографа.
2. Parameters  – доступ до вікна налаштування параметрів.
3. Zoom  – збільшення масштабу по обох осях.

4. Zoom X-axis  – збільшення масштабу горизонтальної осі.


5. Zoom Y-axis  – збільшення масштабу вертикальної осі.


6. Autoscale  – автоматичне встановлення масштабів по обох осях.

7. Save current axes settings  – збереження поточних налаштувань вікна.

8. Restore saved axes settings  – установка раніше збережених налаштувань вікна.


9. Floating scope  – переведення осцилографа у «вільний» режим.



10. Lock/Unlock axes selection  – закріпити/розірвати зв'язок між поточною координатною системою вікна і сигналом, що відображається. Інструмент доступний, якщо увімкнено режим Floating scope.

11. Signal selection  – вибір сигналів для відображення. Інструмент доступний, якщо увімкнено режим Floating scope.

Зміну масштабів відображених графіків можна виконувати кількома способами:

1. Натиснути відповідну кнопку і клацнути один раз лівою клав'яшою мишки в потрібній точці графіка. Відбудеться 2,5-кратне збільшення масштабу деякої області навколо вибраної точки на весь екран.

2. Натиснути відповідну кнопку, натиснувши ліву клав'яшу мишки, за допомогою динамічної рамки для інструмента  або горизонтального

відрізка для інструмента  і вертикального для  вказати область графіка для збільшеного зображення на весь екран. Рисунок 7.17 пояснює цей процес.

Скасувати зміну можна, клацнувши правою кнопкою мишки на відповідному екрані (кривий) і вибравши відповідну команду Zoom out у спливаючому вікні, рис. 7.18.

Клацнути правою клав'яшою мишки у вікні графіків, можна вибрати команду Axes properties ... у контекстному меню. Відкриється вікно властивостей графіка рис 7.19, в якому за допомогою параметрів Y-min

і Y-макс можна вказати граничні значення вертикальної осі. У цьому вікні можна вказати заголовок графіка (Title), замінивши вираз %<SignalLabel> у рядку вводу.

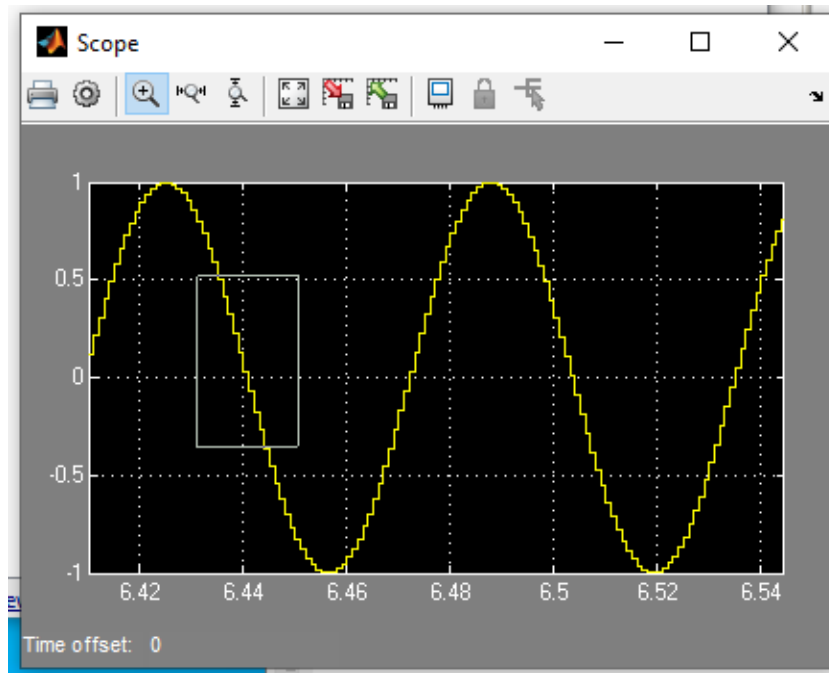


Рисунок 7.17– Збільшення масштабу графіка

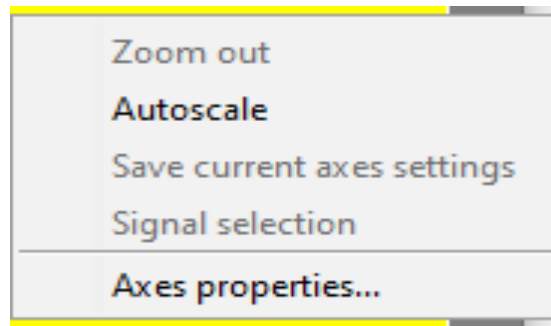


Рисунок 7.18 – Регулювання масштабом

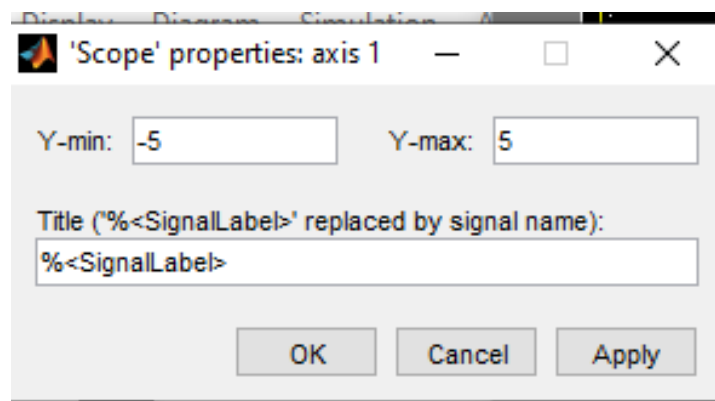


Рисунок 7.19– Вікно властивостей графіка

Параметри блоку встановлюються у вікні *Scope parameters*, яке відкривається за допомогою інструмента (*Parameters*) панелі інструментів.

Вікно параметрів має три вкладки:

- *General* – загальні параметри;
- *Data history* – параметри збереження сигналів у робочій області

MATLAB.

Вкладку загальних параметрів показано на рис. 7.20.

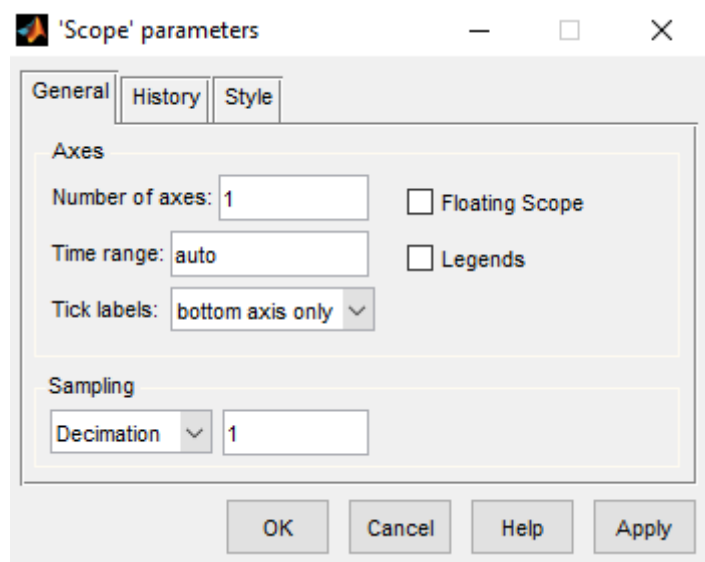


Рисунок 7.20 – Вкладка загальних параметрів *General*

На вкладці *General* задаються такі параметри:

1. *Number of axes* – кількість входів (систем координат) осцилографа. Під час зміни цього параметра на зображенні блоку з'являються додаткові порти.

2. *Time range* – величина часового інтервалу, для якого відображуються графіки. Якщо час розрахунку моделі перевищує заданий параметр *Time range*, то виведення графіка проводиться порціями, при цьому інтервал відображення кожної порції графіка дорівнює заданому значенню *Time range*.

3. *Tick labels* – виведення/приховування осей та міток осей. Може приймати три значення (вибираються зі списку):

- *all* – підписи всіх осей;
- *none* – відсутність всіх осей та підписів до них;
- *bottom axis only* – підписи горизонтальної осі лише для нижнього графіка.

4. *Sampling* — Встановлення параметрів виведення графіків у вікні. Задає режим виведення розрахункових точок на екран. При виборі *Decimation*

кратність виводу встановлюється числом, що задає крок розрахункових точок, що виводяться. На рис. 7.21 та 7.22 показані графіки синусоїдальних сигналів, розрахованих із фіксованим кроком.

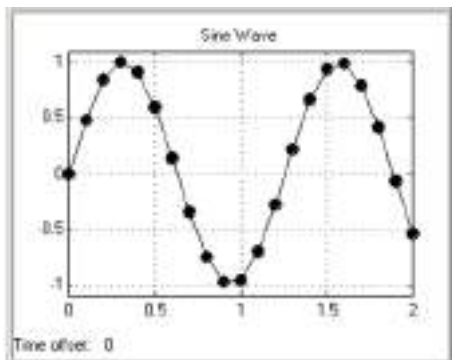


Рисунок 7.21 – Відображення сигналу (Decimation = 1)

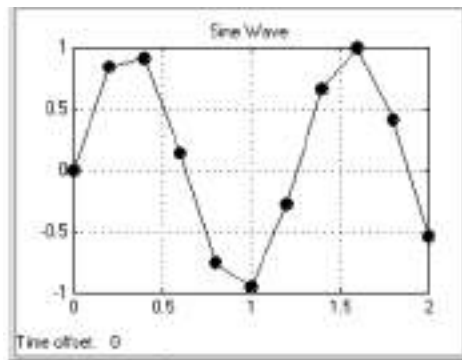


Рисунок 7.22 – Відображення сигналу (Decimation = 2)

На рис. 7.21 у вікні блоку Score виводиться кожна розрахункова точка (параметр Decimation дорівнює 1).

На рис. 7.22 показано виведення кожного другого значення (параметр Decimation дорівнює 2). Маркерами на графіках позначено розрахункові точки. У разі, якщо режим виведення розрахункових точок задається як Sample time, його числове значення визначає інтервал квантування під час зображення сигналу.

5. floating scope – переведення осцилографа у «вільний» режим (при встановленому прапорці).

На вкладці **History**, рис. 7.23, задаються такі параметри:

1. Limit data points to last – максимальна кількість розрахункових точок графіка, що відображуються. У разі перевищення цього числа початкова частина графіка обрізається. Якщо прапорець параметра Limit data points to last не встановлено, Simulink автоматично збільшить значення цього параметра для відображення всіх розрахункових точок.

2. Save data to workspace – збереження значень сигналів у робочій області MATLAB.

3. Variable name – ім'я змінної для збереження сигналів у робочій області MATLAB.

4. Format – формат даних під час збереження у робочій області MATLAB, може приймати значення:

- Array – масив;
- Structure – структура;
- Structure with time – структура з додатковим полем часу.

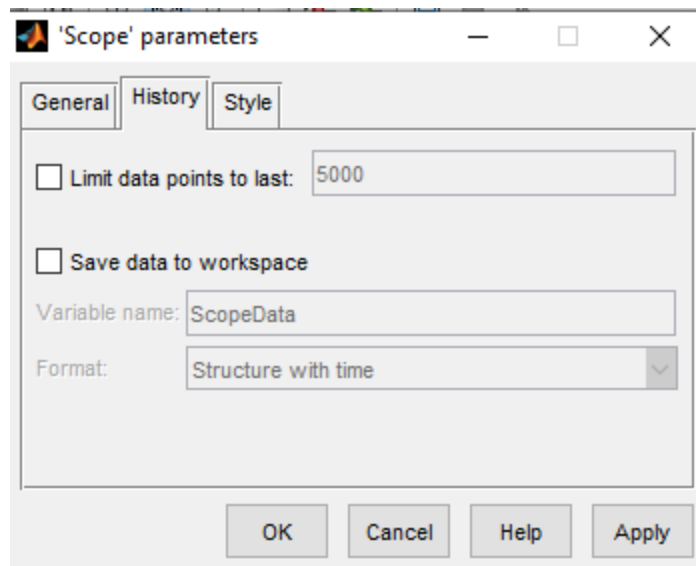




Рисунок 7.23 – Вкладка History

Осцилограф Floating Scope . Призначення – побудова часових

діаграм сигналів (осцилограм). Дає можливість спостерігати за ходом процесів під час моделювання, а також вимірювати миттєві значення сигналу, що застосовуються для виведення довільно призначених сигналів.

У спеціальному режимі осцилограф використовується без зазначення входів, вибір сигналів при цьому виконується за допомогою кнопки Signal selection  на панелі інструментів вікна осцилограми, яке відкривається подвійним клацанням ЛКМ по піктограмі осцилографа. Послідовність дій така:

- відкрити вікно осцилограми;
- клацнути ЛКМ по полю осцилограми (по периметру з'явиться рамка синього кольору);
- за допомогою кнопки  відкрити вікно Signal selection;
- у вікні позначити прапорцями імена блоків, сигнали яких підлягають спостереженню;
- Запустити модель.

Графобудівник XY Graph. Призначення:

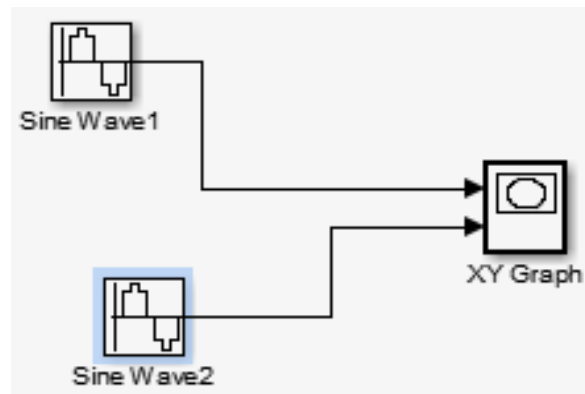
Будує графік одного сигналу функції іншого (графік виду $Y(X)$).

Параметри:

- x–min – Мінімальне значення сигналу по осі X.
- x–max – Максимальне значення сигналу по осі X
- y–min – Мінімальне значення сигналу по осі Y.
- y–max – Максимальне значення сигналу по осі Y
- Sample time – крок модельного часу.

Блок має два входи. Верхній вхід призначений для подачі сигналу, що є аргументом (X), нижній – подання значень функції (Y).

На рис. 7.24, рис. 7.25 показано використання графобудівника.



Риунок 7.24 – Використання графобудівника

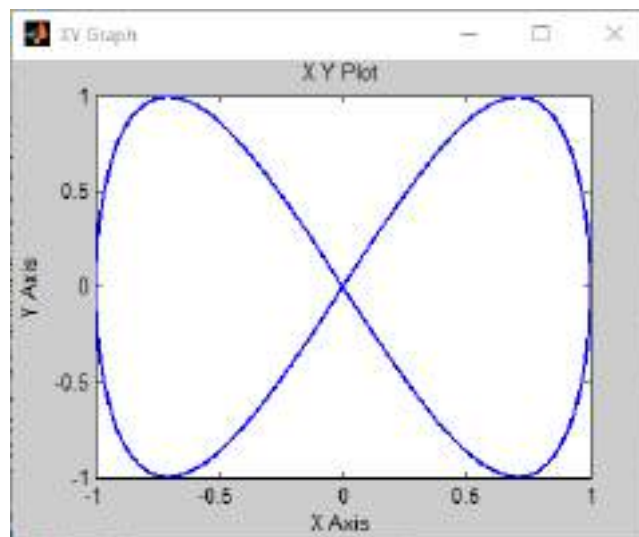



Рисунок 7.25 – Екран графобудівника

Графобудівник можна використовувати і для побудови часових залежностей. Для цього на перший вхід необхідно подати часовий сигнал з виходу блоку Clock.

Каталог Sources – джерела сигналів

Джерело постійного сигналу Constant 

Призначення. Встановлює постійний за рівнем сигнал.

Параметри:

Constant value – Постійна величина

Налаштування сигналу Constant (рис. 7.26).

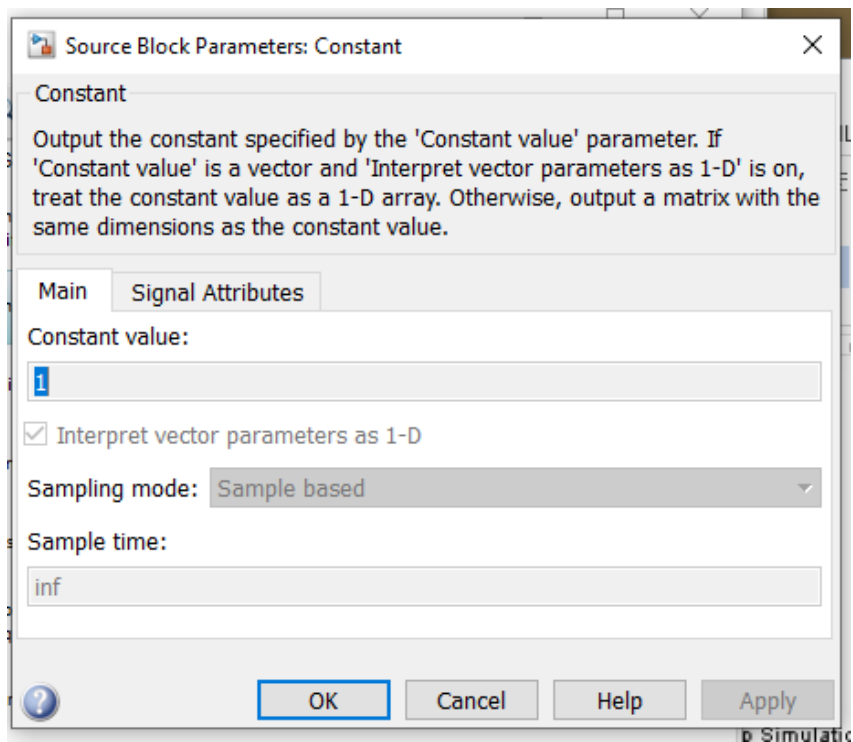


Рисунок 7.26 – Джерело постійного сигналу Constant

Генератор ступінчастого сигналу Step

Призначення. Формує ступінчастий сигнал.

Параметри:

1. Step time – Час перепаду сигналу (с).
2. Initial value – Початкове значення сигналу.
3. Final value – Кінцеве значення сигналу.

Перепад може бути як у більшу сторону (кінцеве значення більше, ніж початкове), так і у меншу (кінцеве значення менше, ніж початкове). Значення початкового і кінцевого рівнів може бути як позитивними, так і негативними. На рис. 7.27 показано використання генератора ступінчастого сигналу.

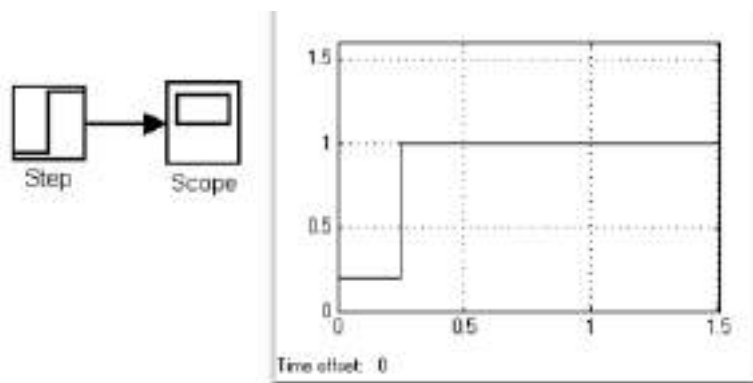


Рисунок 7.27–Сигнал блоку Step

Генератор сигналів Signal Generator.

Призначення. Формує один із чотирьох видів періодичних сигналів.

Параметри:

1. Wave form – Вид сигналу.

1. sine – Синусоїдальний сигнал.

2. square – Прямокутний сигнал.

3. sawtooth – Пилоподібний сигнал.

4. random – Випадковий сигнал.

2. Amplitude – Амплітуда сигналу.

3. Frequency – Частота (рад/с).

4. Units – Одиниці виміру частоти, Hertz – Гц, rad/sec – рад/с.

На рис. 7.28 показано налаштування цього джерела під час моделювання прямокутного сигналу.

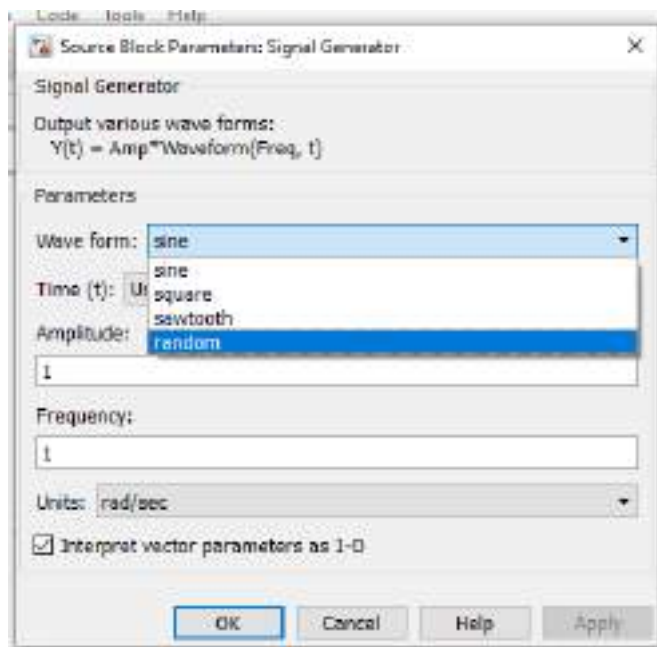


Рисунок 7.28 – Вікно налаштування генератора сигналів

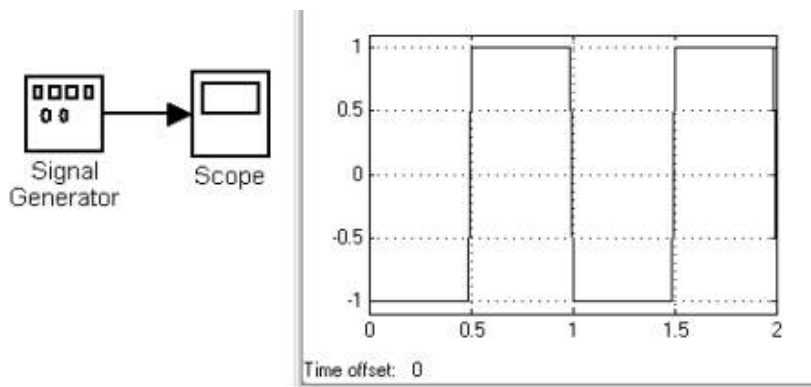


Рисунок 7.29 – Вікно генератора сигналів

Джерело випадкового сигналу з нормальним розподілом Random Number, рис. 7.30. Призначення:

Формування випадкового сигналу із нормальним розподілом рівня сигналу.

Параметри:

1. Mean – Середнє значення сигналу.
2. Variance – Дисперсія (середньоквадратичне відхилення).
3. Initial seed – Початкове значення.

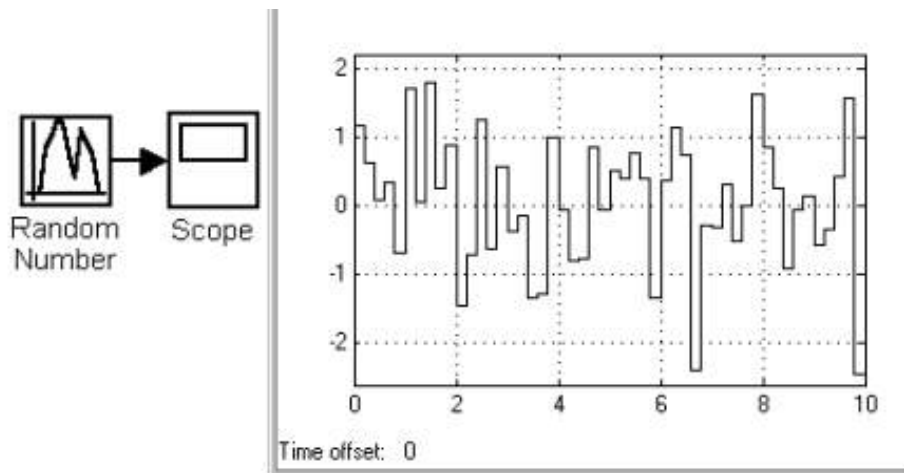


Рисунок 7.30 – Випадковий сигнал генератора

Джерело імпульсного сигналу Pulse Generator. Призначення. Формування прямокутних імпульсів.

