

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЄКТУВАННЯ КУРС ЛЕКЦІЙ

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси»
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Укладач: Я. О. Гаран

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2022

Рецензент

Пушкар М. В., кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

Відповідальний
редактор

Троценко Є. О., кандидат технічних наук, доцент

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 6 від 24.06.2022 р.)
за поданням Вченої ради факультету електроенерготехніки та автоматики
(протокол № 10 від 20.06.2022 р.)*

Курс лекцій з дисципліни «Системи автоматизованого проектування» для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітньо-професійної програми «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси» призначений для формування у студентів уяви про сучасні системи автоматизованого проектування, їх застосування як при вирішенні загальних інженерних задач, так і при створенні спеціалізованих галузевих проектів. Студенти отримують знання про базові можливості відповідних програмних пакетів САПР.

Реєстр. № НП 21/22-830. Обсяг 3,9 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
Лекція 1	5
Поняття системи автоматизованого проектування (САПР)	5
Лекція 2	13
Структура САПР	13
Лекція 3	19
Моделювання тривимірної геометрії в САПР	19
Лекція 4	26
Основи роботи в програмному пакеті FreeCAD	26
Лекція 5	36
Побудова двовимірної геометрії та створення креслень у FreeCAD	36
Лекція 6	47
Тривимірне моделювання та аналіз фізичних моделей у FreeCAD	47
Лекція 7	60
Основи роботи в програмному пакеті FEMM	60
Лекція 8	70
Застосування скриптової мови Lua в FEMM	70
Лекція 9	80
Основи роботи в програмному пакеті QUCS	80
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	90

ВСТУП

Освіта студентів за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітньо-професійної програми «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси» передбачає не тільки отримання ґрунтовних теоретичних знань в галузі електричної інженерії, а й формування навичок практичного застосування таких знань, в тому числі, з використанням сучасних програмно-апаратних комплексів інженерних розрахунків.

Курс лекцій з дисципліни «Системи автоматизованого проектування» розрахований на формування у студентів розвинених уявлень про будову, архітектуру, модульну структуру, програмні, апаратні та інші складові сучасних систем автоматизованого проектування. Особливу увагу в курсі лекцій приділено розгляду систем загальноінженерного проектування, а також розгляду спеціалізованих пакетів прикладних програм і їхнього застосування з використанням сучасного комп'ютерного обладнання для вирішення задач проектування, моделювання режимів роботи та розрахунку характеристик як окремих складових електротехнічних пристроїв та електротехнологічних комплексів, так і режимів роботи електрообладнання в цілому.

В курсі лекцій розглядаються програмні пакети FreeCAD, QUCS, FEMM, які обрані з урахуванням відкритих ліцензій на користування даними програмними продуктами. Дані програмні продукти САПР дозволяють отримати базові знання про будову, принципи роботи та основні можливості використання САПР при виконанні інженерних розрахунків та проектуванні.

Знання, отримані при вивченні даного лекційного курсу студентами можуть бути використані ними для удосконалення своїх навичок при виконанні практичних та лабораторних завдань з широкого кола технічних дисциплін та під час дипломного проектування.

Лекція 1

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 відрізнитись 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. Англomовна 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)). Англomовна 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 схемотехнічного 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 мережєвих 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?

Лекція 2

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 методику 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), 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 аналітичним 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 дерезовидної структури, за аналогією з представленням дерева каталогів і файлів у файловій 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?

Лекція 3

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 багатоповерхову 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 тривимірної 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?

Лекція 4

Основи роботи в програмному пакеті FreeCAD

Серед сучасних САПР переважна частина є комерційними проектами, які фінансуються за рахунок продажу користувацьких ліцензій фізичним або юридичним особам. Однак, існують також некомерційні проекти розробки САПР, які засновані на волонтерській діяльності або фінансуються благодійницькими організаціями чи приватними особами задля можливості надання різним верствам населення доступу до сучасних технологій як в самоосвіті, так і в початку приватної комерційної діяльності із застосуванням сучасних САПР. Цілком зрозуміло, що некомерційні проекти з обмеженим фінансуванням (або взагалі волонтерські проекти) не можуть забезпечити повну конкуренцію комерційним проектам САПР, тому, в першу чергу, рекомендуються у використанні для набуття первинних навичок у роботі з САПР, які в подальшому можуть бути розширені на основі використання комерційних програмних пакетів.

САПР FreeCAD є, на відміну від ряду комерціалізованих САПР, універсальною САПР, тобто, підтримує велику кількість функцій, має модульну архітектуру з програмним ядром та різними за функціоналом модулями, які можуть підключатись без необхідності оновлення або заміни ядра FreeCAD. Даний програмний продукт розповсюджується за ліцензією LGPL (Загальна громадська ліцензія обмеженого використання GNU), яка вносить деякі обмеження на розповсюдження даного програмного забезпечення при модифікації його складових частин коду. У інших випадках, використання програмного коду FreeCAD без внесення в нього змін, в тому числі, в комерційних цілях, не обмежується.

У 2001 році розробник програмного забезпечення Юрген Рігель почав роботу над створенням програмного забезпечення з відкритим кодом, яке містило ядро геометричних побудов. В подальшому ця розробка отримала назву FreeCAD, а до роботи почали приєднуватись інші волонтери, які

додавали функціональності новому програмному продукту та покращували його якість. Станом на 20.03.2021 р. вже випущена версія 0.19 FreeCAD (дев'ятнадцята), в розробці перебуває версія 0.20.

На даний момент FreeCAD є кросплатформним програмним продуктом, тобто, пропонує функціональність, яка не залежить від апаратної платформи чи операційної системи, в якій виконується FreeCAD. Крім цього, FreeCAD може виконувати роль сервера при розподіленій роботі над проектом або задля забезпечення можливості виклику функціоналу FreeCAD з інших програм, або запускатись на окремому комп'ютері користувача. FreeCAD повністю забезпечений графічним інтерфейсом користувача, який надає можливість користування всіма його можливостями у зручній формі. Основою моделювання в САПР FreeCAD є параметричне моделювання, яке дозволяє отримувати результат моделювання, вносячи зміни на будь-якому етапі моделювання у відповідні параметри інструментів моделювання.

Основою взаємодії з користувачем FreeCAD є його графічний інтерфейс користувача, який є оригінальним і не копіює графічні інтерфейси інших програмних продуктів. При цьому, доброю традицією розробників FreeCAD є те, що у програмному пакеті додано можливість обрати набір комбінацій так званих «гарячих клавіш» (комбінацій натиснутих клавіш на клавіатурі або іншому пристрої вводу інформації), який відповідає одному з відомих поширених програмних пакетів інших розробників (наприклад, AutoCAD, Open Inventor, Maya Gesture, Blender тощо).

Приклад вигляду інтерфейсу FreeCAD після його запуску показано на рис. 4.1. Головне вікно FreeCAD містить поділ на кілька областей, розмір деяких з них можна варіювати і підлаштовувати під зручність роботи користувача. При першому запуску відображається стандартне меню вікна програми, стандартні стартові панелі інструментів, а також розташовані нижче фрейми – області перегляду створюваних об'єктів та інформації про проект і його складові.

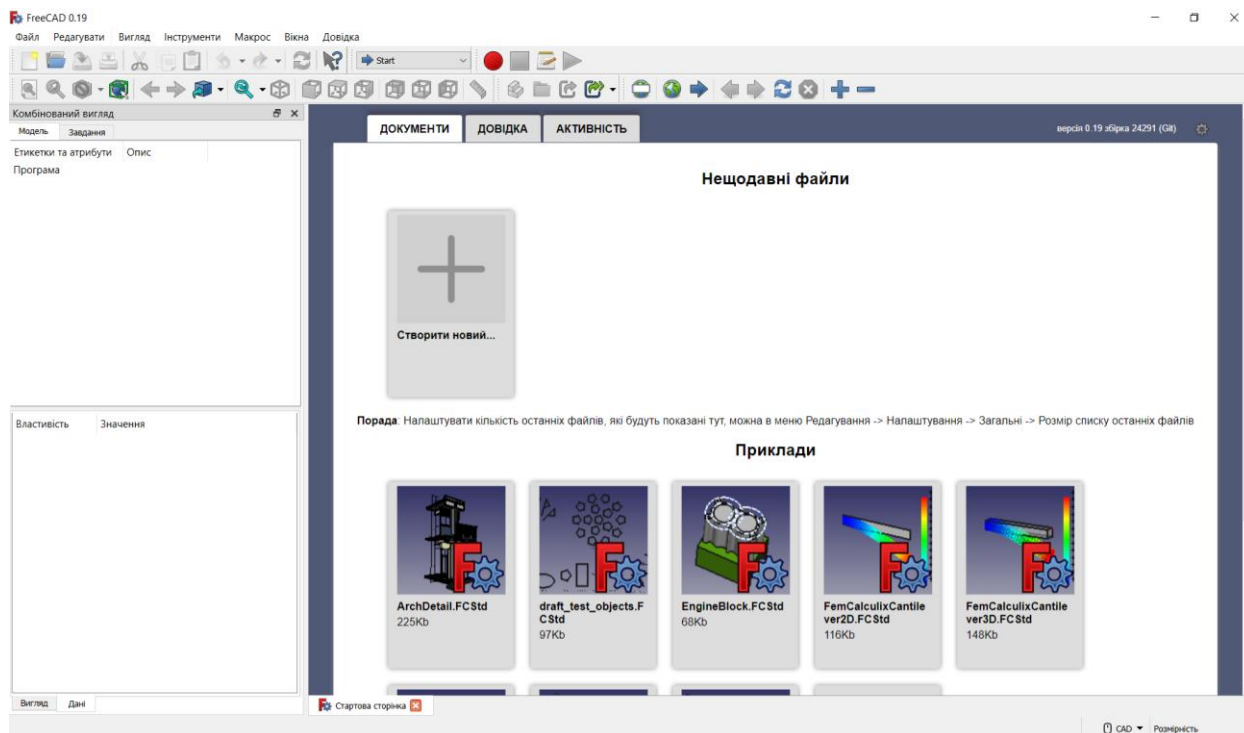


Рисунок 4.1 – Графічний інтерфейс програмного пакету FreeCAD після його запуску.

Налаштування мови інтерфейсу можливе з відповідного меню: *Редагувати → Установки → Загальне → Мова → Змінити мову (Edit → Preferences → General → Language → Change Language)*.

Віконний графічний інтерфейс програмного пакету FreeCAD складається з кількох областей, на які розділене головне вікно програми. В кожній області відображається певна інформація, яка змінюється в залежності від обраних налаштувань програми та дій користувача. Загальне призначення різних ділянок вікна програми показане на рис. 4.2.

На рис. 4.2 можна виділити наступні елементи вікна:

- 1 – Головний вид, який містить в лівій нижній частині вкладки відкритих вікон з різними видами проектів, з якими працює користувач.
- 2 – Тривимірний вид деталі (проекту, креслення, тощо). В правому нижньому кутку цього виду зображені координатні вісі тривимірної системи координат, а у правому верхньому кутку – навігаційний інструмент у вигляді куба, грані якого підписані «TOP», «FRONT», «BOTTOM», «LEFT»... та відповідають

відповідному виду проектування. Поруч з кубом розташовані стрілки, які дозволяють повертати натисканням лівої кнопки миші поточний вид на певний кут (обирається у налаштуваннях програми).

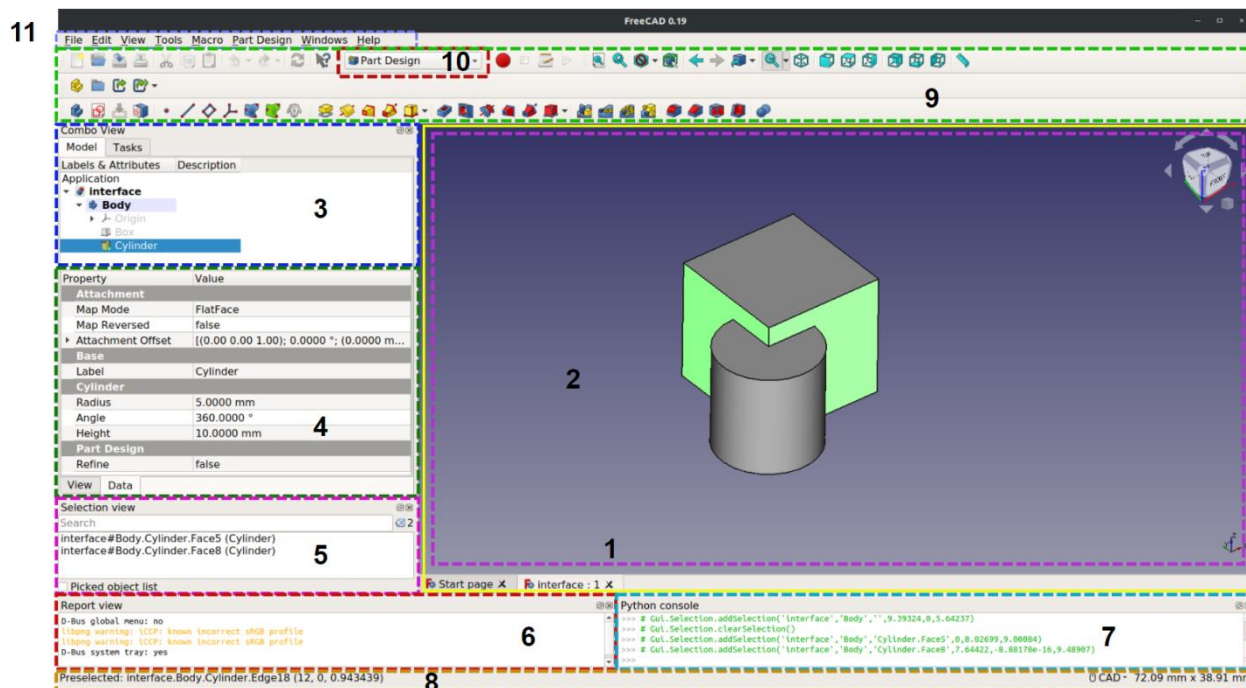


Рисунок 4.2 – Умовне ділення вікна графічного інтерфейсу програмного пакету FreeCAD на функціональні області

3 – Деревовидна структура проекту, в якій відображається ієрархія команд створення та модифікації об'єктів у проекті. Також в цій області відображається панель задач активних команд, які виконуються над об'єктами проекту.

4 – Редактор властивостей об'єктів, який дозволяє редагувати властивості об'єктів, що виділені в деревовидній структурі проекту.

5 – Область, в якій відображається інформація про виділені елементи об'єктів.

6 – Область відображення звітів програми, інформації про помилки, попередження та інші повідомлення програмного пакету.

