



Міністерство освіти і науки України

**ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

**Факультет енергетики, робототехніки та
комп'ютерних технологій**

**Кафедра електромеханіки, робототехніки, біомедичної
інженерії та електротехніки**

Методи та засоби автоматизації схемотехнічного проектування

Конспект лекцій

**для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та
(заочної) форми навчання, спеціальності
163 «Біомедична інженерія»**

**Харків
2024**

Міністерство освіти і науки України
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет енергетики, робототехніки та комп'ютерних технологій
Кафедра електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії та
електротехніки

Методи та засоби автоматизації схемотехнічного проектування

Конспект лекцій

для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та (заочної)
форми навчання, спеціальності
163 «Біомедична інженерія»

ЗАТВЕРДЖЕНО
рішенням Науково-методичної
ради ФЕРКТ ДБТУ
Протокол №1 від 31 жовтня 2023 р.

Харків
2024

УДК 615.37+57.08

Схвалено на засіданні кафедри ЕРБМІЕ
Протокол №2 від 31 вересня 2023 р.

Методи та засоби автоматизації схемотехнічного проектування: Конспект лекцій [Текст] здобувачами першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної (заочної) форми навч., спец. 163 «Біомедична інженерія» / Державний біотехнологічний університет; уклад.: Н. Г. Косуліна, М. О. Чорна, В. В. Сухін. – Харків: [б. в.], 2024. – 21 с.

Конспект лекцій з дисципліни «Методи та засоби автоматизації схемотехнічного проектування» розроблено відповідно до навчальної програми.

Видання призначене здобувачам першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та (заочної) форми навчання, спеціальності 163 «Біомедична інженерія».

Відповідальний за випуск: М. О. Чорна, доцент.

© Н.Г. Косуліна, 2024

© М.О. Чорна, 2024

© В.В. Сухін, 2024

© ДБТУ, 2024

Зміст

1. Мета та завдання роботи	4
2. Перелік обладнання та приладів, необхідних для досягнення запланованого результату	4
3. Короткий теоретичний коментар	4
4. Алгоритм виконання лабораторної роботи	18
5. Структурні елементи звіту	20
6. Порядок захисту лабораторної роботи	20
7. Контрольні питання	20
Список використаної літератури	21
Рекомендована література.....	21

1. Огляд сучасних систем автоматизованого проектування

У сучасному виробництві широке поширення одержали системи автоматизованого проектування (САПР, computer aided design), які дозволяють проектувати технологічні процеси з меншими витратами часу та засобів, зі збільшенням точності спроектованих процесів і програм обробки, що скорочує витрати матеріалів та час обробки, завдяки тому, що режими обробки також розраховуються та оптимізуються за допомогою ПК.

Технічне забезпечення САПР засновано на використанні обчислювальних мереж і телекомунікаційних технологій, персональних комп'ютерів та робочих станцій.

Математичне забезпечення САПР характеризується різноманітністю методів обчислювальної математики, статистики, математичного програмування, дискретної математики, штучного інтелекту. Програмні комплекси САПР відносяться до числа найбільш складних сучасних програмних систем, заснованих на операційних системах Unix, Windows, мовах програмування C, C++, Java і інших, сучасних CASE технологіях, реляційних і об'єктно-орієнтованих системах керування базами даних (СКБД), стандартах відкритих систем і обміну даними в комп'ютерних середовищах.

Проектування, при якому всі проектні рішення або їхня частина одержують шляхом взаємодії людини та ПК, називають автоматизованими на відміну від ручного (без використання ПК) або автоматичного (без участі людини на проміжних етапах). Система, що реалізує автоматизоване проектування, являє собою систему автоматизованого проектування (в англійському написанні CAD System – Computer Aided Design System). САПР (або CAD) звичайно використовуються разом із системами автоматизації інженерних розрахунків і аналізу CAE (Computer-Aided engineering). Дані із CAD- систем передаються в CAM (Computer-Aided manufacturing) – систему автоматизованої розробки програм обробки деталей для верстатів.

CAE – автоматизоване конструювання, використання спеціального програмного забезпечення для проведення інженерного аналізу міцності та інших технічних характеристик компонентів, виконаних у системах автоматизованого проектування. Програми автоматизованого конструювання дозволяють здійснювати динамічне моделювання, перевірку та оптимізацію виробів і засобів їхнього виробництва.

CAM – автоматизоване виробництво. Термін використовується для позначення програмного забезпечення, основною метою якого є створення програм для керування верстатами зі ЧПК (числове програмне керування). Вхідними даними САМ- системи є геометрична модель виробу, розроблена в системі автоматизованого проектування. У процесі інтерактивної роботи із тривимірною моделлю в САМ системі інженер визначає траєкторії руху різального інструменту по заготівлі виробу, які потім автоматично верифікуються, візуалізуються (для візуальної перевірки коректності) і обробляються постпроцесором для одержання програми керування конкретним верстатом.

Структура САПР. САПР складається з проектуючої і обслуговуючої підсистем. Проектуючі підсистеми безпосередньо виконують проектні процедури. Прикладами проектуючих підсистем можуть слугувати підсистеми геометричного тривимірного моделювання механічних об'єктів, виготовлення конструкторської документації, схемотехнічного аналізу, трасування з'єднань у друкованих платах.

Обслуговуючі підсистеми забезпечують функціонування проектуючих підсистем, їхню сукупність часто називають системним середовищем (або оболонкою) САПР. Типовими обслуговуючими підсистемами є підсистеми керування проектними даними (PDM – Product Data Management), керування процесом проектування (DesPM – Design Process Management), користувацького інтерфейсу для зв'язку розробників з ПК, CASE (Computer Aided Software Engineering) для розробки та супроводу програмного забезпечення САПР, навчальні підсистеми для освоєння користувачами технологій, реалізованих у САПР.

На сьогодні створено велику кількість програмно-методичних комплексів для САПР із різним ступенем спеціалізації й прикладною орієнтацією. У результаті автоматизація проектування стала необхідною складовою частиною підготовки інженерів різних спеціальностей; інженер, що не володіє знаннями та не вміє працювати в САПР, не може вважатися повноцінним фахівцем.

Огляд найбільш поширених САПР світових виробників.

AutoCAD – найвідоміший із продуктів компанії Autodesk, універсальна система автоматизованого проектування, що поєднує у собі функції двовимірного креслення й тривимірного моделювання. З'явився в 1982 році і був однією з перших САПР, розроблених для РС. Швидко завоював популярність серед проектувальників, інженерів і конструкторів різних галузей промисловості завдяки демократичним цінам.

AutoCAD прискорює щоденну роботу зі створення креслень і підвищує швидкість і точність їхнього виконання. Середовище концептуального проектування забезпечує легке й інтуїтивне створення і редагування твердих тіл і поверхонь. AutoCAD дозволяє легко й швидко створювати на основі моделі розрізи й проекції, ефективно формувати комплекти креслень і керувати ними: групувати їх по розділах проекту та інших логічних категорій, створювати переліки аркушів, керувати видами креслень, архівувати комплекти проектної документації та організовувати спільну роботу фахівців. Наявні в AutoCAD засоби візуалізації, такі як анімація й реалістичне тонування, допомагають виявити будь-які вади на ранніх етапах проектування.

Формат DWG, що використовується в AutoCAD є стандартом серед проектувальників різних галузей промисловості, крім того, є можливість експорту й імпорту інших розповсюджених файлових форматів, таких як pdf, що дозволяє ефективно організувати обмін даними між фахівцями.

Програма постійно розвивається, серед можливостей, що з'явилися в нещодавно, можна назвати параметричні взаємозв'язки між об'єктами, створення та редагування об'єктів довільної форми тощо. Існують спеціалізовані галузеві різновиди AutoCAD для архітектури, дорожнього

будівництва та землепорядження, електротехніки, машинобудування тощо. Для фахівців, яким не потрібні функції роботи з 3D графікою, існує полегшена версія AutoCAD, призначена для створення двовимірних креслень – AutoCAD LT.

Рішення Autodesk для промислового виробництва й машинобудування засновані на технології цифрових прототипів, тобто надають конструкторам, інженерам, дизайнерам і технологам можливість повністю досліджувати виріб ще на етапі проектування. За допомогою даної технології виробники створюють цифрові моделі та проекти, конструюють, перевіряють, оптимізують і керують ними на всіх етапах – від ідеї до реального втілення

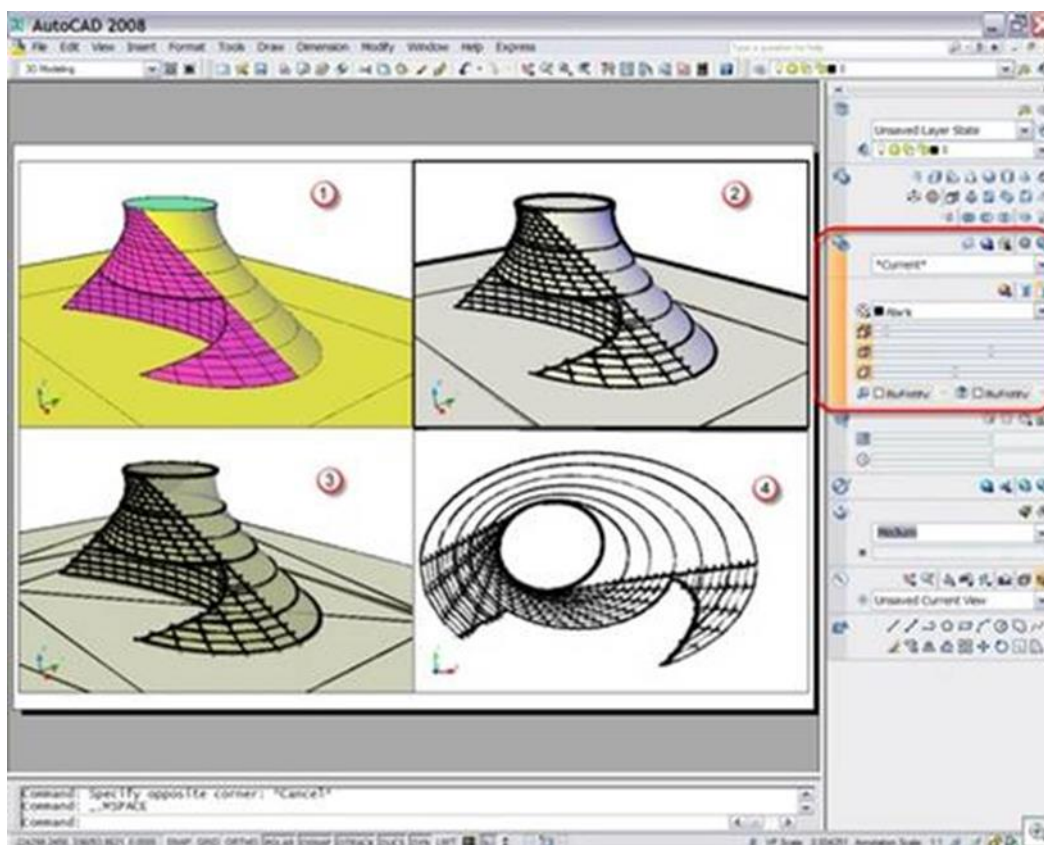


Рисунок 1.1 – Інтерфейс AutoCAD з прикладом 3D моделювання

AutoCAD Mechanical – продукт на платформі AutoCAD для промислового виробництва, що є частиною технології цифрових прототипів Autodesk. Він допомагає прискорити процес проектування, дозволяючи в той же час використовувати досвід і проекти, накопичені при роботі в AutoCAD. Маючи у своєму складі бібліотеки ДСТУ, стандартних деталей і функції

автоматизації типових завдань, він забезпечує значний вигаш у продуктивності при проектуванні.

AutoCAD Electrical – це AutoCAD для проектування електричних систем керування, що є важливою частиною технології цифрових прототипів Autodesk і що дозволяє працювати швидко, якісно й зі значно меншими витратами в знайомому середовищу проектування. Спеціалізовані функції й великі бібліотеки умовних позначень дозволяють підвищити продуктивність, усунути ризик виникнення помилок і забезпечити точність інформації, переданої у виробництво.

AutoCAD Inventor Suite являє собою збалансований набір рішень Autodesk для проектування та конструювання в промисловому виробництві. Рішення сполучають у собі інтуїтивне середовище 3D моделювання деталей і виробів з інструментами, дозволяють конструкторам зосередитися на функціональних вимогах до проекту. Ці інструменти містять у собі автоматичне створення інтелектуальних компонентів, таких як деталі із пластмаси, сталеві каркаси та обертові механізми.

CATIA – система автоматизованого проектування французької фірми Dassault Systems. CATIA V1 була анонсована в 1981 році. У даний момент у світі використовуються дві версії – V4 і V5, які значно відрізняються між собою. CATIA V4 була анонсована в 1993 році й створювалася для Unix-подібних операційних систем, CATIA V5 була анонсована в 1998 році, і це перша з версій, що може працювати під керуванням Microsoft Windows. По завіренню Dassault Systems, CATIA V5 була написана "з нуля" і втілила в собі передові технології САПР. Спочатку CATIA V5 не користувалася особливою популярністю на ринку і щоб стимулювати її використання Dassault Systems висунула концепцію PLM (Product Lifecycle Management). Ідея PLM виявилася вдалою і її підхопила майже вся індустрія САПР. У лютому 2008 року Dassault Systems анонсувала нову версію системи – CATIA V6. V6 буде підтримувати програми моделювання для всіх інженерних дисциплін і колективні бізнес- процеси протягом життєвого циклу виробу. Нова концепція фірми одержала назву "PLM 2.0 на платформі V6". Суть концепції – тривимірне моделювання і колективна робота в реальному часі. Для зв'язку

між людьми, що перебувають у різних точках світу, передбачені засоби простого підключення до Web. PLM 2.0 – це новий підхід, що відкриває можливість використовувати інтелектуальні результати онлайн-взаємозв'язку. Кожний користувач може придумувати, розробляти продукти та обмінюватися інформацією на універсальній 3D-мові. Користувачі зможуть у наочній формі оперувати одночасно віртуальними та реальними об'єктами.

Pro/Engineer – CAD система високого рівня. Містить у собі всі необхідні модулі для твердотілого моделювання деталей і створення креслярської документації. Має убудовані можливості для проектування зварених конструкцій.

SolidWorks – продукт компанії SolidWorks Corporation, система автоматизованого проектування у трьох вимірах, працює під керуванням Microsoft Windows. Розроблена як альтернатива для двовірних програм САПР. Придбала популярність завдяки простому інтерфейсу. Основний продукт SolidWorks включає інструменти для тривимірного моделювання, створення креслень, роботи з листовим металом, звареними конструкціями і поверхнями довільної форми. Є можливість імпортування великої кількості файлів 2D і 3D CAD програм. Є API для програмування в середовищі Visual Basic і C. Також включена програма для аналізу методом кінцевих елементів початкового рівня CosmosXpress.

ADEM (Automated Design Engineering Manufacturing) – інтегрована CAD/CAM/CAPP-система, призначена для автоматизації конструкторсько-технологічної підготовки виробництва (КТПП). ADEM був створений як єдиний продукт, що включає в себе інструментарій для проєктантів і конструкторів (CAD), технологів (CAPP - Computer-Aided Process Planning) і програмістів ЧПК. Тому він містить декілька різних предметно-орієнтованих САПР під єдиною логікою керування і на єдиній інформаційній базі. ADEM дозволяє автоматизувати наступні види робіт:

3D і 2D моделювання та проектування; оформлення проектно-конструкторської й технологічної документації; проектування технологічних процесів; аналіз технологічності й нормування проекту; програмування

устаткування. ADEM застосовується у різних галузях: авіаційній, атомній, аерокосмічній, машинобудівній, металургійній, верстатобудівній та інших.

bCAD – 2- і 3- вимірна система автоматизованого проектування, розроблена компанією "ПРОПРО Група". bCAD являє собою інтегрований пакет для двовимірного креслення, об'ємного моделювання й реалістичної візуалізації. Система одержала широке поширення в меблевому виробництві та дизайні інтер'єрів. Незважаючи на досить розвинені засоби проектування, у промисловості практично не застосовується.

