

АНОТАЦІЯ

Ігнатченко М. С. Лінгвістичне забезпечення скінченно-елементного моделювання у паралельних обчислювальних системах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 “Комп’ютерні науки”. – Запорізький національний університет, Запоріжжя, 2021.

Дисертаційна робота присвячена розробці лінгвістичного та програмного забезпечення скінченно-елементного аналізу в паралельних обчислювальних системах.

На сьогодні створення нової техніки практично неможливе без широкого застосування сучасних інформаційних технологій та обчислювальних систем. Однією з найважливіших задач, які постають перед інженерами, є заміна фізичних випробувань дослідних зразків складних інженерно-технічних систем, що проектуються, віртуальним комп’ютерним експериментом. Це дозволяє, з одного боку, значно зменшити витрати часу та ресурсів на проектування, а з іншого, підвищити його якість.

Одним з найбільш поширених на практиці підходів до чисельного аналізу широких класів задач є застосування методу скінченних елементів. Для автоматизації розрахунків за його допомогою на сьогодні створено велику кількість різноманітного програмного забезпечення. Найбільш відомими серед комерційних систем скінченно-елементного аналізу є Abaqus, Ansys, MSC Nastran та інші. Серед програмного забезпечення з відкритим вихідним кодом можна виділити dial.II, FreeFEM, OpenCAD тощо. Кількість таких програм неухильно збільшується, оскільки постійно зростає складність задач, які постають перед інженерами та науковцями. Крім того, слід враховувати стрімкий розвиток можливостей сучасної обчислювальної техніки. Для ефективного застосування наявних обчислювальних ресурсів сучасних

мультипроцесорів та мультикомп'ютерів необхідно розробляти паралельні версії наявних алгоритмів скінченно-елементного аналізу.

Таким чином, проблема створення систем скінченно-елементного аналізу з відкритим програмним кодом, які б дозволяли використовувати можливості різних паралельних архітектур сучасних комп'ютерних систем, є актуальною.

На сьогодні найбільш поширеними класами паралельних комп'ютерів є: 1) мультипроцесори (обчислювальні системи зі спільною пам'яттю і декількома процесорами або одним процесором з багатьма ядрами) та 2) мультикомп'ютери (обчислювальні системи, що фактично є об'єднаними в єдину мережу окремими комп'ютерами). Програмна реалізація паралельних розрахунків в цих системах істотно різниться, оскільки, наприклад, в мультипроцесорних системах завдяки наявності спільної пам'яті не потрібно реалізовувати складний інтерфейс синхронізації даних.

Отже, на сьогодні актуальною є задача розробки таких програмних систем скінченно-елементного аналізу, які б можна було використовувати на різних типах паралельних архітектур. Для розв'язання цієї задачі в дисертаційній роботі пропонується застосування твірною патерну проектування Prototype, за допомогою якого можна створювати копії об'єктів, не вдаючись у подробиці їхньої реалізації. Це дозволяє, з одного боку, паралельно запускати програмні потоки на обчислювальних вузлах різної природи (ядрах процесора; окремих процесорах або вузлах обчислювального кластеру), а з іншого, створювати стандартизований програмний код, зменшити час на його налагодження, а також мінімізувати можливість виникнення помилок в кодї за рахунок використання верифікованих рішень.

Сучасні програмні системи скінченно-елементного аналізу за своєю архітектурою можуть бути поділені на три окремі функціональні підсистеми: 1) препроцесор, який виконує автоматизацію побудови дискретної геометричної моделі об'єкту розрахунку; 2) процесор – ядро програми, яке безпосередньо реалізує чисельний розрахунок задачі із застосуванням методу

скінченних елементів; 3) постпроцесор, що реалізує автоматизацію аналізу отриманих числових результатів та їх візуалізацію.

Задача побудови скінченно-елементної моделі, яку вирішує препроцесор, є складною і може бути поділена на дві окремі складові: 1) створення формального опису геометрії об'єкту розрахунку у певній формі, зручній для подальшої автоматичної обробки і 2) генерація скінченно-елементної моделі на основі цього опису.

Найбільш природнім та універсальним способом опису довільних геометричних областей є функціональний підхід, який базується на побудові такої функції, яка приймає від'ємні значення за межами вихідного геометричного об'єкта, і невід'ємні в його середині та на границі. Можливість побудови таких функцій для будь-якого геометричного об'єкта була доведена академіком В. Л. Рвачовим.

Використання функціонального підходу в препроцесорі потребує розробки формального способу опису функціональних моделей геометричних об'єктів. В дисертаційній роботі з цією метою було розроблено проблемно-орієнтовану мову FORL-G, яка дозволяє описувати геометричні моделі об'єктів будь-якої форми. В роботі із застосуванням розширеної форми Бекуса-Наура наведено повний опис синтаксису та семантики цієї мови, а також приклади її застосування. Особливістю FORL-G є наявність в ній засобів, що керують процесом побудови скінченно-елементних моделей в паралельних обчислювальних системах. Також в дисертаційній роботі із застосуванням патерну проектування Prototype програмно реалізовано паралельні алгоритми побудови скінченно-елементних моделей геометричних об'єктів, заданих функціонально. Було проведено обчислювальний експеримент, який підтвердив ефективність запропонованих підходів.

