



Ідентифікатор подання: 122

Тип: Секційна доповідь

## Програмне забезпечення для цифрових систем ядерних реакторів

*середа, 28 травня 2025 р. 11:35 (20 хвилин)*

У 2020 р. Франція розпочала масштабний науково-дослідний проект «Ініціатива цифрового ядерного реактора», що включає провідних гравців її атомної галузі. Одним з ключових викликів є точне відтворення конкретного енергоблоку в парку АЕС Франції: цифровий двійник дозволяє віртуально уявляти діючий реактор (у ДіР EDF – EPR (Evolutionary Power Reactor), водо-водяний ядерний реактор покоління 3+) та отримувати доступ до будь-якої інформації про поведінку його компонентів, що неможливо робити в реальному світі. Відповідаючи на подібні виклики, партнери проекту спираються на різноманітне імітаційне ПЗ та десятки обчислювальних кодів (створених у різний час для різних ІТ-середовищ), здатних моделювати різні явища, що відбуваються в реакторі.

Згадані коди моделюють усе – від нейтронних аспектів активної зони реактора до теплогідродинаміки чи хімії. Одні коди зосереджуються на конкретному компоненті та його роботі, а інші – на загальносистемних явищах. CEA (близько 10 осіб із відділів атомної енергетики та дослідницьких відділів) відіграє ключову роль у забезпеченні інтероперабельності всіх цих комп'ютерних кодів, які були окремо чи спільно розроблені CEA, EDF або Framatome (Franco-Américaine de Constructions Atomiques; Франко-американське атомне будівництво; заснована у 1958 р.). Крім того, CEA відповідає за створення передової мультифізичної платформи, де використовується CATHARE (Code Avancé de Thermohydraulique pour les Accidents de Réacteurs à Eau) – ПЗ для двофазного теплогідродинамічного моделювання в масштабі системи, яке CEA розробляє з 1979 р. CATHARE використовують EDF, Framatome, Інститут радіаційного захисту та ядерної безпеки (l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN); заснований у 2001 р.) для загального моделювання потоків у реакторі та його компонентах і дослідження ядерної безпеки реакторів з водою під тиском, а також для навчальних тренажерів атомного парку Франції.

У 1945 р. у Франції був заснований промисловий конгломерат Matra (Mécanique Aviation Traction), який охоплював широкий спектр галузей, зокрема аерокосмічну, оборонну, автомобільну, автоспорт, транспорт, телекомунікації. У 1999 р. компанія Matra Datavision вирішила опублікувати свою інфраструктуру CASCADE за моделлю з відкритим вихідним кодом за ліцензією Open CASCADE Technology Public License (Open Cascade). За ініціативою Open Cascade, у вересні 2000 р. розпочався проект SALOME (Simulation numérique par Architecture Logicielle en Open source et à Méthodologie d'Évolution; Чисельне моделювання за допомогою обчислювальної архітектури відкритим з вихідним кодом і з розвитком методології) в рамках Французької національної мережі досліджень та інновацій у програмних технологіях (Réseau National en Technologies Logicielles (RNTL)), створеної наприкінці 1999 р. Міністерством досліджень і Міністерством промисловості Франції (з 2005 р. – Національне агентство досліджень Франції (l'Agence Nationale de la Recherche (ANR)).

Робочий стенд (workbench), оснований на складових SALOME, надає доступ до мультифізичних і багатомасштабних симуляцій, спираючись на спеціалізовані поєднання (couplings) кодів, які можна застосовувати для розробки нових методів і експертизи з підтримки проектування та експлуатації реактора. Функціональні можливості сервісної платформи можна ілюструвати на деяких сценаріях, включаючи мультифізичні та багатомасштабні підходи. На основі цих сценаріїв стало можливим відповідати критеріям інтероперабельності та взаємозамінюваності кодів, а також їх поєднань з платформами невизначеностей (наприклад, URANIE та OpenTURNS).

URANIE – це програмний фреймворк (CEA), призначений для кількісного оцінювання невизначеностей, аналізу чутливості, калібрування та/або генерування сурогатних моделей, оптимізації тощо. Написаний на C++ URANIE значною мірою базується на програмному фреймворку ROOT, що розробляється CERN з 1990-х років. Фреймворк ROOT створений для допомоги в обробці великих обсягів даних і надання багатьох сервісів. URANIE спирається на рішення візуалізації, обробку даних через складні та оптимізовані дерева, компілятор C++ з виконанням коду під час його написання, автоматичну транскрипцію методу в модулі Python тощо.

OpenTURNS – це ініціатива з відкритим кодом для обробки невизначеностей, ризиків і статистики (Treatment of Uncertainties, Risks'N Statistics).