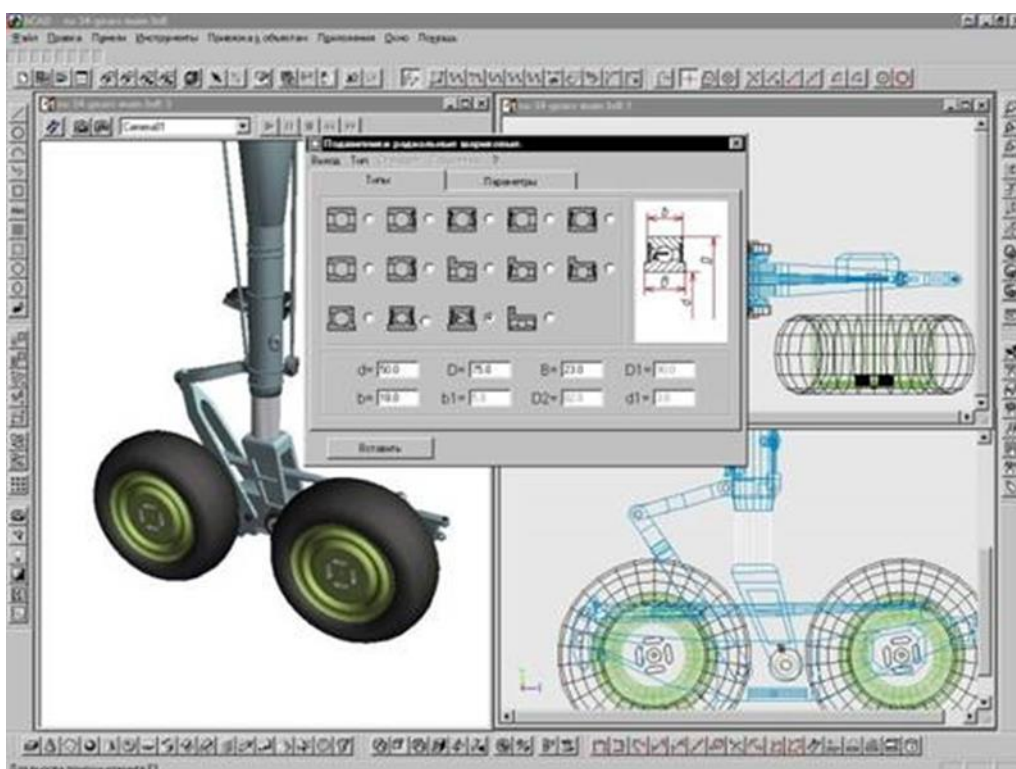


Рисунок 1.2 – Інтерфейс bCAD з прикладом 3D моделювання

T-FLEX CAD – система автоматизованого проектування, розроблена компанією "Топ Системи" з можливостями параметричного моделювання і наявністю засобів оформлення конструкторської документації відповідно до стандартів серії ЕСКД (Єдина система конструкторської документації). T-FLEX CAD є ядром комплексу T-FLEX CAD/CAM/CAE/CAPP/PDM – набору засобів для рішення завдань технічної підготовки виробництва в різних галузях промисловості. Комплекс поєднує системи для конструкторського і технологічного проектування, модулі підготовки керуючих програм для

верстатів та інженерних розрахунків. Всі програми комплексу функціонують на єдиній інформаційній платформі системи технічного документообігу і ведення складу виробів.

КОМПАС – система автоматизованого проектування, розроблена компанією "АСКОН" з можливостями оформлення проектної й конструкторської документації відповідно до стандартів серії ЕСКД і СПДБ (Система проектної документації для будівництва). Існує у двох версіях: Компас-Графік і КОМПАС-3D, відповідно призначених для плоского креслення і тривимірного проектування.

MechaniCS – додаток до AutoCAD або Autodesk Inventor, призначене для оформлення креслень відповідно до ЕСКД, проектування систем гідропневмоелементів, зубчастих зачеплень, валів, інженерного аналізу, розрахунку розмірних ланцюгів, створення користувальницьких бібліотек. MechaniCS забезпечує фахівця всім необхідним для проектування машинобудівних об'єктів: більш ніж 1500 стандартами (включаючи ДСТУ, ОСТ, ДІ і ISO) і уніфікованими компонентами, можливістю створювати власні інтелектуальні об'єкти, виконувати інженерні розрахунки з відображенням результатів на моделі, оформляти проекції креслень по ЕСКД і багато іншого. MechaniCS дає конструкторові можливість застосовувати не тільки геометричні параметри стандартних елементів, але і їхні механічні властивості. На об'єкти в складальних кресленнях (при використанні AutoCAD) можна накладати геометричні і параметричні залежності, використовувати попередньо встановлені залежності при їхньому розміщенні на кресленні.

Контрольні запитання та завдання

1. Що таке модель? В чому суть процесу моделювання?
2. При моделюванні об'єкт відображується у моделі. А чи існує зворотне відображення?
3. Як визначається адекватність моделі, чим вона характеризується?
4. Перечисліть причини можливої неадекватності моделей?

5. Як ви розумієте вираз «модель адекватна реальному процесу»?
6. Дайте означення основних характеристик точності моделі?
7. Що таке обчислювальний експеримент Як він реалізується
8. Наведіть приклади типових задач обчислювальної математики. Класифікуйте їх за видом математичного апарату та за фізичною сутністю. Покажіть застосування цих методів для розв'язання прикладних задач автоматизації та управління.
9. Що є джерелами похибок моделювання?
10. Чим відрізняються локальна та глобальна похибки
11. Якими якісними показниками характеризується модель?
12. З якої послідовності етапів складається процес побудови математичної моделі?
13. Якими можуть бути види вхідних параметрів математичної моделі? Приведіть приклади.
14. Дайте означення гомеоморфізму і ізоморфізму.
15. Для вирішення яких задач може бути використана математична модель?
16. Що розуміють під поняттям коректна модель? Які умови повинна задовольняти коректна модель?
17. Який вид моделей є ізоморфним оригіналу?
18. В чому полягає принципова різниця між аналітичними та імітаційними моделями?
19. Інструменти імітаційного моделювання, призначення та класифікація. Сучасні тенденції в імітаційному моделюванні.

2. Поняття системи автоматизованого проектування (САПР)

Будь-яке проектування є комплексом заходів, метою яких є отримання опису предмету проектування, який необхідний та достатній для того, щоб створити якийсь новий виріб, або реалізувати якийсь новий процес. В процесі проектування є багато складових, які починаються з ідеї, яку обмірковує людина, крізь рішення задач, які пов'язують ідею з її реалізацією, до

представлення цієї ідеї у вигляді сформованих стандартизованих елементів опису, зрозумілих широкому колу фахівців, здатних на основі цих описів відтворити ідею у вигляді матеріального виробу або процесу, які максимально відповідають ідеї розробника (винахідника).

Науковий пошук досліджує об'єкти, явища, процеси, спрямовуючи результат до знаходження їхньої сутності. Проектування – обернений процес, який дозволяє спрямувати знання узагальненої сутності об'єктів, явищ, процесів (у вигляді закономірностей) до створення відповідних об'єктів, явищ, процесів, які відповідають за характеристиками конкретних властивостей початковому завданню (граничним умовам проектування).

Основою проектування є технічне завдання – сукупність початкових відомостей про майбутній об'єкт (явище, процес), які дозволяють виокремити даний об'єкт з сукупності йому подібних на основі даних про його майбутні властивості. Технічне завдання може генеруватись як людиною, так і автоматизовано, технічними засобами (на основі обробки ряду вхідних даних). В залежності від деталізації граничних умов технічного завдання кінцевий результат може відрізнятись від початкової ідеї. Так, наприклад, при виготовленні деталі на токарному верстаті робітник отримує завдання, в якому містяться значення діаметру, який необхідно одержати в результаті обробки заготовки, а також допуски – гранично допустимі відхилення результату від очікуваного.

Елементами технічного завдання є описи властивостей майбутнього об'єкту (явища, процесу), які подаються у вигляді загальновідомих понять, які можуть бути використані при вирішенні задачі взаємного узгодження між собою всіх цих властивостей. Такими властивостями можуть бути як статичні характеристики об'єктів (явищ), так і динамічні характеристики (процесів). Наприклад, геометричні розміри та параметри статичного розташування в просторі по відношенню до інших об'єктів, властивості матеріалів, з яких складається об'єкт, властивості оточуючого середовища тощо. Крім таких загальних характеристик, проектування в кожній конкретній галузі знань додає відповідних властивостей технічному завданню: наприклад, сила струму, напруженість магнітного поля, температура, тиск тощо. Серед динамічних характеристик можуть бути такі, які відповідають за змінюваність стану об'єкта (явища, процесу) в часі, зміну його просторових координат, геометричних розмірів (деформація), фізичних властивостей матеріалу та багато іншого.

Вирішення задачі взаємного узгодження всіх властивостей об'єкта (явища, процесу), які подані у технічному завданні є, як правило, дуже складною задачею. Для цього застосовується закони математики, які дозволяють поєднувати числові характеристики властивостей у вигляді рівнянь та систем рівнянь. Опис реального об'єкта (явища, процесу) у вигляді рівняння (системи рівнянь), що містить описані математичною мовою фізичні взаємозв'язки (закони) між числовими властивостями об'єкта (явища, процесу), називають математичною моделлю. Чим більше властивостей закладено в технічному завданні, тим більш близьким до реального буде числовий результат вирішення рівняння (системи рівнянь), які складають математичну модель об'єкта (явища, процесу). Однак, як відомо, додавання невідомих членів до рівняння (системи рівнянь) збільшує їх порядок і ускладнює процес вирішення. Саме тому для вирішення задач, пов'язаних з проектуванням складних об'єктів (явищ, процесів),

застосовують комп'ютери та програмне забезпечення, здатні прискорити таке вирішення задач з великою кількістю властивостей у технічному завданні. Загалом, процес проектування можна розкласти на кілька узагальнених етапів, властивих більшості процесів проектування. Серед них можна визначити наступні:

1. Передпроектний етап. На цьому етапі всебічно вивчається ідея, яка покладена в основу проектування, аналізуються потреби створення нового об'єкту (явища, процесу), наявність аналогів, їх переваги та недоліки, необхідні та наявні ресурси, наявні методи та можливості (технології) втілення ідеї в матеріалізованому об'єкті (явищі, процесі), організація праці тощо. Передпроектний етап, як правило, реалізується у вигляді науково-дослідної роботи (НДР), результатом якої має бути обґрунтування доцільності розробки. НДР поділяються на фундаментальні розробки (при виконанні яких отримують нові знання про природу та властивості досліджуваних об'єктів (явищ, процесів)) та прикладні розробки (під час яких, базуючись на фундаментальних знаннях, отримують інформацію про можливість матеріалізації (втілення) нових знань, отриманих при виконанні фундаментальних НДР). Цей етап проектування має надати відповідь, чи можливо та доцільно виконувати подальші етапи.

2. Етап ескізного проекту. Даний етап призначений для створення нових, більш досконалих математичних моделей на основі результатів виконання НДР. Даному етапу відповідають дослідно-конструкторські роботи (ДКР). Під час виконання ДКР перевіряються основні результати, одержані на попередньому етапі проектування та визначаються позитивні зміни у проєктованій продукції по відношенню до відомих зразків.

3. Етап технічного проекту. Даний етап призначений для всебічного аналізу властивостей проекту, визначаються та узгоджуються всі технічні деталі, їх взаємозв'язок, знаходять рішення, яке відповідає технічному завданню у всіх деталях.

4. Етап робочого проекту. На даному етапі створюється комплект документації, необхідний для створення об'єкта (процесу). Крім того, виконуються всі необхідні заходи щодо підготовки технологічного процесу до втілення проекту у виріб (технологію): за необхідності, модернізують обладнання, методи та засоби контролю якості, термінів виготовлення тощо.

5. Етап випробувань. Після виготовлення контрольного зразка виробу виконується всебічне тестування його властивостей при впливі на нього зовнішніх чинників. Такі випробування мають назву приймальних випробувань. Приймальні випробування надають інформацію щодо фактичної відповідності результатів очікуваним та технічному завданню. За необхідності, після проведення приймальних випробувань вносять певні зміни в проект, які дозволяють усунути виявлені недоліки або покращити одержані результати.

6. Етап дослідної експлуатації. На цьому етапі дослідні зразки проходять весь життєвий цикл виробу, всебічно аналізуються можливі відхилення властивостей виробу від проєктованих, за необхідності надаються рекомендації щодо уточнення технічних рішень.

7. Етап впровадження. На даному заключному етапі відбувається передавання всієї технічної інформації, одержаної на попередніх етапах проєктування на виробництво, здатне до серійного виробництва виробів. На цьому етапі готують всі необхідні документи, які дозволяють організувати весь життєвий цикл виробу – від сировини до серійного виробу, його реалізації (продажу), експлуатації (в тому числі, технічного обслуговування), утилізації, а також передбачають можливості модернізації виробу.

Як можна зрозуміти з короткого опису етапів проєктування, між ідеєю та готовим виробом у серійному виробництві є великий обсяг роботи, який дуже часто не під силу одній людині за її здібностями та обмеженням часу. Тому для створення складних та високотехнологічних виробів складають колективи розробників, які спільно виконують описані вище етапи проєктування у відповідних проєктних організаціях. Для прискорення

процесів проектування (в умовах ринкової конкуренції той, хто першим одержує серійне виробництво, захоплює більшу частину ринку та отримує найбільші доходи) крім збільшення колективів розробників використовують різні способи прискорення процесу проектування. Наприклад, намагаються використовувати в проектах якомога більше складових (деталей), які вже наявні в серійному виробництві (стандартизовані складові) та не потребують окремого проектування (нема потреби щоразу створювати конструкторську документацію на гайку, якщо вона стандартизована та виробляється серійно – достатньо в технічній документації позначити її у специфікації). Крім того, з появою у людства цифрових обчислювальних машин, з'явилась можливість пришвидшувати процеси знаходження технічних рішень за параметрами технічного завдання, а також автоматизувати процеси створення конструкторської документації. Насправді, стандартизація технічних рішень дозволяє розробникам використовувати такі рішення за аналогією блоків дитячого конструктора, отримуючи нові технічні рішення, які мають швидку здатність до реалізації у серійних виробках.

Системою автоматизованого проектування (САПР) називають комп'ютеризовану систему (апаратне забезпечення та програмне забезпечення), яке здатне автоматизувати повністю або частково будь-який з етапів проектування (або здатне автоматизувати проектування на всіх його етапах). Кінцевим результатом роботи САПР є комплект конструкторської документації (технічної інформації), що відповідає етапам проектування.

За своєю функціональністю САПР поділяються на кілька основних категорій:

1. САПР об'єктів (виробів). Такі САПР призначені для реалізації циклу підготовки об'єктів (виробів) до виробництва. До складу таких САПР входять модулі, призначені для створення та візуалізації тривимірних математичних моделей, оформлення відповідних креслень та текстової конструкторської документації. Англійська назва таких САПР – CAD

(Computer Aided Design), тобто, САПР, створені для дизайну (розробки) за допомогою комп'ютера. Загальновідомим прикладом такої САПР є програмний пакет AutoCAD.

2. САПР наукових досліджень. Такі САПР призначені для етапу науково-дослідних робіт, на якому досліджуються майбутні властивості розробки, її поведінка в змінюваних умовах тощо. Цей тип САПР є найбільш складним і найбільш затребуваним в проектуванні, оскільки виконує функції вирішення задач узгодження фізичних властивостей об'єктів (майбутніх виробів) шляхом вирішення систем математичних рівнянь, що описують геометричні та фізичні властивості об'єктів (виробів). Англійська назва таких САПР – CAE (Computer Aided Engineering), тобто, комп'ютеризовані системи інжинірингу, або інженерного аналізу. Найчастіше CAE-системи використовують тривимірні моделі, створені в CAD-системах, додаючи до геометричної моделі властивості матеріалів, фізичні властивості середовищ та граничні умови, необхідні для вирішення систем рівнянь математичної моделі об'єкта (виробу). Існують як мультифізичні CAE-системи, в яких можна досліджувати одну й ту саму геометричну тривимірну модель в математичних моделях різних фізичних законів (наприклад, ANSYS, COMSOL), так і вузькоспеціалізовані, розраховані на вирішення лише одного (або невеликої кількості) фізичних задач по відношенню до однієї геометричної моделі (наприклад, FEMM).

3. САПР технологічних процесів. Такі САПР призначені для розробки, створення та дослідження технологічних процесів. Для створення технологічного процесу виготовлення виробу використовують математичні моделі, одержані в інших типах САПР, або у відповідних модулях програмного пакету САПР, якщо вони присутні. Англійська назва таких САПР – CAPP (Computer Automated Process Planning), або комп'ютеризоване автоматизоване планування процесів. Відомим прикладом САПР, що містить модуль CAPP, є програмний пакет CATIA.

4. САПР автоматизації виготовлення. Такі САПР призначені для створення на основі математичних моделей тривимірних об'єктів (виробів) коду програмного керування для автоматизованого обладнання, призначеного для виготовлення виробів з заготовок (верстатів з числовим програмним керуванням (ЧПК)). Англійська назва таких САПР – САМ (Computer Aided Manufacturing), тобто, виготовлення за допомогою комп'ютера. З розповсюдженням технології 3D-друку такі системи (або модулі САПР) стають дуже затребуваними. САМ-системи базуються на тривимірних моделях, створених у САД-системах, тому, як правило, сучасні САД-системи містять САМ-модулі. Загальновідомим програмним пакетом, що реалізує САМ-модуль, є SolidWorks.