7 – Консоль Python (вбудована мова програмування), в якій відображаються виконані команди. Також в цій консолі можна ввести текстові команди на мові Python для виконання скриптових команд.

8 – Строка статусу програми, в якій відображається коротка інформація про стан роботи програми, деякі повідомлення та підказки користувачу.

9 – Область панелі інструментів, яка змінюється в залежності від обраного модулю проектування, які у FreeCAD називаються робочими просторами (Workbench). Кожен такий модуль має власний набір інструментів, тому вигляд цієї панелі для різних режимів роботи суттєво відрізняється.

10 – Перемикач робочих просторів та модулів програмного пакету.

11 – Область стандартного меню програми.

Як правило, більшість команд графічного інтерфейсу FreeCAD можуть бути виконані кількома способами. Наприклад, за допомогою відповідних пунктів розділів стандартного меню; за допомогою натискання кнопкою миші на піктограмах відповідних інструментів; за допомогою натискання на клавіатурі певних комбінацій клавіш; набиранням та виконанням відповідного коду на мові Python у відповідному фреймі стандартного вікна програми.

Файл проекту в програмному пакеті FreeCAD є спеціальним контейнером (архівом), який містить ряд файлів даних про проект. У будь-якому файлі проекту міститься інформація про версію програмного пакету, в якому створено проект (зміна у роботі окремих модулів програмного пакету у нових версіях може відобразитись на сумісності відповідного проекту та поточної версії програми, встановлених на комп'ютері), інформація про налаштування інтерфейсу при роботі з проектом (наприклад, налаштування виду у області 3D-перегляду), інформація про структуру об'єктів у проекті (геометричні властивості, задіяні модулі, задіяні інструменти модифікації об'єктів у проекті, матеріали тощо). Файл проекту має розширення *.FCStd.

У деревовидній структурі проекту у зручному для користувача вигляді представлена інформація про об'єкти, які використовуються в проекті та задіяні до них інструменти. Розташування дерева об'єктів та задіяних до них модифікаторів (інструментів) відповідає принципам параметричного моделювання: останній задіяний модифікатор відповідає поточному стану

об'єкта, а зміни, які вносяться до попередніх модифікаторів, після перерахунку програмою відображаються на всіх наступних об'єктах та модифікаторах в деревовидній структурі проекту, які залежать (підпорядковані) від модифікатора, в який вносяться зміни. Слід зауважити, що не завжди зміни, які вносяться в не останній модифікатор в структурі, можуть бути коректно оброблені програмою. В таких випадках програмою відображаються відповідні попередження.

Кожен створюваний в програмному пакеті об'єкт отримує назву за замовчуванням, при цьому об'єкти одного типу відрізняються числовими маркуваннями після назви. Назву новоствореного об'єкта можна (і бажано) змінити на більш співставну з його функцією у проекті – це дозволить швидше орієнтуватись у деревовидній структурі. Виділення об'єкта у деревовидній структурі проекту призводить до появи у відповідній області графічного інтерфейсу інформації про його властивості. Частину цих властивостей можна змінити у відповідних полях, інша частина є системно залежною і не може бути змінена, тому надається у вигляді інформації без права редагування.

Модифікатори, які задіюють до об'єктів проекту, поділяються на 2 основні категорії: модифікатори, які вносять зміни до властивостей об'єкта, не змінюючи його тип, і такі, що під час внесення змін у властивості об'єкту одночасно змінюють його тип. В останньому випадку може відбуватись автоматична зміна назви об'єкту в деревовидній структурі проекту, або замість кількох об'єктів одного типу з'являється об'єкт іншого типу. При цьому можуть змінитись можливості редагування властивостей новоствореного об'єкту (наприклад, якщо був створений об'єкт типу «Прямокутник», а потім одна з його вершин була переміщена ту довільному напрямку, відбудеться перетворення об'єкту до типу «Ламана лінія», і налаштувати розміри сторін цього об'єкту буде можливо вже тільки відповідними інструментами об'єктів даного типу).

Область 3D-перегляду об'єктів FreeCAD має ряд налаштувань для зручної візуалізації результатів моделювання. Для користувача доступні інструменти стандартних 6 видів прямокутної системи координат тривимірного простору, а також два ізометричних види: ортогональний та перспектива. Для навігації (переміщення у тривимірному просторі моделі) рекомендується користуватись комп'ютерною мишею та комбінаціями клавіш клавіатури, які зручно налаштовуються.

Програмний пакет FreeCAD підтримує взаємодію з користувачем на мові програмування Python, тобто, всі команди графічного інтерфейсу можуть бути продубльовані у відповідній області (консолі) цього інтерфейсу (шляхом введення відповідного коду). Також програмний пакет підтримує створення макросів, які дозволяють автоматизувувати часті рутинні операції, які за використання графічного інтерфейсу віднімали б у користувача значно більше часу.

До складу FreeCAD версії 0.19 входить ряд заздалегідь встановлених модулів, які описуються нижче. Інші модулі, які розробляються командою розробників та волонтерами можуть бути завантажені та встановлені окремо. Кожен модуль називається робочим простором та містить інструменти, які відрізняють його функціональність від інших модулів (при цьому, різні модулі можуть мати і певну кількість однакових або схожих інструментів).

Arch. Призначений для роботи з архітектурними проектами та елементами.

Draft. Призначений для креслення на двовимірній площині. Містить інструменти для перетворення плоских креслень у тривимірні тіла. Зручний для побудови креслень за точними розмірами.

FEM. Модуль, призначений для аналізу задач на основі побудованих тривимірних моделей методом скінчених елементів.

Image. Модуль для роботи з файлами растрової графіки.

Inspection. Призначений для одержання інформації про взаємне розташування тривимірних об'єктів, співвідношення їхніх форм та розмірів.

Mesh. Призначений для роботи з полігональними сітками, які імпортуються із сторонніх програм, для їх наступної конвертації в твердотільну геометрію.

OpenSCAD. Призначений для взаємодії з відповідним пакетом параметричного твердотільного моделювання та внесення змін у відповідні файли моделей даного програмного пакету.

Part. Основний робочий простір, призначений для створення деталей у 2D та 3D форматах з геометричних примітивів з наступним використанням деталей у інших робочих просторах.

Part Design. Призначений для створення складних механічних деталей або конструкцій на основі двовимірних форм, створених у інших робочих просторах або вбудованими інструментами. Містить функції групування об'єктів, що спрощує структуру проекту.

Path. Призначений для створення спеціального програмного коду на основі створених в інших робочих просторах тривимірних об'єктів, який використовується в станках з числовим програмним керуванням (ЧПК) та для 3D-друку.

Points. Призначений для обробки файлів даних, отриманих з 3D-сканерів, з наступним перетворенням розташованих у просторі точок у полігональну сітку поверхні сканованого об'єкта.

Raytracing. Призначений для візуалізації проектів у 3D за допомогою встановлених окремо в операційній системі програм візуалізації. Дозволяє отримати якісну тривимірну картинку створених об'єктів.

Reverse Engineering. Призначений для перетворення геометричних багатогранників, твердих тіл або сітчастих поверхонь у параметричні об'єкти системи FreeCAD.

Robot. Призначений для симуляції промислового робота з 6-ма осями обертання, що дозволяє визначати траєкторію руху маніпулятора в області оброблюваної деталі.

Sketcher. Призначений для створення двовимірних ескізів на основі обмежень ступенів свободи двовимірних примітивів (ліній, точок). Створені геометричні двовимірні об'єкти в подальшому використовуються для створення на їх основі тривимірних тіл.

Spreadsheet. Призначений для взаємодії з зовнішніми програмами електронних таблиць (Microsoft Excel, Libre Office тощо), використання даних з таблиць та експорту результатів в таблиці.

Start. Початковий робочий простір, який відкривається при запуску FreeCAD.

Surface. Призначений для роботи з тривимірними поверхнями, які потім можуть бути трансформовані в тверді тіла в інших робочих просторах.

TechDraw. Призначений для створення базових технічних креслень тривимірних об'єктів, створених в інших робочих просторах. Містить інструменти створення видів та проекцій об'єктів, проставлення розмірів та текстових фрагментів у кресленні, імпорту/експорту файлів.

Test framework. Призначений для виявлення помилок у роботі FreeCAD.

Web. Модуль, який замінює стандартний вид (область 2 на рис. 4.2) на вбудований веб-браузер.

При запуску програми, за замовчуванням, поточним робочим простором встановлюється простір **Start**, в якому область 3D-перегляду містить інформацію на доступні шаблони проектів, проекти, що нещодавно відкривались, посилання на довідкову інформацію по роботі з програмним пакетом, вбудований браузер з посиланнями на спільноту, що займається розробкою та користуванням FreeCAD.

Контрольні запитання

1. Чи можна вважати FreeCAD вузькоспеціалізованою САПР?
2. Хто започаткував розробку FreeCAD?
3. В якій операційній системі може бути запущений FreeCAD?

4. За яким типом ліцензії розповсюджується FreeCAD?
5. Чи є графічний інтерфейс FreeCAD багатомовним?
6. Які основні області (за функціональністю) графічного інтерфейсу FreeCAD вам відомі?
7. Яка мова програмування використовується у FreeCAD для програмування та написання макросів?
8. Що означає «параметричне моделювання по відношенню до програмного пакету FreeCAD?
9. Якими способами можна у FreeCAD надавати команди для виконання різних операцій в програмному середовищі?
10. Чи допускається у FreeCAD змінювати назви створюваних об'єктів?
11. Чи всі властивості об'єктів підлягають редагуванню за допомогою графічного інтерфейсу?
12. Які вам відомі особливості роботи FreeCAD при застосуванні модифікаторів до об'єктів?
13. Чи є перелік модулів FreeCAD вичерпним?
14. Для чого призначений модуль Raytracing у FreeCAD?

Лекція 5

Побудова двовимірної геометрії та створення креслень у FreeCAD

В програмному пакеті FreeCAD присутні ряд модулів побудови двовимірної геометрії, призначення яких є різним. Модулі в графічному інтерфейсі FreeCAD носять назви робочих просторів, які відрізняються функціоналом включених до них інструментів. Існують три основних робочих простори FreeCAD, які виконують наступні задачі при побудові двовимірної геометрії:

- **TechDraw** – призначений для створення двовимірних креслень *існуючих* тривимірних моделей;
- **Draft** – призначений для створення двовимірної геометрії «з нуля» в абсолютних координатах точок двовимірних об'єктів;
- **Sketcher** – призначений для створення двовимірних об'єктів на основі обмежень ступенів свободи геометричних примітивів і використовується як основа для побудови тривимірних тіл в інших робочих просторах.

Доступ до кожного з вищезазначених робочих просторів (модулів) FreeCAD у вікні графічного інтерфейсу програми доступний або з випадаючого списку основної панелі інструментів, або з меню: «Вигляд» → «Робочий простір» → «Назва_робочого_простору».

Двовимірна геометрія у FreeCAD базується на прямокутній (декартовій) системі координат. Будь-який проект двовимірної геометрії містить обов'язково одну глобальну систему координат та може містити додатково локальні системи координат, прив'язані до глобальної або до об'єктів двовимірного простору. Локальні системи координат використовуються як для того, щоб зробити зручною роботу у великому за обсягами та кількістю об'єктів двовимірному просторі, так і для того, щоб забезпечити можливість автоматичного перерахунку системою геометричних

параметрів, залежних від локальної системи координат об'єктів, у разі зміни параметру, яким локальна система координат пов'язана з глобальною.

Об'єкти, які створюються у двовимірних просторах відповідних модулів FreeCAD, поділяються на основні та допоміжні. Основними є об'єкти, які відображаються при друку, або ті, що є безпосередніми складовими двовимірної геометрії, що відображається (або в подальшому використовується іншими модулями програми). Окрім основних існують також допоміжні об'єкти, призначення яких – створення шаблонів під час моделювання, визначення розмірів та створення координатних опорних прив'язок для моделювання з використанням основних об'єктів. Допоміжними об'єктами є системи координат, опорні площини, лінії, точки, геометричні примітиви, тимчасові розмірні елементи. Допоміжні об'єкти, як правило, відображаються в області 3D-перегляду тільки в режимах редагування двовимірної геометрії. В інших випадках ці об'єкти відображаються тільки у деревовидній структурі проекту і їх відображення також можна налаштовувати.

Робочий простір TechDraw FreeCAD використовується для створення креслень на основі існуючих тривимірних моделей (з прив'язкою розмірів креслень до розмірів тривимірної моделі). Більшість операцій створення креслень у даному робочому просторі максимально автоматизовані і від користувача вимагається налаштувати ряд основних елементів, що відносяться до формування креслень та інших складових конструкторської документації:

- обрати формат та шаблон оформлення друкованих екземплярів конструкторської документації у відповідності до існуючих стандартів, які підтримуються у FreeCAD;
- обрати види і розрізи проектованої деталі (об'єкта) та способи їхнього представлення на обраному форматі паперового документу;
- визначити розміри, які мають бути проставлені на кресленнях та скоригувати інформаційне налаштування проставлення цих розмірів;

- визначити всі інформаційні виносні елементи, які мають бути представлені на кресленнях та виконати налаштування їх представлення;

- налаштувати відображення всіх складових, що містяться на кресленні (вигляд, розміри та колір ліній, стрілок, виносних елементів; розміри та типи шрифтів у проставлених розмірах, виносних елементах, текстових фрагментах; вигляд штрихування граней або перерізів на кресленнях; відображення таблиць та інших елементів, що додаються на креслення);

- обрати формат експортування результатів оформлення креслення.

Інструменти робочого простору TechDraw згруповані наступним чином:

- **Page** – інструменти створення сторінок креслень за встановленими або створеними шаблонами;

- **Views** – інструменти додавання видів тривимірної геометрії, приєднаної до робочого простору, а також елементів двовимірної геометрії та рисунків на сторінки креслень (з відповідними налаштуваннями цих інструментів);

- **Clips** – інструменти групування видів на кресленні (з метою уніфікації застосовуваних до них налаштувань відображення);

- **Decorations** – інструменти оформлення зовнішнього виду креслень;

- **Dimensions** – інструменти проставлення розмірів та виносних розмірів чи анотацій;

- **Annotations** – інструменти додавання до креслень текстових та графічних елементів, не пов'язаних з геометрією моделі, для якої створюються креслення;

- **Extensions** – інструменти розширеного налаштування відображення таких елементів креслень, як позначення різьб, вісей симетрії тощо (плануються у версії FreeCAD починаючи з 0.20);

- **Export** – інструменти експорту креслень в стандартизовані формати файлів векторної графіки.