Параметри:

1. Pulse Type – Спосіб формування сигналу. Може приймати два значення:
 - Time-based – За поточним часом.
 - Sample-based – За величиною модельного часу та кількістю розрахункових кроків.
2. Amplitude – Амплітуда.
3. Period – Період. Задається в секундах для Time-based Pulse Type або в кроках модельного часу для Sample-based Pulse Type.
4. Pulse width – Ширина імпульсів. Задається у відсотках по відношенню до періоду для Time-based Pulse Type або в кроках модельного часу для Sample-based Pulse Type.
5. Phase delay – Фазова затримка. Задається в секундах для Time-based Pulse Type або в кроках модельного часу для Sample-based Pulse Type.
6. Sample time – Крок модельного часу. Задається для Sample-based Pulse Type.

Один із сигналів, а саме імпульсний, показаний на рис. 7.31.

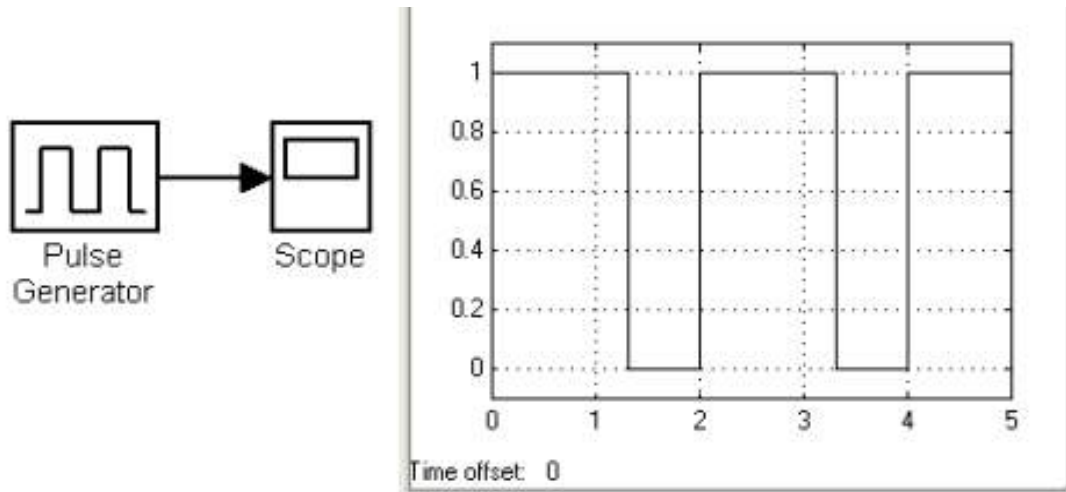


Рисунок 7.31 – Імпульсний сигнал генератора

Джерело часового сигналу Clock

Призначення. Формує сигнал, величина якого на кожному кроці розрахунку дорівнює поточному часу моделювання, рис. 7.32.

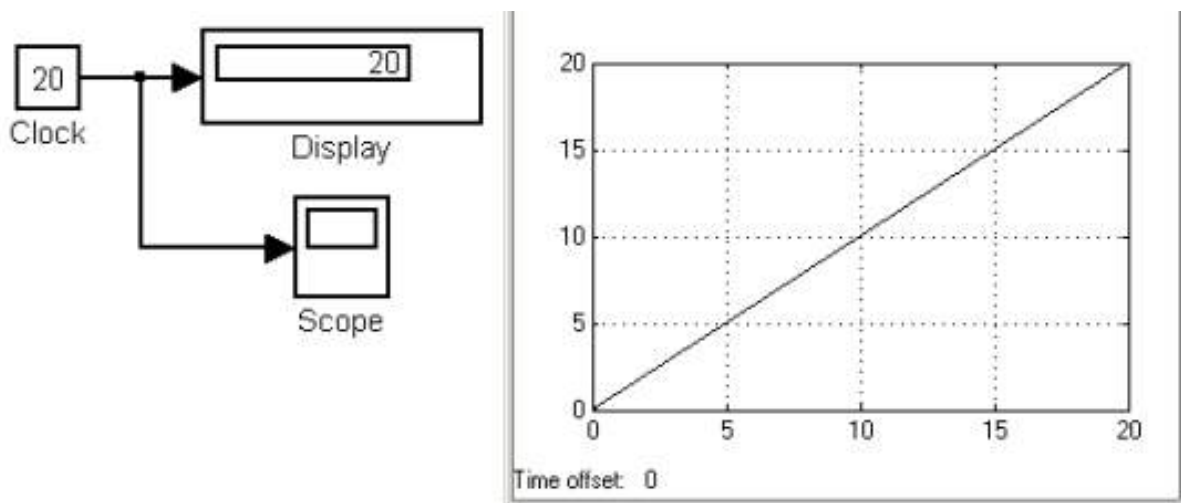


Рисунок 7.32 – Сигнал блоку Clock

Параметри:

1. Decimation – Крок, з яким оновлюються покази часу на зображенні джерела (у разі встановлення прапорця параметра Display time). Параметр визначається як кількість кроків розрахунку. Наприклад, якщо крок розрахунку моделі у вікні діалогу Simulation parameters встановлений рівним 0,01 с, а параметр Decimation блоку Clock заданий рівним 1000, оновлення показань часу проводитиметься кожні 10 секунд модельного часу.

Цифрове джерело часу Digital Clock

Призначення. Формує дискретний часовий сигнал.

Параметр:

Sample time – Крок модельного часу (с).

На рис. 7.33 показано роботу джерела Digital Clock

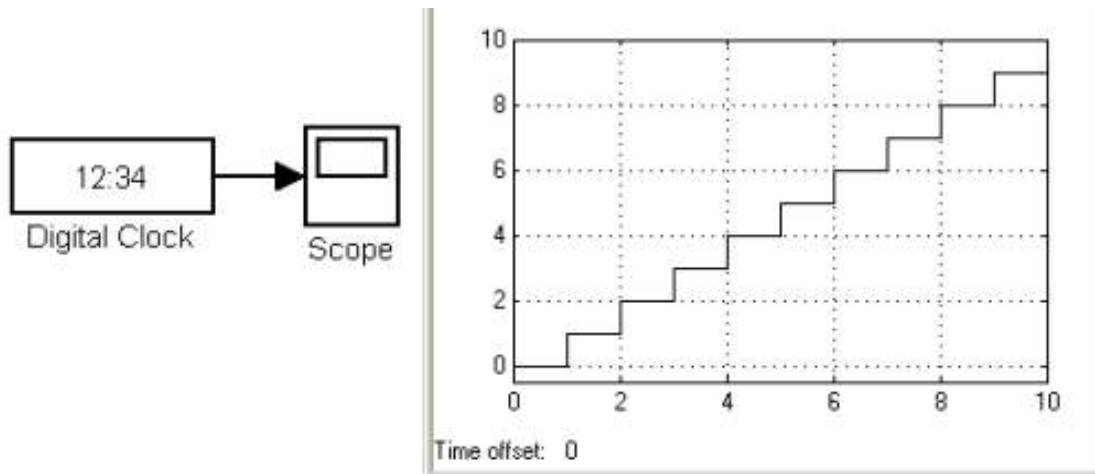


Рисунок 7.33 – Сигнал цифрового джерела часу

Джерело випадкового сигналу з нормальним розподілом Random Number

Призначення. Формування випадкового сигналу із нормальним розподілом рівня сигналу.

Параметри:

1. Mean – Середнє значення сигналу.
2. Variance – Дисперсія (середньоквадратичне відхилення).
3. Initial seed – Початкове значення.

Вікно налаштування, рис. 7.34.

Форма випадкового сигналу із нормальним законом розподілу показана на рис. 7.35.

Розглянемо приклад моделювання фазо-модульованого сигналу.

Фазова модуляція здійснюється шляхом зміни аргументу тригонометричної функції. Математичний вираз для фазо-модульованого сигналу має вигляд $u(t) = A_m \sin(\omega_0 t + ks(t) + \phi_0)$, де завдяки члену $ks(t)$ і здійснюється фазова модуляція.

Перш ніж скласти модель пристрою, який реалізує фазову модуляцію, розглянемо її структурну схему, наведену на рис. 7.36.

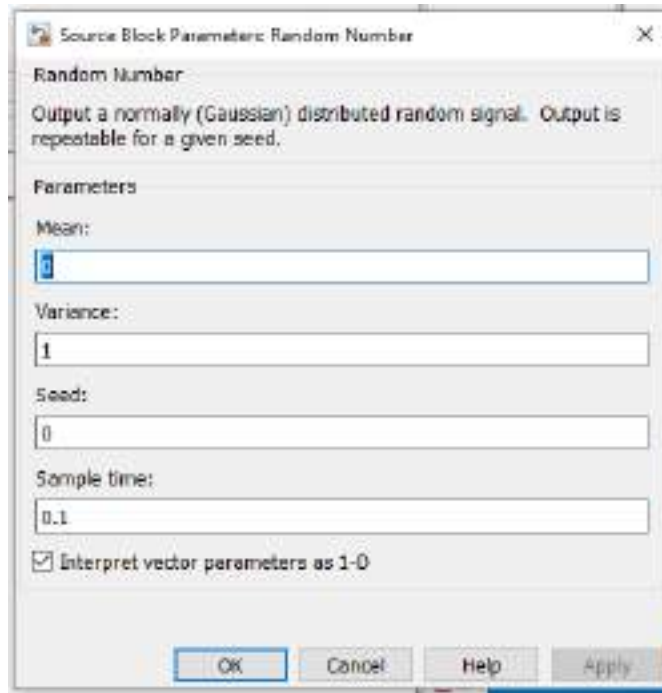


Рисунок 7.34 – Вікно налаштування джерела сигналу з нормальним законом розподілу

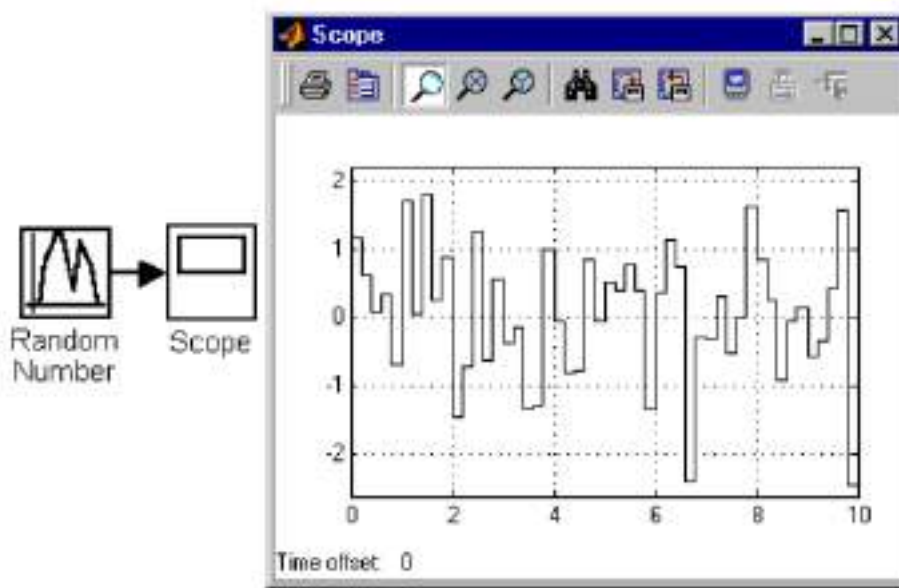


Рисунок 7.35 – Випадковий сигнал із нормальним законом розподілу

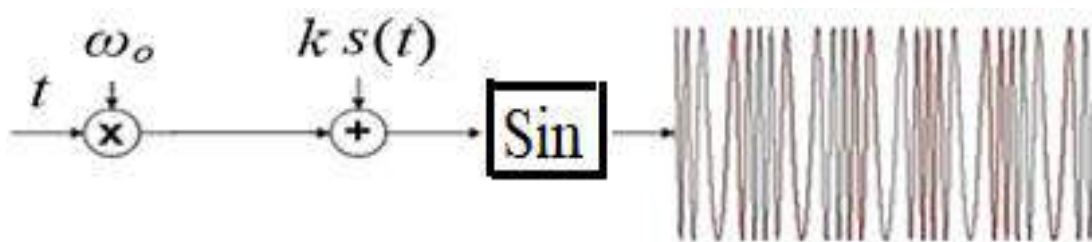


Рисунок 7.36 – Структурна схема фазової модуляції

На цій схемі показано, що головним блоком є блок, який формує синусоїдальний сигнал і якому треба сформувавши аргумент. Для цього спочатку необхідно мати блок, який задає частоту сигналу ω_0 , імітатор часу t , а також перемножувач. Останній перемножує частоту і параметр, який імітує час. Таким чином формується член $\omega_0 t$. Далі до нього потрібно додати член $ks(t)$, що здійснюється у суматорі. Для спрощення вважаємо, що початкова фаза рівна 0. У нашому випадку обираємо гармонійний моделюючий сигнал, джерелом якого є генератор, де є можливість регулювати амплітуду. Тому вважаємо коефіцієнт k рівним одиниці.

Незалежна змінна – час формується блоком Clock, частота сигналу встановлюється блоком Constant, а моделюючий сигнал – генератором.

Сформований таким чином сигнал є входним для останнього блоку, sin, вихідний сигнал якого і є фазо-модульованим.

Для виконання роботи треба скласти модель, показану на рис. 7.37.

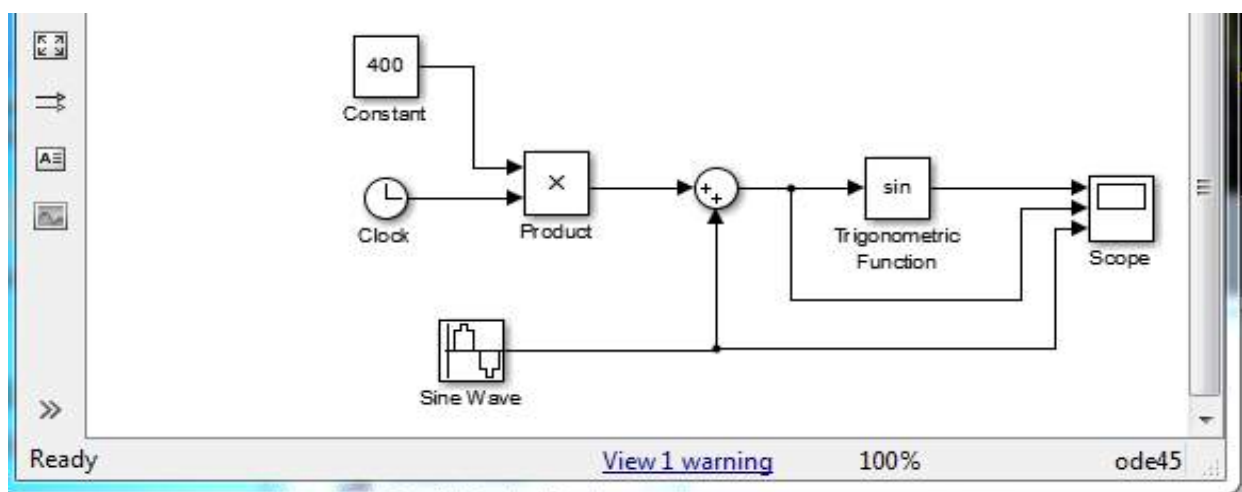


Рисунок 7.37 – Модель установки для формування фазо-модульованого сигналу

Далі треба ознайомитися з налаштуванням блоків, встановити параметри сигналів і моделювання. Параметр блоку Constant встановлюється рівним 400, параметри сигналу, що модулює: частота 5 Гц, амплітуда 8 В; Sample time = 0.001. Час моделювання 1 сек. Результати моделювання подано на рис. 7.38.

На цих рисунках зображено модульований сигнал, зміна аргументу тригонометричної функції, яка формує фазо-модульований сигнал і моделюючий сигнал, який і є носієм інформації.

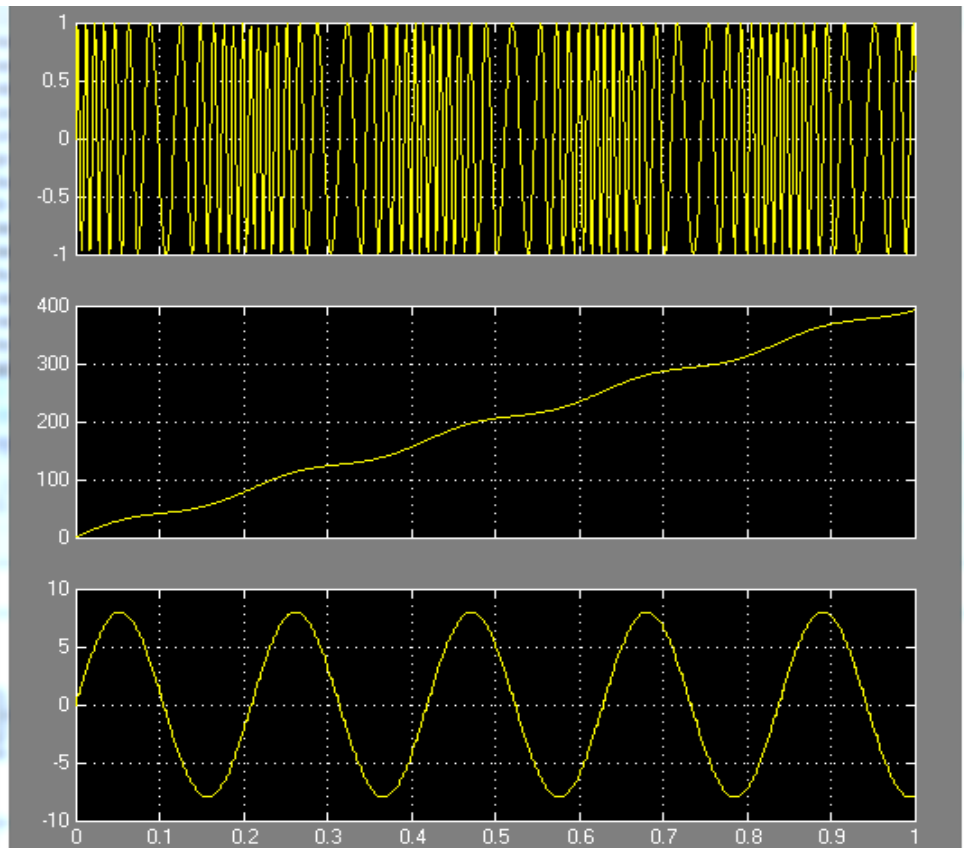


Рисунок 7.38 – Результати моделювання фазо-модульованого сигналу

Контрольні запитання та завдання

1. Яке призначення програми Simulink?
2. Перелічіть переваги Simulink, як середовища комп'ютерного моделювання.
3. Перелічіть основні складові моделі.
4. Охарактеризуйте загальні відомості щодо роботи з Simulink: запуск, інтерфейс користувача.
5. Перелічіть етапи побудови комп'ютерної моделі.
6. Яка бібліотека блокових компонентів Simulink?
7. Яка довідкова система Simulink?
8. Перелічіть прийоми редагування зображення блоків.
9. Які основні види блоків містить бібліотека програми?
10. Який метод запуску програми?
11. Охарактеризуйте елементи вікна перегляду бібліотек.
12. Як з'єднуються блоки Simulink?
13. Яка послідовність налаштування параметрів моделювання?
14. Які блоки задіяні під час моделювання цифрового сигналу?

8 СЕРЕДОВИЩЕ МОДЕЛЮВАННЯ МЕРЕЖ CISCO PACKET TRACER

Cisco Packet Tracer – це симулятор мережі, створений компанією Cisco. Цей додаток дає змогу будувати мережі на різноманітному обладнанні в довільних топологіях із підтримкою різних протоколів. Програмне рішення Cisco Packet Tracer дає змогу імітувати роботу різних мережних пристроїв: маршрутизаторів, комутаторів, точок бездротового доступу, персональних комп'ютерів, мережних принтерів, IP-телефонів тощо. Робота з інтерактивним симулятором дає відчуття налаштування реальної мережі, що складається з десятків або навіть сотень пристроїв.

Налаштування залежать від характеру пристроїв: одні можна налаштувати за допомогою команд операційної системи Cisco IOS, інші – за рахунок графічного веб-інтерфейсу, треті – через командний рядок операційної системи або графічні меню.

Завдяки такій властивості Cisco Packet Tracer, як режим візуалізації, користувач може відстежити переміщення даних мережею, появу і зміну параметрів IP-пакетів під час проходження даних через мережні пристрої, швидкість і шляхи переміщення IP-пакетів. Аналіз подій, що відбуваються в мережі, дає змогу зрозуміти механізм її роботи і виявити несправності.

Cisco Packet Tracer може бути використаний не тільки як симулятор, а як мережний застосунок для симулювання віртуальної мережі через реальну мережу, зокрема Інтернет. Користувачі різних комп'ютерів, незалежно від їхнього місця розташування, можуть працювати над однією мережною топологією, здійснюючи її налаштування або усуваючи проблеми. Ця функція багатокористувацького режиму Cisco Packet Tracer може застосовуватися для організації командної роботи.

У Cisco Packet Tracer користувач може симулювати побудову не тільки логічної, а й фізичної моделі мережі, а отже, отримувати навички проектування. Схему мережі можна накласти на креслення реально існуючої будівлі або навіть міста і спроектувати всю його кабельну проводку, розмістити пристрої в тих чи інших будівлях і приміщеннях з урахуванням фізичних обмежень таких, як довжина і тип кабелю, що прокладається, або радіус зони покриття бездротової мережі.

У режимі «логічна мережа» розташовуються мережні об'єкти і вказуються зв'язки між ними. У режимі «фізична мережа» вказується

розташування мережних об'єктів і каналів зв'язків у приміщеннях (як їх розташовано, у яких стійках тощо). Тут же реалізується управління відображенням, навігацією між рівнями відображення фізичної мережі (Район, Місто, Поверх).

Симуляція, візуалізація, багатокористувацький режим і можливість проектування роблять Cisco Packet Tracer унікальним інструментом для вивчення мережних технологій.

У симуляторі СРТ для мережного обладнання використовуються графічні умовні позначення, прийняті як стандарт у компанії Cisco Systems.

У Cisco Packet Tracer використовуються два типи моделей: моделі конкретного обладнання та абстрактні (Generic) моделі. Абстрактні моделі отримано в результаті узагальнення і спрощення моделей, що належать до певного типу обладнання. Такими моделями можна користуватися на початковому етапі навчання – їх легше налаштувати, але їхні можливості різко обмежені.

Таким чином, для розуміння принципу роботи мережі потрібні два види схем: логічні та фізичні схеми.

8.1 Побудова та моделювання мереж у логічній робочій області

8.1.1 Головне вікно симулятора у логічній робочій області

Запустивши програму, користувач бачить основне вікно, розділене на області, рис. 8.1.