Крім зазначених категорій САПР також виділяють вузькоспеціалізовані САПР окремих галузей, наприклад, САПР схем технічного моделювання (MicroCap, QUCS), САПР архітектурного моделювання (ArchiCAD) тощо.

Системи автоматизованого проектування потребують значних обчислювальних потужностей, тому ряд програмних пакетів САПР дозволяє їх застосування як на персональних комп'ютерах, так і у мережесхемних об'єднаннях робочих станцій та серверів, на суперкомп'ютерах та в хмарних сервісах, що може значно підвищувати ефективність їх роботи і скорочувати час проектування.

Контрольні запитання

1. Що таке проектування?
2. Що називають технічним завданням?
3. Що називають математичною моделлю реального об'єкта (явища, процесу)?
4. З яких етапів складається процес проектування?
5. Якому етапу проектування відповідає науково-дослідна робота?
6. Якому етапу проектування відповідає дослідно-конструкторська робота?
7. Навіщо призначений етап випробувань виробу?

8. Дайте визначення терміну «система автоматизованого проектування».

9. Який тип САПР призначений для автоматизації процесів виготовлення виробу?

10. Який тип САПР призначений для автоматизації наукових досліджень?

3. Структура САПР

Стандартизованої структури САПР на даний момент не існує, оскільки видів САПР дуже багато, сфери їхнього застосування дуже різноманітні, крім того, існують САПР, які розробляються безпосередньо під вимоги замовника. При всій цій різноманітності, існують певні складові систем автоматизованого проектування, які притаманні середнім та складним САПР, що містять велику кількість модулів та призначені для вирішення широкого кола задач.

Надбудовою над всіма складовими САПР є організаційне забезпечення, що складається з різноманітних документів, що регламентують взаємодію людини або колективу з всім комплексом засобів САПР (положення, інструкції, накази, вимоги тощо).

Організаційне забезпечення містить інформацію про технічне забезпечення САПР, яке складається з персональних, серверних та інших засобів обчислювальної техніки, периферійних пристроїв (засоби зберігання інформації, засоби друку, засоби відображення, засоби сканування, засоби вводу інформації тощо), мережевого обладнання, що поєднує технічне забезпечення в єдиний комплекс.

Також дуже часто організаційне забезпечення містить відомості про інформаційне забезпечення – комплекс документів, шаблонів, типових процедур проектування, бібліотек стандартних матеріалів тощо, які можуть постачатись в комплекті САПР. Також, як і інші програмні пакети, САПР супроводжуються довідково-інформаційною документацією різного рівня детальності.

Розвинені САПР у складі організаційного забезпечення містять інформацію про лінгвістичне забезпечення САПР – вбудовані мови програмування, які дозволяють прискорювати проектування шляхом написання програмного (скриптового) коду, що автоматизує певні операції

роботи з графічним інтерфейсом або з функціоналом програмних модулів.

Доволі частою є ситуація, коли наданих розробником САПР інструментів недостатньо для вирішення якихось конкретних задач, або таке вирішення за допомогою наявних інструментів є громіздким та тривалим. Якщо такі ситуації не є типовими, розробнику САПР вигідніше надати користувачеві певні інструменти з удосконалення інструментів САПР, ніж щоразу перероблювати САПР для всіх користувачів та замовників.

Програмне забезпечення САПР – це сукупність модулів програмного коду, адаптованих для виконання на комплексі технічного забезпечення САПР, які містять всі необхідні функції забезпечення необхідних обчислень та обробки інформації у відповідності до закладених в програмний код алгоритмів. Доволі часто програмне забезпечення є апаратно залежним для потужних САПР, проте, розробники завжди намагаються закласти у розроблювані САПР апаратну підтримку для більшості популярних апаратних платформ та операційних систем.

Математичне забезпечення САПР – це сукупність алгоритмів розв'язання математичних задач, які поєднують вхідні та вихідні дані відповідним рішенням. Математичне забезпечення поділяється на більш універсальне (наприклад, алгоритми розв'язання систем рівнянь) та спеціалізоване, розраховане на вирішення конкретних задач.

Методичне забезпечення САПР – це комплекс документації, що може описувати побудову модулів САПР, яким чином застосовується математичне забезпечення для вирішення тих чи інших задач, яким чином взаємодіють модулі між собою, тобто, містить методикку вирішення типових задач, які можуть бути оброблені в даній САПР.

Комплекс всього забезпечення САПР створює робоче середовище (*workbench*), що є посередником між людиною (колективом людей) та процесом проектування. Завдяки робочому середовищу (робочому простору) розробник отримує всі необхідні для автоматизації проектування інструменти та можливості, які можуть бути розширені (якщо це

передбачено розробниками САПР) приєднанням до робочого простору додаткових модулів. Модульна структура програмного та апаратного (технічного) забезпечення вже давно є фактичним стандартом для САПР високого рівня, розробники постійно удосконалюють інструменти та намагаються зменшити трудомісткість процесу проектування за участі людини, переводячи, де це можливо, автоматизоване проектування в автоматичне, яке не потребує участі людини.

Робочі простори бувають розрахованими на одного користувача, або на кількох користувачів (команду розробників). В САПР, розрахованих на команду розробників, обов'язково присутній апаратно-програмний серверний комплекс, який забезпечує взаємодію між користувачами, розподіл їхніх повноважень, можливостей, доступу до складових проекту, централізоване збереження файлів даних проекту, централізоване оновлення модулів та інші операції.

Основний спосіб використання робочого простору – створення математичної моделі реального об'єкта (процесу), її модифікація, дослідження властивостей у відповідності до закладених у програмне забезпечення алгоритмів, створення конструкторської документації для виготовлення деталей об'єкту на основі створеної моделі тощо.

Загалом, моделювання буває математичним (опис за допомогою рівнянь та систем рівнянь), фізичним (натурним), з мішаним (в якому комбінуються математичні моделі та фізичні пристрої, які мають імітувати спільно реальний об'єкт). В свою чергу, математичне моделювання поділяється на аналітичне (за допомогою функціональних залежностей, теорії ймовірності, математичної статистики, методу скінченних елементів тощо) та імітаційне (намагання відтворити процес, який за певних причин неможливо описати аналітично, та визначити характер поведінки складових системи, моделювання якої виконується за допомогою математичної імітації).

Відповідно до видів моделювання існують і відповідні методи моделювання, за допомогою яких виконують створення моделей та взаємодію з ними.

Аналітичні методи моделювання призначені для отримання функціональних залежностей (які відповідають певною мірою реальному об'єкту) шляхом послідовного застосування математичних формул та правил (з урахуванням допустимого нехтування певними чинниками).

Чисельні методи ґрунтуються на побудові скінченної послідовності дій над сукупністю чисел, що описують стан об'єкта чи системи, і яка призводить до бажаного результату (який є наближеним розв'язком задачі).

Статистичні методи полягають в отриманні за допомогою комп'ютера статистичних даних про процеси, які відбуваються в модельованій системі, з наступною обробкою їх методами математичної статистики.

Натурні методи включають проведення експерименту з реальним об'єктом та обробку результатів на основі теорії подібності.

Будь-яка математична модель реального об'єкта має зберігати істотні риси цього об'єкта. Використання математичних моделей дозволяє розробникам оцінити властивості майбутнього виробу, технології його виготовлення, випробування, утилізації – не виготовляючи експериментальні зразки кожного разу, коли до конструкції об'єкту вносяться будь-які зміни та удосконалення. Внаслідок моделювання суттєво скорочуються витрати на фізичні (натурні) експерименти та скорочується обсяг випробувань експериментальних та промислових (серійних) зразків виробів.

Перш ніж починати створювати математичну модель, необхідно бути впевненим, що фізичні методи удосконалення існуючого об'єкта є або занадто дорогими, або занадто тривалими у часі (або взагалі неможливі). В процесі створення математичної моделі, метою створення якої є удосконалення існуючого виробу, необхідно визначити всі суттєві зв'язки властивостей моделі об'єкта з чинниками, які можуть бути описані відповідними аналітичними функціями або вирішені чисельними методами.

Необхідно оцінити ступінь впливу на властивості (параметри) математичної моделі тих чинників, якими було знехтувано в процесі створення моделі. Також необхідно визначити граничні умови, в межах яких буде розглядатись поведінка (стан) математичної моделі.

З точки зору САПР будь-який проект є системою, що складається з множини елементів, які мають між собою певну ієрархію взаємних зв'язків. При цьому елементом називають таку частину системи, подальша деталізація якої по відношенню до об'єкта вже не має сенсу (або з точки зору очікуваної точності, або з точки зору програмно-апаратних можливостей САПР).

Система, що представляє собою об'єкт або процес, у відповідності до системного підходу, розглядається від цілісного (загального) до часткового, дозволяючи визначати ступінь деталізації її складових (елементів) і враховувати чинники впливу у відповідності до їх вагомості у контексті поточної математичної моделі. Саме з цієї причини більшість САПР мають блочно-ієрархічну структуру представлення проектів, яка дозволяє враховувати впливи та зміни у будь-якому елементі на систему в цілому.

В блочно-ієрархічній структурі проектів САПР передбачається можливість редагування параметрів елементів, з яких складаються більш складні об'єкти та вся структура проекту в цілому. Як правило, така структура представляється, для зручності, у вигляді деревовидної структури, за аналогією з представленням дерева каталогів і файлів у файлової системі на комп'ютері. При цьому, складний об'єкт можна «розгорнути» та побачити всі його складові елементи та отримати доступ до параметрів будь-якого з цих елементів. Сучасні САПР автоматично перераховують весь проект в цілому при зміні будь-яких параметрів будь-якого елемента в деревовидній структурі проекту, або дозволяють виконувати такий перерахунок (для проектів, складених з великої кількості елементів) відповідними командами, наданими користувачу для цього у програмному забезпеченні.

Контрольні запитання

1. Які складові забезпечують функціонування САПР?
2. Для чого призначене технічне забезпечення САПР?
3. Що представляє собою програмне забезпечення САПР?
4. Що називають робочим простором САПР?
5. Чим відрізняються САПР, призначені для роботи одного та кількох користувачів одночасно?
6. Які види моделювання вам відомі?
7. В чому полягає аналітичний метод моделювання?
8. В чому сутність чисельного метода моделювання.
9. Яка мінімальна структурна одиниця проекту в САПР?
10. Яку структуру побудови проекту мають сучасні САПР?

4. Моделювання тривимірної геометрії в САПР

Більшість сучасних САПР для представлення математичних моделей тривимірних об'єктів використовують відповідну тривимірну систему координат. Дана система координат характеризується наявністю трьох взаємно перпендикулярних координатних вісей і точкою, в якій ці вісі перетинаються, що носить назву початку координат. Як правило, координатні вісі іменуються літерами латиниці X, Y, Z і створюють відповідні взаємно перпендикулярні площини, що містять відповідні пари координатних вісей: площини XY, YZ, XZ. Кожна координатна вісь має розмірність одиниць відстані у просторі і напрямок, що позначає збільшення числової величини відповідної просторової координати вздовж даної вісі. При цьому, від початку координат за напрямком вісі розташовуються позитивні значення координат, що збільшуються з віддаленням від початку координат рівномірно, а проти напрямку вісі, починаючи від початку координат, розташовуються від'ємні значення координат, які рівномірно збільшуються за модулем з віддаленням від початку координат проти напрямку вісі.

У більшості САПР можна обирати одиниці вимірювань довжини, які використовують в системах координат, але, найчастіше, застосовують або метри (у системі SI), або міліметри (у машинобудівних САПР). Ці одиниці вимірювань в наступному використовують для всіх систем координат, які можуть використовуватись в проекті. Справа в тому, що в проектах сучасних САПР є, щонайменше, одна система координат, яку називають глобальною системою координат і яка є базою для усіх інших систем координат. Додаткові системи координат бувають зручними при складних проектах, що складаються з великої кількості тіл, поверхонь, геометричних примітивів, які мають бути між собою узгоджені взаємним розташуванням або взаємним рухом. Як приклад можна навести багатопверхову будівлю, в якій зручно задати початок глобальної системи координат по висоті на рівні землі, а на кожному поверсі застосовувати власну систему координат, відносно якої зручно розраховувати розташування об'єктів на поверсі. Такі додаткові системи координат називають локальними

системами координат і їхні початки координат пов'язані з початком глобальної системи координат певними співвідношеннями.

Найменшим елементом, який можна представити в даній системі координат, є точка, тому цей елемент присутній в деревовидних структурах проектів САПР як найменший елемент, з яких складаються всі геометричні примітиви і складні об'єкти. Точка є найменшим і найпростішим серед усіх геометричних примітивів і в математичних моделях має, щонайменше, 3 параметри: координати у обраній системі координат, які визначаються відстанями вздовж координатних вісей від початку координат до точки перетину з відповідною віссю перпендикуляру, опущеного з точки, координата якої визначається. З точок та ліній чи поверхонь, що через них проходять, утворюються об'єкти в різних координатних просторах.

Кожна координатна вісь є одномірним простором, на якому розташовуються точки та відрізки, що характеризуються лише однією характеристикою – довжиною (точка має нульову довжину). При цьому кожна точка на координатній вісі характеризується лише одним числом координати. Також одномірною характеристикою точки, яка не лежить на координатній вісі, можна вважати кут, що утворюється між цією віссю та прямою, що проходить через точку та початок координат.

Система з двох взаємно перпендикулярних координатних вісей утворюють координатну площину, або двовимірний простір. Кожна точка в двовимірному просторі характеризується або двома координатами вздовж відповідних координатних вісей, або радіус-вектором (відстанню від початку координат) та кутом, що утворюється між однією з координатних вісей та прямою, на якій розташований радіус-вектор. Також двовимірним є простір, в якому положення точки визначається кутами нахилу радіус-вектора точки до кожної з двох взаємно перпендикулярних площин (прикладом такого простору є географічна система координат у вигляді широти та довготи).

Об'єктами двовимірного простору можуть бути точки, відрізки (лінії) та геометричні фігури – частини координатної площини, обмежені замкненим контуром з відрізків (ліній), що не перетинаються. При цьому, двовимірні замкнені контури на площині поділяються на криві та ламані

лінії та фігури. На відміну від ліній (або контурів), фігури характеризуються не тільки лінією, яка обмежує певну частину двовимірного простору всередині цього замкненого контуру, а й пласкою частиною двовимірної площини, тобто, поверхнею, замкненою цим контуром. Такі пласкі поверхні, обмежені замкненою лінією контуру в двовимірній площині, називають гранями.

Система з трьох взаємно перпендикулярних координатних площин є прикладом тривимірного простору. Об'єктами тривимірного простору є точки, лінії, поверхні та тіла. Кожна точка в тривимірному просторі може бути визначена трьома координатами, тип яких залежить від того, яку систему координат задіяно для тривимірного простору. Серед відомих тривимірних систем координат можна відзначити декартову (перпендикулярну), циліндричну, сферичну, але способів задати координати точки у тривимірному просторі може бути багато. В декартовій системі координат існують три координатні вісі (наприклад, OX, OY, OZ), які мають початок у спільній точці – початку координат – та кожна з яких перпендикулярна до двох інших вісей. Координати точки в декартовій системі координат визначають відстанню від точки до кожної з координатних площин, утворених координатними вісями. При цьому, кожна така координата визначається вздовж вісі, перпендикулярної до відповідної координатної площини. В циліндричній системі координат просторові координати точки визначаються координатами проекції точки на одну з координатних площин, утворених двома взаємно перпендикулярними вісями (наприклад, OR, OZ), та кутом повороту між площиною, яка проходить через точку та одну з координатних вісей (наприклад, OZ), і іншою координатною віссю (наприклад, OR). В сферичній системі координат координати точки у тривимірному просторі задаються довжиною радіус-вектору з початку координат до заданої точки та двома кутами між проекціями радіус-вектору на дві взаємно перпендикулярні координатні площини та відповідними координатними вісями в цих координатних площинах. Для однієї й тієї самої точки у тривимірному просторі існують формули для взаємного перетворення її координат з однієї системи координат в іншу. Різні системи

координат застосовуються в САПР для спрощення умов проектування та виконання моделювання.

До просторових систем координат часто додають додатковий вимір – час. Таким чином створюють просторово-часові системи координат, в яких координата точки у відповідному просторі може змінюватись з часом. Такі системи координат використовують для моделювання динамічних систем та дослідження фізичних процесів.