Робочий простір Draft FreeCAD використовується для створення повноцінної двовимірної геометрії, яка базується на точних координатах та розмірах геометричних примітивів, на яких базуються більш складні геометричні об'єкти. Така двовимірна геометрія може використовуватись як для створення креслень, для яких ще не створено тривимірних моделей, так і для того, щоб надалі використовувати двовимірну геометрію для побудови тривимірних геометричних об'єктів. Найчастіше Draft використовують для створення базових двовимірних об'єктів, на основі яких надалі створюють тривимірні об'єкти в робочому просторі Arch (архітектурне проектування). Практично всі інструменти двовимірного моделювання також доступні і в цьому робочому просторі тривимірної геометрії.

Особливістю робочого простору Draft є наявність системи шарів. Шари можна представити як прозорі плівки з кресленнями на них, які накладені одна на одну. В результаті, та плівка, яка розташована наверху стопки плівок відображатиме весь зміст зображеного на ній, а всі інші – лише ті частини зображення, які не перекриваються зображеннями, що лежать у більш верхніх шарах цієї стопки плівок. Система шарів походить від способу створення мальованої мультиплікації і є її аналогом, який дозволяє як зручно організовувати розташування об'єктів у двовимірному просторі (групувати їх), так і отримувати різноманітні ефекти накладання зображень.

Набір інструментів Draft достатньо різноманітний і дозволяє виконувати всі завдання технічного креслення. В графічному інтерфейсі FreeCAD для робочого простору Draft доступні кілька способів створення та редагування властивостей геометричних об'єктів. Створювати геометричні примітиви можна введенням команд в консолі Python, обиранням відповідних команд через пункти меню програми або через панелі інструментів з наступним налаштуванням параметрів інструментів, а також за допомогою миші або сенсорної панелі. Останній спосіб не дозволяє створювати геометричні об'єкти з точними координатами (на відміну від двох попередніх способів), оскільки точність позиціювання вказівника миші

або іншого вказуючого пристрою обмежена чутливістю даних пристроїв та координацією рухів руки людини. Внаслідок цього, для полегшення роботи з мишою або сенсорною панеллю в Draft задіяна система прив'язок, яка є стандартом для більшості сучасних програм будови двовимірної та тривимірної графіки. Сутність системи прив'язок полягає в тому, що користувач не може створити новий об'єкт (наприклад, поставити точку) в будь-якому місці координатної площини (якщо система прив'язок задіяна). Різновидом системи прив'язок є така система, в якій притягування вказівника відбувається тільки в області дії прив'язки, а в інших областях користувач може створювати геометричні об'єкти без обмежень за точністю позиціонування. Користувач за допомогою відповідних налаштувань (інструментів) обирає, в яких саме місцях координатної площини можуть бути встановлені вузлові точки об'єктів, під яким кутом можуть проходити лінії, якою може бути кривина дуг тощо. При цьому, якщо користувач не зміг точно позиціювати вказівник миші в точці з необхідними координатами, наприклад, для створення вузлової точки ламаної лінії і натискає ЛКМ, створення такої точки відбувається в тій точці координатної площини (з числа доступних за умовами прив'язування), яка є найближчою до точки, над якою знаходився вказівник миші. З аналогій, які походять на дію системи прив'язок, можна привести дію магнітів, які розташовані таким чином, що коли «металевий» вказівник миші проходить поблизу від них, він притягується до місць, де розташовані такі магніти, а коли вказівник потягнути трохи далі, він долає поле притягування такого магніту і може бути притягнутий до наступного, який виявиться ближчим до вказівника. Серед основних типів прив'язок можна зазначити притягування вказівника миші до кінцевих або вузлових точок геометричних об'єктів, до середин ліній, до центрів кіл або дуг, до перехресть ліній; при створенні відрізків наступна точка також може притягуватись так, щоб створювати перпендикуляр до існуючої лінії або дотичну до існуючого кола чи дуги тощо. Але на початку побудови геометричних примітивів за допомогою

миші, як правило, використовують систему прив'язки до координатної сітки. Координатна сітка в Draft є допоміжним об'єктом і являє собою ґратку з ліній, які паралельні координатним вісям і розташовані таким чином, що утворюють квадратні комірки однакових розмірів (ці розміри можна налаштувати в меню налаштувань FreeCAD). Новостворені точки ліній (або центри кіл та величини їх радіусів) притягуються до вузлів (перехресть ліній) координатної сітки.

Стандартними геометричними примітивами, які можна створювати в робочому просторі Draft, є: точка, відрізок прямої, ламана лінія, відрізок дуги, коло, еліпс, прямокутник, правильний багатокутник, криволінійні B-сплайни та криві Безьє. Додатково можна створювати скоси або скруглення кутів між відрізками, створювати криволінійні контури з шрифтового тексту тощо.

Після створення відповідних геометричних примітивів у Draft стають доступними інструменти їх модифікації. Модифікатори – це інструменти, які змінюють параметри геометричних примітивів. При цьому, модифікатори поділяються на дві основні категорії: такі, що не змінюють сутності геометричного примітиву (наприклад, змінюють лише його просторове положення), і такі, що перетворюють геометричний примітив на об'єкт іншого типу (наприклад, перетворюють правильний багатокутник у замкнену ламану лінію). Більшість модифікаторів містять налаштування, які дозволяють обрати між одним з двох типів модифікації об'єкта (або створення копії об'єкта, яка матиме новий тип геометричного примітива).

Інструменти робочого простору Draft згруповані на панелі інструментів у наступні категорії:

- **Drafting** – інструменти створення двовимірних примітивів;
- **Annotation** – інструменти створення написів для креслень, формування розмірних елементів на кресленнях та виносних інформаційних конструкцій креслень;

- **Modification** – інструменти модифікації створених двовимірних примітивів;
- **Draft Tray** – особлива група інструментів для налаштувань відображення, прив'язок, елементів оформлення геометричних об'єктів, текстових елементів тощо;
- **Draft Snap** – інструменти налаштування прив'язок під час створення та модифікації геометричних примітивів за допомогою миші або іншого подібного вказуючого пристрою;
- **Draft Utility** – інструменти для організації робочого простору (налаштування розташування об'єктів у різних шарах двовимірного простору, у різних групах, на додаткових площинах тощо);
- **Additional** – додаткові інструменти, призначені для створення більш зручних умов роботи з графічним інтерфейсом програми або для тестування проекту на наявність помилок чи потенційних проблем.

Варто також зазначити, що робочий простір Draft містить інструменти для перетворення об'єктів цього робочого простору в аналогічні об'єкти іншого двовимірного робочого простору Sketcher (з певними обмеженнями).

Робочий простір Sketcher принципово відрізняється від робочого простору двовимірного моделювання Draft тим, що призначений бути базою для тривимірного параметричного моделювання. На відміну від способу моделювання, який застосовується в Draft, при параметричному моделюванні на будь-якому кроці проектування є можливість змінити налаштування будь-якого модифікатора в ланці застосованих до початкового геометричного примітиву, та отримати кінцевий результат, що враховує такі зміни.

В основу роботи в робочому просторі двовимірного моделювання Sketcher покладено принцип обмежень. Сутність цього принципу полягає у швидкій побудові за допомогою миші геометричного примітиву довільної конфігурації та розмірів з наступним обмеженням його властивостей конкретними установками до одержання необхідних результатів.

Для прикладу можна розглянути процес побудови відрізка прямої у двовимірному просторі. Відрізок має 4 ступені свободи (якщо створений довільно). Після того, як всі ступені свободи відрізка будуть обмежені конкретними налаштуваннями, цей відрізок буде однозначно ідентифікований у двовимірному просторі у єдиному екземплярі з відповідними властивостями. Відрізок без обмежень можна переміщувати довільно по горизонталі, переміщувати по вертикалі, змінювати його довжину, а також обертати. Ці ступені свободи (Degrees Of Freedom – DOF) можна обмежити різними способами. Наприклад, можна обмежити координату початку відрізка по горизонталі фіксованим значенням відстані від початку координат або будь-якої іншої фіксованої по горизонталі точки простору (залишається 3 ступені свободи); аналогічно можна обмежити координату початку відрізка по вертикалі (залишається 2 ступені свободи); далі можна або так само обмежити 2 ступені свободи (по горизонталі і вертикалі) для кінця відрізка, або обмежити довжину відрізка (залишиться 1 ступінь свободи, яка дозволить побудувати безліч відрізків визначеної довжини, які обертаються навколо його початку), а потім обмежити кут між відрізком та однією з координатних вісей або іншим відрізком, кут повороту якого в координатній площині зафіксовано. Різні способи вичерпання 4 обмежень для геометричних примітивів Sketcher роблять роботу в цьому робочому просторі більш зручною. Одночасно, незмінність початкових геометричних примітивів та можливість редагування їхніх обмежень на всьому шляху створення та редагування проекту робить Sketcher основою для тривимірного параметричного моделювання.

Обмеження в Sketcher бувають двох основних типів: геометричні та розмірні. Геометричні обмеження стосуються певних логічних операцій відповідності взаємного розташування геометричних примітивів (наприклад, відрізок має бути тангенційним до кола). Розмірні обмеження стосуються числових характеристик (координат, довжин, радіусів тощо), якими характеризуються взаємні розташування геометричних примітивів один

відносно одного (наприклад, числове значення радіуса кола визначає відстань, на яку віддалена будь-яка точка кола від його центру).

Ще однією особливістю створення двовимірної геометрії у Sketcher є відображення в області 3D-перегляду розмірних елементів та інших обмежень, які застосовані для геометричних примітивів. Однак, якщо вийти з режиму редагування (в Sketcher, на відміну від Draft, редагується не креслення для друку, а ескіз для подальшого тривимірного моделювання), всі розмірні та обмежувальні елементи та позначки геометричних примітивів зникають і при друку не відображаються, тому для друку креслень використовувати Sketcher не рекомендовано (окремих інструментів для проставлення розмірів для режиму друку ескізу в Sketcher не передбачено).

Геометричні об'єкти робочих просторів Draft та Sketcher, які являють собою замкнені контури (не залежно від способу побудови цих контурів), можуть бути перетворені як у твердотільні тривимірні тіла, так і замкнені оболонки (поверхні або «сітки») тривимірних тіл у відповідних робочих просторах тривимірного моделювання. Всі інші геометричні об'єкти, які не являють собою замкнених контурів у робочих просторах двовимірного моделювання, можуть бути перетворені виключно у відповідні тривимірні поверхні.

Також слід звернути увагу на те, що якщо у геометричних об'єктах Sketcher присутні лінії, які перетинаються, але не мають спільної точки у місці перетину, система може створити на основі ескізу Sketcher у робочому просторі тривимірного моделювання поверхневу оболонку замість суцільного твердого тіла. Якщо всередині замкненого контуру ескізу Sketcher присутній інший замкнений контур, при створенні тривимірного тіла у відповідному робочому просторі на основі даного ескізу внутрішній контур формуватиме переріз наскрізного отвору в такому тривимірному тілі.

Основні інструменти робочого простору Sketcher згруповані у наступні категорії:

– **General** – загальні інструменти, призначені для створення, редагування, об'єднання, приєднання ескізів до існуючих площин чи граней тривимірних тіл;

– **Sketcher geometries** – інструменти для створення геометричних примітивів у двовимірному просторі (набір інструментів Sketcher є розширенням у порівнянні з Draft);

– **Geometric constraints** – інструменти створення геометричних обмежень для існуючих геометричних примітивів;

– **Dimensional constraints** – інструменти створення розмірних обмежень для існуючих геометричних примітивів;

– **Sketcher tools** – інструменти для роботи з обмеженнями груп геометричних примітивів, перевірки наявності надлишкових або відсутніх обмежень, прив'язування ескізів до координатних систем чи площин, створення копій, клонів ескізів, створення масивів геометричних примітивів тощо;

– **B-spline tools** – інструменти для налаштування обмежень криволінійних В-сплайнів;

– **Additional** – додаткові інструменти обмежень та інструменти перемикань між основною та допоміжною геометрією.

Слід зауважити, що існуючі робочі простори двовимірного моделювання перебувають у постійному розвитку та удосконаленні, тому у наступних версіях FreeCAD функціональність розглянутих модулів (робочих просторів) FreeCAD може змінитись.

Контрольні запитання

1. Що називають робочим простором у FreeCAD?
2. Які основні робочі простори використовують у FreeCAD для побудови двовимірної геометрії?

3. Чим відрізняються основні та допоміжні об'єкти у двовимірній геометрії FreeCAD?
4. Чи можна створити креслення «з нуля» в робочому просторі TechDraw?
5. Чи можливо використовувати в робочому просторі TechDraw формати сторінок, не представлених у шаблонах стандартних форматів?
6. Для чого призначений робочий простір Draft?
7. Поясніть сутність шарів у робочому просторі Draft.
8. Що таке прив'язки в робочому просторі Draft?
9. Поясніть поняття координатної сітки.
10. Дайте визначення поняттю модифікаторів у робочому просторі Draft. Якими вони бувають?
11. Що таке параметричне моделювання?
12. Що таке ступені свободи геометричних примітивів в робочому просторі Sketcher?
13. Поясніть принцип обмежень в робочому просторі Sketcher.
14. Яких типів бувають обмеження в Sketcher?
15. Що називають розмірними елементами в робочому просторі Sketcher?

Лекція 6

Тривимірне моделювання та аналіз фізичних моделей у FreeCAD

Тривимірне моделювання є головною задачею, для виконання якої був задуманий та створений програмний пакет FreeCAD. Саме тому, модулі (робочі простори) тривимірного моделювання у FreeCAD є найбільш розвиненими і функціональними. Більш того, функціональність тривимірного моделювання у FreeCAD не зосереджена в лише одному модулі з універсальними налаштуваннями «для будь-яких потреб». Кожен модуль тривимірного моделювання у FreeCAD виконує функції створення геометричних моделей тривимірних тіл у той спосіб і такими інструментами, які є більш звичними та зручними для інженерів у відповідних галузях.

Основними модулями для створення тривимірної геометрії у FreeCAD є наступні робочі простори:

- **Arch** – призначений для побудови тривимірних об'єктів архітектурного призначення;
- **Mesh Design** – призначений для створення та редагування об'єктів тривимірної оболонкової (поверхневої, сітчастої) геометрії, в тому числі, імпортованої з файлів, створених у інших програмах;
- **OpenSCAD** – створення та редагування параметричним моделюванням геометричних об'єктів інструментами програмного пакету OpenScad, доданими до FreeCAD;
- **Part** – створення та редагування тривимірних геометричних об'єктів на основі інструментів булевих операцій з тривимірними геометричними примітивами;
- **Part Design** – створення та редагування тривимірних геометричних об'єктів на основі параметричного моделювання, що базується на використанні базових геометричних примітивів;
- **Points** – створення моделей тривимірних об'єктів на основі хмари точок, отриманих шляхом тривимірного сканування реальних об'єктів;

– **Surface** – створення та редагування параметричних тривимірних оболонок (сіток) або поверхонь.

