

**О.О. ОГОРОДНИК**, асп., НТУ «ХП»;

**Є.М. ГОРАШ**, канд. техн. наук, ст. викл., НТУ «ХП»

## **ОСОБЛИВОСТІ РОЗРОБКИ ПРЕПРОЦЕСОРА ДО РОЗВ'ЯЗУВАЧА ЗАДАЧ МІЦНОСТІ ЗА ДОПОМОГОЮ МСЕ**

Представлено підхід до розробки спеціалізованого інженерного ПЗ для візуального моделювання геометрії та статичного розрахунку міцності стержневих конструкцій. Розроблене ПЗ поєднує у собі можливості універсального інженерного ПЗ таких класів, як CAD та CAE. У середовищі програмування Embarcadero RAD Studio розроблено користувацький інтерфейс для створення просторової моделі та задання параметрів розрахунку. При реалізації CAD-модуля 3D моделювання використано графічну бібліотеку OpenGL. З метою проведення розрахунків конструкцій за допомогою МСЕ впроваджено інтеграцію з розв'язувачем відкритої CAE-системи CalculiX. Проведено верифікацію розробленого ПЗ, використовуючи типовий перевірочний розрахунок міцності велосипедної рами.

An approach to development of special-purpose engineering software for visual geometrical modeling and static analysis of beam structures is presented. The developed application combines features of general-purpose engineering software of such classes as CAD and CAE. Graphical user interface for creating of 3D special model and setting the analysis parameters was developed in programming environment Embarcadero RAD Studio. The graphical library OpenGL was used to implement the CAD-module for 3D modeling. The solver of open-source CAE-system CalculiX was integrated for the purpose of structural analysis using FEM. The developed application was verified by employing the typical static strength analysis of bicycle frame.

**1 Актуальність теми.** Система автоматизованого проектування (САПР) є основною і невід'ємною частиною у всіх важливих наукоємних сферах промисловості (суднобудування, авіабудування, моторобудування, автомобілебудування та ін.). У вітчизняний термін САПР з початку вкладалось поняття про систему автоматизованого проектування (CAD – Computer Aided Design), а згодом додалось й поняття про систему автоматизованого аналізу (CAE – Computer Aided Engineering) [1]. Важко уявити сучасне місце інженера-конструктора, а тим більше розраховувача без цих систем. Поява на ринку такого програмного забезпечення, як сучасні комплекси CAD/CAE дозволила прискорити процеси проектування та дослідження різноманітних конструкцій, насамперед відповідальних. Використання сучасних методів розрахунку, реалізованих в комплексах CAD/CAE, дає можливість проводити дослідження різних характеристик об'єктів, що проектуються. Це дозволяє гнучко змінювати конструкцію цих об'єктів без створення експериментальних зразків та не вдаватися до тривалої та кошовної процедури натурних досліджень на випробувальних стендах.

Останнім часом все більша кількість користувачів вирішують для себе, що універсальність багатьох CAD/CAE систем не завжди є перевагою, особливо враховуючи їх дуже значну вартість. У погоні за універсальністю, роз-

робники ПЗ часто забувають про зручність користувацького інтерфейсу. У свою чергу цей, здавалося б, незначний (у порівнянні з різноманітністю розрахунків, можливих в ПЗ) недолік робить ускладненою роботу користувачів-початківців. В САЕ-системах ця проблема стоїть особливо гостро, бо головна увага там приділяється якості розрахунків. Хоча пріоритет за розрахунковою частиною ПЗ є незаперечним, проте таким чином не вирішується існуюча проблема – занадто нелінійний та мало зрозумілий графічний інтерфейс, а інколи і його відсутність (у відкритих САЕ-системах).

Нижче наведено приклад вирішення цієї проблеми, тобто створення комп'ютерної системи автоматизованої побудови стержневих конструкцій та проведення аналізу їх статичної міцності. Клас стержневих конструкцій було обрано, як найбільш поширений тип задач в інженерній практиці.