Будь-яка лінія у відповідному просторі є геометричним місцем точок, координати яких відповідають певним граничним обмеженням, що можуть бути задані функцією, рівнянням, нерівністю або їхньою сукупністю – системою (рівнянь). Це саме стосується двовимірних і тривимірних поверхонь, а також тривимірних тіл. Між тривимірним тілом та замкненою тривимірною поверхнею такого самого розміру, форми та просторового положення у тривимірному просторі існує певна різниця. В першому випадку мова йде про геометричне місце всіх точок тривимірного простору всередині та на тривимірній поверхні, яка обмежує частину даного простору. В другому випадку мова йде лише про геометричне місце точок, які розташовані на відповідній тривимірній поверхні, що обмежує частину тривимірного простору. Твердотільна (solid) геометрія частіше застосовується в САПР, в яких проектуються та досліджуються моделі фізичних об'єктів, для яких важливим є визначення властивостей та динамічних змін у матеріалах, з яких складаються ці об'єкти. Поверхнева (сітчаста, mesh) геометрія частіше застосовується в САПР, для яких важливою є швидка візуалізація зовнішнього вигляду об'єкта, а зв'язок поверхні (сітки) з процесами, що відбуваються всередині неї, моделюється окремо.

Принцип візуалізації поверхневої геометрії в САПР заснований на комп'ютерному обчисленні траєкторії світлових променів джерел світла, які відбиваються від поверхонь об'єктів (заломлюються, проходячи крізь прозорі та напівпрозорі об'єкти) та потрапляють в камеру спостерігача модельованої сцени. Оскільки криволінійні поверхні ускладнюють обчислення фізичних взаємодій з ними, для зниження навантаження на обчислювальні потужності апаратного забезпечення САПР тривимірні поверхні моделюються не

гладкими, а такими, що складаються зі скінченної кількості плоских граней, з'єднаних між собою у суцільну поверхню спільними вершинами і ребрами – прямолінійними відрізками контурів плоских геометричних фігур, що утворюють грані. Така поверхня, змодельована у тривимірному просторі САПР зі скінченної кількості граней, має назву сітки (mesh), оскільки ребра і вершини – вузли їхнього з'єднання – утворюють сітку, що модифікується шляхом зміни геометричних властивостей її вузлів та ребер. Найпростішим і найпоширенішим типом грані в тривимірній поверхні, змодельованій в САПР, є трикутник, всі ребра якого завжди лежать в одній площині. Іноді, для специфічних моделей, застосовують грані з більшою кількістю ребер.

Твердотільна (solid) геометрія для тих самих цілей зниження навантаження на апаратну частину САПР під час обчислень фізичних взаємодій у таких об'єктах використовує елементарні просторові геометричні тіла з плоскими гранями, найпростішим та найпоширенішим з яких є тетраедр. Вершини, ребра та грані таких елементарних просторових тіл, з яких складається твердотільний об'єкт, є спільними для двох чи більше елементарних просторових тіл. Окрім тетраедрів застосовуються призми, гексаедри та інші елементарні просторові тіла.

Слід зауважити, що поділ тривимірних поверхонь та суцільних тривимірних тіл на скінченні елементи використовується найчастіше в САЕ-модулях САПР, в яких вирішуються складні системи рівнянь для визначення фізичних властивостей модельованих об'єктів.

Як правило, для математичного представлення тривимірних тіл та поверхонь в САПР використовуються або характеристики (координати) всіх точок (вершин граней) об'єкта, з яких складається його поверхня (якщо поверхня об'єкта складається виключно з плоских граней), або описуються криволінійні поверхні об'єкта за допомогою рівнянь, що визначають геометричне місце точок, що належать відповідній частині поверхні об'єкта. Наявність великої кількості складних криволінійних поверхонь у об'єкта створює додаткове навантаження на апаратне забезпечення САПР, оскільки при візуалізації таких об'єктів щоразу виконується обчислення координат кожної точки такої поверхні, яка відображається в області візуалізації

(перегляду). З метою зниження навантаження на апаратну частину САПР дуже часто в САПР передбачено налаштування способів візуалізації об'єктів, при яких замість всієї поверхні відображається сітка з ребер або криволінійні контури, що формують відповідні поверхні (наприклад, сферична поверхня може в таких режимах відображатись трьома взаємно перпендикулярними колами однакового радіуса зі спільним центром). На відміну від растрової графіки, в якій кожна точка двовимірного зображення описується кольором, всі дані про тривимірні об'єкти в САПР зберігаються у форматах векторної графіки, тобто, у вигляді опису як координат вершин об'єкта, так і рівнянь, що описують поверхні об'єкта, а також додаткових даних про налаштування візуалізації поверхонь об'єкта (кольори, матеріали тощо).

Всі САПР, які призначені для створення тривимірних геометричних моделей об'єктів, містять відповідні інструменти, які дозволяють описати складні геометричні тіла складеними з геометричних примітивів – точок, відрізків, кривих, контурів, простих геометричних тіл в різних комбінаціях. З такими геометричними примітивами користувачу дозволяється виконувати різноманітні операції їхньої модифікації, в тому числі, булеві (логічні) операції – знаходження математичним шляхом геометричних місць точок, які, наприклад, належать кожному з групи геометричних об'єктів, або не належать жодному, або складаються з геометричних місць точок, що належать кожному з об'єктів групи, або належать одному з об'єктів групи, крім геометричних місць точок, що належать іншим об'єктам групи. Такі операції часто застосовуються для формувань отворів в моделях деталей.

Контрольні запитання

1. Що називають початком координат в тривимірному просторі?
2. Що таке одиниці вимірювань в САПР?
3. Чим відрізняються глобальна та локальна системи координат в САПР?
4. Які вам відомі координатні простори?
5. Чим характеризуються об'єкти одновимірного простору?
6. Що таке координатна площина?

7. Якими способами можна задати координати точки у двовимірному просторі?
8. Які об'єкти двовимірного простору вам відомі?
9. Які вам відомі системи координат тривимірного простору?
10. Як формуються координати точки у циліндричній системі координат тривимірного простору?
11. Для чого застосовують чотиривимірні простори?
12. Як описуються математично об'єкти тривимірного простору в САПР?
13. Чим відрізняються твердотільна і сітчаста геометрії?
14. Що таке грань об'єкта у тривимірному просторі?
15. Чим відрізняються растрова і векторна графіка?

5. Концепція крізного проектування

Крізне проектування це ідеологія сучасного автоматизованого проектування, яка передбачає швидке корегування файлів віртуального проекту пристрою завдяки міжмодульним зв'язкам в структурі одного програмного пакету АСхП. Це дозволяє синхронізувати роботу над проектом, коли вона виконується конструкторським колективом (design team), де кожен відповідає за свою ділянку роботи, і при наявності корекції, наприклад, віртуальної принципової схеми, автоматично вносити ці зміни у проект монтажною схемою друкованої плати. Безумовно, ці всі операції можна застосовувати, коли роботу над проектом виконує один конструктор. Таким чином крізне проектування є досить гнучкою технологією. В технології крізного проектування виділяють такі етапи:

- системне або функціональне проектування, у процесі якого виникає функціональна схема пристрою, і прораховуються загальносистемні характеристики.

- схемотехнічне проектування – кожному функціональному вузлу ставлять у відповідність схемне рішення з урахуванням наявної елементної бази. При проектуванні цифрових пристроїв цей етап коректніше називати логічним проектуванням.

- конструкторське проектування – прораховують основні конструктивні параметри пристрою з обліком необхідної елементної бази, призначення, заданими масогабаритними параметрами, діапазоном частот, споживаною потужністю, температурним режимом і т.д.

- технологічне проектування – вибирається підходяща послідовність технологічних операцій, для кожної операції конкретна технологія, матеріали, режим технологічного устаткування й т.д.

Кожний етап закінчується створенням необхідної документації. Процес проектування, найчастіше є ітераційною процедурою, при якій доводиться неодноразово вертатися до вихідного варіанта схемного рішення.

Повномасштабне автоматизоване проектування, що включає всі етапи, імовірна справа майбутнього, хоча відомі його реалізації при розробці великих інтегральних схем. Розробка програмного забезпечення, навіть для окремого етапу проектування, вимагає величезних попередніх витрат. У розробці програмного забезпечення звичайно беруть участь, як програмісти математики, так і інженери відповідних спеціальностей. У зв'язку з тим, що комп'ютер є широко застосовуваним у інженерній практиці, вивчення питань автоматизації проектування входить у сучасні навчальні плани радіотехнічних спеціальностей.

5.1. Структура та особливості роботи з програмними пакетами кризного проектування

Реалізація операцій кризного проектування виконується завдяки наявності програмних процедур прямого та зворотного корегування в алгоритмічному апараті пакетів EDA. Більшість сучасних програмних пакетів АСхП, як комерційних так і з категорії безкоштовних, є системами які підтримують більшість процедур кризного проектування – OrCAD, ACCEL EDA, Multisim, MicroCap, LTspice. Зазвичай програми АСхП, які підтримують кризне проектування містять редактор схем та компонентів, симулятор (модуль схемотехнічного моделювання), редактор монтажних схем друкованих плат із функцією автоматичного трасування. Крім того в такий програмний пакет можуть входити додаткові програмні модулі – редактор моделей компонентів, модуль параметричної оптимізації, редактор сигналів та інші.

Однією з перших систем кризного проектування АСхП був Design Lab 8.0 уточнена структура якого показана на рис. 5.1. Структура, наведена на цьому рисунку демонструє основні модулі цього програмного пакету АСхП. На схемі не показані модулі перетворення інформації про проект у формати інших програм EDA P-CAD, PADS, Tango. На рис.5.1 показані такі програмні модулі: Schematics – редактор схем та компонентів; PSpice – модуль схемотехнічного

модельовання; PCBoards – редактор монтажних схем друкованих плат (без функції авто трасування); Specstra – зовнішній авто трасувальник; Pspice Optimizer – модуль параметричної оптимізації; StmEd – редактор сигналів; Parts – редактор математичних моделей компонентів; PLSyn – модуль синтезу програмованих логічних структур; Probe – модуль графічного відображення результатів модельовання; Polaris – модуль розрахунку цілісності сигналів (для ВЧ схем).

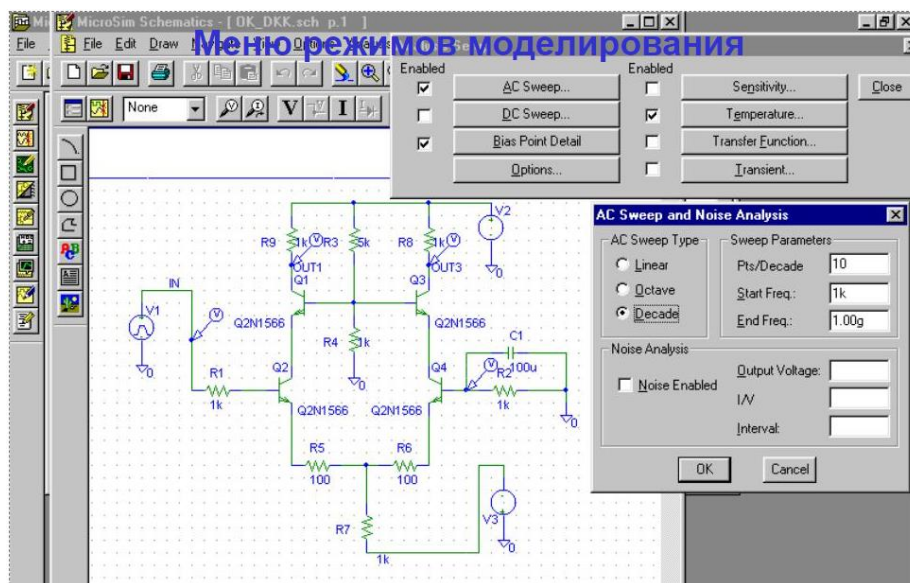


Рисунок 5.1 – Структура програмних модулів пакету Design Lab 8.0

Також показані основні бази даних бібліотек – математичних моделей компонентів, графіки елементів, пакування, контактних площадок. Недоліками цього, дійсно потужного програмного середовища схемотехнічного проектування, вважають

- відсутність власного авто трасувальника, для цієї мети використовували інтерфейс із програмою автотрасування Specstra (фірми Cyan&Cooper Technology);

- не дуже зручний спосіб відображення результатів аналізу перехідних процесів (вихідний файл цих результатів оформлюють у форматі відео файлу формату .dat);

– наявність великої кількості вікон, які відкриваються під час розрахунку, із складними взаємозв'язками між ними.

Але останнє твердження є скоріше недоліком с точки зору складності процесу навчання, зокрема студентів. Звісно, що для серйозних проектувальних робіт із підтримкою крізного проектування ця особливість не є проблемою, до того ж цей процес можна оптимізувати шляхом відповідного налаштування.

Після об'єднання корпорації–розробника пакету Design Lab 8.0 із фірмою OrCAD наступна версія цього середовища, яка вийшла під назвою OrCAD 9.2 мала власний вбудований модуль автоматичного трасування.

Згідно структури Design Lab 8.0 (рис. 1.1), роботу над проектом починають із створення імітаційної моделі принципової схеми пристрою (або її конвертації з інших систем EDA) у графічному редакторі схем та компонентів Schematics. Редактор схем дозволяє розміщувати на полі проекту елементи схем, які витягають із інтегрованих бібліотек компонентів, джерела сигналів та поєднувати їх віртуальними лініями зв'язку. Після створення файлу проекту схеми пристрою, і на його основі автоматичного створення файлів списків з'єднань можна було виконувати імітаційне моделювання схеми шляхом налаштування потрібних директив моделювання за допомогою модуля PSpice, виконувати параметричну оптимізацію за критерієм забезпечення заданого значення цільової функції при виконанні лінійних та нелінійних обмежень за допомогою модуля Pspice Optimizer, створювати монтажну схему друкованої плати за допомогою модуля PCBboards, розраховувати цілісність сигналів друкованої плати з урахуванням впливу паразитних параметрів конструкцій друкованих плат за допомогою модуля Polaris. Незважаючи на наявність розширеної бібліотеки стандартних сигналів, в структуру Design Lab уведено модуль редактора сигналів StmEd, який дозволяє створити модель унікального сигналу з метою оцінювання реакції моделі спроектованої схеми на дію цього сигналу. За допомогою модуля Parts інженер-проектувальник може створити нову або скорегувати коефіцієнти існуючої математичної моделі компонентів, які використовуються в процедурах моделювання схеми. Модуль Probe

дозволяє відображати у вигляді графіків результати деяких директив моделювання – аналізу перехідних процесів, аналізу частотних характеристик схеми, багатоваріантного аналізу, тобто цей модуль функціонує як віртуальний осцилограф. Особливістю Design Lab є наявність в його структурі PLSyn – вбудованого модуля синтезу програмованих логічних структур на основі виконаної у редакторі Schematics принципової схеми. Зазвичай, інші пакети АСхП не забезпечують таку можливість. Сучасний стрімкий розвиток цієї галузі мікроелектроніки викликав появу окремих спеціалізованих програмних середовищ синтезу програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС). Також окремо слід виділити особливості проектування НВЧ пристроїв. Серед програмних середовищ автоматизації проектування НВЧ-схем можна виділити Microwave Office, хоча ця програма за своєю структурою не є середовищем крізного проектування.

Подібну структуру, тобто орієнтовно схожий склад програмних модулів мають всі програмні середовища АСхП. Відміна полягає в побудові екранного інтерфейсу, розширенні файлів, компонуванні модулів та деяких специфічних програмних особливостях. Таким чином можна стверджувати, що при набутті навичок роботи із одним з пакетів АСхП студент буде здатен самостійно, у відносно стислі строки вивчити особливості побудови іншого середовища АСхП, або при виникненні певних окремих складних питань вдатися до допомоги спеціалізованих курсів із підвищення кваліфікації з цього фаху. Особливо підвищення кваліфікації актуально, враховуючі постійну зміну версій та нових програм АСхП. Але є певний базис знань з дисципліни “Автоматизація схемотехнічного проектування”, який потрібно вивчити та зрозуміти. Маючі цей базис та навички роботи, майбутній спеціаліст здатен вдосконалювати свою майстерність у творчому процесі проектування, шляхом постійної та методичної роботи.

6. Узагальнена методологія проектування за допомогою програм АСхП

Слід навести базову методологію проектування, якої варто дотримуватися при проектуванні пристроїв за допомогою сучасних програмних середовищ автоматизації схемотехнічного проектування.

Відповідно до технології проектування розрізняють такі основні стадії проектування:

- I – формулювання завдання. Визначення напрямку пошуку рішення;
- II – вибір і оптимізація шляхи рішення завдання;
- III – інженерний синтез (моделювання й оптимізація). Ескізне проектування. Оцінка проекту, ухвалення рішення.
- IV – технічне проектування. Виготовлення робочої документації.
- V – перевірка й обґрунтування рішення шляхом випробування експериментальних зразків.