Програмна реалізація типового процесору системи скінченно-елементного аналізу передбачає створення окремих модулів, що реалізують певний тип розрахунку. Альтернативним підходом є автоматизація виведення необхідних розрахункових співвідношень безпосередньо з варіаційних

принципів, що дозволяє отримувати необхідні співвідношення для чисельного розв'язання широких класів задач. Його застосування потребує розробки формального способу опису варіаційних формул і правил виведення з них необхідних співвідношень. В дисертаційній роботі розроблено предметно-орієнтовану мову FORL-F, за допомогою якої користувач може описувати комп'ютерні моделі широких класів задач. В роботі наведено формальний опис цієї мови, а також приклади її застосування. За допомогою шаблону Prototype програмно реалізовано процесор, який виконує розрахунки програм, описаних на мові FORL-F, в паралельних обчислювальних системах. Було проведено низку обчислювальних експериментів, які підтвердили ефективність запропонованого підходу.

Також в дисертації наведено опис запропонованого паралельного алгоритму візуалізації чисельних розрахунків, на його основі програмно реалізовано постпроцесор, а також виконано відповідні обчислювальні експерименти.

Отже, у дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-технічна проблема підвищення ефективності розробки систем скінченно-елементного аналізу з використанням паралельних обчислень.

Ключові слова: паралельні розрахунки, патерн проектування Prototype, метод скінченних елементів, препроцесор, процесор, постпроцесор.

ABSTRACT

Ihnatchenko M. S. Linguistic support of finite element modeling in parallel computing systems. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript. The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of philosophy on a specialty 122 “Computer Science”. – Zaporizhia National University, Zaporizhia, 2021.

The thesis is devoted to the development of linguistic and software finite element analysis in parallel computer systems.

Today, the creation of new technology is almost impossible without the widespread use of modern information technology and computer systems. One of the most important problems facing engineers is to replace the physical tests of prototypes of designed complex engineering systems a virtual computer experiment. This allows on the one hand to significantly reduce the cost of time and resources for design, and on the other – to improve its quality.

One of the most common in practice approaches to numerical analysis of wide classes of problems is the use of the finite element method. To automate computing with its help, a large number of different software has been created today. The most well-known among commercial programs of finite element analysis are Abaqus, Ansys, MSC Nastran and others. Among the open source software are dial.II, FreeFEM, OpenCAD, etc. The number of such programs is steadily increasing, as the complexity of the problems facing engineers and scientists is constantly increasing. In addition, the rapid development of modern computer technology should be taken into account. In order to effectively use the available computing resources of modern multiprocessors and multicomputers, it is necessary to develop parallel versions of existing finite element analysis algorithms.

Thus, the problem of development of systems of finite element analysis with open source software, which would allow to use the capabilities of different parallel architectures of modern computer systems, is relevant.

Today, the most common classes of parallel computers are: 1) multiprocessors (computing systems with shared memory and multiple processors or a single processor with multiple cores); 2) multicomputers (computing systems that are actually connected to a single network by separate computers). The software implementation of parallel computing in these systems differs significantly, because, for example, in multiprocessor systems, due to the presence of shared memory, it is not necessary to implement a complex data synchronization interface.

Thus, today the task of developing such software systems of finite element analysis, which could be used on different types of parallel architectures, is relevant. To solve this problem, the dissertation proposes the use of a creative design pattern Prototype, with which you can create copies of objects without going into the details of their implementation. This allows, on the one hand, to run software streams in parallel on computing nodes of different nature (processor cores; individual processors or on nodes of a computing cluster), and on the other – to create standardized program code, reduce debugging time, and minimize the possibility of errors in code through the use of verified solutions.

Modern software systems of finite element analysis by their architecture can be divided into three separate functional subsystems: 1) preprocessor, which automates the construction of a discrete geometric model of the object of calculation; 2) processor – the core of the program, which directly implements the numerical calculation of the problem using the finite element method; 3) postprocessor, which implements automation of analysis of numerical results and their visualization.

The task of constructing a finite element model, which is solved by the preprocessor, is complex and can be divided into two separate components: 1) creating a formal description of the geometry of the object of calculation in a form convenient for further automatic processing and 2) generating a finite element model based on this description.

The most natural and universal way to describe arbitrary geometric domains is a functional approach, which is based on constructing a function that takes negative values outside the original geometric object and is non-negative in its middle and at the boundary. The possibility of constructing such functions for any geometric object was proved by Academician V. L. Rvachev.