Оскільки кожен з перелічених робочих просторів має власну спеціалізацію виконуваних видів моделювання, варто зупинитись на тих робочих просторах, які відповідають твердотільному машинобудівному моделюванню. В першу чергу, це робочі простори OpenSCAD, Part, Part Design.

Робочий простір Part пропонує «застарілий» спосіб створення тривимірної геометрії. Хоча цей спосіб ще використовується у багатьох програмних пакетах тривимірного моделювання, однак, так само, як і у FreeCAD, основне призначення наявності такого способу моделювання у більшості програмних пакетів – надання користувачам можливостей сумісності із старими версіями програм. В основу проектування в робочому просторі Part покладено принцип, в якому кожен створюваний геометричний тривимірний примітив є окремим тілом, над яким надалі виконуються операції модифікації, найпоширенішими з яких є булеві операції. Метод створення тривимірної геометрії шляхом булевих операцій над геометричними примітивами хоча і є доволі простий і швидкий для створення геометричних об'єктів незначної складності, починає проявляти свої недоліки під час збільшення складності результуючої моделі. Кількість геометричних тіл, які беруть участь у логічних операціях додавання, віднімання чи перетину збільшується, що загромождає деревовидну структуру проекту. Аналогічним чином виконується моделювання в робочому просторі OpenSCAD, на базі якого побудовано робочий простір Part. Слід зазначити, що крім тривимірних геометричних примітивів ці робочі простори дозволяють створювати тривимірні тіла і на основі двовимірних ескізів видавлюванням поверхонь, обертанням та іншими інструментами, створювати тривимірні геометричні примітиви на основі тривимірних оболонок (сіток) та іншими способами.

На відміну від розглянутих вище робочих просторів робочий простір Part Design містить дещо іншу базову логіку побудови тривимірної геометрії. В основі побудови тривимірної геометрії у Part Design покладено принцип подібності до виготовлення деталей у реальних умовах виробництва. За цим принципом створюваний геометричний тривимірний об'єкт є окремим тілом, до складу якого входять інші тривимірні геометричні примітиви та інструменти, задіяні над ними. При такій побудові геометричні примітиви не створюються як окремі тривимірні тіла, а мають додаватись у деревовидну структуру начального тіла в якості параметрів його модифікації. Особливістю додавання модифікаторів у робочому просторі Part Design є те, що кожен наступний геометричний примітив має торкатись (або перетинатись) тривимірної геометричної форми, створеної на попередньому кроці моделювання. Це нагадує наварювання (чи напаювання) на поверхню початкового тривимірного тіла інших елементів, або вирізання з поверхні початкового тривимірного тіла пазів чи отворів за допомогою різального інструменту. Завдяки такому принципу побудови тривимірної геометрії тіла у Part Design чітко відображають логіку їхнього виготовлення на виробництві, що значно скорочує час на розробку відповідних технологій при передачі конструкторської документації на виробництво. Крім того, САПР автоматично реагує повідомленнями про помилки при спробі створити новий геометричний примітив поза поверхнями вже існуючого тривимірного тіла (це стосується як операцій створення, так і операцій зміни параметрів задіяних в деревовидній структурі проекту інструментів). Позитивною особливістю, якою Part Design відрізняється від Part є те, що кількість виконуваних операцій з інструментами під час створення тривимірних моделей, що складаються з певної кількості однотипних геометричних примітивів (отворів, наприклад) є меншою завдяки відсутності необхідності створювати для таких операцій окремі геометричні тіла та виконувати з ними булеві операції. Ще однією особливістю Part Design є те, що робочий простір Sketcher з усіма необхідними інструментами «вбудований в Part Design в

інструментах додавання та редагування двовимірних примітивів, на основі яких будуються тривимірні тіла. Це дозволяє виконувати моделювання не перемикаючись на відповідний робочий простір, при цьому зберігаються налаштування параметричного моделювання як тривимірних геометричних примітивів, так і двовимірних ескізів.

При виборі робочого простору PartDesign панель інструментів FreeCAD відображає інструменти, необхідні для виконання задач в даному просторі. Вони згруповані в наступні категорії:

- допоміжні інструменти;
- створення опорних елементів;
- інструменти додавання матеріалу;
- інструменти відбирання матеріалу;
- інструменти перетворення форм;
- інструменти обробки граней;
- інструменти булевих операцій;
- додаткові інструменти;
- інструменти контекстного меню;
- інструменти налаштувань.

Допоміжні інструменти призначені для створення нових тривимірних тіл в проекті та для організації взаємодії з робочим простором Sketcher.

Інструменти створення опорних елементів дозволяють організувати додаткові координатні системи, базові точки, лінії та площини, відносно яких будуватимуться геометричні примітиви, що входять до складу активного в деревовидній структурі проекту тривимірного тіла.

Інструменти додавання матеріалу призначені для модифікації опорного (базового) тіла, одержаного в результаті виконання всіх попередніх модифікаторів над базовим геометричним примітивом, на основі приєднання додаткових об'ємів на основі або тривимірних геометричних примітивів, або операцій над двовимірними ескізами.

Інструменти відбирання матеріалу аналогічні попередній групі інструментів, за виключенням того, що не додають, а віднімають частину об'єму від існуючого тривимірного тіла.

Інструменти перетворення форм використовують для створення масивів модифікаторів – групи модифікаторів з однаковими налаштуваннями більшості параметрів. Такі інструменти найчастіше використовують, наприклад, для створення груп отворів у деталях.

Інструменти обробки граней призначені для створення різноманітних фасок та скруглень кромek тривимірних тіл. Ці інструменти не відносяться до категорії інструментів відбирання матеріалу, хоча за своєю сутністю є такими. Крім того, такі інструменти дозволяють на основі суцільного тіла створювати трубчасті конструкції з певною товщиною стінки, скошення граней тіл тощо.

Серед інструментів булевих операцій наявний лише один відповідний інструмент, який дозволяє поєднати у булевій операції кілька наявних у проекті тривимірних тіл. Булеві (або логічні) операції – це операції «ТА», «АБО», «НІ». Операція «ТА» означає геометричне місце точок, які одночасно належать всім тілам, що беруть участь у логічній операції (такою операцією створюють об'єкт, який є перетином кількох тіл). Операція «АБО» означає геометричне місце точок, які належать будь-якому тілу з числа тих, що беруть участь у логічній операції (такою операцією створюють об'єднання кількох тіл в одне). Операція «НІ» означає геометричне місце всіх точок першого тіла, за виключенням всіх геометричних місць точок, які належать одночасно й будь-якому з інших тіл, які беруть участь у логічній операції (такою операцією виконують вирізання з одного тіла частини об'ємів інших тіл, якими вони перетинаються).

Додаткові інструменти відносяться до створення геометричних примітивів, які не є часто використовуваними, однак, вимагають значних обсягів роботи для їхнього створення (наприклад, шестерні, «зірочки» тощо).

Інструменти контекстного меню та інструменти налаштувань є менш часто застосовуваними, оскільки відносяться до режимів візуалізації об'єктів у вікні 3D-перегляду, переміщенням об'єктів між різними тілами тощо.

Під час проектування будь-якого тривимірного об'єкта дуже часто виникає потреба вивчення властивостей даного об'єкта на етапі проектування, визначення граничних допустимих впливів зовнішніх чинників на проєктований об'єкт, взаємодія об'єкта з навколишнім середовищем або з іншими об'єктами та деталями у складній конструкції (механізмі) тощо. Для аналізу набутих властивостей проєктованого об'єкта у FreeCAD передбачено робочий простір FEM, який надає інструменти фізичного аналізу для розробників.

Модулі фізичного аналізу, які можуть бути задіяні в робочому просторі FEM, не створюються розробниками FreeCAD. Натомість, розробники FreeCAD використовують доступні модулі сторонніх розробників, додаючи їх до функціоналу робочого простору FEM. У базовій конфігурації FEM доступний лише модуль аналізу механіки суцільних середовищ та теплопередачі. Цей модуль є вбудованим в інсталяційний пакет FreeCAD і може бути використаний для фізичного аналізу моделей суцільних твердих тіл або рідинних середовищ вбудованими інструментами. Для вирішення інших типів задач (наприклад, задач електромагнетизму), у FreeCAD передбачено можливість приєднання в якості модулів окремо встановлюваних програмних пакетів, за допомогою яких можна вирішувати відповідне коло задач при дослідженні властивостей проєктованого об'єкта.

Існує ряд методів математичного моделювання ділянки фізичного простору, в якому розташовується досліджуваний об'єкт, які дозволяють визначати властивості цього об'єкту за впливу на нього факторів оточуючого середовища. Найбільш поширеним з таких методів є метод скінченних елементів (finite element method – *FEM*), який набув поширення під час розвитку та удосконалення цифрової обчислювальної техніки.

Сутність методу скінченних елементів полягає в тому, що область простору (з наявними в ній об'єктами, взаємодію між якими треба досліджувати), фізичні взаємодії в якій можна представити у вигляді системи диференціальних рівнянь у часткових похідних, може бути розділена на диференційовані ділянки (елементарні довжини, площини або об'єми), з'єднані між собою скінченною кількістю вузлів (точок) з визначеними ступенями свободи (DOF). Значення фізичної величини, яка має визначатись у визначеній ділянці простору, вважається фіксованою у вузлах побудованого диференційованого простору і входить в якості невідомих до системи рівнянь. Для вирішення такої системи щодо ділянки простору, для якої складається система рівнянь, до такої системи рівнянь додають необхідні граничні умови, які обмежують кількість рівнянь до скінченної величини, яка не перевищує кількості вузлів у даній ділянці простору. Поділ ділянки простору на елементи скінченної довжини (площі, об'єму) має назву побудови сітки скінченних елементів. Елементи в такій сітці можуть мати ребра між вузлами як у вигляді відрізків прямих, так і у вигляді кривих. Це саме стосується і бічних поверхонь скінченних об'ємів, які можуть бути як плоскими гранями, так і криволінійними поверхнями. При розв'язанні системи рівнянь значення у точках простору, які не є вузлами сітки скінченних елементів визначається за допомогою апроксимуючих функцій різного порядку (який залежить від ряду факторів, наприклад, кривини поверхонь моделювання (ребер), що поєднують вузлові точки). Рішення таких систем рівнянь є наближенням і, як правило, обмежується певною точністю розрахунків, яку регулює користувач.

Прикладом застосування методу скінченних елементів для вирішення фізичних задач у програмному пакеті FreeCAD можна назвати вирішення задачі статичної деформації твердого (суцільного) тіла. В такій задачі суцільне тверде тіло розділяється на диференціальні об'єми скінченного (малого) розміру. Бічні грані таких диференційованих об'ємів взаємодіють з суміжними гранями сусідніх об'ємів за третім законом Ньютона, а частина

граней можуть піддаватись впливу зовнішніх чинників (сил, тиску). Так само, до чинників впливу на диференційовані об'єми, крім зовнішніх сил, можуть додаватись впливи від сил тяжіння, сил, пов'язаних з температурними деформаціями тощо. Внаслідок дії сил на диференційовані об'єми тіла в цих об'ємах виникають напруженості, а вузлові точки таких об'ємів можуть переміщуватись під дією результуючої сили. В усталеному (статичному) режимі деформаційні переміщення вузлових точок скінченних (диференційованих) об'ємів тіла у формі нескінченно малих прямокутних паралелепіпедів, грані яких паралельні координатним площинам, пов'язуються з механічними напруженостями, що виникають в цих об'ємах та діючими на ці об'єми силами наступною системою рівнянь:

$$\begin{cases} 0 = F_x = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \\ 0 = F_y = \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z}, \\ 0 = F_z = \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \end{cases} \quad (6.1)$$

де F_i – складові діючих сил по відповідних координатних вісях; σ_{ij} – складові відповідних механічних напружень по відповідних координатних вісях, які входять до системи у часткових похідних.

Для розв'язання системи (6.1) необхідно виразити механічні напруженості через деформації елементарних об'ємів на основі закону Гука, а деформації елементарних об'ємів виразити через переміщення вузлових точок на основі формули Коші:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (6.2)$$

де, ε_{ij} – тензор деформації; u – вектор переміщення елементарних об'ємів вздовж відповідних координатних вісей, що входить до формули у часткових похідних.

Для обмеження кількості рішень таких систем рівнянь вводять граничні умови для області простору, в якій розташований об'єкт досліджень. Це можуть бути як обмеження переміщення точок тіла, так і обмеження

зовнішніх сил, що впливають на тіло, а також інші обмежуючі параметри налаштувань, які дозволяють за скінченної кількості елементарних об'ємів, на які поділено досліджуваний об'єкт, знайти рішення системи диференціальних рівнянь у часткових похідних та визначити значення напруженостей та зсувів для всіх вузлових точок сітки скінченних елементів проектного об'єкта.

Стандартний набір модулів FreeCAD включає в робочий простір FEM вирішувач CalculiX, за допомогою якого можна вирішувати задачі механіки твердих тіл та рідин (газів). Додатково до FreeCAD можна додати окремо встановлювані вирішувачі інших розробників (наприклад, Elmer, Z88 тощо), які дозволяють вирішувати більш широке коло фізичних задач.

Для візуалізації результатів математичного моделювання (результатів роботи вирішувача системи рівнянь) у FreeCAD також використовуються зовнішні модулі візуалізації сторонніх розробників, які можуть бути підключені до робочого простору FEM. Окрім стандартного модуля обробки результатів моделювання методом скінченних елементів доступні до встановлення модулі постобробки сторонніх розробників (наприклад, Paraview).

Звичайний процес аналізу моделі методом скінченних елементів у програмному пакеті FreeCAD робочого простору FEM складається з наступних етапів:

- постановка задачі, визначення методів вирішення, граничних умов та впливів на модель, якими можна нехтувати;
- створення геометричної моделі всіх об'єктів, які входитимуть до аналізу, та оточуючого простору;
- вибір вирішувача для робочого простору FEM (або використання існуючого) та створення відповідного аналізу в робочому просторі;
- додавання матеріалів до геометричних об'єктів та середовищ частини простору, для якого виконується моделювання;
- додавання граничних умов та впливів на об'єкти зовнішніх чинників;

- створення сітки скінченних елементів для всіх об'єктів частини простору, в якому відбувається моделювання (за необхідності, уточнення та налаштування сітки скінченних елементів на окремих ділянках простору);
- запуск зовнішнього вирішувача для знаходження рішення системи рівнянь, що відповідає попереднім налаштуванням моделювання;
- візуалізація результатів моделювання вбудованими засобами FreeCAD, або експорт результатів у один з форматів для обробки зовнішніми програмами.