Розглянемо детальний граф процесу проектування. Процес проектування містить 24 проектні процедури, які виконують на відповідних стадіях. Тоді процес проектування містить такі процедури: 1 - визначення потреби в об'єкті, дослідження й прогнозування умов функціонування проектованого об'єкта; 2 - загальне й часткове формулювання завдання, пошук її рішення; 3 - аналіз альтернативних рішень завдання, оптимізація обраного рішення; 4 - опис функціонування об'єкта, розробка його структури; 5 - обґрунтування й вибір елементної бази й комплектуючих виробів, оцінка матеріальних, енергетичних і трудових витрат на створення об'єкта; 6 - розробка економічних показників, визначення ефективності; 7 - ескізне проектування; 8 - відпрацьовування ескізного проекту на моделях або експериментальних зразках; 9 - захист ескізного проекту, ухвалення рішення щодо проекту; 10 - детальне проектування окремих блоків, вузлів і елементів; 11 - загальне компонування проекту, відпрацьовування структурних, конструкторських і технологічних

рішень; 12 - виготовлення й перевірка комплекту технічної документації; 13 - патентний аналіз окремих розробок; 14 – оцінка проекту, узгодження технічних завдань із виконавцями; 15 – складання калькуляційної вартості реалізації проекту; 16 - захист технічного проекту з комплектом технічної документації, ухвалення рішення щодо реалізації проекту; 17 - створення моделі об'єкта, побудова дослідного зразка; 18 - розробка програми випробувань дослідного зразка; 19 - виконання випробувань дослідного зразка; 20 - документальне оформлення результатів випробувань і досліджень; 21 - аналіз результатів випробувань, уточнення характеристик об'єкта, повторне конструювання слабких ланок і корегування технічної документації; 22 - розробка робочої документації, технічних описів і інструкцій для експлуатації; 23 - оформлення патентних або заявочних матеріалів; 24 - остаточне затвердження проекту.

Звісно досягти рівня повної інтеграції процедур проектування в межах одного програмного середовища АСХП дуже складно та навіть не потрібно. Адже деякі процедури не підлягають автоматизації.

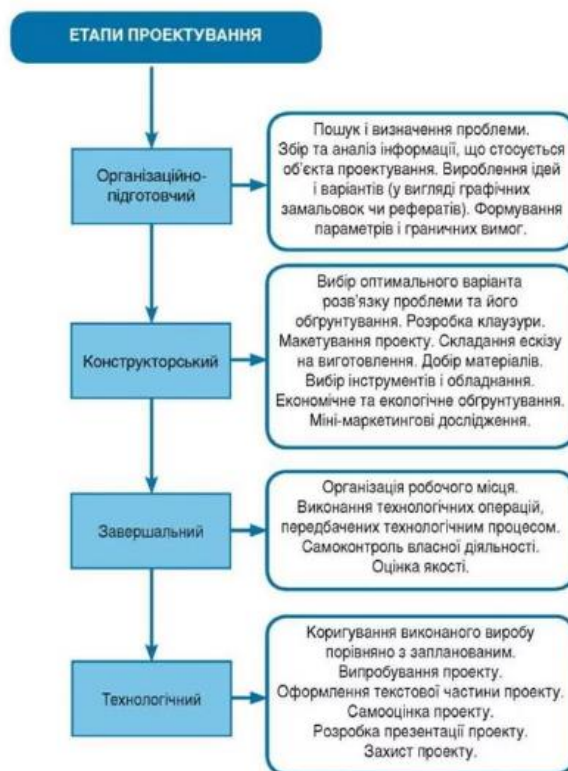


Рисунок 6.1 – Граф процесу проектування

При аналізі сутності процесу проектування стає помітним рекурсивність деяких процедур проектування. 21 проектна процедура передбачає аналіз результатів випробувань дослідного зразка й на його основі виявлення слабких ланок проекту. При виявленні цих слабких ланок іноді доводилося повертатися до початкових позицій, тобто розробок нових варіантів схем. При виконанні автоматизованого проектування у конструкторів є можливість шляхом створення адекватної імітаційної моделі схеми пристрою та всебічного автоматизованого аналізу її функціонування при різних збуджуючих дій зменшити ймовірність помилки проекту та виготовлення дослідного зразка з хибними функціональними властивостями. Автоматизація аналізу схеми дає можливість швидко виявляти недоліки її структури або алгоритму функціонування. Таким чином використання технології автоматизації схемотехнічного проектування дозволяє зменшити час розробки й відповідно заощадити кошти на перепроjektування.

Протягом останніх десяти – п'ятнадцяти років сформувалися певні узагальнені рекомендації щодо виконання проекту за допомогою програм АСхП. Загальні правила автоматизованого проектування досить прості. Необхідно усвідомити, що проектування електронних пристроїв з використанням програмних модулів схемотехнічного проектування містить у собі кілька етапів. С певними доповненнями та корективами, по зрівнянню з етапи, варто виділити такі етапи автоматизації схемотехнічного проектування:

- визначення частини завдання на виконання проекту, яке підлягає автоматизації;
- виконання автоматизованого розрахунку вузлів схеми;
- аналіз розроблюваної схеми, розкладання її на функціональні вузли й вибір припущень, що спрощують;
- побудова імітаційної моделі принципової схеми (або її частин) проектованого пристрою з урахуванням спрощуючих припущень;
- проведення схемотехнічного моделювання побудованої моделі й аналіз отриманих результатів;

- максимально можливе наближення моделі до схеми спроектованого пристрою, одержання остаточних результатів і їхній аналіз;
- побудова монтажної схеми друкованої плати пристрою, автоматичне трасування, виконання перевірки впливу паразитних параметрів плати на цілісність сигналів;
- підготовка комплексу конструкторської документації (за усіма типами проектів – ескізним, технічним, робочим).

Розглянемо ці етапи докладніше.

Визначення частини завдання на виконання проект, яке підлягає автоматизації. Цій етап може починатися із четвертої проектної процедури, згідно якої виконують, зокрема, розробку структури, тобто структурної та функціональної схем розробки. Деякі програми АСхП дозволяють створювати структурні та принципові схеми й навіть виконувати їх структурно-функціональне моделювання. Таким чином, можливо починати роботу над проектом одразу після виконання суто творчих перших трьох процедур.

Виконання автоматизованого розрахунку вузлів схеми. Після визначення структури і, якщо дозволяють можливості пакету її моделювання, розроблюють ескіз принципової схеми і виконують інженерні розрахунки елементів схеми. Існують декілька простих у використанні програм для виконання автоматизованого розрахунку елементів схем які відносять до безкоштовно розповсюдженого програмного забезпечення. Наприклад у Design Lab передбачено інтерфейс із програмою розрахунку активних та пасивних фільтрів Filter Designer. Для роботи із цією програмою потрібно обрати тип та потрібну структуру фільтру, вказати необхідні вхідні та бажані вихідні параметри – полосу частот, імпеданси. Після цього програма виконує автоматичний розрахунок фільтру та відображає його прикінцеву структуру та значення номіналів елементів фільтру. Аналогічні програми розрахунків існують для схем різних типів підсилювачів та ін. Якщо ж такі програми відсутні, то можна виконати інженерний розрахунок елементів у приблизному варіанті.

Аналіз розробленої схеми, розкладання її на функціональні вузли й вибір припущень, що спрощують.

Більшість електронних пристроїв занадто складні для безпосереднього аналізу. Якщо в якості моделі використовувати повну принципову схему, час моделювання стає невиправдано великим або таке моделювання не вдається виконати зовсім. Однак аналіз будь-якої схеми показує, що вона складається з основних і допоміжних функціональних вузлів. Допоміжні вузли забезпечують задані режими роботи основних вузлів, і моделювання їхньої роботи недоцільно (принаймні на першому етапі). До них відносять ланцюги живлення, джерела струму й напруги зсуву, генератори що задають й т.п. Як правило, всі ці вузли цілком доцільно замінити стандартними моделями пакету АСхП.

Найбільш характерні приклади спрощених моделей:

- джерело живлення схеми замінюють на модель ідеального джерела постійної (змінної) напруги;
- джерело напруги зсуву, в якості якого у схемі застосовують наприклад, стабілітрон замінюють також на модель ідеального джерела постійної напруги;
- генератор що задає, або генератор несучої замінюють на відповідну модель ідеального джерела синусоїдальної (пилкоподібної, прямокутної) напруги;
- мережевий трансформатор замінюють на модель ідеального джерела синусоїдальної напруги;
варикап замінюють на ємність;
- транзисторний ключ замінюють на модель керованого напругою (або) струмом джерела напруги/струму.

Побудова імітаційної моделі принципової схеми проектного пристрою з урахуванням спрощуючих припущень. Виконують реалізацію схеми у модулі редактора схем середовища АСхП з урахуванням вже виконаних на попередньому етапі спрощень. Виконують розташування моделей компонентів, їх поєднання згідно ескізу принципової схеми, зазначення потрібних номіналів

та інших атрибутів. Побудована у редакторі схем модель буде базовою для декількох супутніх модулів пакету АСхП. Цей етап складається із суто механічних дій.

Проведення схемотехнічного моделювання побудованої моделі й аналіз отриманих результатів. Схемотехнічне моделювання електронного пристрою передбачає, що схему пристрою попередньо розроблено, проведений розрахунок його компонентів інженерними засобами та створено файл імітаційної моделі схеми. Тому в завдання моделювання можуть входити:

- підтвердження правильності проведених інженерних розрахунків і перевірка працездатності пристрою;
- дослідження чутливості до розкиду параметрів компонентів;
- дослідження нестационарних і аварійних режимів роботи; дослідження температурної нестабільності пристрою; визначення шумових властивостей схеми;
- підбір коригувальних ланцюгів.

Оскільки моделювання у середовищі АСхП є автоматичним, то перед користувачем цього пакету стоїть завдання зазначення потрібних директив моделювання, а головне коректного завдання параметрів директив моделювання того, чи іншого процесу, який відбувається у пристрої. При невірних або надлишкових значеннях початкових параметрів внутрішній компілятор середовища виведе повідомлення про наявність помилки моделювання, а у гіршому випадку відбудеться “підвисання” усього ПК.

Крім того потрібно застерегти розробників від традиційних помилок. Розповсюдженою помилкою є побудова відразу повної моделі пристрою. Якщо модельований пристрій досить складний, то для побудови працездатної моделі доцільно застосовувати метод поблочного налаштування, який використовують для налагодження реальних електронних пристроїв. Суть його полягає в тому, що спочатку досягають працездатності окремих вузлів і лише потім поєднують їх разом. Наприклад, при аналізі підсилювача потужності доцільно спочатку

промоделювати вхідний каскад на ОП (не забувши відповідним чином замкнути зворотний зв'язок), потім приєднати вихідні каскади, підібрати напругу зсуву цих каскадів і лише потім сформувавши загальний зворотний зв'язок і додати ланцюги термостабілізації, корекції й захисту по струму.

Зневага цим правилом іноді сильно затруднює одержання працездатної моделі.

Крім того, не варто забувати, що пошук моделей конкретних компонентів (наприклад, точної моделі якого-небудь транзистора, використовуваного в реальній схемі) у переважній більшості випадків є недоцільним. Завдання в стандартній моделі того ж транзистора основних довідкових параметрів практично гарантовано дає цілком прийнятний результат (якщо, звичайно, метою моделювання не є дослідження поведінки конкретного транзистора в даній схемі).

Взагалі ж для первинного аналізу доцільно застосовувати базові моделі компонентів. Але в той же час необхідно знати їхні особливості. Наприклад, відсутність насичення в найпростішій моделі операційного підсилювача приведе до непрацездатності ряду схем, у яких використовується саме цей режим роботи компонента.

Після отримання позитивних результатів моделювання окремих блоків розроблюваного пристрою можна починати поєднання блоків та виконання моделювання уже зібраного пристрою. Потім можна замінювати елементи схеми, які представлені ідеальними джерелами сигналів на моделі реальних компонентів. На цьому ж етапі проводиться точний підбір ланцюгів зсуву й корекції, а також статистичний аналіз і визначення чутливості до параметрів компонентів.

Максимально можливе наближення моделі до схеми спроектованого пристрою, одержання остаточних результатів і їхній аналіз. На цьому етапі проводять остаточний розрахунок по скорегованій моделі, одержують всі необхідні характеристики й на основі їхнього аналізу роблять остаточні

висновки про працездатність моделі. На основі остаточного аналізу результатів моделювання можливо виконати корегування схеми пристрою.

Побудова монтажної схеми друкованої плати пристрою, автоматичне трасування, виконання перевірки впливу паразитних параметрів плати на цілісність сигналів. Для створення файлу друкованої плати потрібен максимально правдоподібна, прикінцево скорегована модель принципової схеми пристрою. В редакторі друкованих плат інженер виконує такі дії: визначає комп'ютеретричні розміри друкованої плати пристрою, розміщує моделі корпусів компонентів схеми по поверхні друкованої плати, виконую трасування схеми. При проектуванні високочастотних схем можливо виконання перевірки проекту печатної плати на наявність паразитних ефектів та урахування їх впливу на роботу схеми. На основі результатів такого моделювання може виникнути необхідність перепроєктування проекту плати з метою усунення негативного впливу паразитних ефектів на сигнальні ланцюги пристрою. Програмою курсу “Автоматизація схемотехнічного проектування” не передбачено вивчення особливостей автоматизованого проектування друкованих плат. Тому в даному підручнику цей етап не буде описаний. Проектування друкованих плат в модулі PCBboards пакету Design Lab та його взаємодія із автоматичним трасувальником Specstra може бути предметом самостійного вивчення.

Підготовка комплекту конструкторської документації.

Зазвичай сучасні програмні середовища крізного проектування є продуктом іноземного виробництва і відповідно, вони не оформлюють конструкторську документацію згідно діючою в Україні та СНД системою ЄСКД. Але, наприклад, в Design Lab є можливість створення бібліотеки графічних символів елементів користувача, що надає можливість створення умовно-графічних зображень елементів схем за ЄСКД і, відповідно, підготовлення пакету конструкторської документації. Текстову частину конструкторської документації готують за допомогою окремих текстових редакторів.

7. Класифікація моделей та бібліотек моделей компонентів, застосовуваних у програмах EDA

Для опису компонента в програмних середовищах EDA застосовують декілька різновидів моделей. Умовно ці моделі можна розділити на дві категорії: математичні та графічні. Призначення математичних моделей – імітація фізичних процесів, які відбуваються у реальних електронних приладах. Для складних компонентів (напівпровідникових структур) ці моделі побудовані як математичний опис еквівалентної схеми. Наприклад, для опису звичайного біполярного транзистора використовують математичні моделі двох типів – Еберса-Мола та Гумеля-Пуна. Внутрішня програмна структура математичних моделей компонентів є недоступною для редагування в межах середовища АСхП, хоча, наприклад в Design Lab передбачено інтерфейс із додатковим програмним модулем Device Equations, який в звичайний набір цього програмного пакету не входить. Завдяки Device Equations, шляхом редагування програмних заготовок для збірки програми моделювання Pspice інженер-програміст або проектувальник має можливість вносити зміни у топологію еквівалентних схем напівпровідникових схем заміщення, змінювати структуру рівнянь моделей, додавати нові параметри, змінювати імена параметрів та ін. Після необхідних змін програмного коду, виконують компіляцію оновленої версії Pspice для виконання потрібних рівнів моделювання. Звісно подібну операцію може робити тільки досвідчений інженер-проектувальник, який маючи глибокі теоретичні знання в галузі електроніки та схемотехнічного моделювання та практичні знання мови програмування C++ може вносити необхідні зміни. Також цей інструмент потрібен вченим, які спеціалізуються у створенні нових електронних компонентів на підприємствах–розробниках електронної апаратури.

Звичайному користувачеві середовища АСхП для виконання проектувальних робіт цілком достатньо існуючих моделей. За потреби він може скористуватися стандартним апаратом редагування – шляхом редагування

атрибутів (числових параметрів) моделей компонентів для виконання одноразових досліджень. Також можна у подальшому використовувати ці зміни, для цього потрібно зберегти їх у новому файлі моделі або бібліотеки моделей. В середовищі Design Lab можна використати модуль редагування моделей Part, який дозволяє одночасно із зміною числових коефіцієнтів моделей спостерігати вплив цих змін на поведінку тої ці іншої характеристики редагуемого пристрою.

Для характеристики графічних властивостей компонента використовують декілька графічних моделей. По-перше це графіка його умовно-графічного зображення, за допомогою якої він стає візуально доступним при витяганні його на поле проекту із бібліотеки компонентів. В більшості сучасних професіональних середовищ АСХП модуль редактора схем функціонує у двох режимах – режимі власне редактора схем та режимі редактора графіки компонентів. За допомогою цього другого режиму проектувальнику надано можливість створення графіки компонентів згідно вимог національних стандартів (наприклад за ЄСКД для України та СНД). Звісно для відображення конкретного компоненту, наприклад біполярного транзистору достатньо двох зображень (npn- та pnp- транзистора відповідно), але для вказання конкретного транзистора із цією графікою асоціюють його і'мя, і'мя його математичної моделі та деякі інші атрибути.