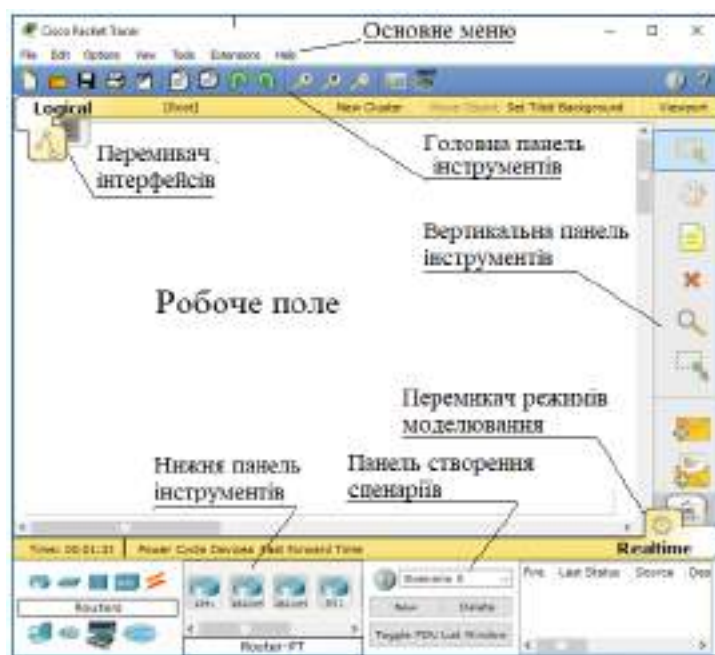


Рисунок 8.1 – Інтерфейс програми Cisco Packet Tracer

Ці області містять – основне меню, панелі інструментів (головну, вертикальну і нижню). Між верхньою панеллю інструментів і робочим простором міститься рядок перемикавання режиму відображення моделюваної мережі: логічна або фізична топологія.

Основне меню програми містить такі пункти:

- файл – містить операції відкриття/збереження документів;
- правка – стандартні операції копіювати/вирізати, відмітити/повторити;
- меню налаштування – говорить саме за себе;
- вид – масштаб робочої області та панелі інструментів;
- інструменти – колірна палітра і кастомізація кінцевих пристроїв;
- розширення – майстер проектів, багатокористувацький режим і кілька утиліт, які з Cisco Packet Tracer можуть зробити цілу лабораторію;
- довідкова система.

Панелі інструментів. За замовчуванням відображаються три: головна, вертикальна і нижня. Доступна також панель графічних примітивів, панель інструментів, частина яких дублює пункти меню.

Головна панель інструментів дублює деякі пункти основного меню, забезпечуючи швидкий і зручний доступ до створення нового файла, збереження і друку поточної схеми, відображення вікна доповнення «Самоперевірка завдань (Activity Window)», дій з буфером обміну, зміни масштабу відображення схеми, доступу до панелі графічних примітивів і створення нового об'єкта моделювання.









Вертикальна панель інструментів містить дії, що виконуються з об'єктами моделюваної схеми мережі (див. табл. 8.1).

Нижня панель інструментів містить бібліотеку елементів, які необхідні для побудови телекомунікаційної мережі, панель створення користувацьких сценаріїв, а також вікно виведення інформації, рис. 8.2.



Рисунок 8.2 – Елементи нижньої панелі інструментів

Таблиця 8.1 – Кнопки вертикальної панелі інструментів

Позначка	Значення
	Інструмент Select. Дозволяє виділити один або кілька об'єктів модельованої комп'ютерної мережі (логічної або фізичної топології)
	Інструмент Move Layout (швидкий доступ – M). Використовується для прокручування схеми модельованої мережі в основному вікні робочого простору. Для виконання цієї дії можуть також використовуватися смуги прокрутки.
	Інструмент Place Note (Зробити позначку, клавіша N) додає текст у робочій області проекту.
	Інструмент Delete (швидкий доступ – Del). Перемикає в режим видалення виділених об'єктів схеми комп'ютерної мережі.
	Інструмент Inspect (Перевірка, клавіша I) дає змогу, залежно від типу пристрою, переглядати вміст таблиць (ARP, NAT, таблиці маршрутизації та ін.).
	Інструмент Resize Shape (швидкий доступ – Alt+R). Використовується для зміни розмірів графічних об'єктів, що розміщуються на схемі з використанням панелі «Графічні об'єкти».
	Інструмент Add Simple PDU (швидкий доступ – P). Дозволяє створити емуляцію простого передавання пакета даних (ICMP, ping) від одного пристрою мережі до іншого.
	Інструмент Add Complex PDU (швидкий доступ – P). Створює емуляцію передачі пакета даних від одного пристрою до іншого. Дозволяє задати параметри пакета (тип протоколу, вихідний порт тощо)

Панель створення користувацьких сценаріїв містить перелік сценаріїв моделювання і містить три кнопки:

- New – додати новий сценарій;
- Delete – очистити список пакетів;
- Toggle PDU List Window – розгорнути або згорнути область відображення результатів моделювання:

Область відображення результатів моделювання служить для виведення повідомлень про результати моделювання процесу передавання пакетів мережею.

Перемикач інтерфейсів дозволяє переходити від логічної робочої області до фізичної, а перемикач між реальним режимом (Real – Time) і режимом симуляції, (Simulation) надається можливість подивитися, як передається інформація між мережними пристроями в заданих ситуаціях. У реальному

масштабі часу вказується лише стан мережних пристроїв, результати передачі відображаються «за фактом» (рис. 8.3 а, б).



Рисунок 8.3 – Перемикачі режимів робочої області:

- а) вікна логічної моделі мережі та фізичної;
- б) – реального часу і покрокового виконання

В ході перемикання в режим імітації (Simulation) вигляд головного вікна програми зміниться, рис. 8.4, оскільки частина робочого простору буде закрита областю управління моделюванням.

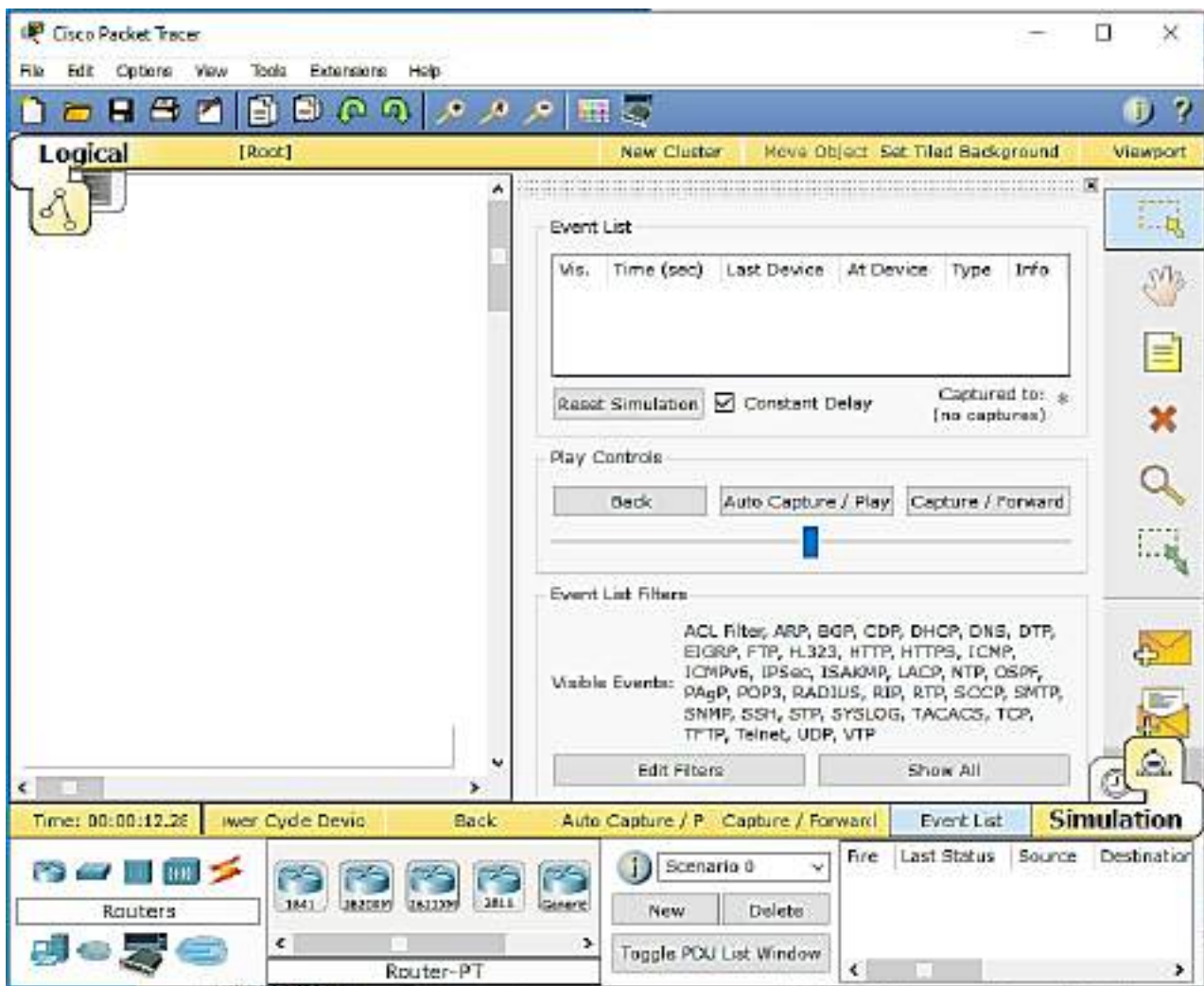


Рисунок 8.4 – Головне вікно симулятора у режимі імітації

Верхню частину області керування моделюванням займає таблиця подій (Event List), у якій відображається список подій, що відбулися в системі.

Ліворуч під таблицею Event List розташована кнопка Reset Simulation, яка дає змогу очистити список подій.

Після таблиці Event List розміщується область управління моделюванням Play Control, в якій розміщуються кнопки, призначені для управління процесом моделювання:

Back – повернутися на один крок назад;

Auto Capture/Play – виконати послідовно всі кроки моделювання в автоматичному режимі (без зупинки);

Capture/Forward – виконати черговий крок моделювання.

Нижче цих кнопок розташований регулятор – повзунок, який дає змогу керувати швидкістю моделювання.

Далі розташовується область фільтрації подій (Event List Filters), у якій відображається перелік типів відображуваних подій, і є дві кнопки:

Edit Filters – кнопка для вибору типів пакетів, передавання яких відобразатиметься в робочому просторі та списку подій (за замовчуванням відображаються всі типи);

Show All – кнопка для увімкнення відображення всіх типів пакетів.

На нижній панелі інструментів у режимі Simulation також з'явиться додатковий набір кнопок, що дублює кнопки з області управління моделюванням. Це Back, Auto Capture/Play, Capture/Forward, що дає змогу в разі необхідності приховати сферу керування.

Обладнання та лінії зв'язку в Cisco Packet Tracer. Середовище моделювання Cisco Packet Tracer має широкий асортимент мережних пристроїв різного призначення. Маршрутизатори, рис. 8.5, використовуються для пошуку оптимального маршруту передавання даних на підставі спеціальних алгоритмів маршрутизації, наприклад, вибір маршруту (шляху) з найменшим числом транзитних вузлів. Вони працюють на мережному рівні моделі OSI.



Рисунок 8.5 – Маршрутизатори та їхні позначення

Комутатори – це пристрої, що працюють на канальному рівні моделі OSI і призначені для об'єднання декількох вузлів у межах одного або декількох сегментів мережі, рис. 8.6. Комутатор передає пакети на підставі внутрішньої таблиці комутації, отже, трафік іде тільки на ту MAC-адресу, якій він призначається, а не повторюється на всіх портах, як на концентраторі.



Рисунок 8.6 – Комутатори та їхні позначення

Концентратор повторює пакет, прийнятий на одному порту, на всіх інших, рис. 8.7.



Рисунок 8.7 – Позначення концентраторів

Бездротові технології Wi-Fi і мережі на їхній основі містять у собі точки доступу, рис. 8.8.

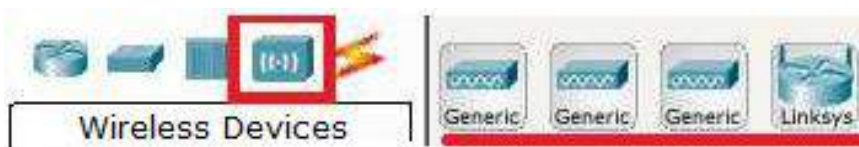


Рисунок 8.8 – Позначення бездротових пристроїв

За допомогою компонентів лінії зв'язку, рис. 8.9, створюються з'єднання вузлів у єдину схему.

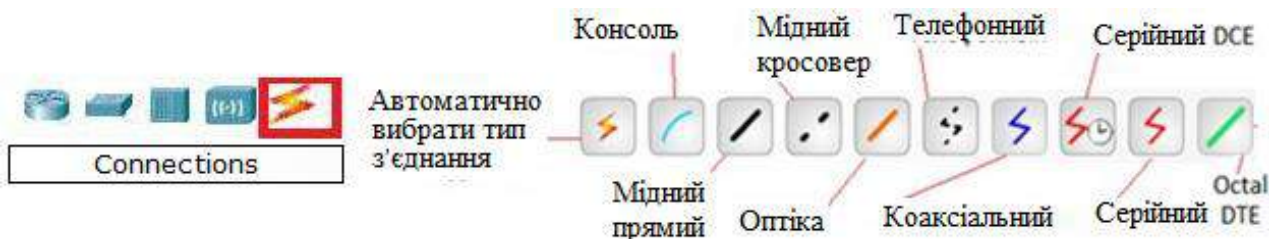


Рисунок 8.9 – Позначення ліній зв'язку

Каталог ліній зв'язку містить кілька типів з'єднань.

Автоматичний тип – при даному типі з'єднання Packet Tracer автоматично обирає найкращий тип з'єднання для пристроїв.

Консоль – консольні з'єднання. Консольне з'єднання може бути виконано між ПК і маршрутизаторами або комутаторами.

Мідний прямий – з'єднання мідним кабелем типу вита пара, обидва кінці кабелю обтиснуті в однаковій розкладці.

Мідний кросовер – з'єднання мідним кабелем типу кручена пара, кінці кабелю обтиснуті як кросовер.

Оптика – з'єднання за допомогою оптичного кабелю, необхідне для з'єднання пристроїв, що мають оптичні інтерфейси.

Телефонний кабель – кабель для підключення телефонних апаратів. З'єднання через телефонну лінію може бути здійснено між пристроями, що мають модемні порти.

Коаксіальний кабель – з'єднання пристроїв за допомогою коаксіального кабелю. Використовується для з'єднання між кабельним модемом і хмарою.

Серійний DCE і серійний DTE – з'єднання через послідовні порти для зв'язків Інтернет. Для налаштування таких з'єднань необхідно встановити синхронізацію на стороні DCE-пристрою. Сторону DCE можна визначити за маленькою іконкою «годинника» поруч із портом. Кожен тип кабелю може бути з'єднаний лише з певними типами інтерфейсів.

Кінцеві пристрої (End Devices) рис. 8.10. На цій консолі показано безпосередньо кінцеві вузли: хости, сервери, принтери, телефони, ПК, ноутбуки тощо.



Рисунок 8.10 – Види кінцевих вузлів

Види пристроїв доступу до глобальної мережі показано на рис.8.11.



Рисунок 8.11 – Види пристроїв доступу до глобальної мережі

Модифіковані користувачем моделі мережних пристроїв, рис. 8.12.



Рисунок 8.12 – Види користувацьких пристроїв

Умовне позначення багатокористувацького з'єднання показано на рис. 8.13.



Рисунок 8.13 – Багатокористувацьке з'єднання

8.1.2 Фізична комплектація обладнання

Більшість пристроїв, поданих у Packet Tracer, більш-менш відповідають реальному обладнанню Cisco. Однак є пристрої, властиві тільки Packet Tracer. Ці пристрої знаходяться у підрозділах категорій комутатори (Switches) і маршрутизатори (Routers) і мають у своїй назві слово (Generic). Спочатку їхні слоти порожні і допускають установку різних типів модулів. Модулі мережних пристроїв становлять апаратну реалізацію деяких поширених інтерфейсів. Наприклад, модуль HWIC-4ESW містить 4 Ethernet-порти (10 Мбіт/с). Як і для реального пристрою, так і для пристрою, представленого в Packet Tracer, для зміни модуля потрібне відключення живлення.

Маршрутизатори забезпечують взаємодію між підмережами. Будь-який маршрутизатор у Packet Tracer може бути ввімкнений і вимкнений перемиканням тумблера «Живлення».

Можливість ввімкнення/вимкнення живлення маршрутизаторів у Packet Tracer симулює роботу реальних пристроїв. Для зміни комплектації обладнання необхідно вимкнути його живлення, клацнувши мишкою на кнопці живлення і перетягнути мишкою потрібний модуль у вільний слот, потім увімкнути живлення. Якщо поточну конфігурацію не збережено, то вимкнення пристрою призведе до втрати зроблених налаштувань.

Для отримання доступу до фізичного вигляду пристрою (рис. 8.14), необхідно перейти до закладки Physical.

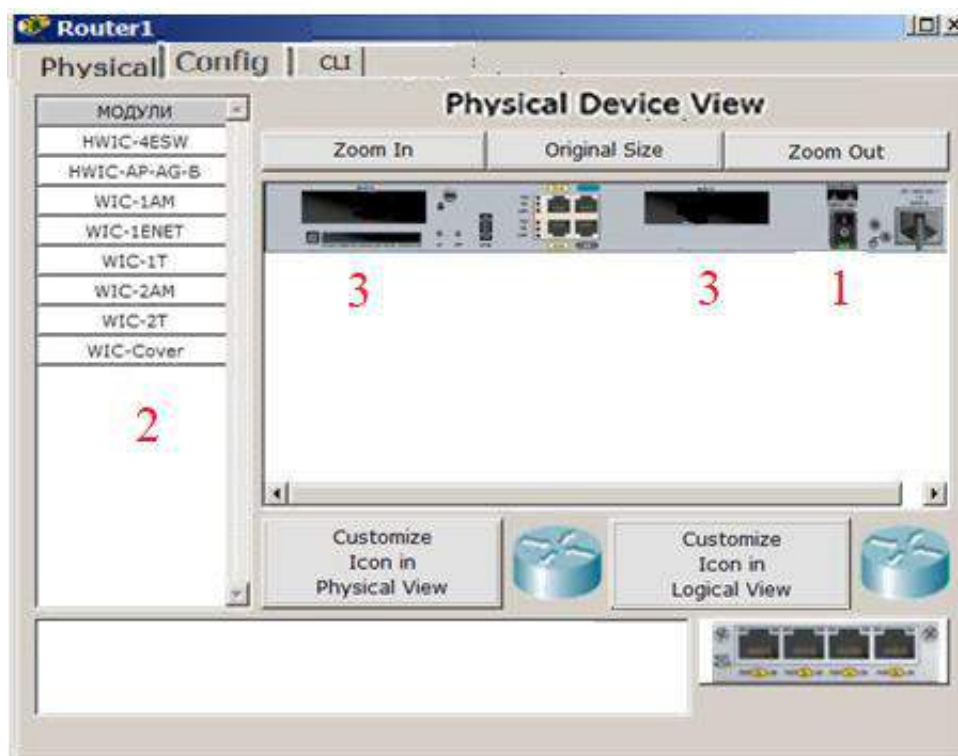


Рисунок 8.14 – Вкладка «Фізичний вигляд пристрою» роутера

Цифрою 1 позначено перемикач джерела живлення. Зліва є список модулів (цифра 2), якими можна укомплектувати цей роутер. Зараз у ньому дві порожнечі (цифри 3). У них можна вкласти ці модулі. Зрозуміло, цю операцію потрібно проводити при вимкненому живленні.

Нижче наведено інформацію про кожен модуль:

а) HWIC-4ESW – високопродуктивний модуль з 4-ма комутаційними портами Ethernet під рознім RJ-45. Дозволяє поєднувати в маршрутизаторі можливості комутатора;

б) HWIC-AP-AG-B – це високошвидкісна WAN-карта, що забезпечує функціонал вбудованої точки доступу для роутерів лінійки Cisco 1800 (модульних), Cisco 2800 і Cisco 3800. Цей модуль підтримує радіоканали Single Band 802.11b/g або Dual Band 802.11a/b/g;

в) WIC-1AM містить два різні RJ-11, які використовуються для під'єднання до базової телефонної служби. Карта використовує один порт для з'єднання з телефонною лінією, інший може бути під'єднаний до аналогового телефону для дзвінків під час простою модему;

г) WIC-1ENET – це однопортова 10 Мб/с Ethernet карта для 10BASE-T Ethernet LAN;

д) WIC-1T надає однопортове послідовне під'єднання до віддалених офісів або застарілих серійних мережних пристроїв, наприклад, SDLC концентраторів, систем сигналізації та пристроїв packet over SONET (POS);

е) WIC-2AM містить два різні RJ-11, які використовуються для підключення до базової телефонної служби. У WIC-2AM два модемні порти, що дає змогу використовувати обидва канали для з'єднання одночасно;

ж) WIC-2T-2-портовий синхронний/асинхронний серійний мережний модуль надає гнучку підтримку багатьох протоколів з 12 індивідуальними налаштуваннями кожного порту в синхронний або асинхронний режим. Застосування для синхронної/асинхронної підтримки представляють:

- низькошвидкісну агрегацію (до 128 Кб/с);
- підтримку dial-up модемів;
- синхронні або асинхронні з'єднання з портами керування іншого обладнання та передачу застарілих протоколів типу Bi-sync і SDLC;

к) WIC-Cover – стінка для WIC слота, необхідна для захисту електронних компонентів і для поліпшення циркуляції охолоджувального повітряного потоку.

Під час зміни комплектації, наприклад, роутера, перетягнувши мишкою, припустимо, модуль 4ESW у вільний слот і зачекавши закінчення завантаження, у закладці конфігурації (Config) можна побачити, що з'явилися чотири нові інтерфейси, рис. 8.15.

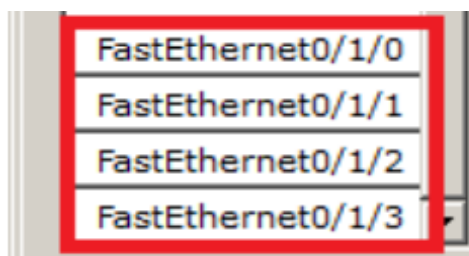


Рисунок 8.15 – Конфігурація інтерфейсів роутера

З технічними характеристиками конкретного модуля можна ознайомитися у нижньому вікні фізичного вигляду пристрою після виділення його лівою кнопкою мишки.

Мережні пристрої є основою мережі, і кінцеві пристрої взаємодіють через них. У Packet Tracer є широкий спектр кінцевих пристроїв, починаючи з ПК і ноутбуків, планшетних ПК, КПК і закінчуючи телевізорами.

ПК і ноутбуки є найвищим рівнем користувацьких пристроїв користувача. Між ними немає принципової різниці (що проявляється в зручності використання), відмінності проявляються в політиці іменування модулів.

Нижче перераховані модулі, доступні для ПК і ноутбуків:

1) Linksys-WMP300N. Забезпечує бездротовий інтерфейс для налаштування підключення до Wi-Fi мережі.

2) PC-HOST-NM-1AM. Має RJ-11 інтерфейс, який використовується для підключення телефонного модему.

3) PC-HOST-NM-1CE, PC-HOST-NM-1CFE, PC-HOST-NM-1CG. Ці три модулі служать для Ethernet, FastEthernet, GigabitEthernet підключення відповідно.

4) PC-HOST-NM-1FFE, PC-HOST-NM-1FGE. Оптичні версії попередніх модулів.

5) PC-HOST-NM-1W, PC-HOST-NM-1W-A. Обидва ці модулі забезпечують бездротовий інтерфейс. Перший з модулів працює на частоті 2.4 ГГц, другий – 5 ГГц (бездротова мережа стандарту IEEE 802.11a).

6) PC-HEADPHONE, PC-MICROPHONE, PC-CAMERA, PC-USB-HARDDRIVE. Ці модулі служать для представлення відповідних пристроїв (навушники, мікрофон, камера, жорсткий диск з USB-інтерфейсом).

Для ноутбуків ці модулі мають інші назви. Замість слова HOST використовується слово LAPTOP. Так модуль PC-HOST-NM-1AM називається PC-LAPTOP-NM-1A.

Одне з можливих зображень фізичної конфігурації ПК показано на рис. 8.16.