При виборі робочого простору FEM панель інструментів відображає інструменти, необхідні для виконання задач в данному просторі. Вони згруповані в наступні категорії:

- аналіз;
- матеріали;
- геометрія елементів;
- обмеження задач електростатики;
- обмеження середовищ;
- геометричні обмеження;
- механічні обмеження;
- температурні обмеження;
- додаткові обмеження;
- побудова сітки скінченних елементів;
- вирішення задач;
- візуалізація результатів;
- утиліти.

Інструменти аналізу дозволяють створювати нові об'єкти аналізу методом скінченних елементів у проекті.

Інструменти категорії матеріалів дозволяють створювати, редагувати та присвоювати матеріали (властивості матеріалів) геометричним тілам, наявним у проекті.

Інструменти категорії геометрії елементів відповідають за обмеження геометричних розмірів та форми, які можуть накладатись на скінченні елементи до початку процедури створення сітки скінченних елементів тривимірного тіла.

Інструменти обмежень задач електростатики визначають відповідні обмеження для тривимірної геометрії та вимагають наявності приєднаного до FreeCAD відповідного модуля аналізу (наприклад, Elmer).

Інструменти обмеження середовищ визначають обмеження, які накладаються на рідинні (газові) середовища, наявні в проекті.

Інструменти геометричних обмежень визначають обмеження згину, кручення, зсуву тощо, які можуть накладатись на певні елементарні ділянки об'єкта (наприклад, грані, площини).

Інструменти механічних обмежень визначають механічні властивості суміжних скінченних елементів, їхній взаємний вплив, зсув, деформацію тощо під дією зовнішніх чинників, а також визначають самі зовнішні чинники, що впливають на геометрію модельованого об'єкта.

Інструменти температурних обмежень визначають граничні умови розподілу теплового потоку в розрахунковій області, визначають джерела тепла та стаціонарні температури поверхонь, тощо.

Інструменти додаткових обмежень містять граничні умови для специфічних розрахунків (наприклад, руху деталі в підшипнику тощо).

Інструменти побудови сітки скінченних елементів представляють можливості створення, деталізації та налаштувань сітки скінченних елементів, яка є базою для створення системи диференційних рівнянь у часткових похідних.

Інструменти вирішення задач дозволяють налаштувати та запустити процес вирішення системи складених диференційних рівнянь на основі сітки

скінченних елементів, властивостей матеріалів та граничних умов, заданих на попередніх кроках в робочому просторі FEM.

Інструменти візуалізації результатів призначені для представлення вирішеної системи диференційних рівнянь у вигляді поля розподілених значень шукомих фізичних величин (зсувів, напружень, температур тощо), побудови на основі таких рішень графічних зображень деформацій або графічних залежностей шукомих фізичних величин в області моделювання.

Утілити дозволяють представити розрізи результатів візуалізації за результатами моделювання площинами довільної конфігурації.

Поєднання результатів тривимірного моделювання та аналізу в програмному пакеті FreeCAD дозволяє інженеру-проектувальнику виконувати більшість етапів проектування (включаючи науково-дослідні роботи) за допомогою даної САПР.

Контрольні запитання

1. Які вам відомі робочі простори тривимірного моделювання у FreeCAD?
2. Які основні відмінності між робочими просторами Part та Part Design?
3. В чому переваги робочого простору Part Design над іншими робочими просторами тривимірного моделювання?
4. Які вам відомі категорії інструментів робочого простору Part Design?
5. Що називають булевими операціями над геометричними примітивами?
6. Наведіть відповідність булевих операцій та операцій додавання, віднімання об'єктів.
7. За допомогою яких робочих просторів виконується аналіз геометричних моделей у FreeCAD?
8. Поясніть сутність методу скінченних елементів.

9. Поясніть поняття сітки скінченних елементів.
10. Наведіть порядок дій при аналізі математичної моделі методом скінченних елементів.
11. Які вам відомі категорії інструментів в робочому просторі FEM?

Лекція 7

Основи роботи в програмному пакеті FEMM

При тривимірному моделюванні дуже часто моделі не є надто складними, або треба дізнатись властивості проектованої моделі наближено чи в обмеженій частині такої моделі. Проектування у тривимірному просторі таких моделей суттєво збільшує кількість рівнянь в системі, яку має вирішувати САПР. В той же час, бувають математичні моделі, в яких досліджувана фізична величина мало змінюється (або взагалі не змінюється) вздовж певного напрямку системи координат. Прикладами таких моделей можна назвати замкнені кругові витки з проводу довільного перерізу, в яких розподіл густини струму у кільцевому витку не змінюється в перерізі на всій довжині витка. Відповідно, магнітне поле, створюване таким витком, є симетрично розподілене в перерізі витка і назовні проводу, тобто, має вісьову симетрію. Це означає, що таку тривимірну модель можна представити більш простою моделлю: двовимірною, в якій одна вісь є віссю симетрії витка, а інша – радіально спрямованою – по радіусу витка. Така модель є аналогічною моделі кругового витка довільного перерізу в тривимірній циліндричній системі координат, в якій по третій (кутовій) складовій простору жодні властивості моделі не змінюються за кутом. Такі двовимірні аналоги циліндричних тривимірних систем координат називають вісесиметричними системами координат. У звичайної декартової тривимірної системи координат також є двовимірний спрощений аналог – плоскопаралельна система координат, в якій властивості моделі не змінюються вздовж вісі, що є перпендикулярною двовимірній площині моделювання. Як правило, в задачах електростатики в таких системах моделюють системи паралельних провідників довільного перерізу, провідних поверхонь, а в задачах магнетизму – елементи ротора і статора електричних машин тощо.

Використання двовимірних систем координат для моделювання тривимірних моделей (або їх складових частин), як вже зазначалось, зменшує кількість вузлів сітки скінченних елементів (приблизно, на порядок для двовимірних і тривимірних сіток з однаковими розмірами елементів для кубу об'єму і квадрату площини), тому зменшується кількість рівнянь у системі, яку має вирішувати вирішувач САПР, а це, в свою чергу, зменшує навантаження на апаратну частину САПР і дозволяє виконувати відповідні спрощені розрахунки набагато швидше.

САПР FEMM є розробкою Девіда Мікера, яку він започаткував у 1998 році. Розробник працював і працює в області вирішення задач електродинаміки, електроприводу, робототехніки, тому часто стикався з необхідністю вирішувати поставлені перед ним задачі чисельними методами. Дана САПР є некомерційною розробкою, і її використання обмежується, в першу чергу, ліцензіями на ті складові (модулі) сторонніх розробників, які входять до її складу. Ліцензія, за якою розповсюджується програмний пакет FEMM (Aladdin Free Public License) дещо відрізняється від способу ліцензування раніше розглянутого FreeCAD, проте, так само, результати роботи програми і всіх модулів, які входять до складу програмного пакету (за умови, що користувач не вноситиме змін до коду програмних модулів) можуть використовуватись як для навчання, так і для комерційної діяльності.

Фізичні задачі, які можна аналізувати в FEMM, це задачі низькочастотних електромагнітних полів, задачі електростатики, задачі розтікання струмів у провідних середовищах і задачі теплових потоків. На даний момент актуальною версією програмного пакету є версія 4.2, яка доступна для операційних систем сімейства Windows. Для операційних систем сімейств Linux, MacOS необхідне додаткове встановлення емулятора Wine. Завантажити актуальну версію програмного пакету можна за адресою: <https://www.femm.info/wiki/Download>.

Інсталяційний пакет FEMM складається з ряду модулів, основні з яких – це модуль графічного інтерфейсу користувача (призначений для взаємодії з

інструментами і модулями програмного пакету); модуль побудови сітки скінченних елементів; модуль вирішувача систем рівнянь у частинних похідних, модуль візуалізації результатів моделювання. Модуль графічного інтерфейсу містить обмежені (базові) інструменти для побудови власних геометричних моделей (є інструменти імпорту готових моделей у форматі *.dxf), а також інструменти для додавання граничних умов і зовнішніх впливів на елементи математичної моделі, вбудовану бібліотеку матеріалів і відповідний редактор для їхнього редагування. Також до складу програмного пакету FEMM входить модуль програмування на мові Lua. Подробиці встановлення програмного пакету для різних операційних систем розглянуті на сайті розробника. Для коректної роботи програмного пакету всі необхідні модулі, які вимагаються для роботи FEMM, мають встановлюватись разом з ядром програми.

Графічний інтерфейс FEMM є надбудовою над всіма програмними модулями, які входять до складу програмного пакету, та дозволяє виконувати всі функції та команди FEMM за допомогою миші і клавіатури персонального комп'ютера. Стартове вікно графічного інтерфейсу містить обмежену кількість пунктів у головному меню, обмежену кількість інструментів та строку статусу виконання дій. Інструменти та пункти меню обмежені діями, пов'язаними з можливістю створити або відкрити файл проекту, відкрити та/або виконати скриптовий код на мові програмування Lua, налаштувати параметри FEMM та отримати довідкову інформацію про програмний пакет та умови ліцензії. Інтерфейс програми є англomовним.

Базова функціональність FEMM передбачає налаштування препроцесорів та постпроцесорів цієї САПР, а також файлові операції та використання вбудованої скриптової мови Lua. Препроцесор – це модуль САПР, який відповідає за підготовку завдання для модуля вирішувача – підготовку геометричної моделі, завдання граничних умов, чинників впливу на геометрію, властивості матеріалів та інші налаштування. Постпроцесор – це модуль САПР, який відповідає за візуалізацію результатів вирішення

вирішувачем системи складених рівнянь на основі даних, підготовлених у препроцесорі та створеної на основі геометрії моделі сітки скінчених елементів. За створення сітки скінчених елементів у FEMM відповідає модуль Triangle, який будує сітку скінчених елементів з найпростіших трикутників. Всього FEMM дозволяє вирішувати у двовимірній площині фізичні задачі 4 типів: задачі магнетизму (низькочастотні); задачі електростатики; задачі визначення теплових потоків у суцільних середовищах та задачі розтікання струмів у провідних середовищах. Кожна фізична задача має власні налаштування параметрів та відмінні налаштування інструментів, призначених для її вирішення, проте, загальні налаштування для задач різних типів є однаковими або подібними, що робить інструменти FEMM більш «аскетичними» у порівнянні з більш розвиненими комерційними проектами. В той же час, такі налаштування зменшують можливість помилкових налаштувань і дозволяють швидше звикнути до функціональності графічного інтерфейсу даної САПР. Для кожної математичної моделі можна обрати зручні одиниці виміру для геометрії, обрати декартову або полярну систему координат, обрати плоскопаралельний або вісесиметричний тип задачі. Однаково налаштовуються глибина тривимірної моделі для плоскопаралельних задач, точність вирішення системи рівнянь, ступінь неоднорідності сітки скінчених елементів. Так само, типовими для всіх типів задач є налаштування відображення елементів геометрії в препроцесорі та постпроцесорі, налаштування координатної сітки, навігації тощо.

Після створення нового документу (проекту САПР FEMM), або відкриття існуючого за допомогою стартового вікна графічного інтерфейсу FEMM, зміст головного меню та панелі інструментів значно розширюється і відповідає за змістом типу вирішуваних задач. Для користувача стають доступними область перегляду геометрії моделі, інструменти побудови геометрії, інструменти редагування і навігації в області перегляду, інструменти налаштування граничних умов і впливів, створення,

налаштування та застосування матеріалів (в тому числі, з переліку вбудованих в програмний пакет), інструменти побудови сітки скінчених елементів по замкнених контурах (фігурах перерізу твердих тіл) тощо.

Для створення геометрії безпосередньо засобами препроцесора FEMM використовуються наступні геометричні примітиви: точки (вузли геометрії); прямолінійні сегменти (просто сегменти, або відрізки прямих); дугові сегменти. Для створення та редагування геометричного примітиву конкретного типу необхідно обирати відповідний інструмент на панелі інструментів графічного інтерфейсу. При цьому, створення та редагування примітивів іншого типу стає недоступним. Виключенням (частковим) з цього правила є інструмент, який дозволяє виділяти геометричні примітиви різних типів, які належать до однієї групи елементів, з метою зміни їх властивостей. Окремою категорією геометричних примітивів є мітка блока, яка визначає замкнений контур перерізом твердого тіла, має розташовуватись в межах цього перерізу та задає властивості матеріалу, з якого складається блок – елемент геометрії, який є замкненим контуром з визначеними властивостями матеріалу в межах цього контуру. Аналогами вузлів, сегментів та блоків двовимірної геометрії є лінійні кола, поверхні тіл обертання та тіла обертання. Також в програмному пакеті FEMM міститься модуль імпорту-експорту, який дозволяє імпортувати готові двовимірні моделі у форматі *.dxf, який дозволяє користуватись готовими моделями, створеними у програмних пакетах з більш розвиненими можливостями побудови двовимірної геометрії.

Для додавання в математичну модель граничних умов (для різних типів геометричних примітивів ці умови відрізнятимуться) піктограма на панелі інструментів відсутня, дані налаштування знаходяться в головному меню FEMM. Основні граничні умови – це умови Неймана (усталений потік фізичної величини через границю) або Діріхле (визначене значення функції на границі). Так, наприклад, для вузла (точки) доступні лише умови фіксованого потенціалу або питомого лінійного заряду. Для сегментів

доступні як фіксовані потенціали, так і значення питомого поверхневого заряду, а також умови різного виду симетрії по відношенню до границі. Для блоків доступні граничні умови відносної діелектричної проникності та наявності об'ємного заряду. Окремою можливістю програмного пакету FEMM є додавання до математичної моделі зовнішнього електричного кола. Параметри такого приєднаного електричного кола можуть як впливати на фізичні величини самої моделі, так і одержувати вплив від фізичних величин самої моделі.

Сітка скінченних елементів створюється автоматично – як перед запуском вирішувача, так і може бути створена попередньо – за допомогою модуля Triangle. Перед побудовою сітки файл проекту обов'язково має бути збережений, оскільки тимчасові файли, які створюються САПР при побудові сітки та при вирішенні задачі мають створюватись в тому ж каталозі, що й файл проекту. При спробі побудувати сітку скінченних елементів з параметрами зміни густини скінченних елементів, які не забезпечують якісну деталізацію на суміжних геометричних примітивах різної кривини поверхонь, модуль Triangle видає повідомлення про помилку і необхідно або коригувати густину скінченних елементів у окремих областях розрахунку, виділяючи їх в окремі сегменти (блоки) з окремими налаштуваннями максимальних розмірів скінченних елементів, або змінювати параметр, який відповідає за коефіцієнт згущення сітки скінченних елементів (визначається кутовою мірою в градусах), який задіюється для всіх ділянок моделі, що не мають персональних налаштувань максимально допустимих розмірів скінченних елементів, або задіюють обидва таких методи.