Крім того, при створенні графіки компоненту в полі відповідного атрибуту необхідно вказати і'мя графіки пакування цього компоненту – тобто графічного зображення корпусу компоненту у якому розміщують цей компонент. Без зазначення пакування (package) при спробі створення проекту монтажної схеми друкованої плати програмою буде виведено повідомлення про помилку, тому що модуль редактора друкованих плат не буде знаходити графічний символ якого корпусу потрібно виводити на поле монтажної схеми. Тому друга графічна бібліотека, яку застосовують разом із бібліотекою умовно-графічних зображень – це бібліотека корпусів компонентів (footprint library).

Інша графічна бібліотека – це бібліотека контактних площадок, яку подекуди називають стеком контактних площадок. Контактна площадка – це гкомп’ютер етричне місто контакту виводу компонента із контактним шаром друкованої плати. Ця бібліотека містить опис контактної площадки (код форми, зовнішній розмір, внутрішній розмір), графіка якої буде відображена на проекті монтажної схеми при виведенні на поле проекту корпусу того, чи іншого компоненту.

Для деяких компоненти схеми можуть бути відсутні корпуси. Це стосується компонентів які використовують тільки для схемотехнічного моделювання проекту. Зазвичай це всі компоненти із бібліотек сигналів, які не виводять на друковану плату.

8. Відомості про еталонну мову схемотехнічного проектування Spice

Оскільки командний файл у формат Spice окрім опису моделей та директив моделювання описує ще й топологію схеми, це дає підстави вважати мову Spice саме мовою проектування. Крім того, на основі результатів моделювання відбувається корекція топології як схеми так і проекту друкованої плати.

SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) – імітатор електронних схем загального призначення із відкритим вихідним кодом. Spice використовують як при розробці інтегральних схем так і друкованих плат для перевірки цілісності сигналів схем а також для аналізу її поведінки. Програму SPICE було розроблено в Electronics Research Laboratory в Каліфорнійському університеті в Беркли Лоуренсом Найгелем та його науковим керівником Дональдом Педерсоном. Починаючи із ранішніх версій SPICE було програмним забезпеченням із відкритими вихідними кодами, що сприяло його широкому розповсюдженню та застосуванню. Вихідні коди SPICE розповсюджувалися університетом Берклі за номінальною вартістю (за ціною магнітної стрічки). Тому SPICE швидко стала індустріальним стандартом імітації електронних

схем [Pescovitz, David. 1972: The release of SPICE, still the industry standard tool for integrated circuit design, Lab Notes: Research from the Berkeley College of Engineering]. Програма SPICE слугувала основою для розробки багатьох інших програм імітації схем, як в академічному середовищі та і у промисловості. Комерційна версія PSPICE, яка застосовується у таких середовищах, як Desig Lab, Orcad належить зараз фірмі Cadence Design Systems, версія HSPICE належить фірмі Synopsys. Академічна версія XSPICE із підтримкою аналого-цифрових пристроїв, яка застосовується у Multisim належить Georgia Tech. Деякі відомі виробники електронних пристроїв використовують власні пропріетарні версії SPICE. Наприклад, ADICE у компанії Analog Devices, LTspice у Linear Technology, Mica у Freescale Semiconductor, TISPACE у Texas Instruments. У 2011 році було відмічено, що SPICE та його похідні стали невід'ємною частиною майже будь-якої інтегральної схеми. SPICE набув популярності, оскільки, крім відкритості кодів підтримував аналіз та містив моделі, необхідні для розробки інтегральних схем того часу і при цьому був достатньо швидкодіючим, що було позитивним фактором при практичному використанні. При використанні словосполучення «SPICE- подібні засоби схемотехнічного моделювання» використовують, коли потрібно підкреслити що під час моделювання не використовують спрощуючих припущень, які знижують вірогідність результату, як у системах “прискореного” моделювання. Слід зазначити, що у даному курсі передбачено використання програми SPICE для навчання проектуванню електронних пристроїв на друкованих платах. Окремо буде розглянуто проектування ПЛІС, яке має відміни та при якому SPICE не використовуватиметься.

Перевагою формату SPICE є те, що принципову схему електронного пристрою або його частини можна описати за допомогою коротких та цілком зрозумілих позначень. Формат потребує спершу опису елементів та їх зв'язків, а потім зазначення директив моделювання. Елементи описують за такою методикою: спочатку вказують позиційне позначення елемента, при цьому для того, щоб програма SPICE “розпізнала” саме яку модель застосовувати при

виконанні моделювання для цього елемента це позиційне позначення повинне починатися з певної префіксної літери. Так, позиційне позначення резистора повинно починатися із літери R, конденсатора – літери C, індуктивності – літери L, біполярного транзистора – літери Q, польового транзистора із керованим p-n переходом – літери J, мікросхеми – літери U. Після префіксної літери вказують без пробілу або цифру, яка вказує порядковий номер елемента або можна вказувати іншу літеру. Після позиційного позначення елемента через пробіл вказують номер (або імена) електричних ланцюгів до яких ці елементи під'єднані. Літери замість цифр елементам або електричним ланцюгам надають якщо необхідно виділити цей елемент або ланцюг з метою зручності трактовки результатів моделювання. Після зазначення вузлів, до яких підключений елемент вказують номінал елемента для пасивних компонентів, або і'мя моделі для активних компонентів. Також в частині опису схеми зазначають джерела сигналів, джерела живлення та інші елементи.

Після секції опису схеми вказують моделі компонентів які потрібно використовувати при моделюванні, а також ідентифікатори директив моделювання і виведення результатів моделювання. Директива моделювання – це різновид псевдокоманди для ядра програми SPICE. Перед ідентифікатором кожної моделі компонента та кожної директиви моделювання обов'язково проставляють крапку. Для компілятора програми SPICE крапка є ознакою того, після неї йде псевдокоманда на проведення певного виду схмотехнічного моделювання. Після ідентифікатора директиви через пробіл зазвичай вказують числові параметри – вхідні змінні або початкові значення для вбудованого математичного апарату ядра програми. Наприклад директива на виконання спектрального аналізу може мати такий вигляд – .FOUR 36MEG V(9). Всі елементи завдання у форматі SPICE записують латинськими літерами. Кириличні символи можна використовувати лише у коментарях. Рядок коментарю потрібно починати із символу “зірочка” – *. В кінці файлу завдання у форматі SPICE вказують директиву .END. Крапку в кінці рядка опису

елементу схеми або рядка опису директиви не проставляють. Компілятор програми ідентифікує кожен нову строку як новий опис.

Розглянемо схему транзисторного мультивібратора та завдання на виконання його імітаційного моделювання у форматі PSPICE для середовища Design Lab 8.0. Мультівібратор це пристрій, який генерує прямокутні коливання.

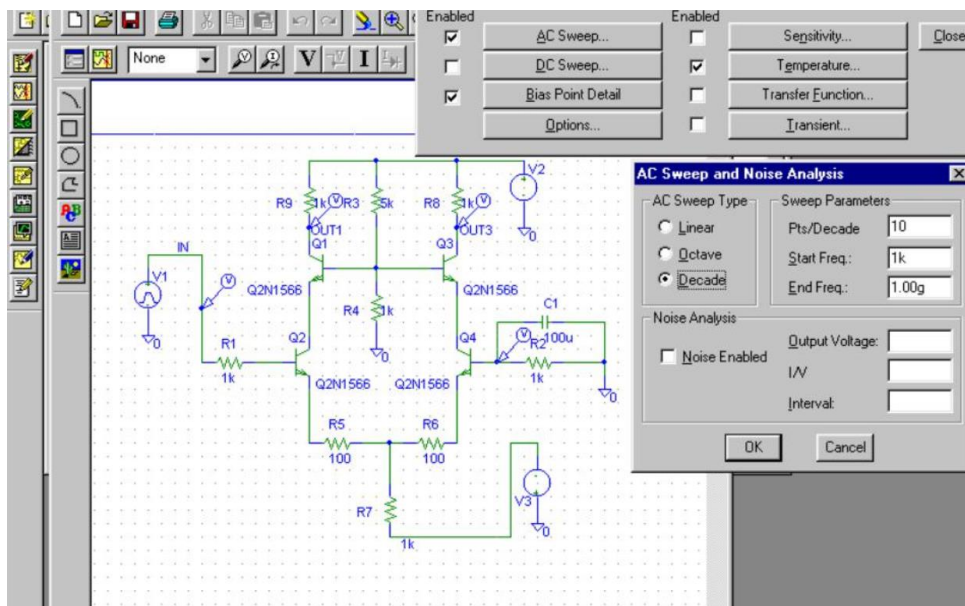


Рисунок 8.1. – Схема транзисторного мультивібратора

Для даної схеми потрібно провести автоматизований аналіз перехідних процесів. Тоді файл опису схеми та директив моделювання виглядатиме таким чином

Multivibrator

R1 121K

R2 50750

R3 13100K

R4 14100K

R5 161K

```
R6 70750
C1 230.01uF
C2 460.01uF
Q1 2452N2218
Q2 6372N2218
VP q10DC 10V
.LIB bipolar.lib
.IC V(3)=3.46V
.TRAN100us 1.2ms
.PROBE
.END
```

Перша строка файлу опису за умовчанням вважається його ім'ям. В пакетах кризного проектування усі файли одного проекту мають одне ім'я та різні розширення. Звернемо увагу на опис напівпровідникових елементів схеми – транзисторів. При опису біполярних транзисторів після вказання позиційного позначення вказують на першому місці номер вузла до якого підключений колектор, на другому – номер вузла до якого підключена база, на третьому – номер вузла до якого підключений емітер. Цю черговість потрібно враховувати. Після номерів вузлів вказують ім'я моделі транзистора. В кінці опису елементів вказують джерело живлення, яке необхідно для роботи схеми – це джерело постійної напруги 10В з ім'ям VP, яке підключено до вузлів 1 (позитивний затискач) та 0 (негативний затискач).

Далі вказують директиви. Директива LIB вказує компілятору SPICE в якому файлі бібліотек шукати вказану в описі модель транзистора. Якщо ця бібліотека знаходиться не в стандартній папці бібліотека то в цієї директиві можна прописати її повний шлях (адресу) звичайним способом.

Хоча в описі не вказують, але програма SPICE автоматично виконує розрахунок схеми за постійним струмом, результат якого записують у вихідний файл результатів моделювання. Оскільки мультівібратор є симетричним

пристроєм, то за постійним струмом він знаходиться у стані рівноваги. Тобто потенціал вузла 2 та потенціал вузла 6 будуть рівними. Якщо виконувати директиву аналізу перехідних процесів одразу після розрахунку за постійним струмом, то генератор, який знаходиться у стані рівноваги не збудеться і відповідно на екрані програми відображення графіки буде пряма лінія. Тому є два способи зрушити його рівновагу – перший передбачає зміну на 1-2% значення резистора або ємності у колі якогось з транзисторів або завдання початкового значення потенціалу одного з вузлів. Ми обрали другий шлях. Завдамо початкові умови (initial conditions) для вузла 3. Після виконання розрахунку за постійним струмом проглянемо вихідний файл результатів моделювання та відзначимо значення потенціалу вузла 3 що дорівнює 3,4889 В. Тоді в директиві завдання початкових умов для вузла 3 вкажемо трохи інше значення – .IC V(3)=3.46V. Після цього вказуємо директиву аналізу перехідних процесів TRAN із указанням початкового та фінального часу моделювання. Директива .PROBE вказує компілятору на підключення графічного редактора результатів моделювання після закінчення обчислень модуля PSPICE.

Таким чином можна виконати моделювання нескладної принципової схеми, яка накреслена на папері навіть лише якщо ми маємо тільки модуль SPICE та простий моношрифтовий текстовий редактор. Але звісно, якщо ведеться робота над складним проектом, який містить десятки, сотні елементів, якщо потрібно проаналізувати декілька складових характеристик створюваного пристрою, створити монтажну схему друкованої плати, тоді просто необхідно мати повноцінне середовище схемотехнічного проектування.

9. Особливості автоматизованого проектування схем із пасивними базовими дискретними компонентами

Дискретними компонентами в програмах АСхП називають компоненти які мають два контакти, тобто будь-які двох полюсники. Базовими пасивними

компонентами ми будемо вважати елементи класичної теорії електричних кіл – резистор, конденсатор та індуктивність.

Одразу слід зазначити, що у програмах АСхП використовують різні моделі цих компонентів. З навчальних дисциплін, які присвячені основам електротехніки та електроніки ми знаємо, що ці елементи можуть бути як лінійними так нелінійними і відповідно для відтворення їх поведінки слід застосовувати різні моделі. Застосування нелінійних моделей наближує імітаційну схем розроблюваного пристрою до відтворення реальних процесів, але ускладнює обчислювальний процес внаслідок втрат часу та ресурсів машинної пам'яті.

В програмах АСхП застосовують математичні вирази, які за допомогою спеціальних коефіцієнтів дозволяють апроксимувати характеристики елементів у моделі. Інженеру потрібно лише зазначити необхідні значення цих коефіцієнтів, які подекуди називають атрибутами або параметрами моделі, в діалогових вікнах екранного інтерфейсу. Тому слід розглянути вирази, які відтворюють характеристики елементів із тлумаченням використовуваних у них коефіцієнтів.

Опір елемента “Резистор” у програмах АСхП обчислюють з урахуванням уведених значень параметрів моделі за допомогою двох виразів:

– якщо вказано експоненційний температурний коефіцієнт опору (ТСЕ) то вираз для обчислення опору моделі такий :

$$\text{значення опору} = \langle \text{value} \rangle \cdot R \cdot 1.01^{\text{TCE} \cdot (T - T_{\text{nom}})}$$

де $\langle \text{value} \rangle$ – позитивне значення опору (може мати також негативне значення, але не нульове), яке зазначив інженер- розробник у діалоговому вікні атрибутів конкретного резистора у схемі. Наведемо приклад діалогових вікон з різних програмних середовищ АСхП (рис. 1.4, рис. 1.5.) в яких вказують значення опору резистору;

T – поточне значення температури для конкретної схеми, яке вказують коли у середовищі АСхП присутній програмний модуль розширеного

температурного моделювання (у тому числі за списком), значення цього параметру повинно відрізнятися від T_{nom} ;

T_{nom} – номінальне значення температури, це глобальний параметр, який за умовчанням дорівнює 27°C , його зазвичай встановлюють в розділах глобального налаштування середовища АСхП.

– якщо не вказано експоненційний температурний коефіцієнт опору, то вираз для обчислення опору моделі буде виглядати інакше:

$$\text{значення опору} = \langle \text{value} \rangle \cdot R \cdot (1 + TC1 \cdot (T - T_{nom}) + TC2 \cdot (T - T_{nom})^2)$$

Значення подальших параметрів моделі резистору, які використовують у двох вищевказаних виразах наведено у таблиці 1.1.