Рисунок 8.16 – Фізична конфігурація ПК

Для зміни комплектації обладнання ПК обов'язково необхідно також попередньо відключити його живлення, клацнувши мишкою на кнопці живлення і перетягнути мишкою потрібний модуль у вільний слот, потім увімкнути живлення. Як приклад розглянемо результати додавання у фізичну конфігурацію ПК мікрофона (PT–MICROPHONE), навушників (PT–HEADPHONE) або жорсткого диска для зберігання даних (RT–USB–HARD–DRIVE), унаслідок чого ПК змінює свій значок у програмі (рис. 8.17).



Рисунок. 8.17 – Зміна піктограми

Решта модулів додаються в пристрої аналогічно.

8.1.3 Робота з об'єктами телекомунікаційної мережі

Для розміщення мережного об'єкта на схемі необхідно вибрати в нижній панелі інструментів його клас: маршрутизатори (routers), комутатори (switches), концентратори (hubs), бездротові пристрої (wireless devices), з'єднувальні кабелі (connections), термінальні пристрої (End devices), «інтернет» (WAN emulation), призначені для користувача об'єкти, багатокористувацьке з'єднання. Вибравши необхідне обладнання, його можна «перетягнути» в робочу область або клацанням мишки вказати місце в робочій області, куди треба його помістити.

Для з'єднання мережних пристроїв необхідно вибрати клас «З'єднувальні кабелі», далі вибрати необхідний тип кабелю (або вибрати «автоматичне визначення»), відзначити початковий пристрій, вибрати один з його мережних портів, потім відзначити кінцевий пристрій і один з його портів. У разі застосування об'єкта «Автоматичне визначення типу мережного кабелю», порт і тип кабелю обираються автоматично (номер порту обирається в порядку зростання).

Конфігурування мережного пристрою проводиться за подвійним клацанням на ньому. У вікні, що відкрилося, користувач може увімкнути/вимкнути пристрій (відповідним тумблером на його зображенні в ділянці «Physical Device View»), змінити апаратну конфігурацію, додавши або видаливши модулі, користуючись ділянкою MODULES, змінити картинку

для відображення цього пристрою в режимі логічної мережі та в режимі фізичної мережі. Вибравши вкладку «Config», користувач може задати деякі конфігураційні параметри (наприклад, налаштувати мережний інтерфейс, визначити ім'я пристрою тощо). На вкладці «CLI» надається доступ до командного інтерфейсу пристрою (якщо він передбачений).

Для кінцевих пристроїв реалізовано додаткові вкладки. На вкладці «Desktop», рис. 8.18, розташовані емулятори роботи деяких утиліт робочого столу (командний рядок, інтернет-браузер тощо).



Рисунок 8.18 – Вікно конфігурування кінцевого пристрою

IP адреса, маска підмережі, шлюз вказуються у вікні IP конфігурація (рис. 8.19).



Рисунок 8.19 – Вікно адресації кінцевого пристрою

Навівши курсор мишки на об'єкт і, зачекавши кілька секунд, можна отримати стислу інформацію про стан об'єкта. З більш детальною інформацією користувач може ознайомитися, скориставшись інструментом «Inspect». Необхідно зазначити, що спливаюча підказка під час наведення мишки на об'єкт відповідає пункту меню «Port Status Summary Table» інструменту «Inspect». Після створення логічної моделі мережі прямує етап моделювання.

Результати виконання завдань з передачі даних відображаються в області сценаріїв (рис. 8.20).

Fire	Last Status	Source	Destination	Type	Color	Time (sec)	Periodic	Num
	Failed	PC0	10.10.10.2	TCP		10.000	N	0
	Successful	PC0	PC1	ICMP		0.000	N	1

Рисунок 8.20 – Приклад результатів виконання сценарію передавання даних (у реальному часі)

У режимі реального часу результати виконання завдань відображаються відразу ж після закінчення імітації. У разі, якщо користувач спробує під час створення простого завдання вказати пристрій (джерело або приймач), що не має налаштованого мережного інтерфейсу, то відразу буде видано повідомлення про помилку.

Перейшовши в режим покрокового виконання, користувач отримує можливість наочно подивитися, як передаються дані мережею (згідно зі створеними завданнями). Перехід до наступного кроку здійснюється натисканням на кнопку «Capture / Forward». Перейти до попереднього кроку можна, натиснувши на клавішу «Back». Натиснувши на кнопку «Auto Capture / Play», запускається автоматичний перехід до наступного кроку (час переходу вказується в області налаштувань покрокового виконання. Кнопка «Power Cycle Device» – скидає досліджувану мережу у вихідний стан.

У панелі налаштувань можна вказати додаткові фільтри на виведення інформації про передавання даних мережею, вибравши відповідні протоколи (рис. 8.21).

Елементи анімації та симуляції. У Packet Tracer передбачено режим моделювання (Симуляції), у якому показується, як працює утиліта **Ping**, де можна «наживо» роздивитися, як пакети пересилаються мережею від пристрою до пристрою. Ping – утиліта надсилає запити (наприклад, ICMP Echo–Request) протоколу ICMP зазначеному вузлу мережі та фіксує

відповіді, що надходять (ICMP Echo-Reply). Час між надсиланням запиту й отриманням відповіді (RTT) дає змогу визначати двосторонні затримки (RTT) за маршрутом і частоту втрати пакетів, тобто побічно визначати завантаженість.

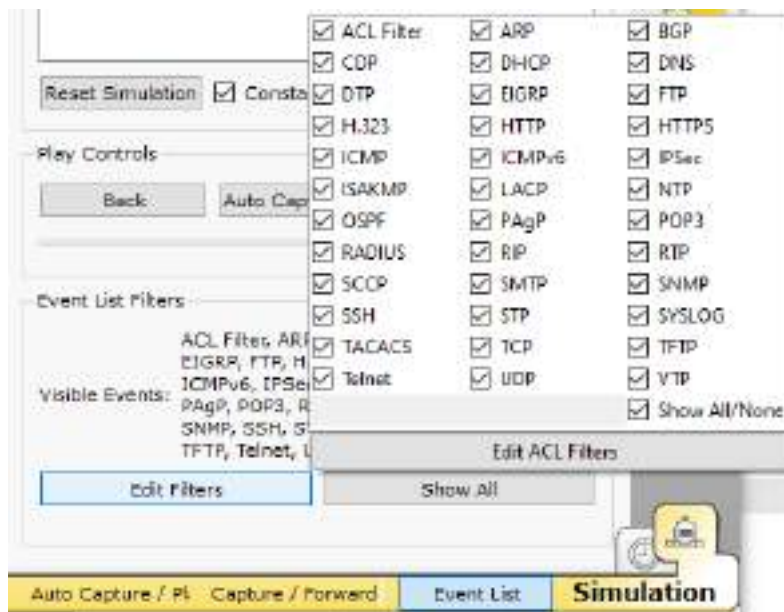


Рисунок 8.21 – Панель вибору протоколів (фільтрів)

Щоб перейти в режим симуляції Simulation Mode (Симуляція), необхідно натиснути на перемикач у нижньому правому куті робочої області (рис. 8.22), або натиснути комбінацію клавіш Shift+S. Відкриється Simulation Panel (Панель симуляції), у якій відобразатимуться всі події, пов'язані з виконанням ping-процесу, рис. 8.23. Вигляд вікна може дещо змінюватися залежно від редакції симулятора. На рис. 8.23 показано моделювання мережі.



Рисунок 8.22 – Перемикач режимів

Моделювання припиняється або після завершення ping-процесу, або при закритті вікна симуляції. У режимі симуляції можна не тільки відстежувати використовувані протоколи, а й бачити, на якому із семи рівнів моделі OSI цей протокол задіяний. У процесі перегляду анімації можна,

наприклад, бачити принцип роботи хаба. Концентратор (хаб) повторює пакет на всіх портах у надії, що на одному з них є отримувач інформації. Якщо пакети яким-то вузлом не призначені, ці вузли ігнорують пакети. А поява «галочки» означає прийняття пакета на каналах передачі даних і проміжних пристроях. Повна відсутність ICMP-відповідей може також означати, що віддалений вузол (або який-небудь із проміжних маршрутизаторів) блокує ICMP Echo-Reply або ігнорує ICMP Echo-Request.

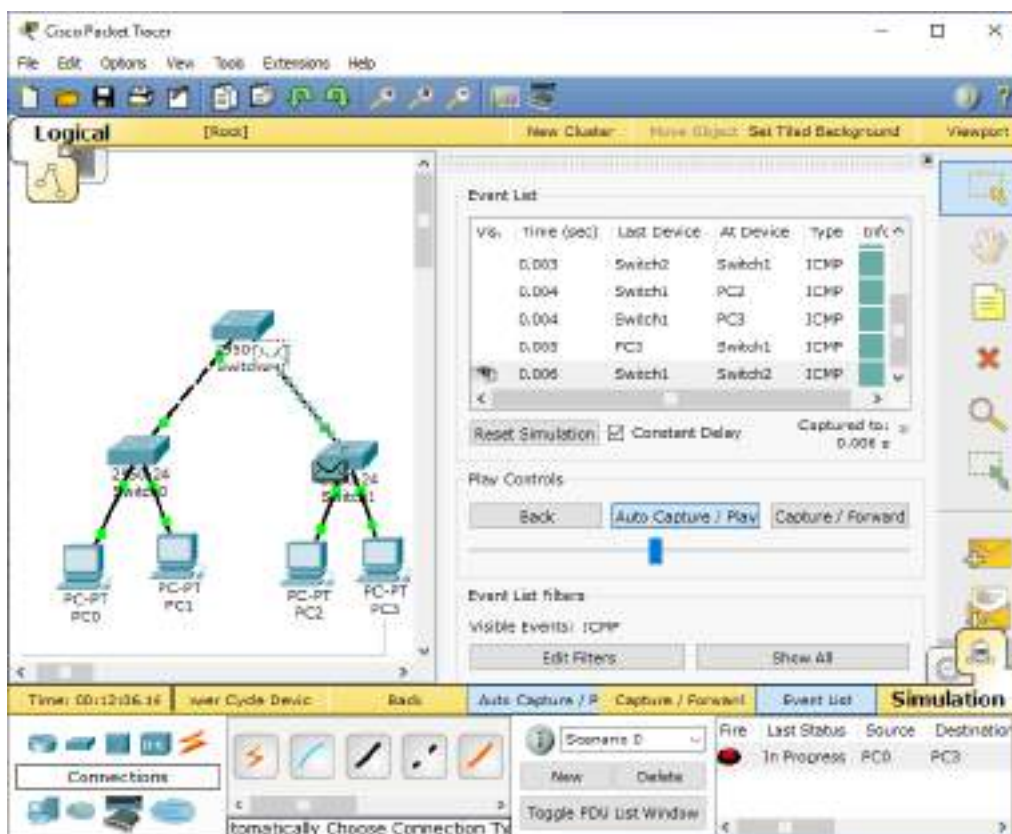


Рисунок 8.23 – Панель симуляції

Для вибору протоколу необхідно натиснути кнопку Edit Filters (редагувати фільтри) і встановити галочку у полі обраного протоколу, наприклад, «ICMP». {ICMP (Internet Control Message Protocol)}.

Запуск команди Ping призводить до появи інформації у вікні Event List. Якщо клацнути на іконку в колонці Info, вікна Event List, то побачимо «побудову пакета» на стадії приймання і передавання. Тут можна побачити як формується пакет, з яких полів він складається і якими даними заповнюється. Вибираючи той чи інший фільтр, можна зазирнути всередину пакета і дізнатися, як дані одного рівня OSI інкапсулюються в інший.

Натискаємо кнопку Add Simple PDU (додати простий PDU). Це значок закритого конверта, який розташований у правій частині екрана. При цьому

біля вказівника маніпулятора мишки з'явиться конвертик (пакет) зі знаком +, що дає змогу бачити відправлення пакета з подальшим відстеженням його маршруту і даних усередині пакета. Після цього клацаємо по зображеннях комп'ютерів PC0 і PC3 для запуску моделювання.

Можна використовувати кнопку Add Complex PDU, яка має вигляд відкритого конверта на правій панелі вікна. Потім необхідно клацнути PC0 і PC3. З'явиться вікно, де треба буде прописати адреси ПК джерела повідомлення і отримувача, а також вказати періодичність використання команди ping. Щоб скасувати complex PDU, необхідно клацнути кнопку Delete на панелі вікна Event Simulation pane в нижній частині вікна Packet Tracer.

Тепер тиснемо кнопку «Автозахват/Відтворення» (Auto Capture/Play) в області «Регулятори відтворення» (Play Controls). Під кнопкою «Автозахоплення/Відтворення» є горизонтальна смуга з вертикальною кнопкою (повзунком), що регулює швидкість імітації. Під час перетягування повзунка вправо/вліво збільшується/знижується швидкість імітації.

Відтворення анімації закінчиться і в таблиці в нижній частині екрана в стовпчику Last Status з'явиться напис Successful.

Натискання кнопки «Захоплення/Вперед» (Capture/Forward) дає змогу запустити імітацію тільки на один крок вперед.

Тепер про перегляд будови пакета. Як зазначалося, клацнувши на іконці в колонці Info, вікна Event List, побачимо «будову пакета» на стадії приймання і передавання. Нижче наведено приклад таких вікон для роутера, рис. 8.24 і рис. 8.25.

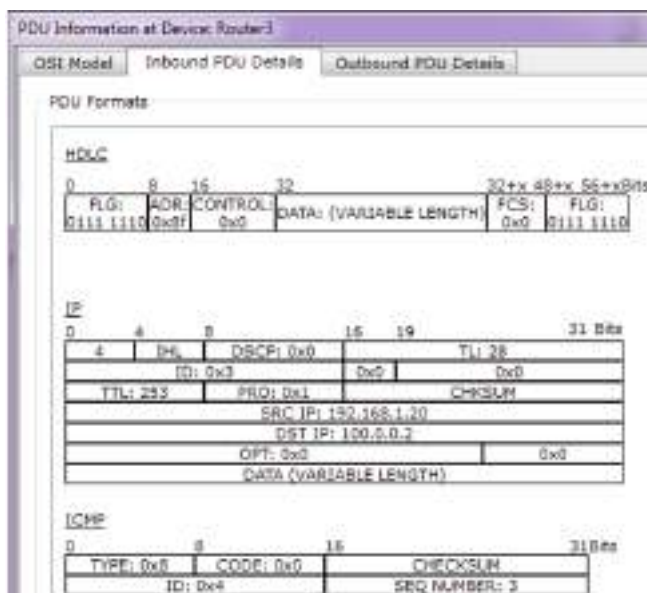


Рисунок 8.24 – Прийнятий пакет

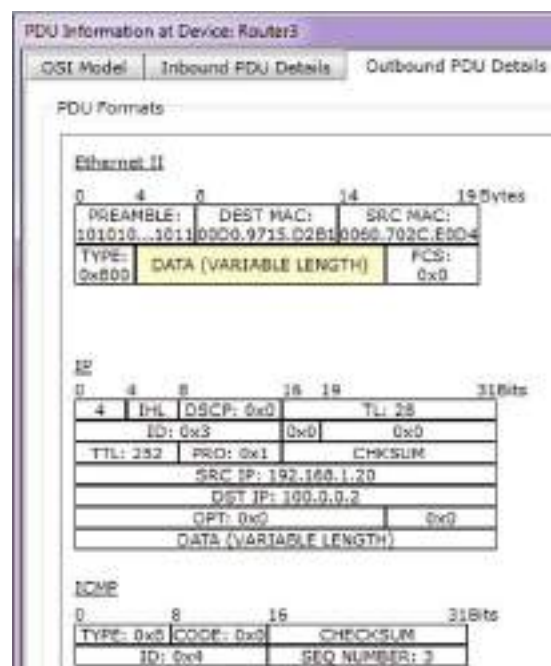


Рисунок 8.25 – Переданий пакет

8.1.4 Побудова та моделювання мережі

Розглянемо приклад створення локальної мережі в Cisco Packet Tracer, мережа наведена на рис. 8.26. Далі стисло, у загальних рисах, описується покрокова інструкція.

У нижньому лівому кутку Packet Tracer вибираємо пристрої «Мережні комутатори», і, у списку праворуч, вибираємо комутатор 2950–24, натискаючи на нього лівою кнопкою мишки, вставляємо його в робочу область. Так само вчиняємо з «Мережним концентратором (Hub–PT)» і «Робочими станціями (PC–PT)», відповідно до рис. 8.26, 8.27, 8.28, 8.29.

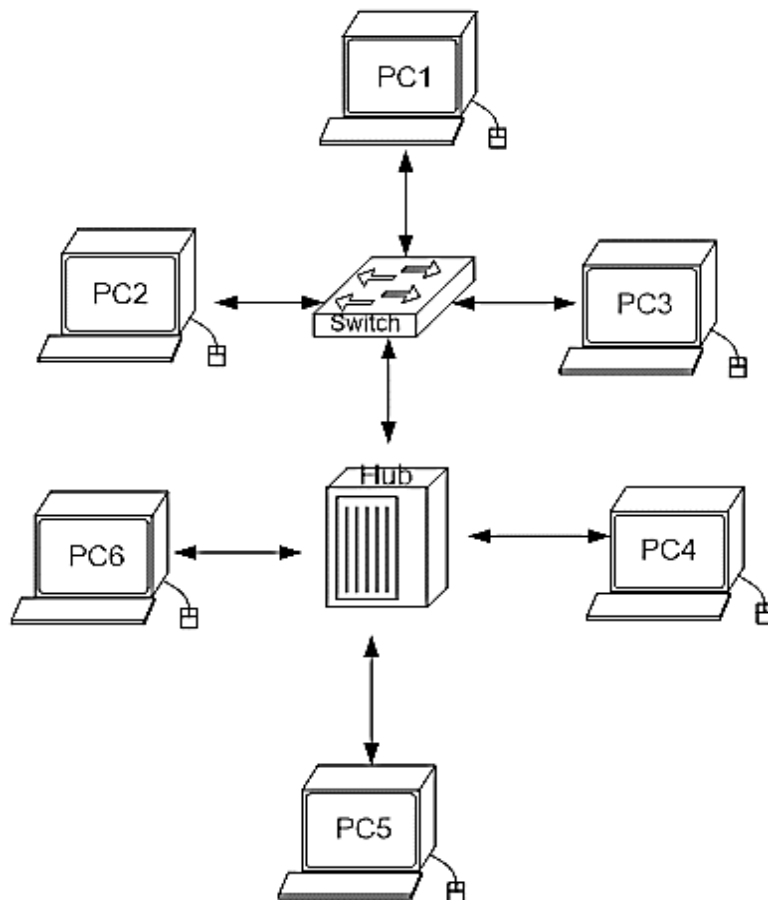


Рисунок 8.26 – Приклад мережі в cisco packet tracer



Рисунок 8.27 – Вибір комутатора 2950–24

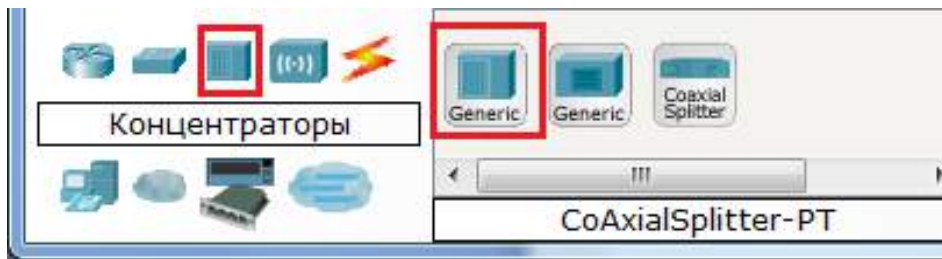


Рисунок. 8.28 – Вибір концентратора Hub–PT



Рисунок 8.29 – Вибір персонального комп'ютера PC–PT

Далі необхідно з'єднати пристрої, як показано на рисунку 8.26, використовуючи відповідний інтерфейс. Для з'єднання комп'ютерів до комутатора і концентратора використовується кабель типу «мідний прямий», відповідно до рис. 8.30.



Рисунок 8.30 – Вибір типу кабелю «мідний прямий»

А для з'єднання між собою комутатора і концентратора використовується мідний кросовер-кабель, відповідно до рис. 8.31.



Рисунок 8.31 – Вибір типу кабелю «мідний кросовер»

Безпосередньо для з'єднання двох пристроїв, після вибору кабелю, необхідно, використовуючи покажчик маніпулятора «Мишка», натиснути

на один пристрій, вибрати довільний вільний порт FastEthernet і потім натиснути на другий пристрій, також обрати довільний вільний порт FastEthernet, відповідно до рис. 8.32, 8.33, 8.34.

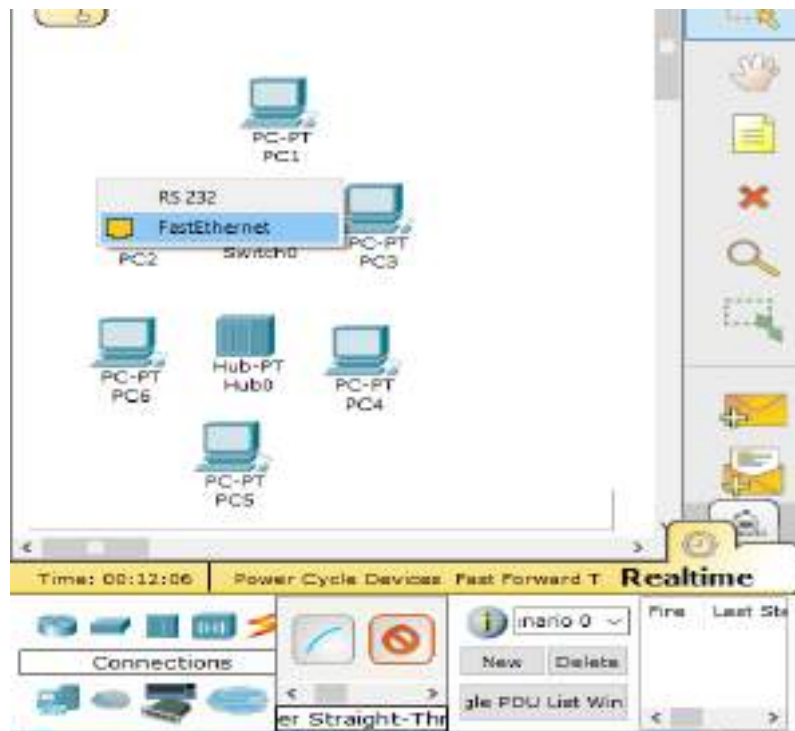


Рисунок 8.32 – Вибір вільного порта на комп'ютері

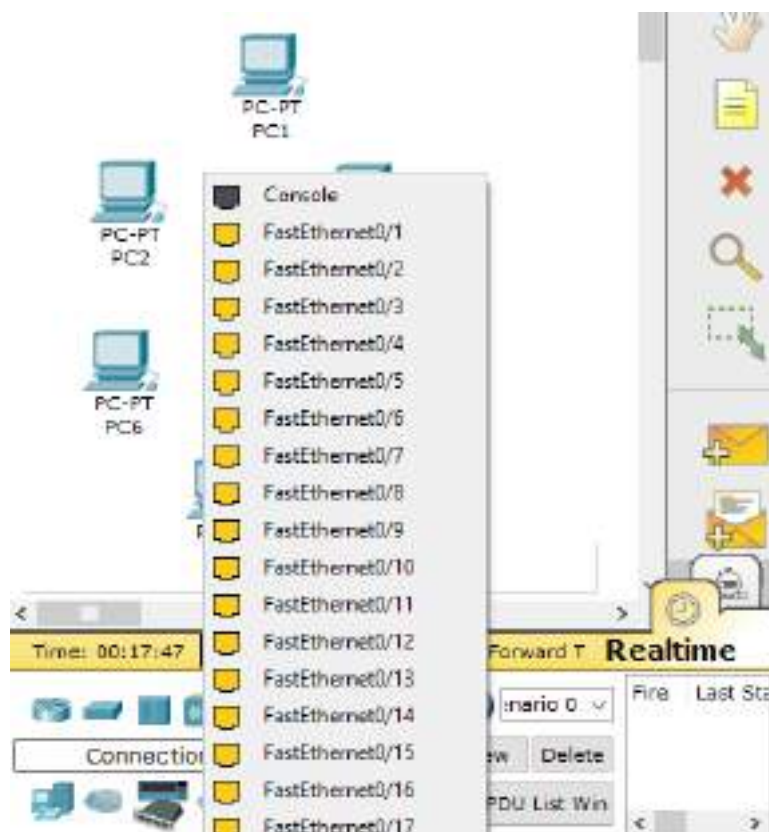


Рисунок 8.33 – Вибір вільного порта на комутаторі

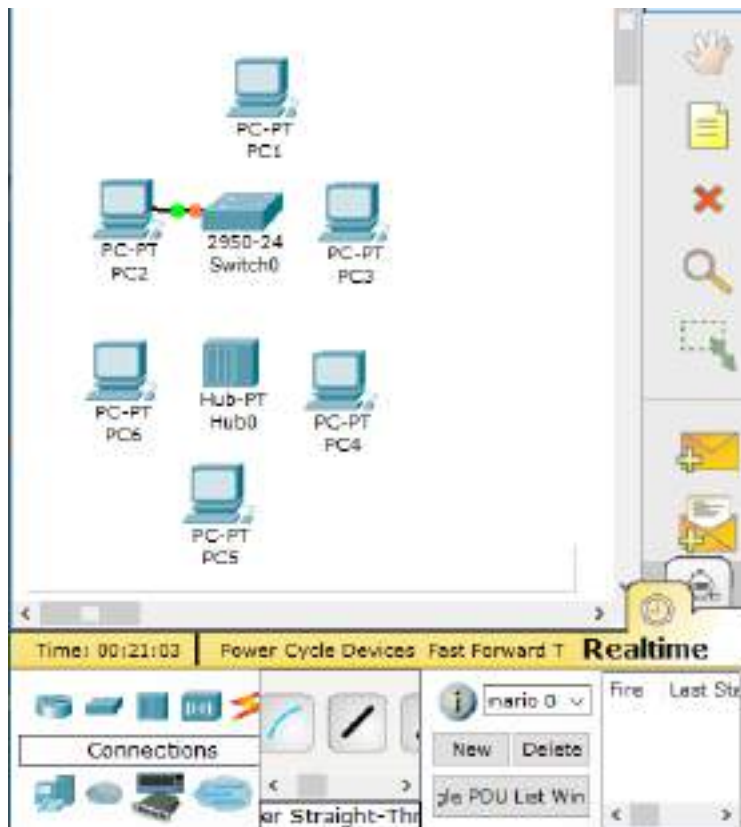


Рисунок 8.34 – З'єднання мідним прямим кабелем ПК і комутатора

Аналогічно виконується з'єднання для всіх інших пристроїв. Результат під'єднання пристроїв показано на рис. 8.35.