Вирішення фізичних задач в програмному пакеті FEMM базується на рівняннях у частинних похідних розподілу векторного поля відповідної фізичної величини на ділянці простору, обмеженої границями розрахункової області. Так, для задач електростатики у FEMM використовуються рівняння:

$$\begin{cases} \nabla D = \rho \\ \nabla E = 0 \\ D = \varepsilon E ; \\ E = -\nabla V \\ -\varepsilon \nabla^2 V \end{cases} \quad (7.1)$$

де D – вектор індукції електричного поля (вектор електричного зміщення); E – вектор напруженості електричного поля; ρ – об’ємна густина заряду; ε – діелектрична проникність середовища; V – скалярний електричний потенціал; ∇ – оператор дивергенції.

Налаштувань, які б дозволяли впливати на алгоритм розв’язання систем складених рівнянь, в FEMM немає, проте, єдиним налаштуванням для вирішувача є точність результату вирішення системи рівнянь, яку можна налаштовувати на будь-якому етапі проектування і яка впливає на час, потрібний для вирішення задачі. За наявності помилок у роботі вирішувача (незбіжність рішень системи, нестача фізичної пам’яті апаратної частини САПР тощо) робота вирішувача переривається та виводяться повідомлення про помилки. В такому випадку необхідно проаналізувати зміст помилки, яка викликала переривання роботи вирішувача, та усунути причини, що її викликали.

Функціональність постпроцесора FEMM є доступною після завершення роботи вирішувача. Всі дані, які може візуалізувати модуль постпроцесора, містяться в файлі результатів, який створює вирішувач в каталозі з файлом проекту. Для кожного типу фізичної задачі можливості візуалізації певною мірою відрізняються, проте доступний загальний інтерфейс інструментів та уніфіковані модулі налаштувань інформації, що відображається.

Як і будь-який постпроцесор, постпроцесор FEMM здатен надати інформацію про значення будь-якої фізичної величини, яку можна одержати з вирішеної системи рівнянь, у будь-якій точці розрахункової області моделі. Крім точкових значень, одержуваних інтерполяцією значень фізичної величини у вузлових точках сітки скінченних елементів, постпроцесор дозволяє представити результати вирішення системи рівнянь у вигляді

розподіленого по координатній площині градієнтного поля фізичної величини з позначенням інтенсивності цієї величини різними відтінками кольорів. Таке поле розподіленої фізичної величини (наприклад, модуля вектору напруженості електричного поля) супроводжується відповідною кольоровою діаграмою, на якій вказуються числові характеристики фізичної величини, які відповідають відтінкам кольорів. Також у постпроцесорі передбачено представлення розподілу на розрахунковій області моделі фізичної величини у векторному вигляді. В такому випадку розподілена векторна величина представляється у вигляді стрілок, масштаб та густину яких можна регулювати. Крім того, ті фізичні величини, які можуть бути представлені на розрахунковій області замкненими контурами (магнітні потоки, еквіпотенціальні лінії тощо) можуть бути представлені на розрахунковій області у вигляді суцільних ліній, густину яких також можна регулювати інструментами постпроцесора.

При наявності в проекті FEMM приєднаного зовнішнього електричного кола постпроцесор може розраховувати стан цього електричного кола, пов'язаний з фізичними величинами, розрахованими в моделі вирішувачем.

Важливим інструментом постпроцесора FEMM є можливість одержувати числові інтегральні значення по ділянках геометричної моделі: лінійні інтеграли представлені числовими значеннями у обраних точках розрахункової області двовимірної моделі; поверхневі інтеграли одержують інтегруванням по виділених сегментах двовимірної моделі; об'ємні інтеграли одержують інтегруванням по блоках двовимірної моделі. Слід зазначити, що лінійні та поверхневі інтеграли можуть бути одержані у FEMM не тільки у вузлах і на сегментах геометрії самої моделі, а й у довільних точках та на довільно побудованих в розрахунковій області лініях (що представляють відповідні поверхні тривимірних тіл). Для одержання інтегральних значень у налаштуваннях FEMM необхідно зазначити кількість диференційованих елементів, на яку розбивається розрахункова область. В першу чергу, це стосується сегментів при одержанні значень поверхневих інтегралів фізичних

величин. Чим більше деталізація, тим більше точність інтегрування і тим більше час, необхідний на одержання розрахунків. Для задач електростатики шляхом інтегрування нормальної складової вектору електричної індукції D по поверхні (по виділеному сегменту двовимірної моделі) можна одержати сумарний заряд на цій поверхні. При інтегруванні тангенційної складової вектору напруженості електричного поля E по такій поверхні (представленій у двовимірній моделі прямим або дуговим сегментом) можна одержати величину спадання потенціалу (різницю потенціалів, напругу) вздовж цієї поверхні, обумовлену розподілом заряду вздовж цієї поверхні (лінії інтегрування). Також можна шляхом інтегрування визначити як довжину сегменту геометрії двовимірної моделі, так і площу поверхні, яка відповідає цьому сегменту у тривимірній моделі. Також, інтегрування тензорів напруженостей по обраних поверхнях дозволяє визначати величини електростатичних сил та моментів сил, які діють на відповідні елементи геометрії. Серед інтегральних значень, доступних для блоків двовимірної моделі, найбільш часто використовують визначення об'єму, що відповідає обраному блоку моделі, енергію електричного поля, зосереджену в даній частині об'єму моделі, а також усереднені значення величин векторів електричної індукції та напруженості поля по обраному об'єму.

Важливою функціональною можливістю FEMM є можливість побудови графічних залежностей обраних фізичних величин вздовж обраних контурів (сегментів, ліній) геометричної моделі (або ліній, обраних самотійно). Вісь абсцис таких графіків представляється протяжністю обраного лінійного (чи криволінійного) контуру або сегменту (ряду сегментів) від першої обраної його точки до останньої (навіть, якщо це – ламана лінія, вісь абсцис представляє лінійну довжину цієї ділянки). По вісі ординат відкладаються значення фізичної величини, розраховані для кожної точки на обраному шляху. Інструменти побудови графіків дозволяють змінювати кількість точок графіку, регулюючи таким чином точність відображення обраної залежності. Важливою особливістю інструментів побудови графічних залежностей у

FEMM є можливість експорту числових результатів у текстові формати у вигляді колонок пар чисел, які надалі можуть оброблятися табличними процесорами (наприклад, Excel) або математичними програмними пакетами (наприклад, Mathcad) для одержання графіків з налаштуваннями, які не надає вбудований у FEMM модуль постпроцесора.

Контрольні запитання

1. Для чого призначений програмний пакет FEMM?
2. Які принципові відмінності програмного пакету FEMM від FreeCAD?
3. Які вам відомі особливості, які дозволяють виконувати моделювання тривимірних тіл у двовимірному просторі?
4. Чим характеризуються вісесиметричні моделі?
5. Чим характеризуються плоскопаралельні моделі?
6. Які основні модулі графічного інтерфейсу FEMM вам відомі?
7. Які типи фізичних задач можна вирішувати за допомогою FEMM?
8. Поясніть термін «препроцесор» та його призначення.
9. Поясніть термін «постпроцесор» та його призначення.
10. Які обмеження у побудові двовимірної геометрії у FEMM, у порівнянні з FreeCAD, вам відомі?
11. Які інструменти візуалізації результатів моделювання в FEMM вам відомі?
12. Яким чином одержують інтегральні значення фізичних величин в постпроцесорі FEMM
13. Яка функціональність побудови графічних залежностей в FEMM вам відома?

Лекція 8

Застосування скриптової мови Lua в FEMM

Скриптові мови не є повноцінними мовами програмування, за допомогою яких створюються застосунки, що взаємодіють з операційною системою на рівні команд процесора або отримують низькорівневий доступ до апаратної частини ПК. Натомість, вони застосовуються для того, щоб автоматизувати рутинні операції в графічному інтерфейсі програмного забезпечення різного призначення, для забезпечення зручності взаємодії користувача з програмним забезпеченням (модулями пакетів програмного забезпечення), для виконання функцій, не передбачених напряму функціоналом програмного забезпечення, однак, доступних шляхом розширення такого функціоналу засобами сценаріїв скриптової мови програмування. Дуже часто розробники програмного забезпечення створюють основний функціонал своїх застосунків, доступний користувачам графічного інтерфейсу, однак, замість того, щоб постійно оновлювати цей функціонал під змінювані з часом запити користувачів, розробники створюють так званий програмний інтерфейс – набір функцій, який дозволяє користувачам самостійно розширювати можливості програмного забезпечення, не вносячи змін в його двійковий код (і не порушуючи тим самим умови ліцензійних угод). Найбільш часто до таких заходів вдаються розробники програмного забезпечення, яке розповсюджується за так званими «вільними» ліцензіями, оскільки можливості колективу розробників такого ПЗ, як правило, суттєво обмежені у порівнянні з комерціалізованим ПЗ. Однак, навіть гіганти індустрії програмного забезпечення (Adobe, Blizzard, Google, Microsoft...) також дозволяють використання скриптових мов у своїх програмних продуктах задля розширення їхньої функціональності зусиллями спільноти користувачів.

Системи автоматизованого проектування також використовують скриптові мови програмування. Наприклад, FreeCAD використовує Python в

якості скриптової мови, FEMM – використовує мову Lua. Lua – є скриптовою мовою, розробленою підрозділом Tecgraf Католицького університету Ріо-де-Жанейро і її інтерпретатор (програма, яка не формує виконуваний код для процесора, а аналізує текстові команди користувача і перетворює їх в команди процесора під час перетворення) розповсюджується за вільною ліцензією, тому дуже часто використовується в різноманітних програмних пакетах – як комерціалізованих, так і таких, що розповсюджуються за вільною ліцензією. Основою даної мови програмування є сценарії – пакети інструкцій, які виконуються послідовно і складають сценарій – певну послідовність дій, які міг би виконувати користувач, однак витратив би на це більш значний обсяг часу. Дуже часто скриптові мови використовують для виконання однотипних задач, наприклад, побудови однотипних геометричних примітивів в САПР, циклічну зміну параметрів об'єктів у САПР з наступним вирішенням фізичних задач тощо.

Графічний інтерфейс FEMM дозволяє виконувати моделювання двовимірної геометрії та постановку задачі у препроцесорі, а також завантажувати готове рішення, створене вирішувачем на основі задачі препроцесора, у постпроцесор для візуалізації та аналізу одержаних результатів. Однак, під час проектування дуже часто буває так що одержані результати моделювання по одному або декільком параметрах не відповідають завданню на проектування. В такому випадку доводиться вносити зміни у геометрію моделі, налаштування граничних умов задачі, коригувати сітку скінчених елементів тощо, після чого знову запускати вирішувач, знову завантажувати рішення у постпроцесор та аналізувати одержані результати. Дуже часто буває так, що за одну-дві ітерації одержати необхідний результат не вдається (а буває так, що необхідно виконати десятки або сотні ітерацій моделювання з різними вхідними параметрами, щоб одержати необхідні результати). Весь цей час розробники проекту мають перебувати в очікуванні результатів моделювання, аналізувати їх вручну через графічний інтерфейс САПР, вносити необхідні корективи в

математичну модель засобами графічного інтерфейсу, і так робити доти, доки не буде одержано очікуваного результату.

Виходом з такої ситуації є параметричне моделювання, інструменти якого дуже часто вже є вбудованими в сучасні комерційні програмні пакети САПР. Сутність параметричного моделювання полягає в тому, що створюється сценарій на скриптовій мові програмування, в якому всі послідовності дій при взаємодії користувача з графічним інтерфейсом САПР під час створення, редагування, вирішення та аналізу рішення фізичної задачі розміщуються всередині функції, яка під час виклику приймає в якості аргументів ті величини, які впливають на параметри математичної моделі на всіх етапах її існування. Така функція може бути розміщена в циклі, протягом виконання якого аргументи, які передаються у функцію під час виклику, можуть також циклічно змінюватись, впливаючи на результат моделювання. Так само, як змінюються циклічно аргументи, що передаються у функцію на кожній ітерації її виклику, можна аналізувати результати моделювання на відповідність критеріям параметричного моделювання. Такими критеріями може бути відповідність результату якомусь значенню, або відхилення результату від очікуваного значення на похибку, що не перевищує допустимої тощо.

FEMM містить вбудований інтерпретатор мови Lua, який дозволяє розширити можливості даного програмного пакету до параметричного моделювання фізичних задач, яке займало б набагато більше часу при виконанні даної задачі за допомогою виключно графічного інтерфейсу FEMM. Взаємодія з Lua в FEMM відбувається двома способами: або за допомогою завантаження і виконання скрипту на мові Lua, збереженого у окремому файлі, або за допомогою консолі Lua, яка дозволяє вводити і виконувати команди покроково, або пакетами у сценарії.

Основою для виконання команд інтерпретатором Lua в FEMM є текстовий файл з розширенням *.lua, який складається з певної кількості рядків, що містять команди інтерпретатора. Кожен рядок в текстовому файлі

має завершуватись відповідним кодом завершення строки (натискання клавіши <ENTER> на клавіатурі). Всі символи у рядку, які йдуть після комбінації символів «—» (подвійний дефіс), сприймаються інтерпретатором як коментар і не виконуються. Коментарі додають у скриптові файли для розуміння їхнього змісту. Якщо необхідно розмістити коментар у кількох рядках, то його починають із символів «--[» і завершують символами «]]».

На відміну від завантаженого файлу, команди, які вводяться в консоль, виконуються тільки після натискання відповідної кнопки «Evaluate» консолі. Кожна команда відділяється від попередньої так само натисканням клавіши <ENTER> на клавіатурі в кінці рядка коду.

Всі дані у Lua зберігаються у змінних – іменованих комірках пам'яті. В пам'яті апаратного забезпечення САПР інформація зберігається виключно у двійковому виді, однак, в залежності від типу інформації, яка має зберігатись у комірці, одні й ті ж самі двійкові коди можуть визначатись інтерпретатором по-різному. В Lua інтерпретатор автоматично визначає приналежність інформації в комірках пам'яті до того чи іншого типу на основі логіки використання цих даних в програмі, однак, дуже часто буває потрібно безпосередньо вказати інтерпретатору, які саме дані зберігаються в комірці (або отримують з комірки). Як правило, це робиться на основі формату запису даних в рядках коду.