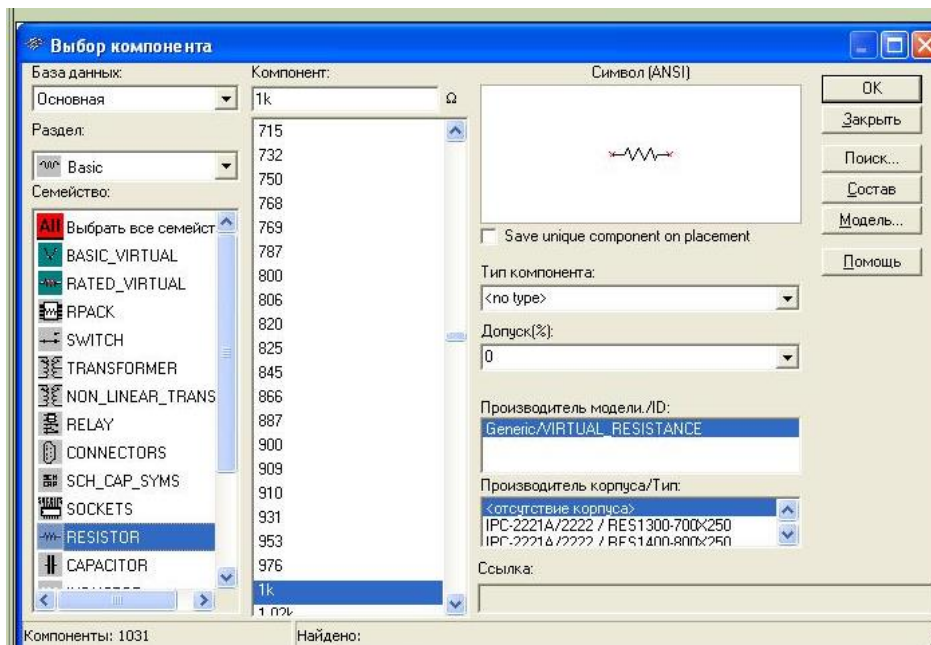


Рисунок 9.1 – Фрагмент діалогового вікна із укаванням значення резистору у програмі Multisim 7.0 і вищих версій

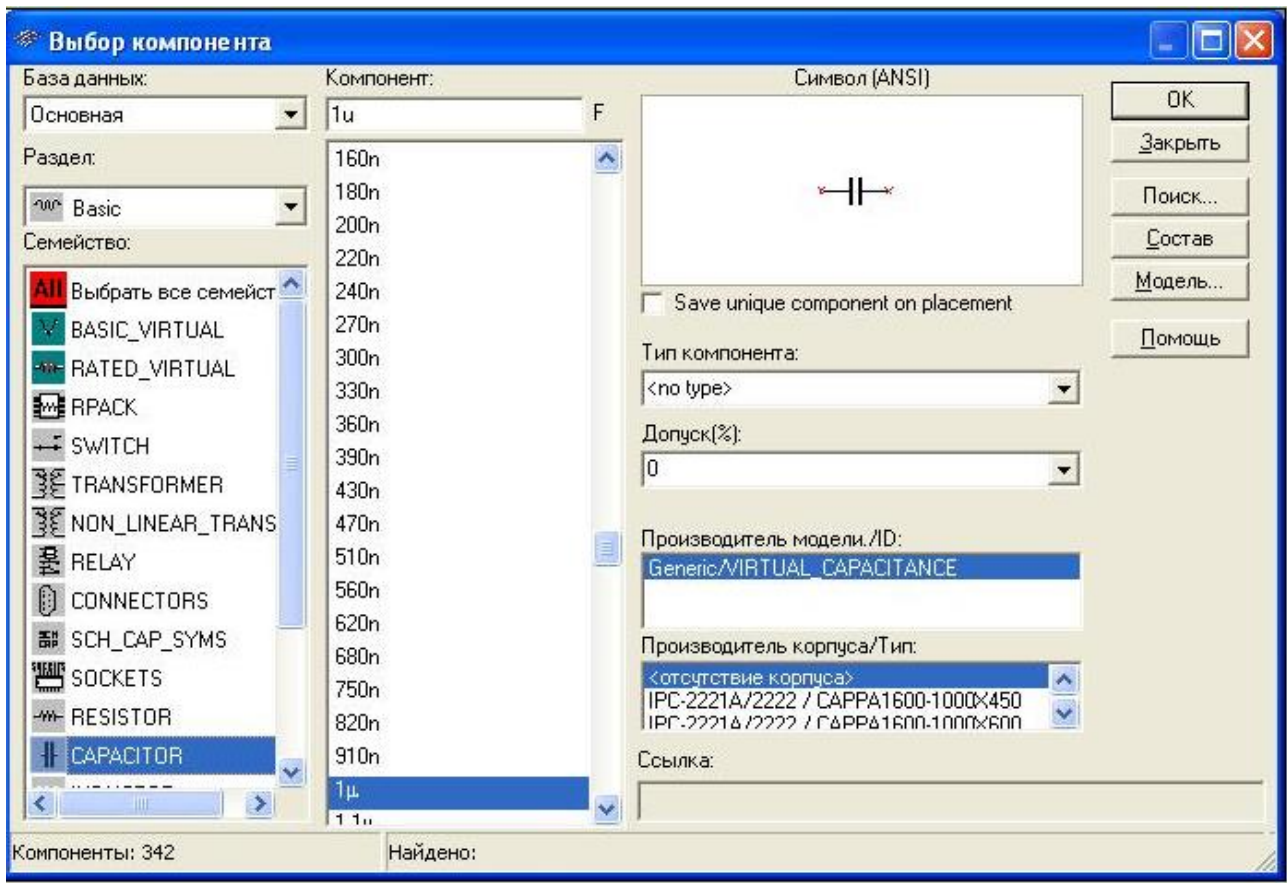


Рисунок 9.2. Фрагмент діалогового вікна із указанням значення резистору у програмі Electronic Workbench 5.12

Шумовий струм резистору при виконанні аналізу рівня шумів обраховують при умові полоси пропускання яка дорівнює 1Гц. Резистор генерує тепловий шум за формулою Найквіста для спектральної щільності енергії (на одиницю полоси пропускання):

$$i_2 = 4kT/\text{resistance}$$

Ємність елемента “Конденсатор” у програмах АСхП обчислюють з урахуванням уведених значень параметрів моделі за допомогою виразу:

$$\text{значення ємності} = \langle \text{value} \rangle \cdot C \cdot (1 + VC1 \cdot V + VC2 \cdot V2) \cdot (1 + TC1 \cdot (T - T_{nom}) + TC2 \cdot (T - T_{nom})^2)$$

де <value> – позитивне значення ємності яке зазначив інженер- розробник у діалоговому вікні атрибутів конкретного резистора у схемі;

V – напруга на конденсаторі при розрахунку перехідних процесів (Transient), при розрахунку частотних характеристик (AC Sweep) ємність вважають постійною величиною, яка визначається у робочій точці по постійному струму;

Так як і для конденсатора, для індуктивності потрібно зазначити початкові умови, але для котушки це буде не напруга, а струм через неї при розрахунку перехідних процесів.

Якщо потрібно імітувати роботу нелінійної індуктивності, тобто реального елемента – котушки індуктивності, яка існує у вигляді мідного проводу, який намотують на певне осердя, то потрібно використовувати інші моделі. За допомогою котушок індуктивності можливо побудувати пристрої, які функціонують на основі електромагнітного зв'язку між котушками індуктивності, які розташовані на одному осерді. Для цього в програмах АСхП використовують елемент “взаємна індуктивність”, який дозволяє враховувати електромагнітний зв'язок між декількома котушками.

Взаємну індуктивність за різними графічними форматами описують у середовищах EDA. Але параметри опису у форматі SPICE є стандартними. Якщо не вказано ім'я моделі осердя то вираз прийме вигляд:

K <ім'я, або номер> L <ім'я, або номер першої індуктивності> ... L < ім'я або номер n-ї індуктивності >

<значення коефіцієнту зв'язку

Вказують таку кількість індуктивностей, яку необхідно зв'язати за допомогою однієї взаємної індуктивності. Значення взаємної індуктивності M_{ij} двох індуктивностей L_i та L_j можна обрахувати після зазначення коефіцієнту зв'язку (англ.- coupling value) за допомогою виразу:

$$\langle \text{coupling value} \rangle = \frac{M_{ij}}{\sqrt{L_i L_j}}$$

Напругу на котушці L_i з урахуванням взаємної індуктивності при виконанні аналізу перехідних процесів визначають за виразом:

$$U_{L_i} = L_i \frac{di_i}{dt} + M_{ij} \frac{di_j}{dt} + M_{ik} \frac{di_k}{dt} + \dots$$

Наведемо приклад опису взаємної індуктивності такої схеми

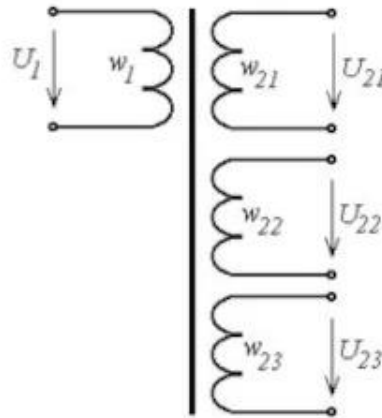


Рисунок 9.3. – Схема трансформатора із трьома обмотками

Формат опису цієї схеми такий:

```

I1      1      0      AC      1MA
L1      1      0      10UH
L2      2      3      10UH
L3      3      4      10UH
K12     L1     L2     L3     0.8

```

Перший вузол в описах індуктивностей L_1 , L_2 , L_3 означає початок обмотки (тобто для індуктивності L_1 початок обмотки підключено до вузла 1, для індуктивності L_2 початок обмотки підключено до вузла 2, для

індуктивності L3 початок обмотки підключено до вузла 3). До того слід зазначити, що наприклад струм скрізь котушку L2 буде мати протилежний напрям ніж скрізь котушку L1. Також потрібно зазначити, що при відсутності моделі осердя атрибут value усіх індуктивностей, які пов'язані взаємною індуктивностей повинен бути зазначений у генрі. Для покращення збіжності методів розрахунку між вузлами до яких підключено початки обмоток всіх котушок підключають резистор величина опору якого дорівнює $1/GMIN$ (де $GMIN$ – значення глобального параметра мінімальної провідності гілки електричного ланцюга). Ще один спосіб покращення збіжності – підключення резистору паралельно досліджуваній котушці, опір якого є дуже малим, наприклад таким що дорівнює 0,1 Ом.

При проектуванні деяких пристроїв необхідно застосовувати котушки індуктивності, електромагнітний зв'язок між якими відбувається через магнітне осердя. Для опису магнітного осердя в SPICE використовують майже такий саме формат опису як і у випадку взаємної індуктивності, але також додають ім'я моделі осердя, яке потім також вказують із зазначенням необхідних параметрів моделі.

Формат опису електромагнітного зв'язку декількох котушок індуктивності за допомогою магнітного осердя такий:

$K<ім'я, \text{ або номер} > L<ім'я, \text{ або номер першої індуктивності} > \dots L< ім'я \text{ або номер } n\text{-ї індуктивності} > <\text{значення коефіцієнту зв'язку} > <ім'я моделі осердя >$

Як бачимо, в опису додається ще один компонент – ім'я моделі осердя. Але потрібно пам'ятати, що при зазначенні моделі осердя в опису, в атрибуті value індуктивностей які пов'язують за допомогою цього магнітного осердя, потрібно вказувати не значення індуктивностей у генрі, а кількість витків проводу кожної котушки. Через це, значення вказане в атрибуті value котушки може бути тільки позитивним і тільки цілим. Наведемо приклад схеми трансформатора із магнітним осердям та його опис:

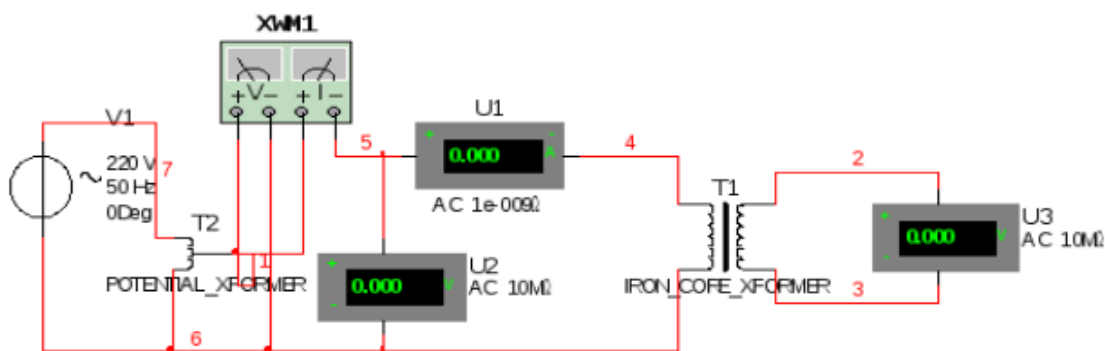


Рисунок 9.4 – Схема трансформатора із магнітним осердям

L1 151050

L2 100150

K2 L1 L2 0.99 Ti125V

.MODEL Ti125V CORE (LEVEL=2 MS=334E3 ALPHA=2.5E-2 +A=4.05E3
K=166 C=0.05 AREA=0.064 PATH=2.25)

В опису індуктивності L1 цифра 50 означає 50 витків проводу котушки, в опису індуктивності L2 цифра 150 означає 150 витків проводу котушки. Вказано коефіцієнт зв'язку котушок, що дорівнює 0,99, а також модель магнітного осердя Ti125V. В секції атрибутів моделі обов'язково вказують ім'я цієї моделі після вказання директиви MODEL, параметр опису CORE вказує компілятору SPICE що це модель саме осердя. В дужках наведені конкретні значення параметрів моделі осердя. Що означають ці параметри показано у таблиці 1.4.

Таблиця 9.1. Параметри (коефіцієнти) моделі осердя

LEVEL	індекс моделі		
A	Параметр форми безгістерезисної кривої	A/м	
AREA	Площа поперечного перерізу магнітопроводу	см ²	
C	Стала пружного зсуву границь доменів		
GAP	Ширина повітряного зазору	см	
K	Стала рухомості доменів	A/м	
MS	Намагнічуваність насичення	A/м	
PACK	Коефіцієнт заповнення осердя		
PATH	Середня довжина магнітної силової лінії	см	

Слід зазначити, що в програмах АСхП при імітації роботи магнітного осердя здебільшого використовують модель осердя, яка була запропонована Джилсом та Аттертоном . Наводити математичні вирази цієї та інших моделей осердя, а також прийняті припущення при їх побудові у даному підручнику не будемо. Модель Джилса та Аттертона має обмеження при використанні у імітації високочастотних пристроїв, оскільки вона не враховує втрати при перемагнічуванні. Відома також модель Чена, яка застосована у середовищі OrCAD 9.2 та яка більш придатна для моделювання поведінки осердя при намагнічуванні змінним полем. Але до сьогодні імітаційне моделювання пристроїв із магнітним осердям часто створює проблеми інженерам-проектувальникам. Тому серед вчених та розробників продовжуються пошуки адекватних моделей магнітного осердя. Наприклад ідуть роботи по імплементації до структур модельного апарату програм АСхП моделі Ізінга.

Розробники середовищ АСхП створили користувачам їх програмних засобів додаткову опцію моделювання магнітного осердя. Вони заклали у програмний апарат можливість внесення в атрибути магнітного осердя координати кривої намагнічування, числові дані якої можуть бути отримана, наприклад, експериментальним шляхом або взята із літературних джерел, або з довідникових даних. При використанні цієї опції користувачеві за допомогою екранного інтерфейсу потрібно внести декілька (від 10 до 15) координат, тобто значень магнітної індукції як функції від значення напруженості магнітного поля. На рис. 1.8 показана екранна форма для зазначення координат магнітного осердя компоненту нелінійний трансформатор програми Electronic Workbench, Multisim.

У середовищі Design Lab інженеру-розробнику окрім зазначених вище опцій надано можливість продивитись графік кривої намагнічування обраного осердя за допомогою графічних засобів програмного модуля Parts.