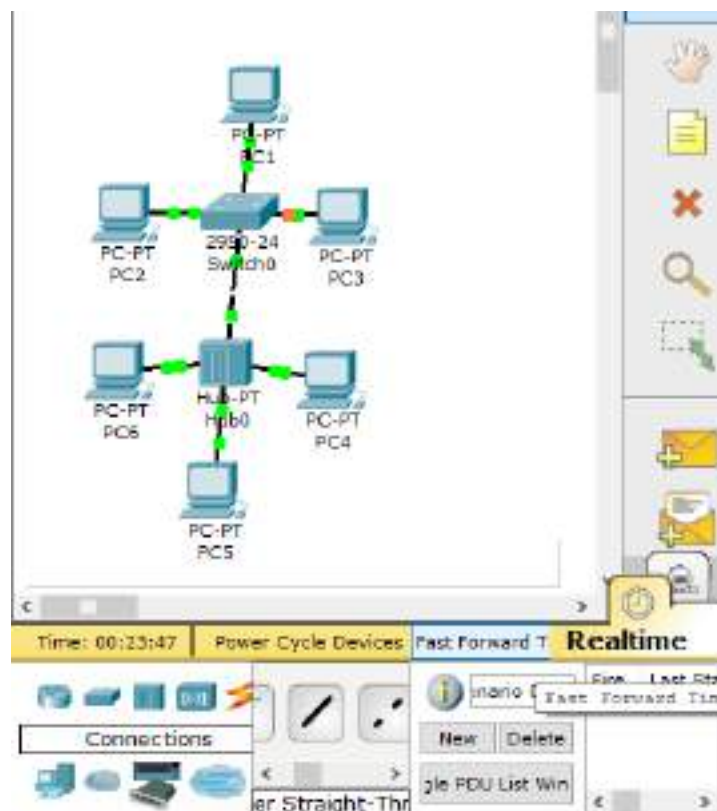


Рисунок 8.35 – Підключення пристроїв між собою

Рожевий ліхтарик вказує на те, що електричне з'єднання не встановлене і, якщо все було зроблено правильно, то треба тільки трохи зачекати, доки з'єднання не встановиться автоматично.

Подальше налаштування. Комутатори і концентратор, що працюють на початкових рівнях мережної моделі OSI, налаштовувати не треба. Необхідне налаштування робочих станцій, а саме: IP-адреси, маски підмережі. Нижче наведено налаштування лише однієї станції (PC1) – інші налаштовуються аналогічно. Двічі клацаємо по потрібній робочій станції й отримуємо вікно, рис. 8.36. У вікні, що відкрилося, обираємо вкладку «Робочий стіл» (Desktop), далі – «Налаштування IP» (IP Configuration), згідно з рис. 8.37.

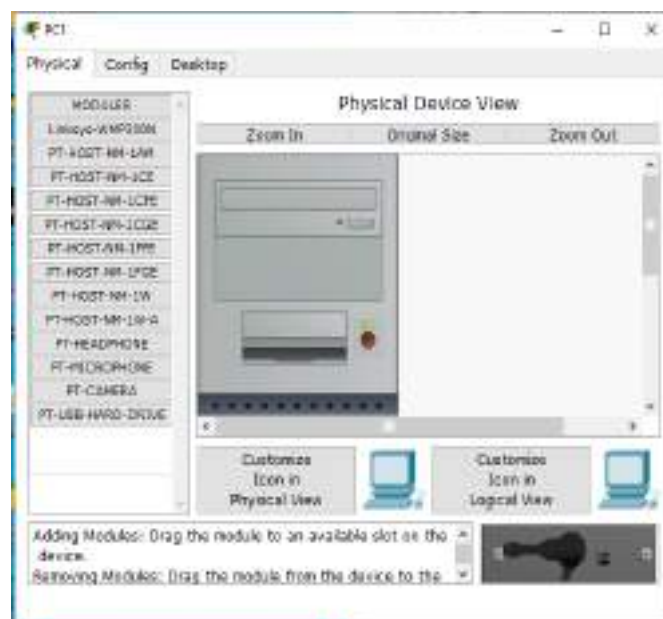


Рисунок 8.36 – Вікно налаштування комп'ютера PC1



Рисунок 8.37 – Вікно налаштування комп'ютера PC1, вкладка «Робочий стіл»

Відкривається вікно, рис. 8.38, де потрібно ввести IP-адресу і маску підмережі комп'ютера PC1. Поля шлюз і DNS-сервер можна не заповнювати.

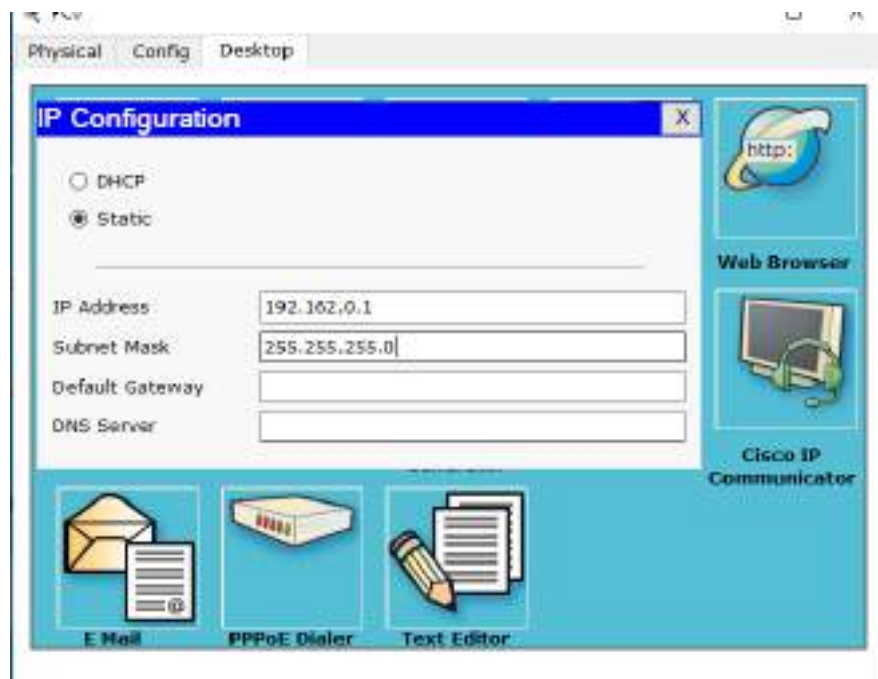


Рисунок 8.38 – Ввід IP адреси і маски підмережі

Аналогічно присвоюються IP-адреси всім іншим комп'ютерам. IP-адреси всіх робочих станцій мають перебувати в одній і тій самій підмережі (тобто з одного діапазону), інакше процес ping не виконається. Природно, що комп'ютери мають бути ввімкнені. Увімкнення здійснюється на вкладці Physical.

Коли налаштування завершено, виконується ping-процес. Наприклад, запускається з PC5 і перевіряти наявність зв'язку з PC1.

Можна довільно вибирати, звідки запускати ping-процес, головне, щоб виконувалася умова: пакети мають обов'язково пересилатися через комутатор і концентратор. Для цього в режимі Realtime робимо клацання мишкою по робочій станції, звідки відправиться повідомлення (відправник PC5), у вікні, яке відчинилося, обираємо вкладку «Робочий стіл», далі згідно з рисунком 8.39 відкриється вікно командного рядка, наведене на рис. 8.40.

Пропонується ввести команду, наприклад, PC> ping 192.168.0.1 (Адреса отримувача). Натискаємо клавішу Enter. Якщо все налаштовано правильно, то буде видно інформацію, наведену на рис. 8.41. Це означає, що зв'язок установлено, і ця ділянка мережі працює справно.



Рисунок 8.39 – Вибір режиму «Командний рядок»

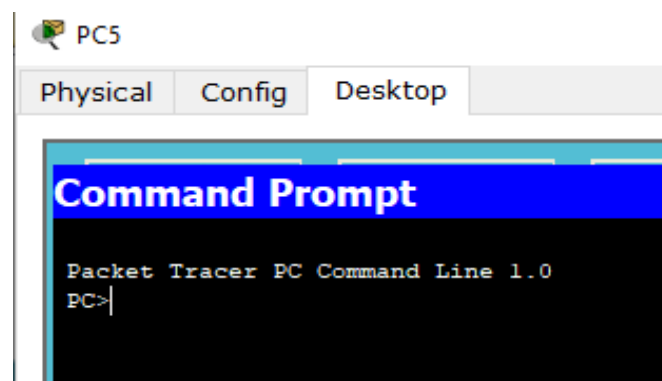


Рисунок 8.40 – Режим «Командний рядок»

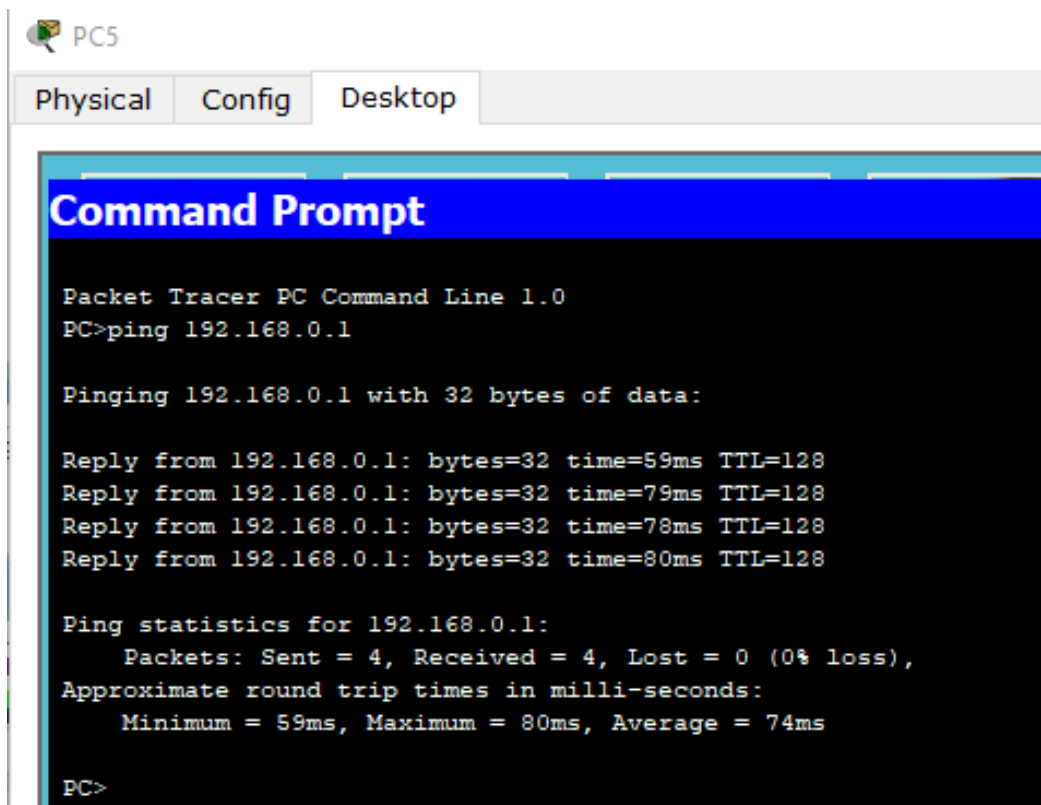


Рисунок 8.41 – Результат виконання команди «ping»

У цьому вікні показано, що дані надходять на комп'ютер 1. Відсилалося 4 пакети по 32 байти, отримано чотири відповіді (Reply). Кожна відповідь дається в окремому рядку, де також зазначено: IP-адресу отримувача, розмір пакета – 32 байти, приблизний час, витрачений на надсилання запиту та отримання відповіді (time) і TTL – час життя надісланого пакета. У цьому вікні також зазначено статистику ПК отримувача, що містить кількість відісланих пакетів (Send=4), кількість отриманих пакетів (Received=4), кількість втрачених пакетів (Lost=0). час життя надісланого пакета в мілісекундах: мінімальний (Minimum=59 ms), максимальний (Maximum=80 ms), середній (Average=74 ms).

Packet Tracer дає змогу виконувати команду «ping» швидше і зручніше натисканням на бічній панелі пункту «Повідомлення» (рис. 8.42).

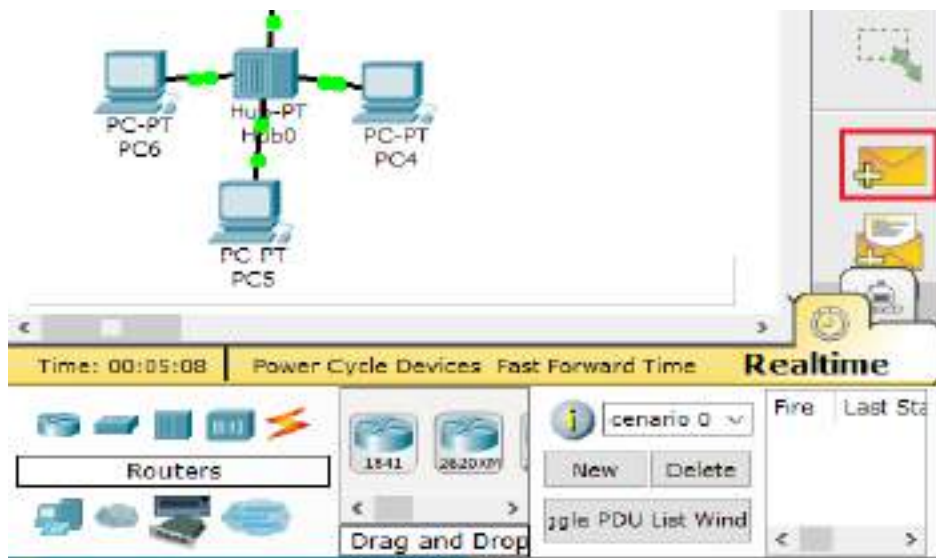


Рисунок 8.42 – Вибір повідомлення, для виконання команди «ping»

З'являється курсор із прикріпленим до нього конвертом. Далі потрібно вибрати мишкою комп'ютер, від кого передаватиме команда «ping», і ще вибрати комп'ютер, для якого виконуватиметься команда «ping». Повідомлення про виконання команди «ping» відобразиться в нижньому правому куті (рис. 8.43).

Для більш детального відображення результату виконання команди ping (рис. 8.44), необхідно вибрати команду «Переключити вікно списку PDU» (Toggle PDU List Windows) у вікні сценаріїв.

У Packet Tracer передбачено режим моделювання, де детально описується і показується, як працює утиліта Ping. Тому необхідно перейти в режим симуляції. Відкриється панель моделювання, у якій відобразатимуться всі події, пов'язані з виконанням ping-процесу, відповідно до рис. 8.45.

Перед виконанням симуляції необхідно задати фільтрацію пакетів натисканням на кнопку «Редагувати фільтри» (Edit Filters). Після цього відкриється вікно (рис. 8.46), у якому потрібно залишити лише ICMP.

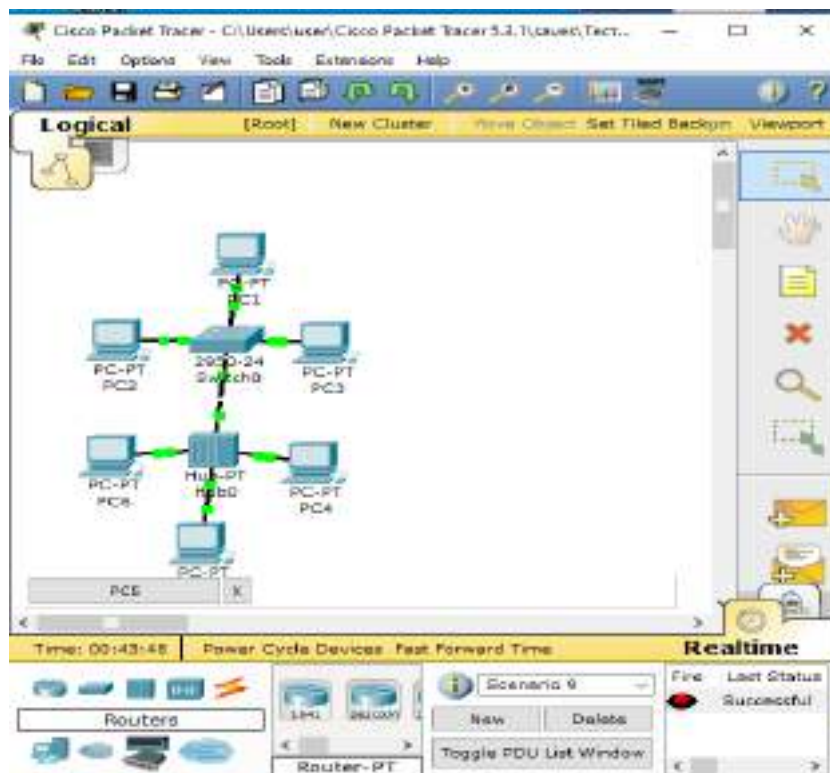


Рисунок 8.43 – Повідомлення про виконання команди «ping»

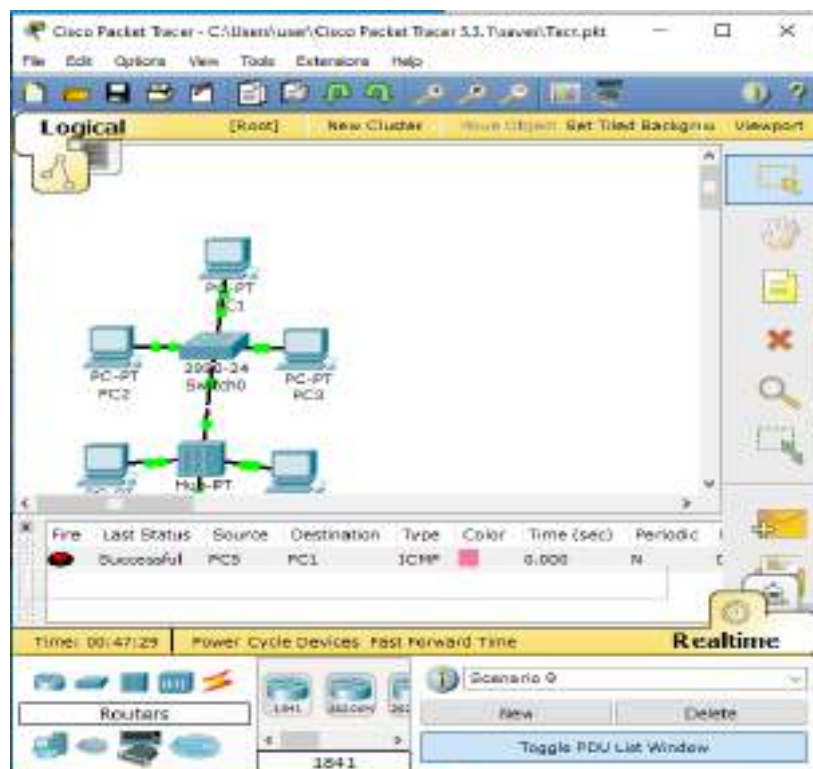


Рисунок 8.44 – Результат виконання команди «ping»

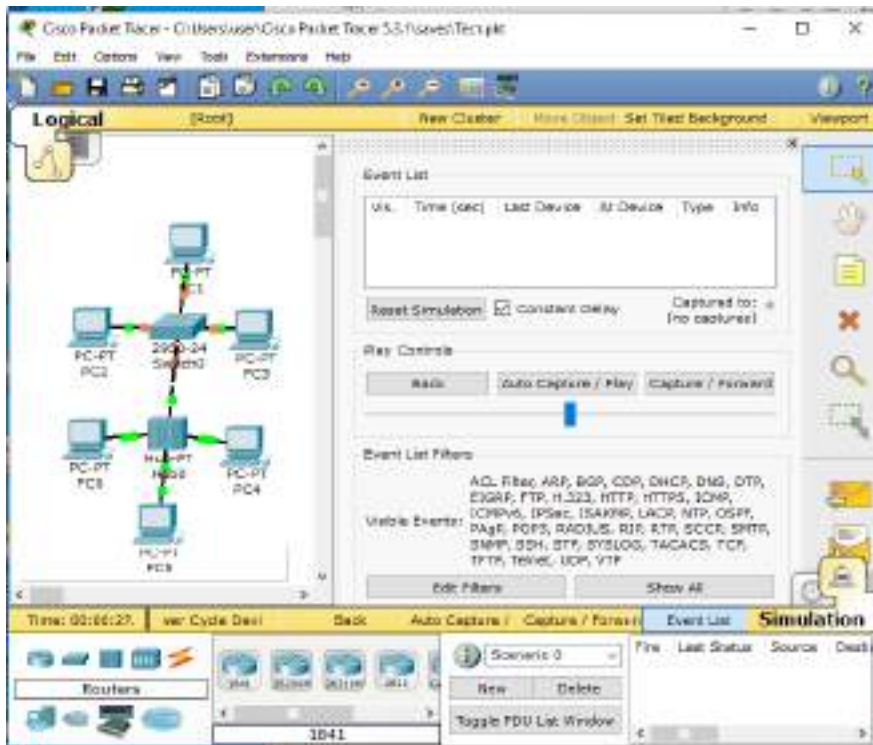


Рисунок 8.45 – Режим симуляції

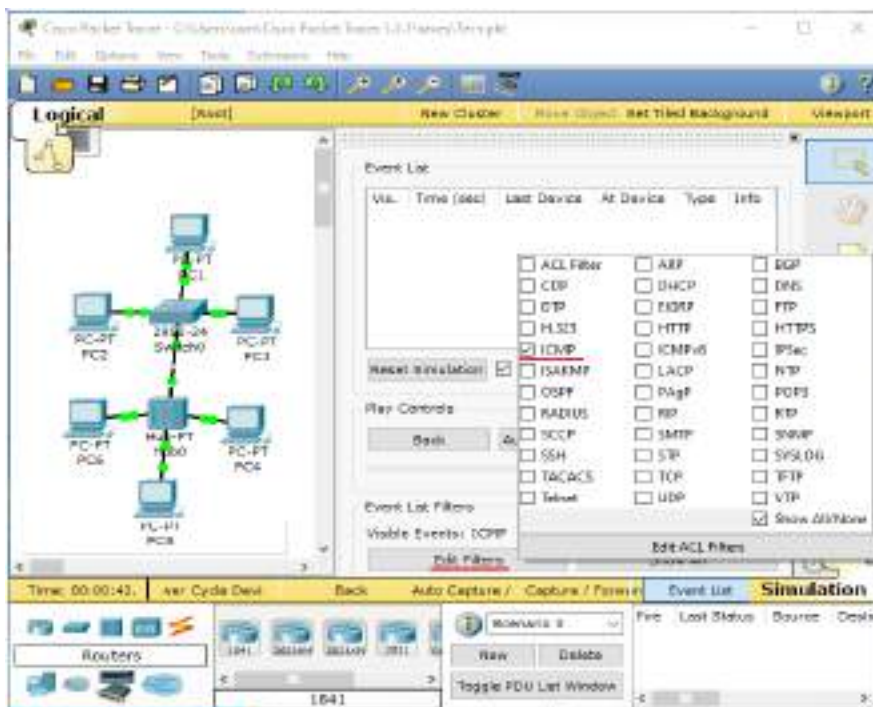


Рисунок 8.46 – Вибір фільтра

ICMP Internet Control Message Protocol – протокол міжмережних керуючих повідомлень – мережний протокол, що входить до стека протоколів TCP/IP, протокол третього рівня моделі OSI, який використовується для діагностики проблем зі зв'язком у мережі. Здебільшого ICMP

використовується для передавання повідомлень про помилки та інші виняткові ситуації, що виникли під час передавання даних, наприклад, запитувана послуга недоступна, або хост, або маршрутизатор не відповідають.