Типи даних, що використовуються в Lua, наступні:

- nil – тип даних, який означає «ніщо» – відсутність інформації у комірці;
- boolean – логічний тип даних, який приймає одне з двох фіксованих значень (**true** або **false**);
- numbers – числові дані, які не поділяються на цілі та не цілі;
- strings – строкові дані у вигляді символів тексту;
- functions – комірка містить інформацію про функцію;
- thread – потокові дані для операцій вводу-виводу;
- userdata – дані користувача у довільному форматі;
- table – табличні дані.

Для того, щоб зв'язати іменовану комірку даних з її змістом виконують операцію присвоювання, яка має наступний синтаксис: **Назва_змінної = Значення_змінної**. Знак «=» в даному випадку є оператором присвоєння значення.

Оператори в Lua – це команди, які має виконувати інтерпретатор. Крім оператора присвоєння в Lua є наступні оператори:

- оператори арифметичних операцій: + (складання), – (віднімання), * (множення), / (ділення), ^ (зведення у ступінь), % (залишок від ділення);
- оператори логічних операцій і порівняння **and**, **or**, **not**, > (більше), >= (більше, або дорівнює), < (менше), <= (менше, або дорівнює), == (дорівнює), ~= (не дорівнює);
- оператор конкатенації (поєднання двох строкових значень в одне) записується у вигляді двох точок «..» між двома строковими значеннями, які треба поєднати;
- оператор індексу [] (квадратні дужки з цілочисельним значенням в дужках) – визначає значення у індексованих структурах даних (таблицях) за її порядковим номером в структурі;
- оператор розмірності комірки даних # визначає довжину (розмірність) значення у комірці (для строкових даних визначає кількість символів у змінній, для числових – кількість байт, необхідних для зберігання числа тощо).

Блоки – це ділянки скрипту, в яких можуть виконуватись більше кількох операторів, поєднаних спільною задачею. Синтаксична конструкція блоку починається з службового слова, яке означає функціональність (тип) даного блоку, і завершується службовим словом (оператором) **end**. Перший тип блоків – це блоки поєднання операторів у загальну конструкцію. Другий тип блоків – це блоки розгалуження (блоки перевірки умов на істинність). Третій тип блоків – це цикли (циклічне повторення кількох операторів).

Функції також можна назвати різновидом блоків. Однак, на відміну від розглянутих вище блоків, функції не тільки можуть змінювати значення

змінних чи виконувати будь-які інші дії, а й повертати результати виконання операцій (*тіла функцій*). Результат, що при цьому повертається, може бути присвоєний якійсь змінній. Ще однією відмінністю функцій від розглянутих вище блоків є можливість приймати при виклику функції значення параметрів (*аргументів*), які будуть використовуватись в тілі функції під час її виконання. Функції в Lua поділяються на *функції користувачів*, *вбудовані* та *включені* з інших ресурсів (різновид функцій користувачів). Користування функціями в Lua складається з двох етапів: *опису функції* та її *виклику*. Опис функції в скрипті має розташовуватись до її виклику.

Вбудовані функції Lua не потребують опису (вже описані розробниками), тому можуть бути викликані у будь-якому місці скрипту. На відміну від окремо встановлюваного в операційній системі інтерпретатора Lua, вбудований у FEMM інтерпретатор відрізняється набором функцій. Вони поділяються на 2 основні категорії: функції *загального призначення* та *спеціальні функції САПР*. Серед функцій загального призначення можна виділити *математичні* функції (тригонометричні, логарифмічні, експоненційні, ступеневі, округлення тощо), функції для *роботи з файловою системою* (даний вид функцій призначений для завантаження з файлів та зберігання інформації у файлах даних), функції *вводу-виводу* (для відображення інформації на екрані чи принтері), тощо.

Спеціальні функції САПР FEMM створені розробниками даного програмного пакету для інтерпретатора Lua та доступні виключно за умови використання інтерпретатора Lua, вбудованого у FEMM. Спеціальні функції Lua в FEMM в свою чергу поділяються на *загальні* та такі, що відповідають *конкретній фізичній задачі*. Серед останніх також є *функції препроцесора* та *функції постпроцесора*.

Кожному інструменту, доступному в графічному інтерфейсі FEMM, відповідає функція на скриптовій мові Lua. На відміну від графічного інтерфейсу FEMM, функції Lua дозволяють кількома способами виконати функціонал деяких інструментів, що розширює можливості використання

таких інструментів. Крім функцій, які дублюють інструменти графічного інтерфейсу, є функції, які дозволяють скрипту взаємодіяти з користувачем: запитувати про подальші дії, виводити довідкову інформацію, запитувати ввід даних у змінні тощо. За допомогою скрипту можна забезпечити ввід-вивід даних в різних форматах файлів – це забезпечується можливостями загальних функцій Lua.

Загальні функції та константи в Lua FEMM трохи відрізняються у способі їх виклику у скрипті – вони не потребують запису модулю, в якому вони описані, перед викликом (наприклад, константа π викликається не «Math.pi», а просто «pi»; не «Math.sin()», а sin() тощо).

Спеціалізовані функції Lua FEMM певною мірою відрізняються для різних типів фізичних задач, однак, є спеціалізовані функції, які, як і команди графічного інтерфейсу, є спільними для будь-якої фізичної задачі. Такі функції виділяються розробником у категорію спеціалізованих функцій загального призначення. Як правило, це – функції налаштування FEMM, а також функції, не пов'язані з конкретним типом фізичної задачі, яка має вирішуватись.

Для кожного типу фізичної задачі, вирішення якої можливе засобами FEMM, присутні спеціалізовані функції, що поділяються на дві основні категорії: функції препроцесора (які відповідають за підготовку геометрії моделі та встановлення граничних умов і властивостей складових моделі) та функції постпроцесора (які відповідають за візуалізацію результатів моделювання, а також за інтегральні обчислення й експорт одержаних даних).

Назви таких спеціалізованих функцій препроцесора та постпроцесора починаються з літер, які відповідають типам фізичних задач, які мають вирішуватись: «**m**» – задачі магнетизму; «**e**» – задачі електростатики; «**h**» – задачі теплопередачі; «**s**» – задачі розтікання струмів. Другою літерою в назві функції є літера або «**i**» – для препроцесору, або «**o**» – для постпроцесору. Після перших двох літер слідує знак підкреслення «**_**», а далі – назва самої

функції. Функції препроцесора, як правило, поділяються на такі категорії: функції геометричних побудов; функції редагування геометрії; функції виділення геометричних примітивів; функції створення граничних умов і матеріалів; функції встановлення властивостей геометрії; функції побудови сітки скінченних елементів; функції вирішувача; функції навігації; функції візуалізації; додаткові функції. Функції постпроцесора, як правило, поділяються на такі категорії: функції отримання даних; функції виділення елементів геометрії; функції навігації; функції візуалізації результатів моделювання; додаткові функції.

Оскільки описи функцій у багатьох випадках для різних фізичних задач схожі (як для препроцесора, так і для постпроцесора), добре вивчити функції, властиві одному типу фізичних задач, достатньо, щоб опанувати в значній мірі функціонал спеціалізованих функцій Lua і для інших типів фізичних задач.

Найбільш цінною можливістю Lua FEMM є організація параметричного моделювання, яке неможливе вбудованими засобами графічного інтерфейсу FEMM. В якості змінюваного параметру при такому моделюванні можуть використовуватись властивості елементів геометрії, граничних умов, матеріалів, властивості сітки скінченних елементів, налаштування вирішувача, постпроцесору, тощо. При параметричному моделюванні параметри у всіх функціях задають не їх значеннями, а передають у вигляді змінної при виклику функції. Значення самої змінної (параметру) при цьому змінюють в блоці циклу в заданому діапазоні значень. Одночасно, в тому ж циклі організовують зміни в моделі, використовуючи відповідні категорії функцій препроцесору, вирішують задачу, за допомогою функцій постпроцесору одержують числові значення, які характеризують результат моделювання і за допомогою блоків розгалуження перевіряють відповідність числових значень результату умовам параметричного моделювання (наприклад, одержання мінімально можливого або максимально можливого значення фізичної величини; відповідності значення

фізичної величини певному числу із заданою допустимою похибкою відхилення тощо). Допоки умова відповідності результату не досягнута, організовують циклічні зміни значення змінних вхідних параметрів (за обраними алгоритмами) та повторення операцій внесення змін в математичну модель, вирішення системи рівнянь і одержання числових результатів для наступної ітерації перевірки умов завдання параметричного моделювання.

Серед блоків Lua, які використовуються в параметричному моделюванні, найчастіше використовують блоки циклів:

for <Ініціалізація змінної>, <Кінцеве значення>[, <Прирощення змінної>] **do**

<Оператори>

end

або

while <Умова> **do**

<Оператори>

end

Серед блоків умов використовують наступний:

if <Умова> **then**

<Оператори>

[<elseif> <Умова> **then**

<Оператори>]

[<else>

<Оператори>]

end.

В даних блоках <Оператори> – це рядки з командами (операторами), які мають виконуватись; <Умова> – це вираз, який приймає одне з двох логічних значень: «**true**» або «**false**»; <Ініціалізація змінної> – це присвоєння початкового значення змінній циклу; <Кінцеве значення> – це кінцеве значення змінної циклу; <Прирощення змінної> – це не обов'язковий елемент, який визначає, що при кожній ітерації виконання тіла циклу

значення змінної циклу буде змінюватись на величину, що відрізняється від одиниці.

Контрольні запитання

1. Чим скриптові мови програмування відрізняються від звичайних?
2. Що таке інтерпретатор Lua?
3. Що таке параметричне моделювання?
4. Якими способами у FEMM можна виконати скрипт на мові Lua?
5. Як оформлюють коментарі на мові Lua?
6. Яким чином інтерпретатор Lua визначає, дані якого типу зберігаються у комірках пам'яті?
7. Які типи даних в Lua вам відомі?
8. Які типи операторів в Lua вам відомі?
9. Що таке блоки в Lua?
10. Яким чином створюють та використовують функції в Lua?
11. Які типи функцій Lua вам відомі?
12. На які категорії поділяються спеціалізовані функції Lua, доступні в FEMM?
13. Як можна організувати параметричне моделювання в FEMM засобами вбудованої мови Lua?

Лекція 9

Основи роботи в програмному пакеті QUCS

Окрім систем автоматизованого проектування, які застосовуються для проектування деталей машин і розрахунку їх властивостей, існують спеціалізовані галузеві САПР, в основу яких покладено вирішення задач моделювання та/або проектування за відповідним технічним напрямком. До одного з таких напрямків розвитку відносяться САПР схемотехнічного моделювання, призначені для моделювання та аналізу стану електричних кіл та їх окремих ділянок. В епоху розвитку цифрової техніки та мікроелектроніки можливість проектувати, аналізувати параметри, вдосконалювати відповідні складові такої техніки визначають в значній мірі конкурентоспроможність на відповідному ринку товарів і послуг. Моделювання процесів у великих електроенергетичних системах, які враховують як нормальні, так і аварійні режими роботи ділянок таких систем і мереж, дозволяють автоматизувати такі енергосистеми, робити їх більш надійними і безпечними, стійкими до зовнішніх і внутрішніх впливів.

Основою моделювання в САПР схемотехнічного моделювання є представлення ділянок досліджуваних електричних кіл відповідними математичними моделями, на основі яких далі виконується аналіз таких електричних кіл та визначаються невідомі параметри (наприклад, струми або напруги). Будь-яка реальна ділянка електричного кола є ділянкою з розподіленими параметрами, тобто, фізичні властивості ділянки мають залежності від просторових координат. Математична модель такої ділянки електричного кола може бути представлена, наприклад, системою рівнянь, в якій ділянка кола диференційована на певну кількість дрібних ділянок, властивості яких за умовами моделювання можна вважати незмінними в межах диференційованих просторових координат. Такі диференційовані ділянки в математичних моделях електричних кіл та ділянок кіл розглядаються як зосереджені елементи – тобто, елементи, які можна

описати багатополіусниками, параметри яких не залежать від просторових координат параметрів елементів, що входять до їх складу. Прикладом зосередженого елементу може бути ідеальний резистор, який розглядається властивостями відносно точок його приєднання до двох вузлових точок схеми. Властивості ідеального резистора можуть бути описані функцією залежності опору резистора від температури і часу, однак в цій функції відсутня залежність опору від відстані між точками приєднання резистора до електричного кола. Тобто, вважається, що всі фізичні властивості резистора зосереджені в одній «точці» – дискретній області простору, в якій залежністю цих властивостей від просторових координат можна нехтувати.

Можливість нехтувати залежністю властивостей елемента електричного кола від його просторових координат суттєво залежить як від геометричних розмірів такого елемента (або ділянки електричного кола), так і від параметрів струму, що протікає в такому електричному колі. Крім того, при визначенні того, чи можна певну ділянку представити у схемі заміщення електричного кола елементами з зосередженими параметрами, важливим є те, наскільки вплив параметрів такої ділянки електричного кола впливає на властивості кола, що розглядаються. Наприклад, звичайний радіоелемент – резистор – під час роботи в електричному колі являє собою складну просторову структуру розподілу електричних та магнітних полів, рухомих та нерухомих зарядів, пов'язаних із властивостями матеріалів, з яких він виготовлений. Як правило, ділянки резистора, на яких зосереджені нерухомі заряди, можна представити в схемі заміщення конденсаторами, ділянки, на яких рухомі заряди створюють магнітне поле – котушками індуктивності, а ділянки, на яких енергія електричного струму перетворюється в матеріалі в теплову енергію – активним опором. При цьому, чим більш детально розглядатиметься резистор з точки зору його еквівалентної схеми заміщення, тим з більшої кількості зосереджених елементів він має складатись. Однак, у значній кількості випадків більшістю складових резистора в його схемі заміщення нехтують, оскільки вони є незрівнянно малими у порівнянні з

величиною активного опору. В таких випадках в загальній схемі заміщення електричного кола резистор може бути представлений ідеальним резистором, що складається лише з активного опору.

Важливою особливістю при виборі деталізації схеми заміщення досліджуваного в САПР електричного кола є те, який саме режим роботи схеми досліджується. Серед основних режимів з курсу теоретичних основ електротехніки відомі усталений режим та режим перехідного процесу – від одного усталеного режиму до іншого. Усталені режими характеризуються незмінністю або циклічною повторюваністю процесів в електричному колі. До відомих таких процесів відносяться електричні кола, в яких протікають постійний струм, або синусоїдний змінний струм. Перехідні процеси відбуваються протягом короткого (як правило) проміжку часу і в цей момент відбуваються значні зміни просторового розподілу електричних та магнітних полів навколо елементів електричного кола, які не є циклічними в часі. Як відомо з курсу теоретичних основ електротехніки, швидкоплинні зміни електромагнітного поля призводять до суттєвого перерозподілу густини та напрямків руху зарядів на ділянках електричного кола, тому при дослідженні перехідних процесів в електричних колах їх схеми заміщення стають більш складними та деталізованими.