**2 Постановка задачі.** У статті розглянуто особливості розробки комп'ютерної системи автоматизованої побудови стержневих конструкцій з метою подальшого розрахунку статичної міцності у відкритому САЕ-модулі.

В рамках даної роботи було необхідно:

1 Розробити спеціалізовану інтегровану CAD/CAE систему для стержневих конструкцій, що повинна включати у себе:

- ефективний і простий спосіб представлення інформації про модель;
- зручний майстер для відображення елементів моделі та її редагування;
- інтерактивне графічне зображення моделі при створенні та редагуванні.

2 Провести дослідження щодо вводу/виводу даних та проведення розрахунку засобами САЕ-модуля CalculiX [2] та реалізувати:

- підключення САЕ-модуля CalculiX для розрахунку статички;
- препроцесор для САЕ-модуля CalculiX.

**3 Огляд застосованих програмних засобів.** Програма реалізована на мові програмування Delphi в середовищі Embarcadero RAD Studio 2009. Вибір середовища програмування обумовлений відносною простотою реалізації графічного інтерфейсу користувача (Graphic User Interface – GUI) для невеликих windows-застосунків.

Для збереження та структуризації даних про стержневу модель було обрано розширювану мову розмітки (англ. Extensible Markup Language, скорочено XML), що дозволяє структурувати інформацію різного типу, використовуючи для цього різний набір інструкцій. Для задання валідності XML документу було віддано перевагу моделі XML Schema. Кожний елемент у цій моделі асоціюється з певним типом даних, що дозволяє будувати у пам'яті об'єкт, який відповідає структурі XML-документа. Мовам об'єктно-орієнтованого програмування значно легше мати справу з таким об'єктом, ніж з текстовим файлом. Для створення XML Schema використано програму

Altova XMLSpy 2009 [3]. Для обробки XML-документа головною програмою було використано технологію Document Object Model (DOM). DOM – є програмним інтерфейсом який дозволяє здійснювати обхід цілого документа так, наче він є деревом, вузли якого є об'єкти, що відтворюють зміст документу. Документ DOM може створюватись синтаксичним аналізатором або користувачами (з деякими обмеженнями). Типи даних вузлів DOM-дерев є абстрактними; реалізації мають власні, специфічні для мов програмування типи даних. Реалізації DOM мають тенденцію до інтенсивного використання пам'яті, оскільки, зазвичай, перед початком роботи документ має бути повністю завантажений, оброблений, та перетворений на дерево об'єктів [3]. Через те, що структура документа представляється у вигляді дерева, повний зміст документа аналізується та зберігається в пам'яті комп'ютера. Тому, DOM підходить для застосувань в програмах, які вимагають багаторазовий доступ до елементів документа в довільному порядку.

Бібліотека OpenGL являє собою інтерфейс програмування тривимірної графіки. Одиницею інформації є вершина, з яких створюються складніші об'єкти. Програміст створює вершини, вказує яким чином їх сполучати (лініями або багатокутниками), встановлює координати і параметри камери та ламп, а бібліотека OpenGL бере на себе роботу по створенню зображення на екрані. OpenGL ідеально підходить для програмістів, яким необхідно створити невелику тривимірну сцену і не замислюватися про деталі реалізації алгоритмів тривимірної графіки [4].

З погляду архітектури, графічна система OpenGL є конвеєром, що складається з декількох етапів обробки даних:

- 1) Апроксимація кривих і поверхонь;
- 2) Обробка вершин і збірка примітивів;
- 3) Растрезація і обробка фрагментів;
- 4) Операції над пікселями;
- 5) Підготовка текстури;
- 6) Передача даних в буфер кадру.