Тепер необхідно повторити запуск ring-процесу. Вибираємо натисканням на бічній панелі пункту «Повідомлення», потім вибираємо відправника PC 5 і отримувача PC1 і запускаємо моделювання. Для запуску можна вибрати пункт Захоплення/Відтворення», що означає моделювання всього ring-процесу в єдиному процесі, тоді як «Захоплення/Вперед» дає змогу відображати його покроково. Результат моделювання показано на рис. 8.47.

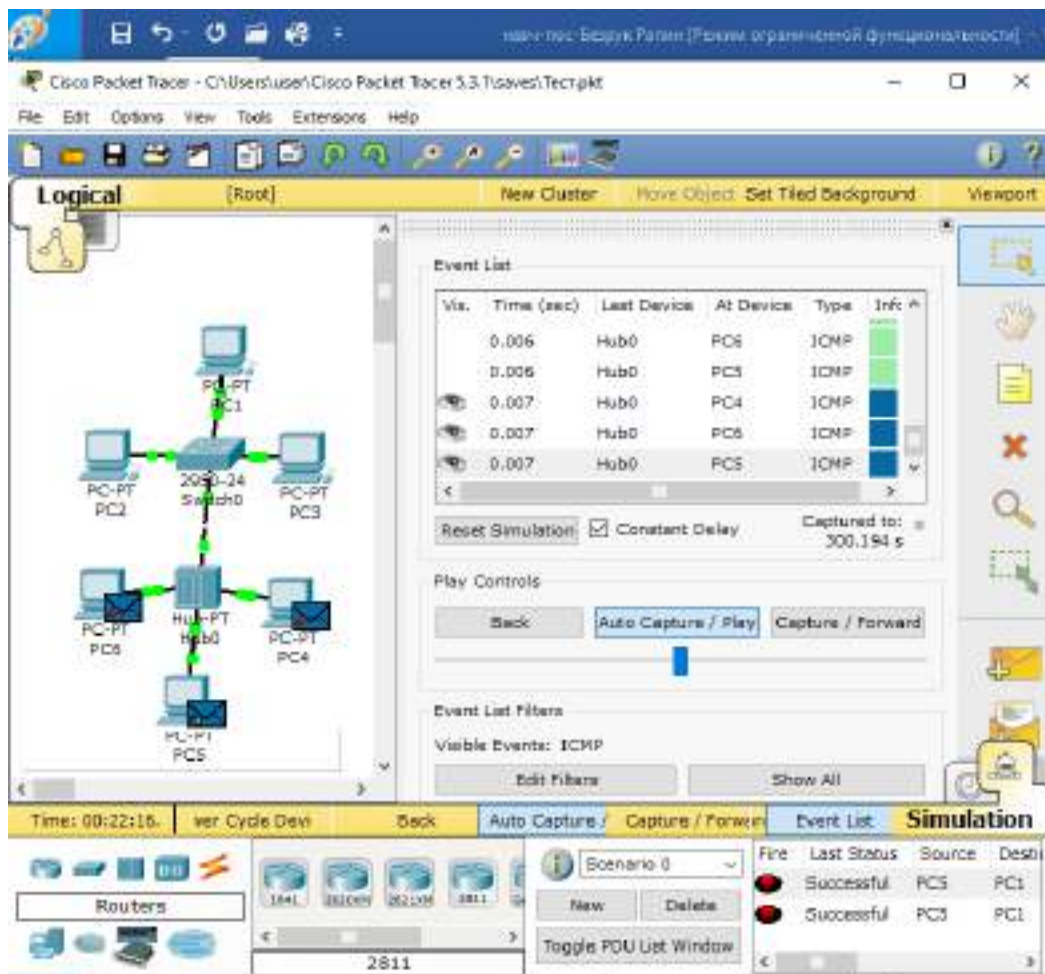


Рисунок 8.47 – Виконання процесу симуляції

Щоб дізнатися інформацію, яку несе в собі пакет, його структуру, достатньо натиснути правою кнопкою мишки на кольоровий квадрат у графі Info. Моделювання припиняється при завершенні ring-процесу.

Для видалення завдання натискається кнопка «Видалити» в нижній частині екрана. Тепер необхідно повторити запуск ring-процесу. Після запуску можна зрушити «Панель моделювання», щоб на схемі спроектованої мережі спостерігати за надсиланням/прийманням пакетів.

8.1.5 Кластеризація і кольорове виділення схем

В ході створення топологій великого розміру можна зіткнутися з ситуацією, коли стає важко що-небудь зрозуміти або відстежити. У такому разі виручає групування (кластеризація) деяких пристроїв, що забезпечує об'єднання цих пристроїв в єдине хмарне подання. Під час подвійного клацання на хмарі воно розкриватиметься і відобразить згруповані пристрої у звичайному поданні.

Розглянемо, як створюється кластер пристроїв. Як приклад, скористаємося такою топологією, що містить 2 комутатори і 6 ПК (рис. 8.48). І хоча ця схема не надто характерна, але послужить для демонстрації принципів кластеризації, як необхідно чинити в разі майбутніх труднощів.

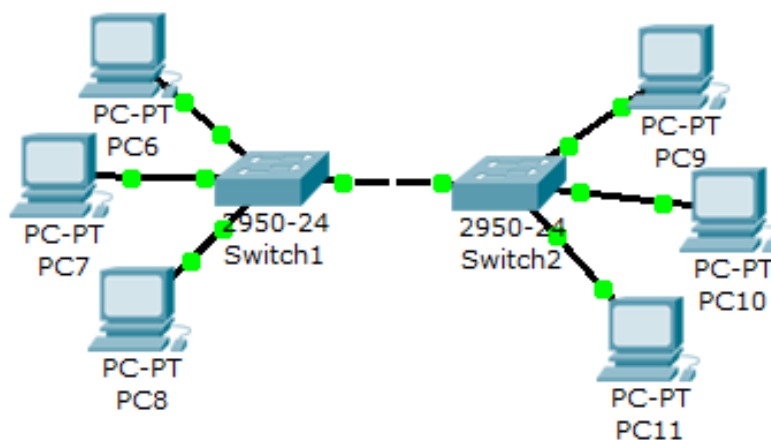


Рисунок 8.48 – Топологія мережі

Клацнемо в чистому місці біля ПК9 і протягнемо мишкою для виділення ПК9–ПК11 і комутатора Switch2. Потім натиснемо кнопку «Новий кластер» (New Cluster), розташовану над робочим простором. При цьому виділені пристрої будуть об'єднані в кластер. У підсумку наша топологія після групування матиме такий вигляд (рис. 8.49):

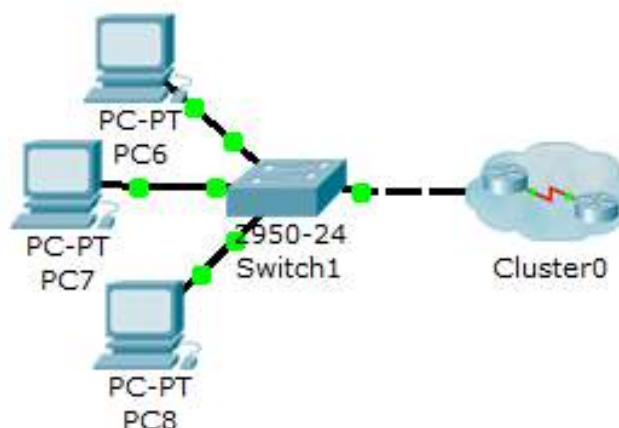


Рисунок 8.49 – Створення кластера

Подвійне клацання по кластеру розгорне групу і покаже тільки пристрої, що входять до нього. Для того, щоб повернутися назад у робочий простір, треба натиснути кнопку «Назад» (Back).

Для розкриття кластера з поверненням до вихідного зображення мережі треба клацнути мишкою в чистому місці біля нього і протягнути мишкою для виділення і натиснути кнопку Delete. З'явиться вікно (рис 8.50).

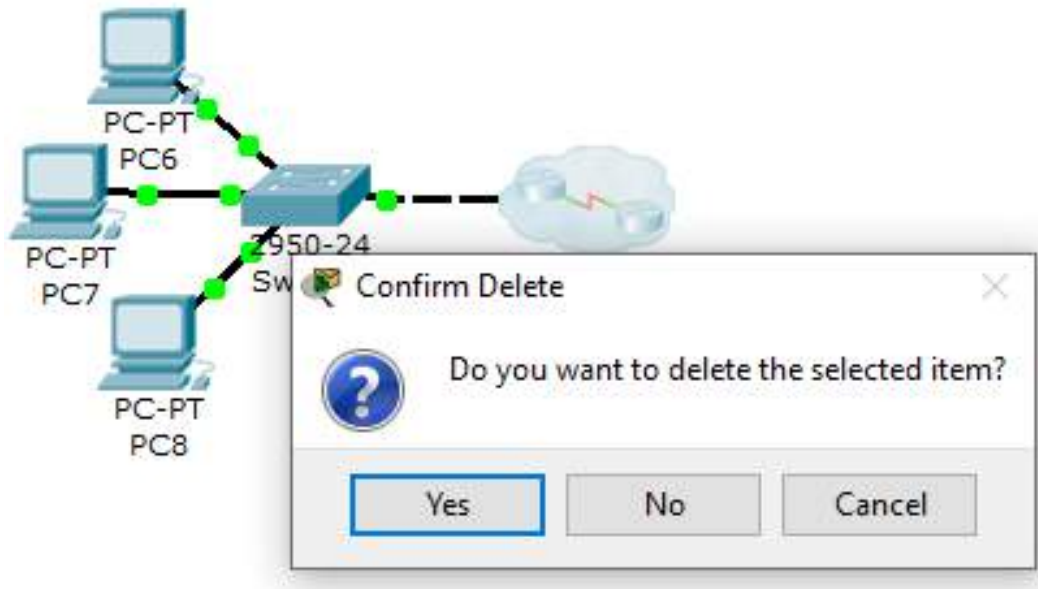


Рисунок 8.50 – Розкриття кластера, крок 1

Вибираємо No. Курсор набуває хрестоподібного вигляду. Поєднуємо його із зображенням кластера і натискаємо ліву кнопку мишки. З'являється інше вікно, рис. 8.51, де треба вибрати Uncluster.

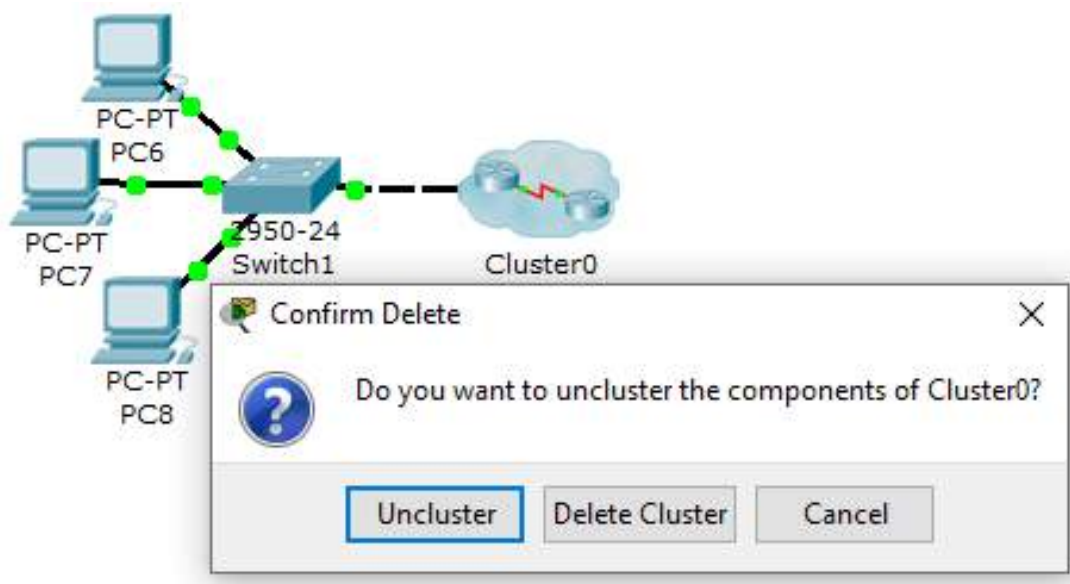


Рисунок 8.51 – Розкриття кластера, крок 2

Кластеризація також може бути використана для групування та приховування подробиць зовнішніх пристроїв. Необхідно зауважити, що кластеризація має відношення до логічного робочого простору і не впливає на відображення пристроїв у фізичному робочому просторі.

Використання кольорових областей і написів дає змогу відокремлювати візуально одну підмережу від іншої, що полегшить роботу з моделями мереж. Для встановлення кольорових областей необхідно виконати такі дії:

1. На панелі інструментів вибрати відповідний значок і відкрити діалогове вікно (рис 8.52).

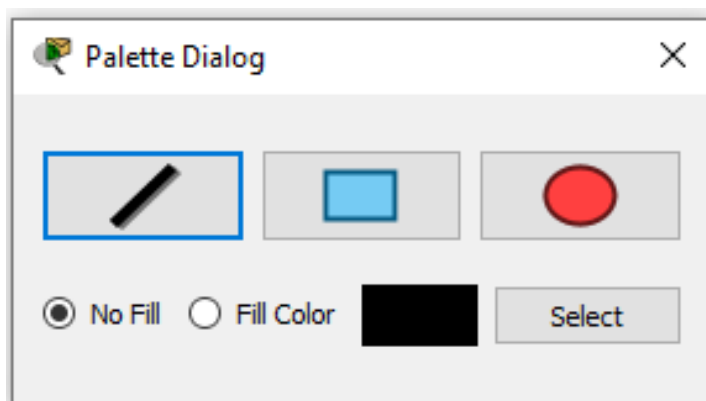


Рисунок 8.52 – Формування кольорових областей

2. Вибрати режим «Заливка».
3. Вибирати колір заливки, наприклад, жовтий.
4. Вибирати форму області, наприклад, еліпс.
5. Нарисувати еліпс на робочому просторі, рис. 8.53.

Можна також додати підпис за допомогою інструмента (Текст) і переміщати/масштабувати цю область, рис. 8.53.

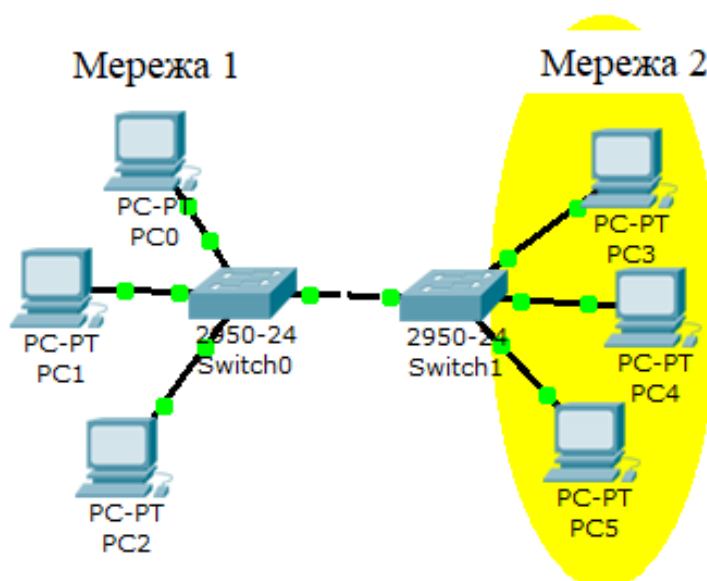


Рисунок 8.53 – Візуальне виділення мереж

8.2 Фізична топологія телекомунікаційної мережі та її реалізація

Симулятор Packet Tracer здійснює імітацію не тільки логічної взаємодії пристроїв, а й імітує роботу пристроїв на фізичному рівні. Фізичний робочий простір робить логічну топологію більш відчутною, надаючи їй фізичного виміру. Мета фізичного робочого простору – дати фізичне уявлення мережі.

Фізичний простір призначений для накладання абстрактної топології мережі на реальну карту об'єктів (приміщень, будівель, міських кварталів). Тобто метою фізичної робочої області є огляд фізичних аспектів логічної топології мережі. Це дає відчуття масштабу та розміщення (як саме мережа може виглядати в реальному середовищі).

Щоб відобразити масштаб, фізично робоча область розділена на чотири шари: міжміський, місто, будинок або будова, комутаційний вузол. Міжміський шар є за масштабом найбільшим, він може містити багато міст. Кожне місто може містити безліч будівель, кожна будівля може містити безліч комутаційних вузлів.

8.2.1 Інтерфейси симулятора у фізичному просторі

Початковий інтерфейс симулятора Cisco Packet Tracer у режимі Physical відрізняється від інтерфейсу в режимі Logical наявністю контрольної панелі, розташованої під лінійкою інструментів, що дає змогу працювати з шарами.

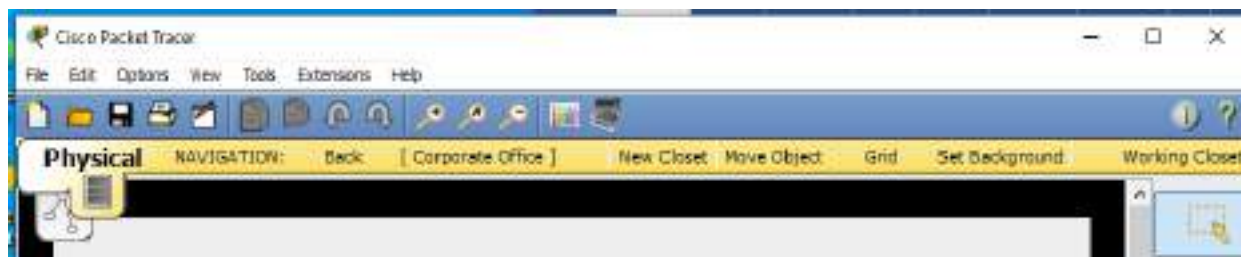


Рисунок 8.54 – Контрольна панель фізичного робочого простору

Інструмент Navigation служить для переміщення мережних пристроїв з одного шару на інший у вікні Physical Location, яке з'являється після натискання на кнопку Navigation.

Інструмент Back служить для повернення на попередній шар.

Інструмент Corporate office дає змогу помістити будівлю на карту міста.

Інструмент New Closet поміщає телекомунікаційну шафу на план приміщення.

Телекомунікаційна шафа (Wiring closet) – це останній шар, що містить пристрої, розміщені у вікні логічної топології. Його стандартна назва

«Головна телекомунікаційна шафа» (Main Wiring Closet) і він не має інших підрозділів.

Інструмент Move Object також дає змогу переміщати мережні пристрої.

Інструмент Grid (Сітка) викликає вікно параметрів, де встановлюються розміри сітки в метрах для кожного шару на фізичному просторі (рис. 8.55).

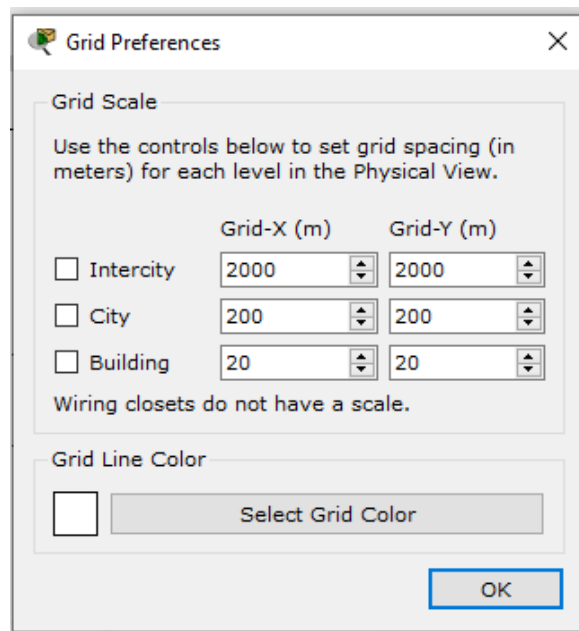


Рисунок 8.55 – Встановлення параметрів сітки

Сітка вводиться в разі потреби.

Після переходу на фізичний робочий простір з'являється початковий інтерфейс симулятора Cisco Packet Tracer у вигляді (рис. 8.56).

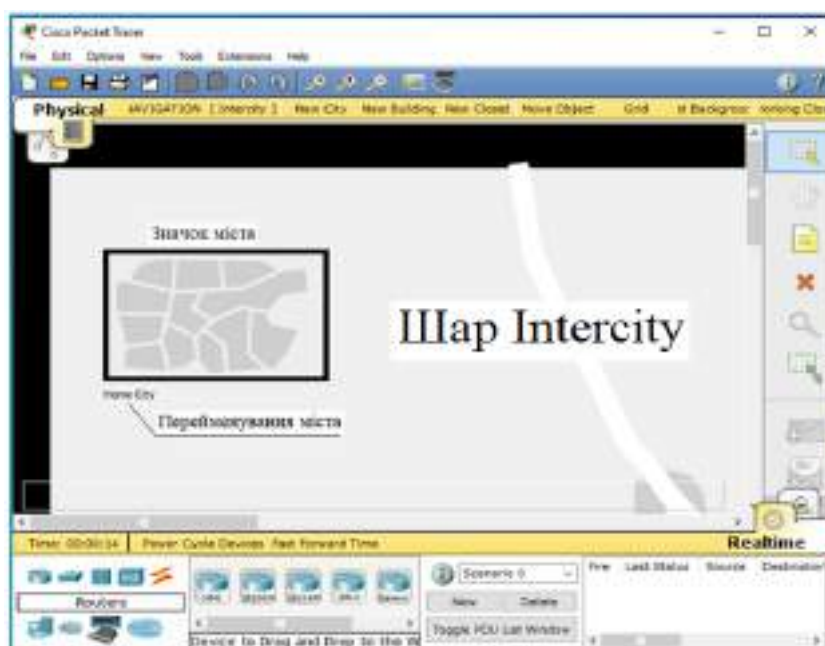


Рисунок 8.56 – Інтерфейс симулятора у шарі Intercity

На робочому просторі представлено **Міжміське оточення (Intercity)**.