При цьому інтероперабельність і взаємозамінюваність кодів, досяжні за допомогою зручних для користувача підходів, а також перехід до застосувань високопродуктивних обчислень (High Performance Comput-

ing (HPC)) стають головною рушійною силою для розвитку кодів та ДіР. Од-ним з прикладів є Консорціум для передового моделювання реакторів на легкій воді (Consortium For Advanced Simulation Of Light Water Reactors (CASL)) –перший енергетичний інноваційний хаб, заснований у 2010 р. Міністерством енергетики США. CASL з'єднав фундаментальні дослідження і технологічний розвиток через інтегроване партнерство уряду, наукових кіл, промисло-вості, яке поширилося поміж підприємств ядерної енергетики. Інший приклад дають застосунки на основі платформи MOOSE (Multiphysics Object Oriented Simulation Environment; Мультифізичне об'єктно-орієнтоване середовище моделювання; створено у 2008 р.). MOOSE –об'єктно-орієнтований фреймворк скінченних елементів на C++ для розробки тісно пов'язаних мультифізичних розв'язувачів від Національної лабораторії Айдахо (США), який використовує пакет PETSc нелінійного розв'язувача та бібліотеку libmesh для забезпечення дискретизації методу скінченних елементів. Прикладом також є OpenFOAM (Open Field Operation And Manipulation; Операції та маніпуляції у відкритій області; створено у 2004 р. у Великобританії) – набір інструментів на C++ для розробки налаштованих чисельних розв'язувачів і утиліт попередньої обробки та постобробки у розв'язанні задач механіки суцільних середовищ, зокрема обчислювальної гідродинаміки (computational fluid dynamics (CFD)). Прикладом від Фінляндії є Serpent – багаточільовий код моделювання тривимірного переносу частинки неперервної енергії на основі методу Монте-Карло, створений у 2004 р. Національним технічним науково-дослідним центром (Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT); заснований 16 січня 1942 р.).

Інтеграційний стенд для вивчення безпеки має ключові компоненти:

- редактор командних файлів і семантичний аналізатор EFICAS (Editeur de Fichier de Commandes et Analyseur Sémantique; розроблений EDF R&D (на 2025 р. охоплює 1800 дослідників у Франції та 282 дослідники за межами Франції) в контексті платформи SALOME – розробник інтерфейсу даних і модуль динамічної перевірки набору даних) як спільна модель даних для визначення значень, що використовуються в мультифізиці. EFICAS включає технологічні, модельні, сценарні дані;  
- бібліотека СЗРО (Collaborative Code Coupling PlatfOrm), призначена поєднанням кодів. СЗРО включає дані основного сценарію, драйвер нейтроніки, драйвер теплогідрравліки.

Потім загальні дані зберігаються у спеціальному файлі каталогу, що включає деревовидну структуру даних. Далі цей файл конвертується у формат XML (стандартний формат W3C (World Wide Web Consortium, який у 1994 р. заснував винахідник WWW Тім Бернерс-Лі у CERN)) за допомогою EFICAS та обробляється певною програмою на Python, розробленою у даному проєкті для генерування вхідних даних кожного коду з його специфічним Python API. Потім програма на Python приєднує внутрішній стан кожного коду до об'єкта PhysicsDriver для СЗРО, який відповідає специфічному Python API коду з форматом ICoCo (Interface for Code Coupling) API.

Другий ключовий компонент, СЗРО (Collaborative Code Coupling PlatfOrm), – це бібліотека Python, призначена для поєднання програм. Вона надає інструменти для управління виконанням програм, обміну даними, а також розширені алгоритми конвергенції та інструменти управління інтерфейсу передачі даних MPI (message passing interface). СЗРО забезпечує обмін даними між програмами шляхом передачі скалярних значень і полів. Обраним форматом поля є формат MED (Modèle d'Échange des Données; модель обміну даними) платформи SALOME. Для проєкту була обрана бібліотека MEDCoupling, яка використовується для обробки просторових сіток (meshes) і виконання проєкцій. MEDCoupling розроблено CEA та EDF R&D для платформи SALOME. В рамках проєкту «Ініціатива цифрового ядерного реактора» програми, розроблені CEA, були інтегровані на робочий стенд і успішно застосовувалися до різних сценаріїв. Серед цих програм – APOLLO3® (оновлена версія APOLLO II), THEDI (THErmohydraulique DИrphasique; програма розрахунків двофазних теплогідрравлічних потоків), FLICA-4 (програма теплогідрравлічних розрахунків для проєктування та теплового аналізу безпеки активних зон ядерних реакторів), CATHARE3 (оновлена версія CATHARE).

Розвиток штучного інтелекту висуває нові вимоги до цифрових трансформацій енергетики [1], зокрема атомної енергетики, особливо у державах з високою її часткою в загальній електроенергетиці [2].

1. Електроенергетика України: стратегія ефективності. І.Р. Юхновський (гол.ред.), В.Г. Бар'яхтар, В.М. Горбачук, В.А. Копилов, М.М. Кулик, В.Т. Меркушов, Г.Г. Півняк, С.Б. Ту-луб (ред.) (Київ: Міжвідомча аналітично-консультативна рада з питань розвитку продуктивних сил і виробничих відносин, 2001) 88 с.
2. В.М. Горбачук, С.А. Беспалов, В.В. Гладковський, М.М. Пустовойт. Від електронних документів ЦЕРН до великих даних. Глушковські читання (26 жовтня 2023 р., Київ, Україна) (Київ: Інститут кібернетики імені В.М.Глушкова НАН України, 2023) 27.

**Authors:** ГОДЛЮК, В. В. (Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України); ГОРБАЧУК, В. М. (Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України); РИБАЧОК, Д. О. (Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України); ДУНАЄВСЬКИЙ, М. С. (Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України); ГОЛОЦУКОВА, Т. Г. (Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України); БАРДАДИМ, Т. О. (Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України)

**Доповідач:** ГОРБАЧУК, В. М. (Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України)

**Тип засідання:** Атомна енергетика

**Класифікація за напрямком:** Атомна енергетика