Розрахункове ядро CalculiX — відкритий, вільний програмний пакет, призначений для вирішення лінійних та нелінійних тривимірних задач механіки твердого деформованого тіла за допомогою метода скінчених елементів (МСЕ). CalculiX має явний та неявний розрахунковий модуль. Використовує збіжний з ABAQUS формат вхідного файлу. Охоплює широкий спектр задач механіки: теплові задачі, термічні напруження та контактні проблеми. Усі файли відповідають стандарту ASCII, таким чином вони можуть бути переглянуті та змінені в будь-якому текстовому редакторі [2].

**4 Опис програмного комплексу.** Запропонований та створений на базі CalculiX програмний комплекс здатен моделювати балочні конструкції на основі тривимірного підходу та запускати на подальший розрахунок міцності.

Таким чином, програмний комплекс має наступні можливості:

- створювати стержневі конструкції будь-якої складності, завдяки функціям «Додати балку», «Видалити балку» та «Редагувати поперечний

- переріз»;
- вибирати тип поперечного перерізу, а саме: перпендикулярний або круглий, що задається двома локальними координатами;
- здійснювати зручний перегляд тривимірного тіла конструкції та повної інформації про конструкцію у дереві побудови;
- створювати SE-сітку;
- задавати граничні умови по шести ступеням свободи: три переміщення та три кути повороту;
- задавати зосереджену силу за трьома напрямками;
- автоматичне створення вхідного файлу для подальшої передачі його на розрахунок у САЕ-модуль (розв'язувач) CalculiX;
- перегляд результатів засобами постпроцесора Calculix CGX.

У ядрі будь-якого САПР можна виділити два основні елементи: набір базових елементів і система інтеграції основних елементів. У реалізованому ПЗ САПР важливим і невід'ємним супутником ядра є візуалізація. Тому пропонується представити базову структуру САПР (систему CAD) у вигляді зв'язаної роботи трьох підсистем [5].

CAD-система також складається з трьох підсистем (рис. 1):

1) ProGeometric (ПЛП); 2) ProView і TabView (ПВВ); 3) ProDoc (ПЗІ).

Підсистема логічного представлення (ПЛП) включає опис всіх доступних елементів моделі окремої САПР. Уся структура та логіка опису геометрії стержневої конструкції міститься у XML-схемі, за якою і створено XML файл. XML файл у свою чергу передає структуру геометрії у програму через технологію XML DOM. Схема розроблена за допомогою програми Altova XMLSpy (рис. 2).

Підсистема зберігання інформації (ПЗІ) служить для роботи бази даних документу (БДД) конкретної САПР і обміну даними з іншими САПР. Основною частиною БДД є інформація про модель об'єкту, яка має два типи уявлення: у ОЗП і ПЗП.

В даному випадку ПЗІ реалізована за допомогою технології XML DOM. Реалізація DOM має на увазі представлення XML-документа у вигляді набору вузлів (чи вершин) деревовидної структури. Крім того, згідно специфікації DOM, що затверджено W3C, вузлами вважаються усі компоненти структури XML: документ, елементи, атрибути, текст елементів, інструкції обробки і т.д. Таким чином, дані про конструкцію під час роботи програми зберігаються у оперативній пам'яті і у файлі.

Підсистема візуального відображення (ПВВ) забезпечує працездатність інтерфейсу програми. Обов'язковим елементом інтерфейсу САПР є робоча графічна область для побудови моделі та дерево побудови, що дозволяє переглядати інформацію про модель у структурованому вигляді. Основні завдання ПВВ: зв'язане реалістичне відображення елементів моделі, відображення і працездатність інструментів для роботи з моделлю (меню, панелі інструментів, командний рядок та ін.).