За замовчуванням, міжміський вид містить один об'єкт типу місто, званий «Рідне місто» (**Home city**). Іконку міста можна переміщати по карті за допомогою ЛКМ. Рідне місто містить одну будівлю, іменовану «Корпоративний офіс» (**Corporate office**). Ця будівля, як і об'єкт рідного міста в міжміському вигляді, може бути переміщена в межах міста. Щоб переміститися на карту інтер'єру, необхідно натиснути на іконку будівлі ЛКМ. Усі будівлі обмежені одним поверхом. Корпоративний офіс містить одну стандартну робочу стійку «Головна стійка» (**Main Wiring Closet**). Натискання ЛКМ на її іконку дозволяє переглянути вміст. Також можна повернутися до будь-яких інших попередніх рівнів, натиснувши на кнопку «Назад» (**Back**).

Міжміське оточення (Intercity) – це наймасштабніший вид середовища, що складається з міст. Міста, будівлі та телекомунікаційні шафи можуть бути додані на цьому рівні з використанням панелі керування. Міста додаються за допомогою інструмента New City. Під час натискання на цю кнопку на робочому просторі з'являється умовне зображення ще одного міста, яке збігається з початковим зображенням, і яке можна перемістити в інше місце за допомогою лівої клавіші мишки. Кожному місту може бути присвоєно свою назву.

Міста (Cities). Перехід на цей шар здійснюється, як і при звичайному переході з рівня високого на більш низький, по клацанню ЛКМ на умовному зображенні міста. Цей шар, рис. 8.57, включає будівлі та телекомунікаційні шафи. Додаткові будівлі додаються за допомогою інструмента New Building. Повернення на рівень міжміської карти за допомогою інструмента **Back**.



Рисунок 8.57 – «Шар City»

Шар будівлі (Buildings) за замовчуванням називається «Корпоративний офіс» (CorporateOffice) (рис. 8.58) та включає телекомунікаційні шафи.

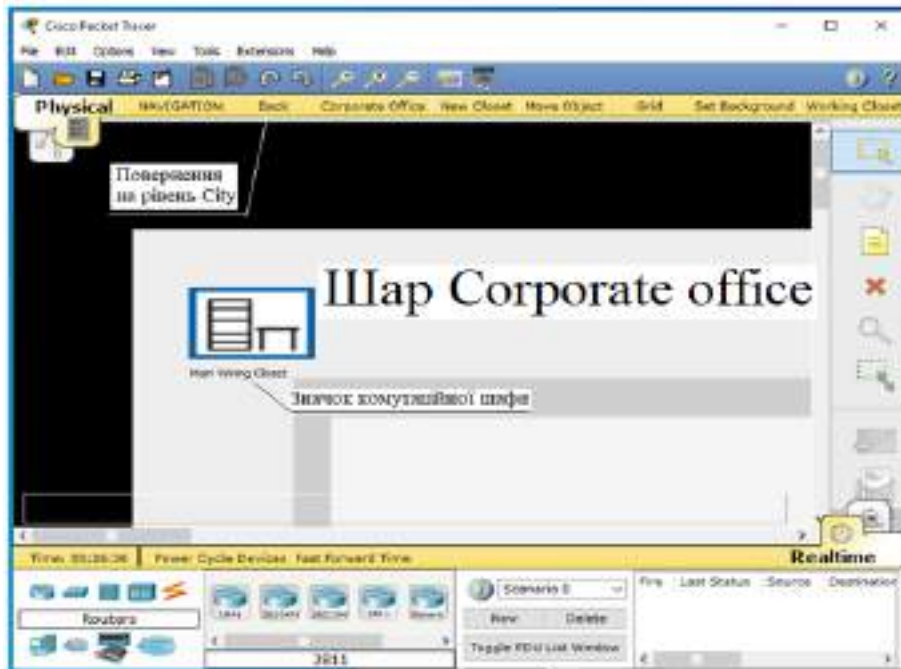


Рисунок 8.58 – Шар «Корпоративний офіс»

Корпоративний офіс об'єкта «Рідне місто» (Home city). містить одну стандартну робочу стійку «Головна стійка» (Main Wiring Closet). Натисканням ЛКМ на її іконці можна переглянути вміст.

«Головна стійка» спочатку містить всі пристрої, які були створені в логічному робочому просторі. Вона приблизно має в своєму розпорядженні ці пристрої по шафах і столах, щоб було наочно видно фізичне розташування цих пристроїв. Вигляд робочої стійки також відображає підключені порти та статуси індикаторів з'єднання пристроїв. Під час натискання на пристрій відображається його вікно конфігурації, аналогічно логічному робочому простору. Додати телекомунікаційні шафи в будівлі можна за допомогою інструмента New Closet.

8.2.2 Робота у фізичному робочому просторі

Насамперед необхідно створити схему мережі в логічному робочому просторі. Для з'ясування принципів роботи у фізичному робочому просторі зберемо мережу з невеликою кількістю робочих станцій (рис. 8.59).

Як зазвичай з'єднаємо комп'ютери між собою та привласним їм IP-адреси з однієї підмережі. Далі переключаємося на фізичний вигляд. Переходимо в корпоративний офіс і відкриваємо головну телекомунікаційну шафу (рис. 8.60).

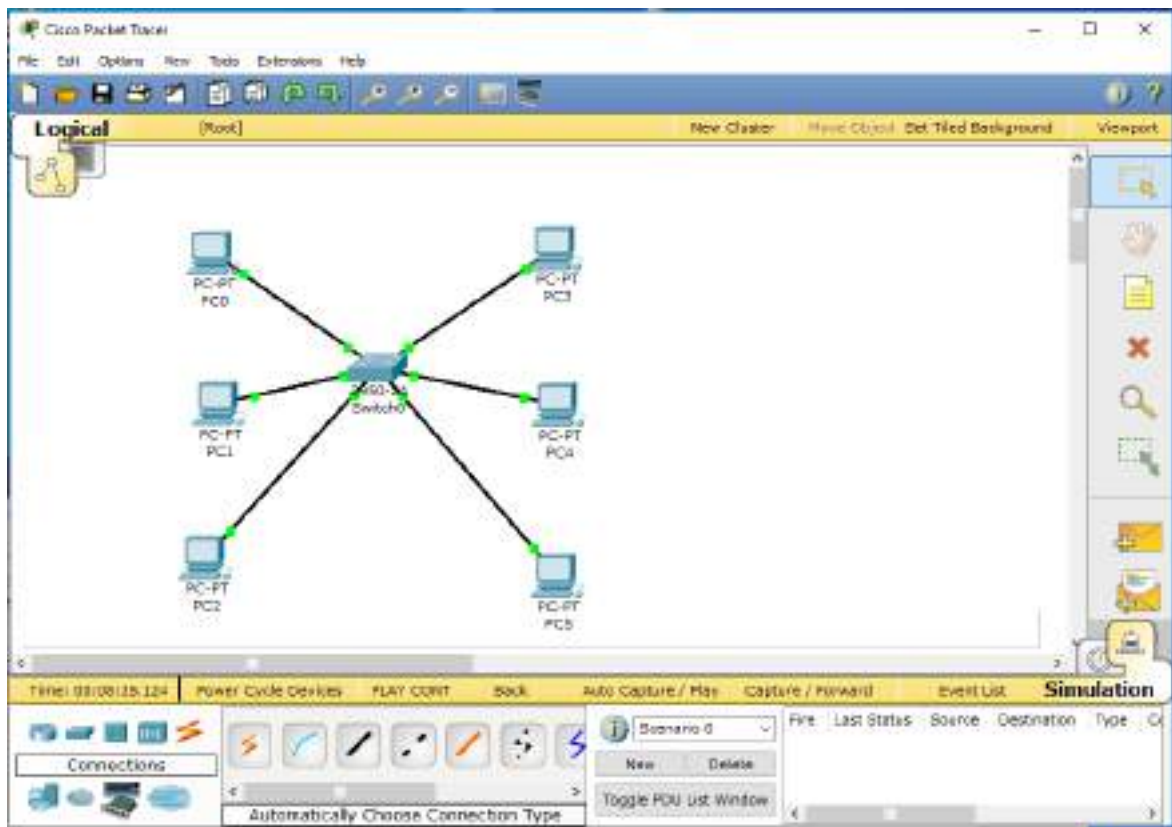


Рисунок 8.59 – Схема мережі

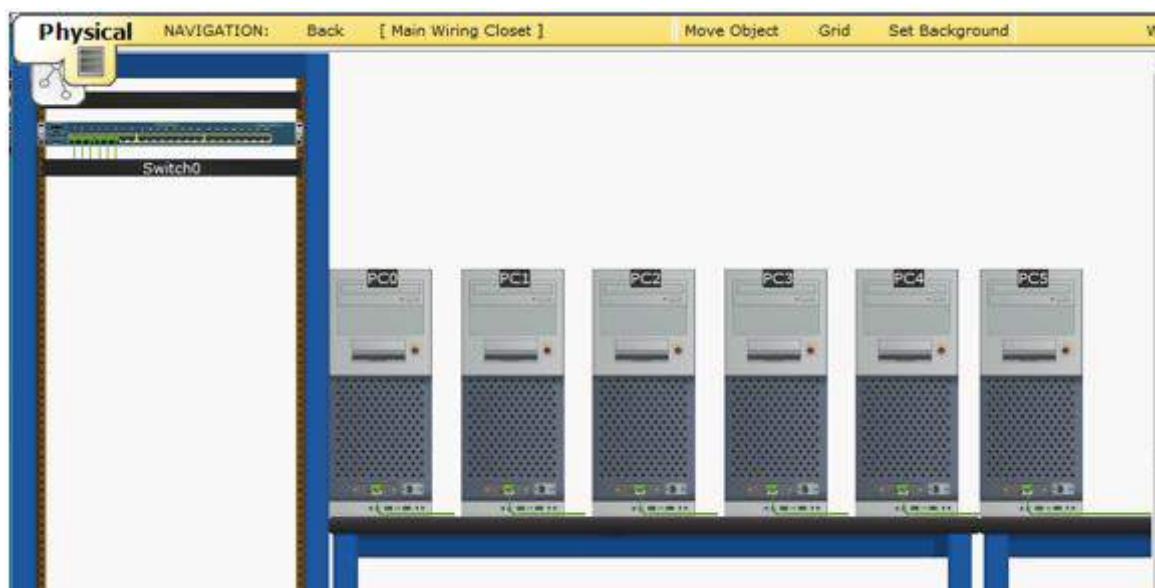
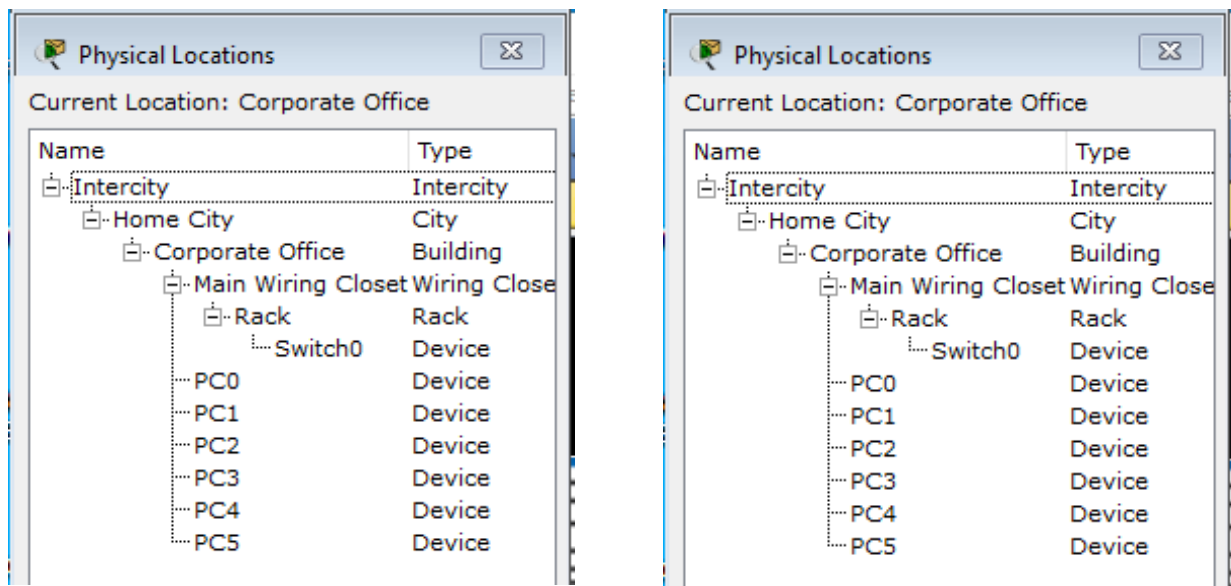


Рисунок 8.60 – Вміст головної телекомунікаційної шафи

На рисунку видно комутатор і шість комп'ютерів, проглядаються з'єднувальні кабелі. Устаткування увімкнено, є зелене світло.

Далі розподіляємо комп'ютери з офісу. Клацаємо лівою кнопкою мишки на кнопку «Навігація» (Navigation). Відкриється вікно навігації, де показано розташування мережних пристроїв. Все мережне обладнання знаходиться

у головній стійці (Rack) (рис 8.61, а). Переміщуємо мишкою комп'ютери в Office (рис 8.61, б).



а)

б)

Рисунок 8.61 – Розташування мережних пристроїв:

а) розташування мережного обладнання у головній стійці (Rack);

б) переміщення комп'ютерів в Office

Отримуємо зображення усіх комп'ютерів в одному місці вікна (рис. 8.62).

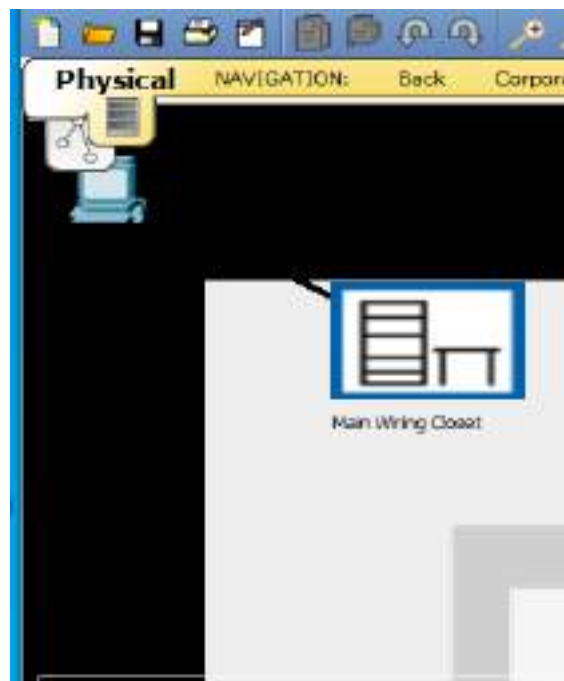


Рисунок 8.62 – Початкове зображення комп'ютерів в офісі

Їх необхідно розподілити по офісу за допомогою лівої кнопки мишки (рис. 8.63). Інформацію про довжину кабелю можна отримати, якщо поєднати покажчик маніпулятора із зображенням кабелю, рис. 8.63.

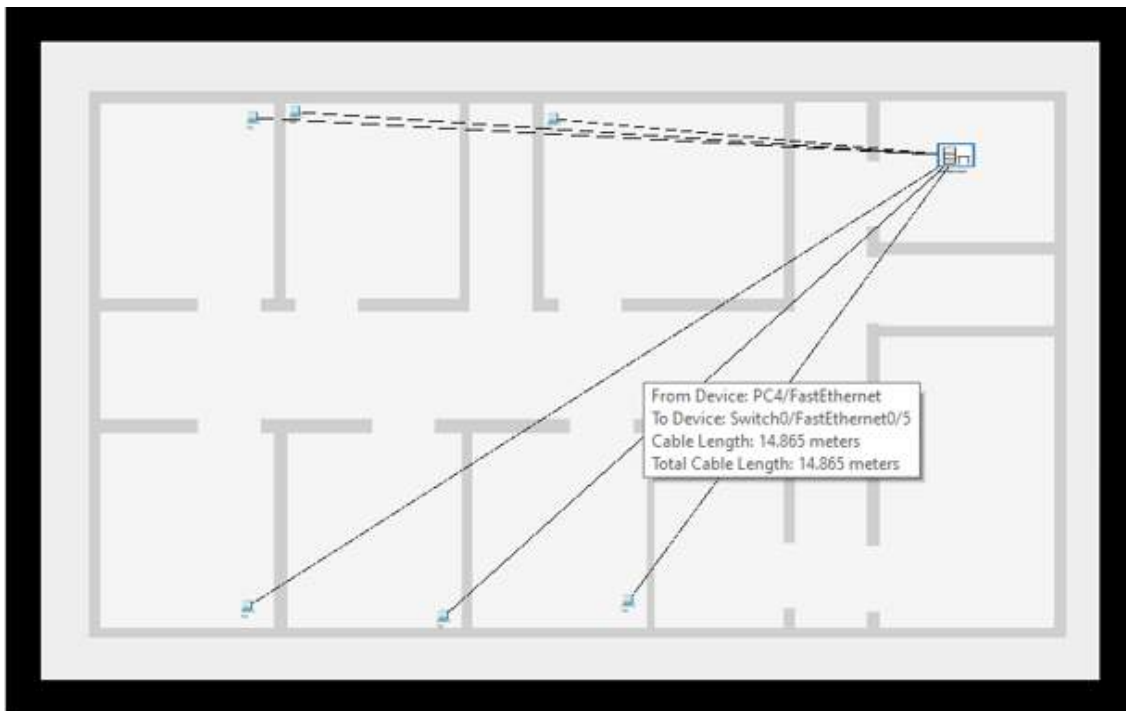


Рисунок 8.63 – Розподіл комп'ютерів за приміщеннями

Для компактного розташування кабелів їх треба зібрати в джгут, а для спрощення контролю кабельних підключень доцільно використовувати колірне забарвлення кабелів.


Для колірної кодування кабелю необхідно клацнути лівою кнопкою мишки (ЛКМ) на проводі у фізичному робочому просторі і в діалоговому вікні, що з'явилося, вибрати пункт меню «Колір кабелю» (Color Cable). Після чого підібрати колір у новому діалоговому вікні «Вибір світла» (Select Color).

На фізичному плані також є можливість створення точки перегину для усунення заплутаного виду кабелю та формування джгута. Для створення точки перегину клацніть по кабелю ЛКМ у точці, де приблизно передбачається зміна напрямку прокладки джгута і виберіть пункт меню «Створити точку перегину» (Create bend Point). І так по всіх кабелях. На одній лінії можна створити будь-яку кількість точок перегину.

На додаток точки перегину дозволяють об'єднати кілька кабелів у єдину групу. Для створення групи треба поєднати точку перегину з іншою точкою. Чорний квадрат точки перегину набуде жовтого вигляду.

Таким чином, точки перегину, що знаходяться в одній області, об'єднують, об'єднуючи кілька кабелів в єдину групу. Створення групи

сумісності точок перегину кабелів з однією точкою здійснюється перетягуванням за допомогою лівої кнопки мишки. Отриманий таким чином вузол треба перемістити за допомогою ЛКМ у точку перегину джгута.

Для видалення групування використовується інструмент видалення із вертикальної панелі інструментів . Контекстне меню, що з'явилося (рис. 8.64), дозволяє витягти з групи одну точку або розгрупувати все відразу.

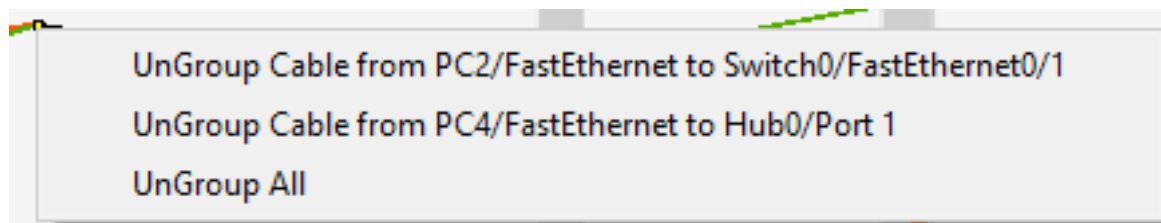


Рисунок 8.64 – Меню розгрупування

В процесі розгрупування видаляється лише об'єднання точок у групу, самі точки перегину залишаються без змін. У результаті виконання цих операцій отримуємо зображення джгута (рис. 8.65).

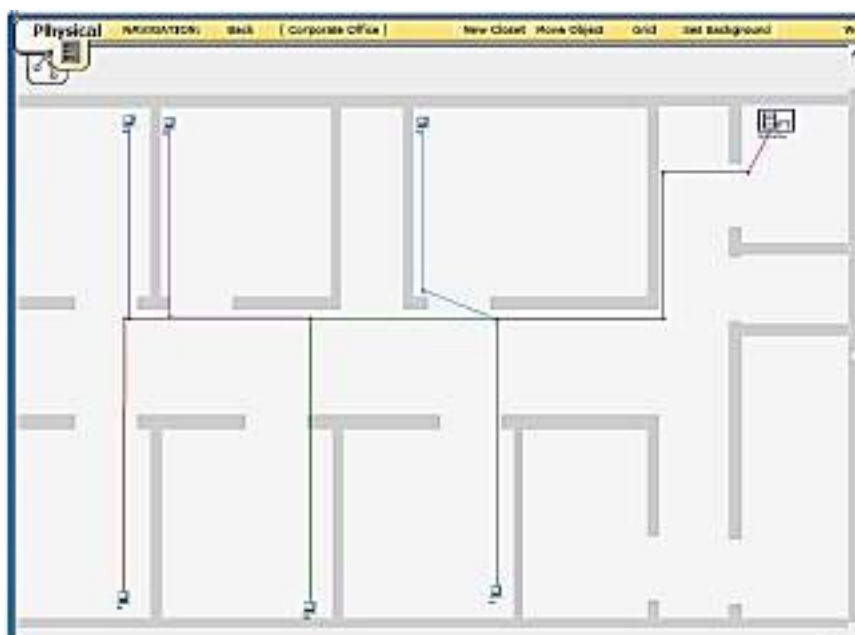


Рисунок 8.65 – Створення джгута

8.2.3 Кастомізація зображень пристроїв та фону

Незважаючи на те, що Packet Tracer пропонує власний набір зображень для кожного пристрою, також є можливість замінити їх на власні зображення. Для зміни зображень пристроїв необхідно у логічному робочому просторі клацнути ЛКМ на пристрої і перейти на вкладку «Фізичний вигляд» (Physical) (рис. 8.66).



Рисунок 8.66 – Фізичний вигляд комп'ютера

Потім клацнути по кнопці «Налаштування зображення пристрою у логічному робочому просторі» (Customize Icon in Logical View) або кнопці «Налаштування зображення пристрою у фізичному робочому просторі» (Customize Icon in physical View). Після цього з'являється вікно (рис. 8.67), що дозволяє вибрати файл зображення користувача. Після вибору файла і буде змінено зовнішній вигляд пристрою. Зміна зображення фізично стає видимою тільки під час переміщення пристроїв за межі телекомунікаційної шафи.