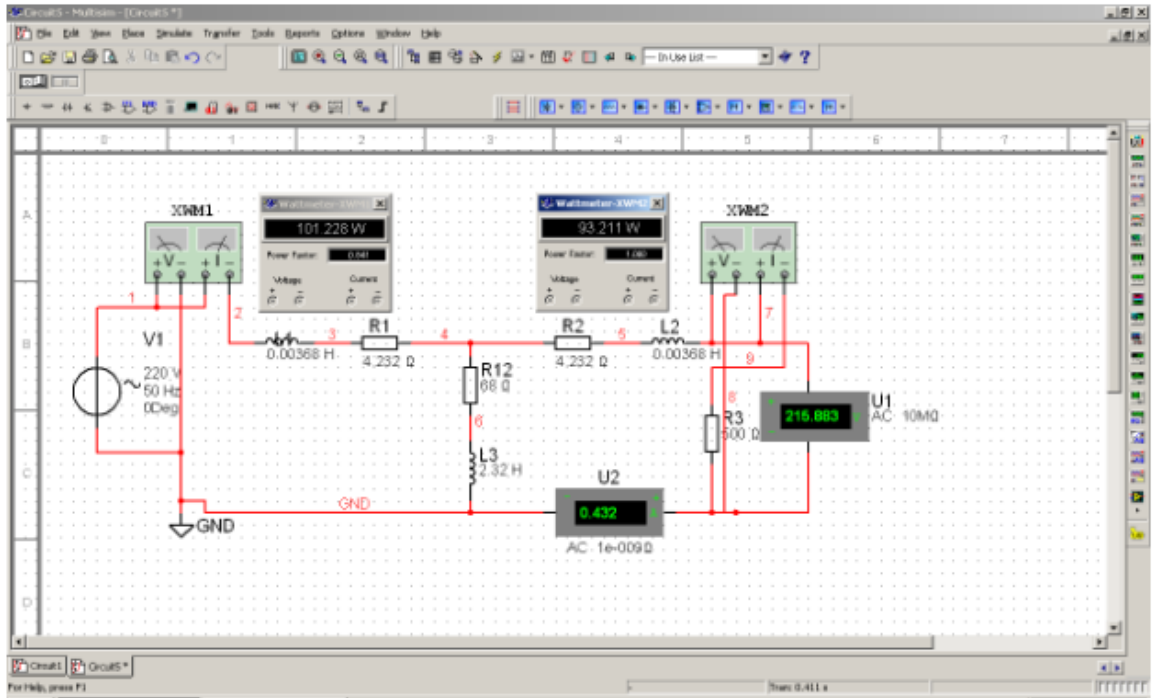


Рисунок 9.5. Вікно для редагування координат кривої намагнічування програми EWB

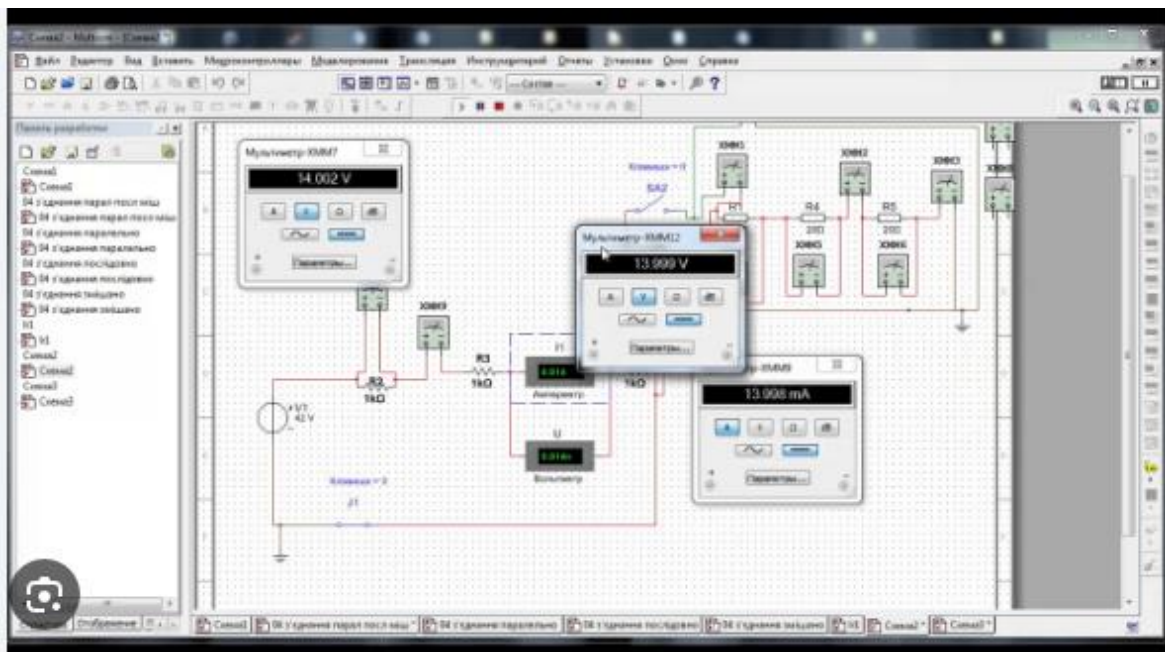


Рисунок 9.6. Вікно для редагування координат кривої намагнічування програми Multisim

10. Особливості автоматизованого проектування схем із активними дискретними компонентами.

До активних дискретних компонентів будемо відносити елементи діодної групи та транзистори.

У програму SPICE вбудована модель напівпровідникового діоду, яку можна представити у вигляді такої еквівалентної схеми рис. 1.10.

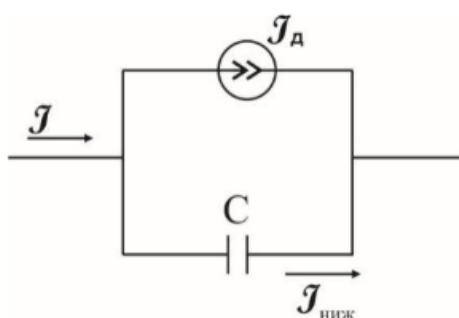


Рисунок 10.1. Еквівалентна схема діоду

На еквівалентній схемі представлено нелінійне залежне джерело струму $I(V)$ яке підключено паралельно до ємності р-п перетину C та послідовно підключеного питомого опору R_S . Це звісно узагальнена схема діоду, оскільки ми знаємо, що характеристики напівпровідникового перетину залежать від декількох факторів – полярності підводимої напруги, частоти струму, температури.

Параметри SPICE-моделі діоду наведені у таблиці 1.5. Потрібно чітко розуміти, що ці параметри імітують поведінку окремих характеристик діоду, тому певна група параметрів моделі входить до рівняння імітації одної характеристики, та не буде міститися у рівнянні для імітації іншої характеристики. Розглянемо, за допомогою яких рівнянь представляють характеристики діоду.

Таблиця 10.1 – Параметри моделі діоду

Параметр	Позначення параметра	Значення умовч	
NBVL	Коефіцієнт не ідеальності на ділянці пробою низького рівня	1	
XTI	Температурний (експоненційний) коефіцієнт струму насичення	3	
TIKF	Лінійний температурний коефіцієнт IKF	0	
TBV1	Лінійний температурний коефіцієнт BV	0	
TBV2	Квадратичний температурний коефіцієнт BV	0	
TRS1	Лінійний температурний коефіцієнт RS	0	
TRS2	Квадратичний температурний коефіцієнт RS	0	
KF	Коефіцієнт фліккер - шуму	0	
AF	Показник ступеню у формулі фліккер-шуму	1	
T_MEASU RED	Температура вимірювань		
T_ABS	Абсолютна температура		
T_RELGL OBAL	Відносна температура		
T_REL_LO CAL	Різниця між температурою діоду та моделі прототипу		
IS	Струм насичення при температурі 27 ⁰ C	10 ⁻¹⁴	
RS	Питомий опір	0	
N	Коефіцієнт інжекції	1	
ISR	Параметр струму рекомбінації	0	
NR	Коефіцієнт емісії для струму рекомбінації	2	
IKF	Максимальний струм при високому рівні інжекції	∞	
TT	Час перенесення заряду	0	
CJO	Бар'єрна ємність при нульову зсуві	0	
VJ	Контактна різниця потенціалів	1	
M	Коефіцієнт лавинного множення	0,5	
EG	Ширина забороненої зони	1,11	
FC	Коефіцієнт не лінійності бар'єрної ємності зміщеного у прямому напрямі перетину	0,5	
BV	Зворотна напруга пробою (позитивна величина)	∞	
IBV	початковий струм пробою, що відповідає напрузі BV (позитивна величина)	10 ⁻¹⁰	
NBV	Коефіцієнт не ідеальності на ділянці пробою	1	
IBVL	Початковий струм пробою низького рівня	0	

Струм діоду при негативному значенні напруги на діоді характеризує явище пробою.

При виконанні аналізу шумових складових схем із діодами використовують модель із двома джерелами шумового струму. Для цього в моделі наведеній на рис. 1.10 замінюють джерело струму на провідність G а також підключають паралельно до неї джерело шумового струму I яке

імітуватиме дробовий та фліккер шум діоду та яке має спектральну щільність струму.

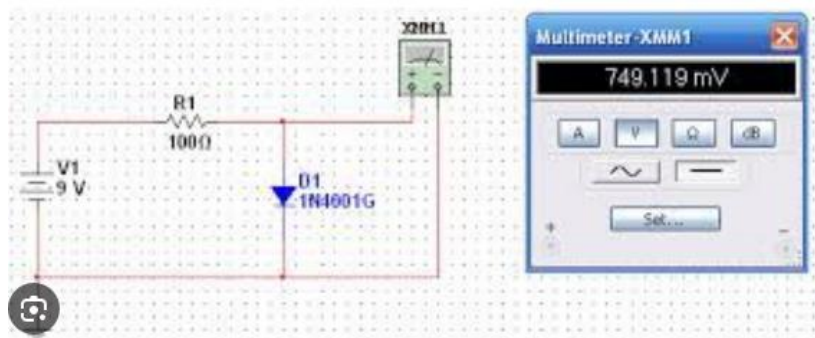


Рисунок 10.1. Модель діоду для імітації шумових складових

Для діодів Шоттки вказують інше значення температурного коефіцієнту струму насичення ХТІ яке дорівнюватиме 2. Для діодів із р-п перетином ХТІ=3.

Всі елементи діодної групи із р-п перетином (окрім тунельних діодів), включаючи діоди Шоттки, в яких присутній перетин типу метал-напівпровідник описують за допомогою вищевказаних рівнянь. При імітації стабілітрону до моделі діоду додається два параметри:

Параметр	Позначення параметра	Значення умовч	
IZT	номінальний струм стабілізації	10^{-4}	
VZT	напруга стабілізації при номінальному струмі стабілізації	1	

БПТ транзистор

В програмах автоматизації схемотехнічного проектування використовують схему заміщення біполярного транзистора (БПТ) у вигляді моделі Гумеля—Пуна яка дозволяє враховувати ефекти, що виникають при великих значеннях зсувів на перетинах транзистору. Ця модель автоматично спрощується до моделі Еберса – Молла, якщо усунути деякі параметри. Параметри повної математичної моделі БПТ наведені у табл. 1. На рис. 1.1

наведено схему моделі БПТ Гумеля – Пуна, а на рис. 1.1 схему моделі Еберса – Молла.

Таблиця 10.2. Параметри SPICE-моделі БПТ

Параметр	Позначення параметра	Значення умовч	
AF	Показник ступеня, що визначає залежність спектральної щільності флікер-шуму від струму через р-п перехід	1	
BF	Максимальний коефіцієнт підсилення за струмом у нормальному режимі у схемі з загальним емітером (без урахування струмів витікання)	100	
BR	Максимальний коефіцієнт підсилення за струмом у інверсному режимі у схемі з загальним емітером	1	
CJC	Ємність колекторного переходу при нульовому значенні напруги на ньому	0	
CJE	Ємність емітерного переходу при нульовому значенні напруги на ньому	0	
CJS (CCS)*	Ємність переходу колектор - підкладка при нульовому значенні напруги на ньому	0	
EG	ширина забороненої зони	1.11	
FC	Коефіцієнт нелінійності бар'єрних ємностей зміщених у прямому напрямі перетинів	0,5	
GAMM A	Коефіцієнт легування епітаксимальної області	10^{-11}	
IKF (IK)*	Струм початку спаду залежності BF від струму колектору у нормальному режимі	∞	
IKR*	Струм початку спаду залежності BR від струму емітеру у інверсному режимі	∞	
IRB*	Струм бази, при якому опір бази зменшується наполовину повного перепаду між RB і RBM	∞	
IS	Струм насичення при температурі 27°C	10^{-16}	
ISC (C4)*	Струм насичення витікання перетину база-колектор	0	
ISE (C2)*	Струм насичення витікання перетину база-емітер	0	
ISS	Зворотний струм р-п перетину підкладки	0	
ITF	Струм, який характеризує залежність TF від струму колектора при великих струмах	0	
KF	Коефіцієнт, що визначає спектральну щільність флікер-шуму	0	
MJC (MC)*	Коефіцієнт плавності колекторного перетину	0.33	
MJE (ME)*	Коефіцієнт плавності емітерного перетину	0.33	
MJS (MS)*	Коефіцієнт плавності перетину колектор-підкладка	0	
NC*	Коефіцієнт неідеальності колекторного перетину	2.0	
NE*	Коефіцієнт неідеальності емітерного перетину	1.5	
NF	Коефіцієнт не ідеальності у нормальному режимі	1.0	
NK	Коефіцієнт, що визначає множник Q_b	0.5	
NR	Коефіцієнт не ідеальності в інверсному режимі	1.0	
NS	Коефіцієнт не ідеальності перетину підкладки	1.0	
PTF	Додатковий фазовий зсув на граничній частоті	0	

Знак * справа від параметра означає, що даний параметр застосовують тільки для моделі Гумеля-Пуна.

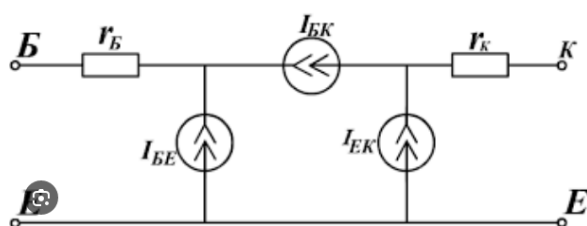


Рисунок 10.3. Схема заміщення біполярного транзистора у вигляді моделі Гумеля -Пуна

Наведемо співвідношення для статичного режиму роботи біполярного транзистора. В цих та подальших співвідношеннях крім вказаних у таблиці параметрів будемо використовувати скорочені позначення таких параметрів моделі : I_b – струм бази, I_c – струм колектора, I_{be1} – струм колектора у нормальному режимі, I_{bc1} – струм колектора в інверсному режимі, I_{be2} , I_{bc2} – складові струму переходу база-емітер, що викликані неідеальністю переходу, I_s – струм підкладки, V_{be} , V_{bc} – напруга на переході внутрішня база-емітер і внутрішня база-колектор, V_{bs} – напруга внутрішня база-підкладка, V_{bn} – напруга внутрішня база-підкладка для режиму квазінасичення, V_{bw} – напруга внутрішня база- колектор для режиму квазінасичення, V_{bx} – напруга база-внутрішній колектор, V_{ce} – напруга внутрішній колектор- внутрішній емітер, V_{js} – напруга внутрішній колектор-підкладка для NPN транзистора, напруга підкладка внутрішній колектор для PNP транзистора, напруга внутрішня база-підкладка для LPNP транзистора. Також позначено температурний потенціал $V_t = k \cdot T/q$.

Коефіцієнт $Area$ дозволяє врахувати паралельне поєднання однакових транзисторів. За замовчанням, тобто при наявності одного аналізованого транзистора він дорівнює одиниці.

Питомий опір бази R_b характеризують за допомогою двох складових. Перша складова R_B визначає опір виводів бази та опір зовнішньої області бази, якій не залежить від струму бази I_b . Друга складова R_{BM} характеризує опір активної області бази, який знаходиться безпосередньо під емітером, цей опір залежить від струму I_b . Питомий опір бази R_b визначають за допомогою таких співвідношень в залежності від значення параметру IR_B .

Список використаної літератури

1. Валуєв, М.І., Системотехніка та основи проектування аеронавігаційних систем. [Текст] / М.І. Валуєв, В.П. Харченко, А.Н. Яппаров. – К.: НАУ. - 2003р.-120с.
2. Саєнко С. Ю. Основи САПР / С. Ю. Саєнко, І. В. Нечипоренко – Х.: ХДУХТ, 2017. – 119 с.
3. Системи автоматизованого проектування та інженерного аналізу в машинобудуванні: навч. посіб. / О. С. Цибенко, М. Г. Крищук. – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 100 с.
4. Електроніка та мікросхемна техніка: курс лекцій для студентів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання спеціальності 163 «Біомедична інженерія» / укладачі: Н. Г. Косуліна, М. О. Чорна; ДБТУ. – Харків: [б. в.], 2023. – 146 с.
5. Розрахунок та проектування електронних пристроїв: метод. вказівки до виконання комплексного контрольного завдання для студентів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форми навчання спеціальності 163 «Біомедична інженерія» / укладачі: Н. Г. Косуліна, М. О. Чорна; ДБТУ. – Харків: [б. в.], 2023. – 56 с.
6. Розрахунок засобів фільтрації біосигналів БМА з курсу: «Основи конструювання БМА та основи технології виробництва БМА для біоб'єктів»: метод. вказівки для самостійного вивчення дисципліни для студентів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання спеціальності 163 «Біомедична інженерія» / укладачі: Н. Г. Косуліна, М. О. Чорна, В. В. Сухін; ДБТУ. – Харків: [б. в.], 2023. – 57 с.

Рекомендована література

1. Основи проектування електронних систем: лабораторний практикум / Уклад.: Т.В.Мелешко, В.А. Швець, А.О. Краснопольский, Н.О. Касперович, О.О. Туз. – К.: НАУ, 2014. – 102 с.

2. Практична електротехніка. Посібник для виконання лабораторних і практичних робіт з курсу «Основи теорії електричних кіл та сигналів» на основі віртуальної лабораторії Multisim. Частина I / В.М. Рябенський, В.С. Буряк. – Миколаїв: НУК, 2016. – 164 с.

3. Болюх В.Ф., Данько В.Г. Основи електроніки і мікропроцесорної техніки: Навч. посібник. – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – 257 с.

Навчальне видання

Методи та засоби автоматизації схемотехнічного
проектування

Конспект лекцій

КОСУЛІНА Наталія Геннадіївна
ЧОРНА Марія Олександрівна
СУХІН Віталій Володимирович

Формат 60x84/16. Гарнітура Times New Roman
Папір для цифрового друку. Друк ризографічний.

Ум. друк. арк. 3,04

Наклад 50 пр.

Державний біотехнологічний університет
61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44