Using a functional approach in a preprocessor requires the development of a formal way to describe functional models of geometric objects. For this purpose, the dissertation developed a problem-oriented language FORL-G, which allows you to describe geometric models of objects of any shape. In the work with the use of the extended Backus-Naur form, a complete description of the syntax and semantics of

this language is given, as well as examples of its application. A feature of FORL-G is the presence of tools that control the process of building finite-element models in parallel computing systems. Also in the dissertation work with the use of the design pattern Prototype programmatically implemented parallel algorithms for constructing finite-element models of geometric objects, given functionally. A computational experiment was conducted, which confirmed the effectiveness of the proposed approaches.

Software implementation of a typical processor of the finite element analysis system involves the creation of separate modules that implement a certain type of calculation. An alternative approach is to automate the derivation of the necessary calculation relations directly from the principles of variation, which allows to obtain the necessary relations for the numerical solution of wide classes of problems. Its application requires the development of a formal way to describe the variational formulas and rules for deriving the necessary relations from them. In the dissertation the subject-oriented language FORL-F is developed, with the help of which the user can describe computer models of wide classes of tasks. The paper provides a formal description of this language, as well as examples of its use. Using the Prototype template, a processor is implemented that performs calculations of programs described in the FORL-F language in parallel computer systems. A number of computational experiments were performed, which confirmed the effectiveness of the proposed approach.

Also in the dissertation the description of the offered parallel algorithm of visualization of numerical calculations is given, on its basis the postprocessor is programmatically realized, and also the corresponding computational experiments are executed.

Thus, in the dissertation the actual scientific and technical problem of increase of efficiency of development of systems of finite element analysis with use of parallel computing is solved.

Keywords: parallel computing, Prototype design pattern, finite element method, preprocessor, processor, postprocessor.

**СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ, В
ЯКИХ ОПУБЛІКОВАНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ
ДИСЕРТАЦІЇ:**

1) Математичне забезпечення інженерного аналізу об'єктів аерокосмічної техніки на базі хмарних технологій: монографія / С. В. Чопоров, О. В. Кудін, Є. В. Панасенко, Д. Д. Грищак, М. С. Ігнатченко [за наук. ред. С. В. Чопорова]. Херсон: Видавничий дім "Гельветика", 2020. 300 с.

2) Mathematical and computer modelling of engineering systems : Collective monograph / In edition by Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine V. S. Hudramovich. Riga, Latvia: "Baltija Publishing", 2020. 164 p.

3) Ігнатченко М. С., Кудін О. В. Візуалізація геометричних областей складної форми в паралельних обчислювальних системах зі спільною пам'яттю. *Вісник Запорізького національного університету*. 2019. № 2. С. 48-54.

4) Ігнатченко М. С., Кудин А. В., Гнездовский А. В. Объектно-ориентированная реализация библиотеки конечно-элементного анализа на языке программирования Python. *Вісник Запорізького національного університету. Фізико-математичні науки*. 2020. № 1. С. 138-147.

5) Ігнатченко М. С. Параллельная реализация алгоритма marching cubes с использованием паттерна проектирования Prototype. *Colloquium-journal*. 2021. №10 (97). P. 49-52.

6) А.с. № 100690. Комп'ютерна програма "Об'єктно-орієнтована бібліотека класів, що реалізують інтерпретацію складних арифметичних виразів "PARSER" / С. В. Чопоров, С. І. Гоменюк, М. С. Ігнатченко, М. І. Клименко, О. А. Головань. – опубл. 18.11.2020.

7) Ігнатченко М. С., Гнездовский А. В. Объектно-ориентированное моделирование задач механики. *Сучасні проблеми машинобудування*.

Конференція молодих вчених та спеціалістів: зб. тез доп. Харків: Інститут проблем машинобудування НАН України, 2016. С. 23-24.

8) Ігнатченко М. С. Паралельний алгоритм пошуку границі двовимірної геометричної області, заданої неявною функцією. *Інформаційні технології та взаємодії (IT&I – 2019)*. VI міжнародна науково-практична конференція. Матеріали доповідей. Київ: Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 2019. С. 24-25.

9) Ігнатченко М. С., Кудін О. В. Моделювання складних геометричних областей із застосуванням функціонального підходу. *Актуальні проблеми математики та інформатики: тези доповідей Десятої Всеукраїнської, сімнадцятої регіональної наукової конференції молодих дослідників*. Запоріжжя: Запорізький національний університет, 2019. С. 97-98.

10) Ігнатченко М. С., Кудін О. В. Візуалізація R-функцій в паралельних обчислювальних системах зі спільною пам'яттю. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ITMM'2021: тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції імені професора Михальова О. І.* Дніпро: НМетАУ, 2020. С. 161-165.

11) Ігнатченко М. С., Кудін О. В. Застосування паралельних обчислювальних систем зі спільною пам'яттю для візуалізації R-функцій. *Актуальні проблеми математики та інформатики: Збірка тез доповідей Одинадцятої Всеукраїнської, вісімнадцятої регіональної наукової конференції молодих дослідників (м. Запоріжжя, 23-24 квітня 2020 р.)*. Херсон: Видавничий дім "Гельветика", 2020. С. 26-27.