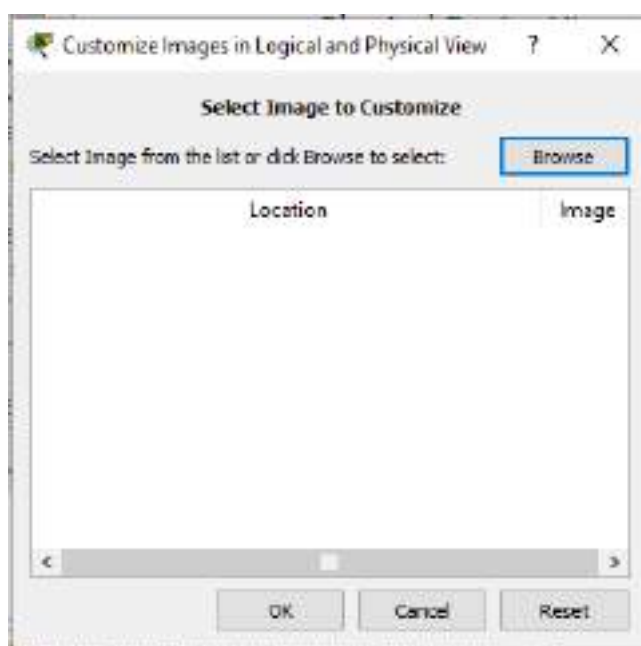


Рисунок 8.67 – Вікно вибору файла

Фонове зображення логічного та фізичних робочих просторів також може бути кастомізовано. Для зміни фону логічного плану натисніть на кнопку «Вибрати фонове зображення» (**Set Background**) і виберіть файл зображення (рис. 8.68).

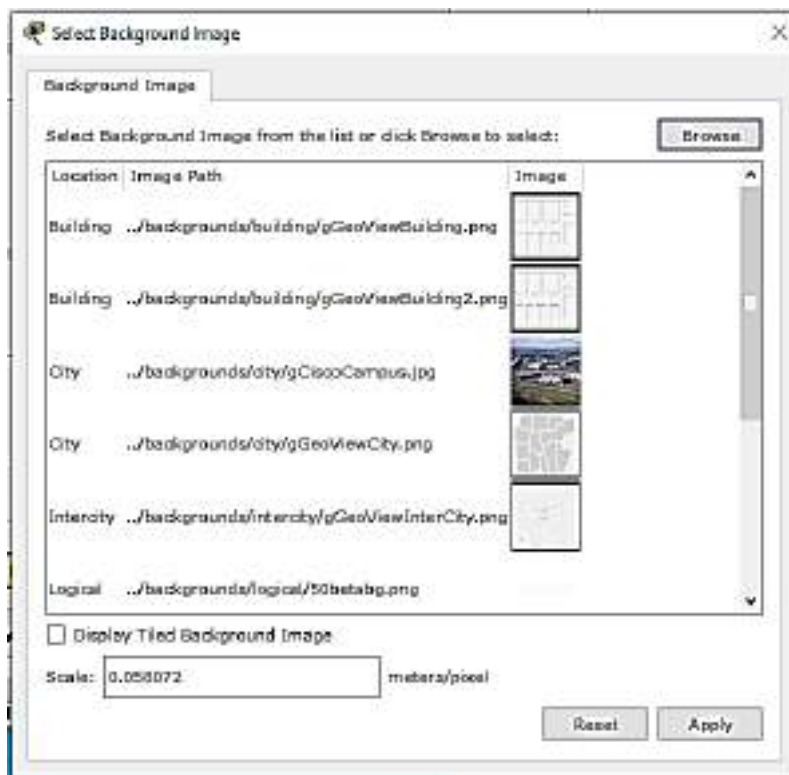


Рисунок 8.68 – Вікно вибору файла фонового зображення

Якщо вибраний рисунок менший, ніж робочий простір, то можна використовувати опцію «Замостити фоновим зображенням» (Display Tiled Background Image).

Для фізичного робочого простору фонове зображення може бути встановлене окремо для міжміського рівня, міста, офісу та телекомунікаційної шафи.

Користувач може створити власний фон, завантаживши додатковий файл з рисунком за допомогою кнопки Browse.

Контрольні запитання та завдання

1. Навіщо використовується режим симуляції?
2. Як у режимі симуляції визначити, які протоколи були задіяні у роботі мережі?
3. Перерахуйте основні можливості режиму симуляції.
4. Які типи обладнання підтримує цей емулятор мережі?

5. Як відбувається додаткова комплектація заданих пристроїв?
6. Назвіть основні відмінності режимів «Real–Time» та симуляції.
7. Як можна відокремити візуально одну підмережу від іншої?
8. Як здійснюється кабельне з'єднання мережі?
9. Як здійснюється налаштування IP-адреси вузла мережі?
10. З яких частин складається IP адреса v4?
11. Як провести тестування мережі?
12. Який пристрій забезпечує маршрутизацію між мережами?
13. Яке призначення команди ping?
14. Яка відмінність логічних та фізичних робочих просторів?
15. Скільки інтерфейсів у фізичному просторі має СРТ?
16. Чим відрізняються інтерфейси фізичного простору симулятора?
17. Як формується джгут?
18. Як можна відокремити візуально один кабель від іншого?
19. Як відбувається кастомізація мережних пристроїв?
20. Як проводиться кастомізація фону логічних і фізичних просторів?

ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

Загальні питання проектування систем

1. Гуд Г.Х., Макол Р.Э. Схемотехника. Введение в проектирование больших систем. – М.: Сов. радио, 1962.
2. Месарович М., Такахаря Я. Общая теория систем: Математические основы. – М.: Мир, 1978.
3. Сингх М., Титл. Системы: декомпозиция, оптимизация, управление. – М.: Мир, 1986.
4. Лямец В.И., Тевяшев А.Д. Системный анализ. Вводный курс: Учебное пособие. – Харьков: ХНУРЭ, 2004.
5. Батищев Д.И. Методы оптимального проектирования. – М.: Радио и связь, 1984.
6. Брахтман Т.Р. Многокритериальность и выбор альтернатив в технике. – М.: Сов.радио, 1984.
7. Тимченко А.А. Основы системного проектирования та системного аналізу складних об'єктів: Основы САПР та системного проектирования складних об'єктів. – К.: Либідь, 2003.
8. Молчанов А.А. Моделирование и проектирование сложных систем: учебное пособие. – К.: Выща школа, 1988.
9. Стеклов В.К., Беркман Л.Н. Проектирования телекоммуникаційних мереж: підручник. – К.: Техніка, 2002.
10. Березин Л.В., Вейцель В.А. Теория и проектирование радиосистем. – М.: Сов. радио, 1977.
11. Гуткин Л.С. Проектирование радиосистем и устройств: учебное пособие. – М.: Радио и связь, 1990.
12. Апович А.Ф. Проектирование радиотехнических систем. – Минск.: Высшая школа, 1988.
13. Юрлов Ф.Ф. Технично-економическая эффективность сложных радиоэлектронных систем. – М.: Сов. радио, 1980.
14. Окунев Ю.Б., Плотников В.Г. Принципы системного подхода к проектированию в технике связи. – М.: Наука, 1985.
15. Архипов М.Н., Захаров Г.П., Малиновский С.Т., Яновский Г.П. Проектирование и техническая эксплуатация сетей передачи дискретных сообщений. – М.: Радио и связь, 1988.
16. Берганов И.Р., Гордиенко В.Н., Крухмалев. Проектирование и техническая эксплуатация систем передачи. – М.: Радио и связь, 1989.

17. Зелигер Н.Б., Чугреев О.С., Яновский Г.Г. Проектирование сетей и систем передачи дискретных сообщений. – М.: Радио и связь, 1984.
18. Шварц М. Сети связи: протоколы, моделирование и анализ. Том 1. / М. Шварц. – М.: Наука, 1992. – 336 с.
19. Шварц М. Сети ЭВМ: Анализ и проектирование / М. Шварц. – М.: Мир, 1987.
20. Мартин Дж. Системный анализ передачи данных. Т.2. Проектирование систем передачи данных / Дж. Мартин. – М.: Мир, 1975.
21. Безрук В.М., Бідний Ю.М., Омельченко А.В. Інформаційні мережі зв'язку. Ч.1. Математичні основи інформаційних мереж зв'язку: навч. посібник.– Харків: ХНУРЕ, 2011.
22. Глоба Л.С. Математичні основи побудови інформаційно-телекомунікаційних систем: навч. посібник. – К.: Норіта-плюс, 2007.
23. Поповський В.В. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем: навч. посібник / за заг. ред. В.В. Поповського. – Харьков: «Компанія Смит», 2006.
24. Семенов Ю.В. Проектирование сетей связи следующего поколения. – СПб.: Наука и техника, 2005.
25. Вишневский В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. – М.: Техносфера, 2003.
26. Назаров А.Н. Модели и методы расчета структурно-сетевых параметров АТМ сетей. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002.

Автоматизация проектирования систем

27. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования: учебник. – М.: МГТУ, 2002.
28. Норенков И.П. Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем. – М.: Высшая школа, 1986.
29. Энкарачо Ж., Шлехтендаль Э. Автоматизированное проектирование. Основные понятия и архитектура систем. – М.: Радио и связь, 1986.
30. Вермишев Ю.Х. Методы автоматического поиска решений при проектировании сложных технических систем. – М.: Радио и связь, 1982.
31. Ильин В.Н. Автоматизация схемотехнического проектирования – М.: Радио и связь, 1987.
32. Вязгин В.А., Федоров В.В. Математические методы автоматизированного проектирования: учебное пособие. – М.: Высшая школа, 1989.

33. Петренко А.И. Основы построения систем автоматизированного проектирования: учебник. – К.: Вища школа, 1986.
34. Колодицкий Е.А. Элементы теории САПР сложных систем. – Житомир: ЖТІ, 1999.
35. Норенков И.П. САПР. Принципы построения и структура: учебное пособие. – М.: Высшая школа, 1986.
36. Автоматизация схемотехнического проектирования: учебное пособие/ Под ред В.Н. Ильина. – М: Радио и связь, 1987.
37. Норенков И.П. Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем: Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 1986.
38. Захарченко М.В., Стеклов В.К., Князева Н.О. Автоматизація проектування пристроїв, систем та мереж зв'язку: підручник. – К.: Радіоаматор, 1996.
39. Дмитриев А.Н., Екупов Н.Д., Шестопапов А.М., Моисеев Ю.Г. Машинные методы расчета и проектирования систем электросвязи и управления. – М.: Радио и связь, 1990.
40. Винницкий В.П., Хиленко В.В. Методы системного анализа и автоматизация проектирования телекоммуникационных сетей. – К.: Интерлинк, 2002.
41. Алексеев О.В., Головкин А.А., Пивоваров И.Ю. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств: учебное пособие. – М.: Высшая школа, 2000.
42. Рыбкин В.С., Кобзар Ю.В., Демин В.К. Автоматизация проектирования систем управления систем связи. – М.: Радио и связь, 1990.
43. Норенков И.П. Системы автоматизированного проектирования в радиоэлектронике: Справочник. – М: Радио и связь, 1986.
44. Дмитриев А.Н., Екупов Н.Д., Шестопапов А.М., Моисеев Ю.Г. Машинные методы расчета и проектирования систем электросвязи и управления. – М.: Радио и связь, 1990.
45. Тимченко А.А. Основы системного проектування та системного аналізу складних об'єктів. – К.: Либідь, 2003.
46. Винницкий В.П., Хиленко В.В. Методы системного анализа и автоматизации проектирования телекоммуникационных сетей. – К.: Интерлинк, 2002.
47. Дмитриев А.Н., Екупов Н.Д., Шестопапов А.М., Моисеев Ю.Г. Дмитриев А.Н. Машинные методы расчета и проектирования систем электросвязи и управления. – М.: Радио и связь, 1990.

48. Безрук В.М. Автоматизация проектирования систем связи: Конспект лекций. – Харьков: ХНУРЕ, 2002.

Оптимизация систем

49. Кини Р.Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях. Предпочтения и замещения. – М.: Радио и связь, 1981.

50. Бейко И.В., Бублик Б.Н., Зинько П.Н. Методы и алгоритмы решения задач оптимизации. Справочное пособие. – К.: Вища школа, 1983.

51. Ногин В.Д., Протодьяконов И.О., Евлампиев И.И. Основы теории оптимизации: учебное пособие. – М.: Высшая школа, 1986.

52. Березовский Б.А., Барышников Ю.М., Борзенко В.И., Кепнер Л.М. Многокритериальная оптимизация. Математические аспекты. – М.: Наука, 1986.

53. Морозов В.В., А.Г. Сухарев, В.В. Федоров В.В. Исследование операций в задачах и упражнениях: учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 1986.

54. Сухарев А.Г., Сухарев, В.В. Федоров В.В. Курс методов оптимизации: учеб. пособие. – М.: Наука, 1986.

55. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. – М.: Наука, 1982.

56. Дубов Ю.А., Травкин С.И., Якимей В.Н. Многокритериальные модели модели формирования и выбора вариантов систем. – М.: Наука, 1986.

57. Назаров А.В., Лоскутов А.И. Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем. – СПб.: Наука и техника, 2003.

58. Вентцель Е.С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология: учеб. пособие. – М.: Наука, 2001.

59. Поляк Б.Т. Введение в оптимизацию. – М.: Наука, 1983.

60. Ашмалов А.Л., Тихонов В.А. Теория оптимизации в задачах и упражнениях. – М.: Наука, 1991.

61. Зайченко Ю.П. Дослідження операцій: підручник. – К.: Видавничий дім «Слово», 2006.

62. Ларіонов Ю.І., Левикін В.М., Хажмурадов М.А. Дослідження операцій в інформаційних системах: навч. посібник. – Харків: Компанія СМІТ, 2005.

63. Стеклов В.К., Беркман Л.Н. Оптимизация та моделювання пристроїв і систем зв'язку: підручник. – К.: Техніка, 2004.

64. Лямец В.И., Тевяшев А.Д. Системный анализ: учеб. пособие. – Харьков: ХНУРЭ, 2004.

65. Черноруцкий И.Г. Методы оптимизации в теории управления: учеб. пособие. – СПб.: Нитев, 2004.
66. Захарченко М.В., Горохов С.М., Балан М.М., Гаджиев М.М., Корчинский В.В., Ложковский А.Г. Математичні основи оптимізації телекомунікаційних систем: підручник. – Одеса: ОНАЗ, 2010.
67. Перепелица В.А. Многокритериальные задачи теории графов. Алгоритмический подход. – Киев: УМК ВО, 1989.
68. Пашкеев С.Д., Минизов Р.И., Могилевская В.Д. Машинные методы оптимизации в технике связи. – М.: Связь, 1976.
69. Безрук В.М. Векторна оптимізація та статистичне моделювання в автоматизованому проектуванні систем зв'язку – Харків: ХНУРЕ, 2002.
70. Чеботарёва Д.В., Безрук В.М. Многокритериальная оптимизация проектных решений при планировании сотовых сетей мобильной связи: монография. – Харьков: Компания СМІТ, 2013.
71. Безрук В.М., Чеботарёва Д.В., Скорик Ю.В. Многокритериальный анализ и выбор средств телекоммуникаций: монография. – Харьков: Компания СМІТ, 2017.

Моделювання систем

72. Советов В.Я. Моделирование систем: учебное пособие. – М.: Высшая школа, 1988.
73. Максимей И.В. Имитационное моделирование на ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1988.
74. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1978.
75. Кузьмин И.В. Основы моделирования сложных систем: учебное пособие. – К.: Вища школа, 1981.
76. Рыжиков Ю.И. Иммитационное моделирование. Теория и технологии. – СПб.: Корона, 2004.
77. Ионнин Г.Л., Седол Я.Я. Статистическое моделирование систем телетрафика. – М.: Радио и связь, 1982.
78. Полляк Ю.Г., Филимонов В.А. Статистическое моделирование средств связи. – М.: Радио и связь, 1988.
79. Борисов Ю.П., Цветков В.В. Математическое моделирование радиотехнических систем и устройств. – М.: Радио и связь, 1985.
80. Бененсон Э.М. и др. Моделирование и оптимизация на ЭВМ радиоэлектронных устройств. – М.: Радио и связь, 1988.

81. Стеклов В.К., Беркман Л.Н. Оптимізація та моделювання пристроїв і систем зв'язку: підручник. – К.: Техніка, 2004.

82. Олійник В.Ф. Основи теорії систем зв'язку: Математичні моделі телекомунікаційних систем. – К.: Техніка, 2000.

83 Омельченко В.А., Безрук В.М., Драган Я.П. та інші. Імовірнісні моделі випадкових сигналів та полів у прикладах і задачах: навчальний посібник. – К.: ІСДО, 1996.

84. Безрук В.М., Буханько О.М., Чеботарьова Д.В. Оптимізація та математичне моделювання мереж зв'язку: навчальний посібник.– Харків: Компанія СМІТ, 2014.

Програмні засоби моделювання та оптимізації систем

85. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM. Программа Electronics Workbench и ее применение. – М.: Солон-Р, 1999.

86. Разевиг В.Д. Система сквозного проектирования электронных устройств DesignLab 8.0. – М.: Солон, 1999.

87. Разевиг В.Д. Система схемотехнического моделирования и проектирования печатных плат Design Center (Pspice). – М.: Солон, 1996.

88. Разевиг В.Д. Система схемотехнического моделирования MICRO-CAP V. – М.: Солон, 1997.

89. Рудаков П.И., Сафонов И.В. Обработка сигналов и изображений. MATLAB 5.x. – М.: ДИАЛОГ–МИФИ, 2000.

90. Дьяконов В.И. MATLAB. Электронная лаборатория. – СПб.: Питер, 2001.

91. Шрайбер Т.Д. Моделирование на GPSS. – М.: Машиностроение, 1980.

92. Разевиг В.Д. Система схемотехнического моделирования MICRO-CAPV. – М.: Солон, 1997.

93. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM. Программа ElectronicsWorkbench и ее применение. – М.: Солон-Р, 1999.

94. Разевиг В.Д. Система сквозного проектирования электронных устройств DesignLab 8.0. – М.: Солон, 1999.

95. Рудаков П.И., Сафонов И.В. Обработка сигналов и изображений. MATLAB 5.x. – М.: ДИАЛОГ–МИФИ, 2000.

96. Дьяконов В.П. Компьютерная математика. Теория и практика. – М.: Нолидж, 2000.

97. Дьяконов В.П. Mathcad 2001. Учебный курс. – СПб.:ПИТЕР, 2001.

98. Дьяконов В.И. MATLAB. Электронная лаборатория. – СПб.: Питер, 2001.
99. Дьяконов В.И. MATHCAD. Справочное пособие. – СПб.: Питер, 2001. 100.
100. Дьяконов В.П. MATLAB 6. Учебный курс. – СПб.:ПИТЕР, 2001.
101. Дьяконов В.П. MATLAB 6+ Simulink 5. Основы применения. Полное руководство пользователя. – М.: СОЛОН-Пресс, 2002.
102. Дьяконов В.П., Круглов В.В. MATLAB Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник. – СПб.: ПИТЕР, 2002.
103. Семишен Ю.А. Литвинова О.В. ДАСИМ как инструментальное средство моделирования дискретных систем // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.– 2000. – № 2–3. – С. 22–26.

Схемотехнічне моделювання

104. Петрова О.О. Моделирование схем в программной среде Electronic Workbench: навч. посібник. – Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2018. 128 с.
105. Скрипаль А.В., Усанов Д.А. Руководство к практическим занятиям по автоматизированному проектированию аналого-цифровых схем: учебное пособие. – Саратов: Изд-во гос. ун-та, 2005.
106. Чернышов Н.Г., Чернышова Т.И. Моделирование и анализ схем в Electronics Workbench: учеб.-метод. пособие. – Тамбов: Изд-во гос. техн. ун-та, 2005.
107. Карлацук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronics WorkBench и ее применение. – М.: Солон-Пресс, 2009.
108. Корольков В.И., Андреев В.В. Программные и аппаратные средства современной схемотехники и программирование микроконтроллеров: учеб. пособие. – М.: РУДН, 2008.
109. Шестеркин А.Н. Система моделирования и исследования радиоэлектронных устройств Multisim 10. – М.: ДМК Пресс, 2012.
110. NI Multisim™ User Manual NI Multisim User Manual May 2008.
111. Кузовкин В.А., Филатов В.В. Моделирование электрических и электронных устройств в Multisim 10: учеб. пособие. – М.: ГОУ ВПО МГТУ «Станкин», 2010.
112. Хернитер Марк Е. X39 Multisim® 7: Современная система компьютерного моделирования и анализа схем электронных устройств. – М.: Издательский дом ДМКпресс, 2006.

Візуальне моделювання динамічних систем

113. Бурьков Д.В. Mathcad, Matlab, Mathlab Simulink, Scilab в электротехнике. учебное пособие. – Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2021.

114. Бурьков Д.В., Полуянович Н.К. Применение IT технологий в электроэнергетике: MATHCAD, MATLAB, (SIMULINK), NI MULTUSIM учебное пособие. – Таганрог: Издательство Южного федерального университета. 2018.

115. Дьяконов, В.П. MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров. – М.: ДМК Пресс, 2011.

116. Дьяконов В.П. MATLAB. Полный самоучитель. – М.: ДМК Пресс, 2012.

117. Солонина А.И., Арбузов С.М. Цифровая обработка сигналов. Моделирование в MATLAB. – СПб.: БХВ–Петербург, 2008.

118. Разработка имитационных моделей в среде MATLAB: Р17 Методические указания для студентов специальностей 01719, 351400 / Составитель А.М. Наместников. – Ульяновск, УлГТУ, 2004.

119. Голубева Л.Л., Малевич А.Э., Щеглова Н.Л. Компьютерная математика. Пакет имитационного моделирования Simulink: лаб. практикум. – Минск : БГУ, 2010.

Симулятор CISCO PACKET TRACER

120. Кулаков В.Г., Леохин Ю.Л. Моделирование компьютерных сетей в симуляторе СРТ . учебное пособие. – М. Изд-во МТИ, 2016.

121. Минин В.Е., Измайлов К.Ф. Cisco Packet Tracer Учебно-методическое пособие по выполнению практических работ по дисциплине «Сетевые технологии». – Гомель, 2016.

122. Ситников С.Ю., Ситников Ю.К., Мухутдинов Э.А. Информационные системы и сети. Ч. 1. Основы компьютерных сетей: лабораторный практикум. Казань: Изд-во Казан. гос. энерг. Ун-та, 2017.

123. Белоусова Е.С. Основы построения локальных сетей. Лабораторный практикум. учебное пособие. – Минск. БГУИР 2020.

124. Егоров А.Н. и др. Моделирование компьютерных сетей: учебно-методическое пособие – СПб.: Изд-во ГУМРФ, 2015.

125. Абрамов Г.В., Колбая К.Ч., Сумина Р.С. Ряполов М.П., Телков А.Ю. Основы работы в программе Cisco Packet Tracer. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2017.

126. Минин В.Е., Измайлов К.Ф. Cisco Packet Tracer: учебно-методическое пособие по выполнению практических работ по дисциплине «Сетевые технологии». – Гомель 2016.

127. Бейцун С.В., Кулинич М.В. Моделирование компьютерных сетей: учебное пособие. – Днепропетровск: НМетАУ, 2016.

Електронне навчальне видання

БЕЗРУК Валерій Михайлович
РАПІН Володимир Васильович

**ОСНОВИ КОМП'ЮТЕРНОГО
МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОЄКТУВАННЯ
ЗАСОБІВ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ І РАДІОТЕХНІКИ**

Навчальний посібник

Електронне видання

Відповідальний випусковий В.М. Безрук
Редактор Б.П. Косіковська
Комп'ютерна верстка Л.Ю. Светайло

План 2023 (друге півріччя), поз. 60

Підп. до використання 06.07.2023

Формат pdf.

Обсяг даних 9,26 Мб

ХНУРЕ. Україна. 61166, Харків, просп. Науки, 14, E-mail: info@nure.ua

Підготовлено в редакційно-видавничому відділі ХНУРЕ
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №1409 від 26.06.2003