Рисунок 1 – Логічна структура програмного забезпечення САПР

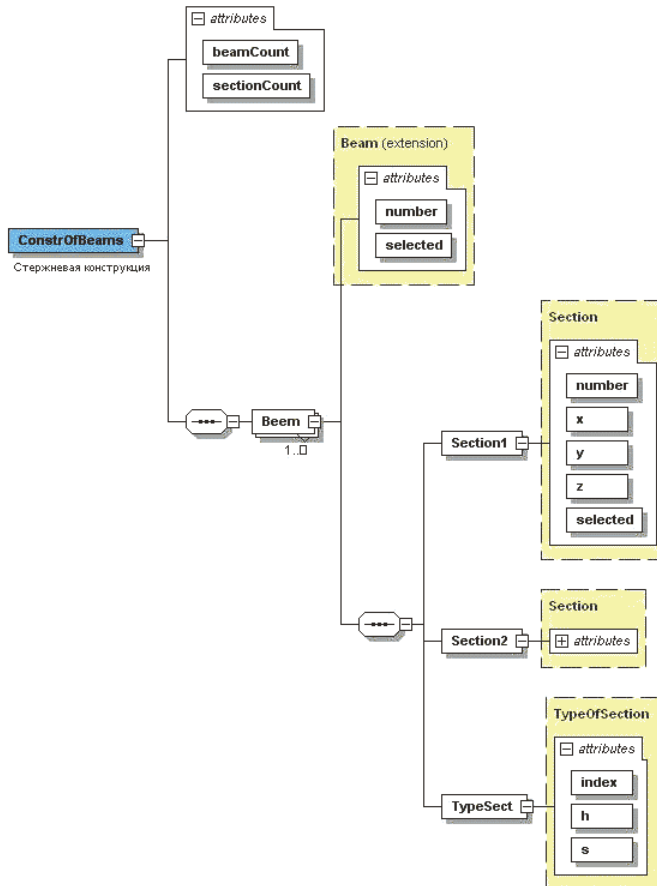


Рисунок 2 – Логічне представлення геометрії за допомогою XML-схеми

Робоча область для побудови моделі і схематичного її відображення реалізована у програмі за допомогою вищеописаної технології OpenGL.

Уся інформація, що відображається ПВВ передається із ПЗІ. Кожного разу, коли застосовуються відповідні інструменти для зміни конструкції, уся інформація оновлюється у ПЗІ, далі інформація автоматично оновлюється у ПВВ, а саме у дереві побудови та графічній області. Така схема і дає ефект інтерактивного моделювання, коли можливо побачити усі зроблені зміни відразу після їх внесення.

**5 Розрахунок та відображення результатів.** Для того, щоб запустити розрахунок міцності для конструкції після її моделювання, необхідно здійснити інтеграцію розробленого препроцесора та розв'язувача CalculiX. Інтеграція реалізується через вхідний (скрипт) файл, який містить дані про SE-сітку та параметри розрахунку, та генерується препроцесором для розв'язувача CalculiX і запускає його на читання (рис. 3).

Отримані результати можна переглянути як у текстовому вигляді у полі Results view, так і у графічному вигляді (у вікні постпроцесора Calculix – CGX). Як видно на рисунку 4 (ліворуч) у цьому вікні можна переглядати переміщення за трьома напрямками (D1, D2, D3) та абсолютні переміщення (All), які і зображено на рис. 4 (ліворуч). А праворуч на рис. 4 зображено еквівалентні напруження за фон Мізесом (von Mises).

У вікні постпроцесора CGX також розміщено інструменти для зручного перегляду результатів розрахунку тривимірної моделі: 1) обертання моделі у просторі на бажаний кут; 2) наближення-віддалення моделі; 3) переміщення моделі відносно вікна перегляду.