Як правило, САПР схемотехнічного моделювання містять всі необхідні інструменти для побудови схем заміщення електричних кіл, налаштування параметрів зосереджених елементів, з яких складаються схеми заміщення, підтримує різні методи моделювання одного й того ж електричного кола (наприклад, на постійному струмі, на змінному струмі, режим перехідних процесів тощо). Більшість сучасних САПР схемотехнічного моделювання також підтримує моделювання електричних схем на основі логічних елементів, тобто, «ключів» або «вентилів». Принцип роботи електронного ключа або вентиля полягає в керованій зміні провідності ділянки електричного кола. Така керована провідність організовується за допомогою нелінійних напівпровідникових елементів (діоди, тиристори, транзистори

тощо), або їхнього поєднання в інтегральні мікросхеми. З блоків логічних елементів складаються цифрові логічні схеми, які є основою сучасної мікропроцесорної та комп'ютерної техніки.

Крім моделювання режимів роботи електричних кіл значна частина сучасних САПР також підтримує макетування друкованих плат – розрахунок розташування електричних та електронних компонентів на платі, розташування провідних «доріжок» та роз'ємів, врахування взаємного впливу сусідніх елементів та вплив зовнішніх чинників на них (електромагнітна сумісність).

Однією з існуючих на даний момент САПР схемотехнічного моделювання є програмний пакет QUCS, аббревіатура якого розшифровується як Quite Universal Circuit Simulator, або достатньо універсальний симулятор електричних кіл. Серед відомих САПР схемотехнічного моделювання також можна назвати програмні пакети Multisim від National Instruments, MicroCap, LTspice, LabVIEW, OrCAD тощо. QUCS дозволяє виконувати математичне моделювання складних електричних схем з лінійними та нелінійними зосередженими елементами в режимах постійного струму, змінного синусоїдного струму, перехідних процесів, цифрового моделювання, параметричної оптимізації тощо. Розробка та удосконалення QUCS відбувається командою Qucs team починаючи з 2004 року. Протягом цього часу змінювалась команда розробників, додавались нові функціональні можливості до проекту. Дана САПР підтримує зосереджені елементи електричного кола, описані за допомогою мови SPICE (хоча всередині самої програми ці елементи описані мовою XML), підтримує бібліотеки цифрових елементів, описаних за допомогою мов VHDL, Verilog. QUCS має простий і зрозумілий графічний інтерфейс, який дозволяє виконувати всі команди ядра даної САПР, приєднувати додаткові модулі функціональності, перекладений на значну кількість популярних мов. Для запуску в операційній системі сімейства Windows не потребує встановлення – запускається з будь-якого

каталогу (навіть, з зовнішніх накопичувачів). Даний проект продовжує розвиватись, тому поточна стабільна версія QUCS – 0.0.19.

Програмний пакет QUCS не призначений для макетування друкованих плат, однак містить достатньо компонентів для симуляції (аналізу) електричних кіл, в тому числі, враховуючи параметри друкованих плат, з'єднувальних кабелів, роз'ємів тощо. Графічний інтерфейс QUCS являє собою головне вікно, яке відкривається при запуску виконуваного файлу програми на комп'ютері. Графічний інтерфейс містить всі необхідні компоненти, які необхідні для візуальної побудови схеми заміщення електричного кола, налаштування властивостей елементів електричного кола, безпосереднього виконання симуляції роботи електричного кола в обраному режимі його дослідження, візуалізації результатів моделювання та їхнього експорту в формати файлів інших програмних пакетів. Більшість команд графічного інтерфейсу для прискорення роботи з ними мають відповідне дублювання комбінаціями «гарячих клавіш» на клавіатурі.

Головне вікно містить стандартні пункти головного меню, горизонтальну панель найбільш часто використовуваних інструментів, основний робочий простір моделювання та візуалізації, в якому складові проекту відображаються в окремих вкладках, а також область навігації. Область навігації в QUCS є багатофункціональною і забезпечує як навігацію у доступних проектах та їх файлових компонентах, так і навігацію по елементах і складових модельованих електричних кіл. Також елементом головного вікна графічного інтерфейсу є статусний рядок в нижній частині програми, в якому відображаються повідомлення САПР до користувача.

Основою моделювання в QUCS є файл даних схеми. Такі файли в структурі проекту мають розширення *.sch. Файли схем проекту, як і інші файли цього проекту, розташовуються в окремому каталозі користувача операційної системи, який має назву «.qucs» та за замовчуванням є прихованим каталогом в корені каталогу користувача операційної системи. Файл схеми є текстовим файлом, в якому у структурі XML описано всі

складові та налаштування електричного кола, які передаватимуться для аналізу у вирішувач. Відомості про те, який саме вирішувач має бути застосований до даної схеми при її аналізі також міститься в файлі схеми. Під час вирішення системи рівнянь електричного кола, укладеної на основі даних файлу схеми, вирішувач формує файл даних, з якого надалі вбудований постпроцесор QUCS може формувати візуалізацію результатів моделювання. Файл даних вирішеної системи рівнянь має розширення *.dat. Для того, щоб постпроцесор QUCS міг візуалізувати результати моделювання у необхідному форматі в програмному пакеті передбачено формування текстового файлу даних візуалізації результатів моделювання у форматі XML з розширенням *.dpl, в якому міститься необхідна інформація. Для формування такого файлу (якщо його ще не створено в каталозі проекту) у вікні графічного інтерфейсу створюється ще одна вкладинка, на яку користувач додає необхідні елементи оформлення візуалізації результатів (таблиці, графіки тощо) та налаштовує їх зміст. Результати моделювання у вигляді текстових файлів, що складаються з наборів числових даних, або у вигляді графічних зображень, можуть бути експортовані в інші формати файлів та надалі оброблені за допомогою інших програм.

Користувач програмного пакету QUCS може додавати до файлу схеми в графічному інтерфейсі зручним способом наявні в інсталюваній разом з програмою бібліотеці компонентів будь-які складові електричних схем. Однак, можливості QUCS на цьому не обмежуються. Користувачу надається можливість самостійно описувати схеми заміщення будь-яких нових компонентів за допомогою мови SPICE і додавати їх в окрему бібліотеку компонентів користувача. Крім цього, існує можливість додавання до користувацької бібліотеки компонентів компоненти електричних схем, описаних виробниками на мовах VHDL, Verilog. Дуже важливою особливістю QUCS є можливість організації користувачем так званих «підсхем» (часто використовуваних ділянок електричних кіл з однаковими параметрами) у окремих файлах з подальшим використанням таких підсхем в

головній схемі проекту у вигляді багатополісників. Така можливість суттєво зменшує загромадження області проектування у складних електричних колах. Всі доступні для користувача компоненти з бібліотеки, яка постачається разом з програмним пакетом QUCS поділяється на кілька основних категорій. Серед них наступні:

- «lumped components» – компоненти, що мають властивості зосереджених елементів (так звані «ідеальні» елементи схем, властивості яких описуються найпростішими рівняннями) – опори, конденсатори, котушки індуктивності, ідеальні трансформатори, вузли заземлення (нульового потенціалу), ідеальні амперметри та вольтметри тощо;

- «sources» – компоненти, які відповідають джерелам електричного струму або напруги різної форми: постійного струму, змінного синусоїдного струму, пульсуючого струму, шумів тощо;

- «probes» – компоненти, призначені для вимірювання параметрів напруги у вузлах схеми або струмів у гілках схеми, до яких відносяться ідеальні амперметр та вольтметр;

- «transmission lines» – компоненти, що визначають елементи печатних плат, з'єднувальні кабелі, інші провідні ділянки електричних кіл, призначені для з'єднання у схему інших компонентів, і які неможливо представити ідеальними провідниками без втрат напруги, паразитних ємностей чи індуктивностей, хвильових опорів тощо;

- «nonlinear components» – компоненти з нелінійними характеристиками, до яких належать діоди, тиристори, транзистори, варистори тощо;

- «digital components» – компоненти для цифрового моделювання – різноманітні логічні цифрові блоки, компаратори входних сигналів, цифрові джерела, інвертори тощо;

- «file components» – компоненти, що представлені в цифровому моделюванні кодом, що міститься в інших файлах – файли підсхем, файли опису елементів на мові SPICE тощо;

– «simulations» – компоненти, що відповідають виду моделювання, який буде розраховувати вирішувач (без такого компоненту жоден розрахунок схем є неможливим) – існують компоненти розрахунку на постійному струмі, на змінному синусоїдному струмі, розрахунки перехідних процесів, цифрове моделювання, параметричне моделювання, оптимізація тощо;

– «diagrams» – компоненти, призначені для відображення результатів моделювання (можуть розташовуватись як на основній схемі, так і в окремому файлі результатів) – представлені таблицями, графіками у декартовій системі координат (двовимірні та тривимірні), у полярній системі координат тощо;

– «paintings» – компоненти оформлення схем, представлені різноманітними фігурами, лініями, стрілками тощо.

У розглянутому переліку категорій компонентів присутні «simulations», тобто, види моделювання – методи аналізу схеми електричного кола. QUCS надає можливість аналізувати одне й те саме коло в режимі постійного струму; в режимі змінного синусоїдного струму; в режимі дослідження перехідного процесу; в режимі дослідження s-параметрів схеми; в режимі цифрового моделювання; в режимі дослідження гармонійного балансу; в режимі параметричного моделювання та в режимі оптимізації. Як можна бачити, на відміну від раніше розглянутого програмного пакету FEMM, в QUCS присутній не тільки параметричний аналіз в якості вбудованого модуля програмного пакету, а й присутній модуль оптимізації параметрів схеми на основі такого параметричного аналізу.

Постпроцесорний модуль візуалізації інформації, одержаної в результаті вирішення системи рівнянь, що відповідає складеній користувачем схемі з відповідними налаштуваннями, представлений в категорії вбудованих компонентів QUCS наступними модулями в категорії «diagrams»:

- двовимірний графік в декартовій системі координат»;
- двовимірний графік в полярній системі координат;
- таблиця (представлення числових даних у табличному виді);

- діаграма Сміта;
- тривимірний графік у декартовій системі координат;
- кругова діаграма;
- таблиця залежностей величини від часу;
- таблиця істинності (для цифрових логічних схем).

Кожен графік або діаграма у постпроцесорі QUCS оснащений широким набором інструментів налаштування візуалізації: тип, товщина та колір лінії, позначення маркерами точок на лініях, налаштування відображення координатної сітки на графіку чи діаграмі, наявність окремих масштабів відображення по двох координатних вісях ординат (для відображення двох або більше графіків залежностей із суттєво відмінними масштабами величин), можливість звуження діапазону відображення графіку по кожній з координатних вісей, наявність можливості встановлення логарифмічного масштабу відображення величин по кожній з вісей, можливість додавати оформлення графіку підписами вісей (включаючи літери грецького алфавіту) тощо. Крім цього, QUCS надає інструмент додавання маркеру до графіку, за допомогою якого можна зручно візуалізувати значення будь-якої точки графіку (наявні налаштування точності і формату відображення результату). Також графіки і діаграми, так само, як і таблиці, оснащені функцією експорту числових даних у текстовий формат файлу, який надалі може бути візуалізований за допомогою інших програм чи програмних пакетів.

В цілому, САПР схемотехнічного моделювання QUCS є більш орієнтованою на моделювання високочастотної радіоапаратури та електронних цифрових схем, проте містить всі необхідні інструменти для моделювання процесів, які відбуваються в електроенергетичному обладнанні, електричних машинах і апаратах, дозволяє моделювати режими роботи електричних мереж, вирішувати інші задачі електротехнічного та електроенергетичного спрямування, які можуть бути представлені відповідними схемами заміщення з зосередженими елементами. Дана САПР

може бути використана як в навчальних, так і в наукових цілях при виконанні відповідних схмотехнічних моделювань.

Контрольні запитання

1. Для чого призначені САПР схмотехнічного моделювання?
2. Як ви розумієте термін «зосереджені елементи»?
3. Що саме розподіляється в елементах електричного кола з розподіленими параметрами?
4. За яких умов можна нехтувати залежністю властивостей елемента електричного кола від просторових координат при складанні його схеми заміщення?
5. За яким принципом працюють логічні елементи в САПР схмотехнічного моделювання?
6. Що означає назва програмного пакету QUCS?
7. Для виконання яких задач використовується графічний інтерфейс програмного пакету QUCS?
8. З яких основних структурних елементів складається проект в QUCS?
9. Які категорії компонентів користувач QUCS може додати на створену ним схему в проекті?
10. Що таке «підсхема» з точки зору програмного пакету QUCS?
11. В яких режимах доступне моделювання створеного користувачем електричного кола в QUCS?
12. Якими способами можна візуалізувати результати моделювання в QUCS?
13. Які вам відомі налаштування відображення результатів моделювання в QUCS?

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. О FreeCAD [Електронний ресурс]: [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: https://wiki.freecadweb.org/About_FreeCAD/uk (дата звернення 30.05.2022) – Назва з екрана.
2. Баженов В. А., Криксунов Е. З., Перельмутер А. В., Шишов О. В. Информатика. Інформаційні технології в будівництві. Системи автоматизованого проектування. Підручник для вузів. – К.: Каравела, 2019. – 488 с.
3. Гервас О. Г. САПР об'єктів середовища. Навчально-методичний посібник / Гервас Ольга Геннадіївна. – Умань: Візаві, 2018. – 160 с.
4. Основи автоматизації проектування в будівництві : конспект лекцій Укладач: Сорочак А.П. – Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2018. – 120 с.
5. Гололобов В.Н. Qucs и FlowCode. Программы для тех, кто интересуется электроникой [Електронний ресурс]: [Файл]. – Електронні дані. – Режим доступу: <https://ua1lib.org/dl/1154984/48056d> (дата звернення 30.05.2022) – Назва з екрана.
6. Саєнко С. Ю. Основи САПР / С. Ю. Саєнко, І. В. Нечипоренко – Х.: ХДУХТ, 2017. – 119 с.
7. Е. И. Байда Расчет электромагнитных и тепловых полей с помощью программы FEMM: учебно-методическое пособ. – Х.: НТУ «ХПИ», 2015. – 147 с.
8. Системи автоматизованого проектування та інженерного аналізу в машинобудуванні: навч. посіб. / О. С. Цибенко, М. Г. Кришук. – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 100 с.