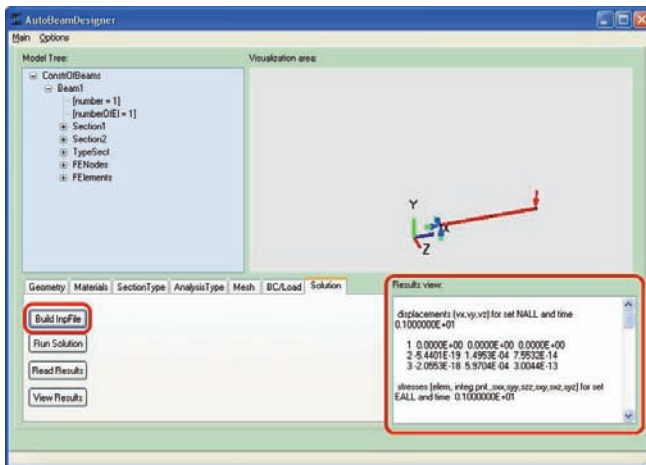


Рисунок 3 – Дані про SE-сітку та параметри розрахунку у дереві побудови

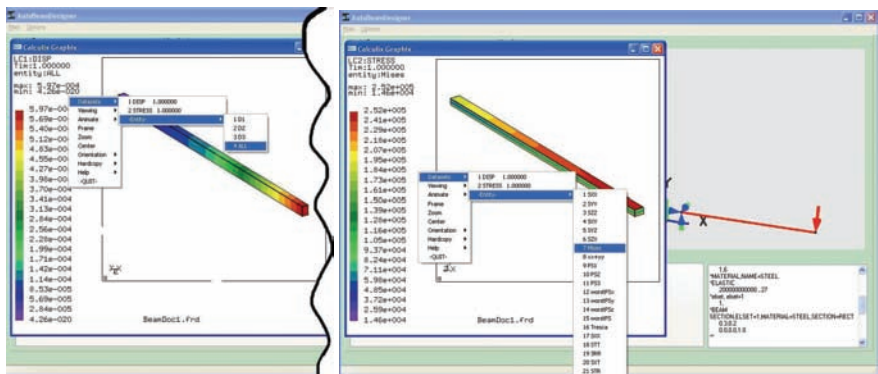


Рисунок 4 – Огляд результатів у вікні CGX: сумарні переміщення [м] (ліворуч) та еквівалентні напруження [Па] (праворуч)

**6 Висновки.** Спроектовано та реалізовано програмний комплекс, головною задачею якого є автоматизована побудова геометрії стержневих конструкцій та розрахунок їх статичної міцності у вигляді переміщень, деформацій, напружень на основі даних, що вводяться користувачем.

Розроблена CAD/CAE-система володіє наступними властивостями:

- «Дерево побудови», яке дає можливість зручного та зрозумілого способу перегляду даних про геометричну модель та параметри розрахунку;
- «Графічна область» дає змогу переглядати тривимірну геометричну та кінцево-елементну модель завдяки можливості повертати та наближувати/віддаляти її;
- «Менеджер вкладок», який містить редактори та інструменти для задання параметрів розрахунку;
- автоматизований запуск розрахункового модуля (розв'язувача) CalculiX для аналізу статичної міцності за допомогою МСЕ;
- автоматизований перегляд результатів скінченно-елементного розрахунку засобами постпроцесора Calculix – CGX.

Доробка ПЗ передбачає підключення інших розрахункових модулів з більш широкими можливостями та реалізація інших типів розрахунку.

**Список літератури:** 1. Лу К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE). – СПб.: Питер, 2004. – 560 с. 2. Dhondt G. The Finite Element Method for Three-dimensional Thermomechanical Applications. – Chichester: John Wiley & Sons, 2004. – 340 с. 3. Шенард Д. Освой самостоятельно XML за 21 день. – Изд. дом «Вильямс», 2002. – 432 с. 4. Ву М., Девис Т., Нейдер Дж. и Шрайнер Д. OpenGL. Руководство по программированию. – СПб.: Питер, 2006. – 624 с. 5. Красніков С.В., Руденко С.С. Особенности твердотельного геометрического моделирования машиностроительных объектов // Вісник НТУ «ХП». – Харків: НТУ «ХП», 2007. – №38. – С. 181-187.

Надійшло до редколегії 19.11.2010