

УНІФІКОВАНА СХЕМА РЕАЛІЗАЦІЇ ОПТИМІЗАЦІЙНО-ІМІТАЦІЙНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

В.Б. Бігдан, В.А. Пенеляєв, Ю.М. Чорний

Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України
03680, МСП, Київ-187, проспект Академіка Глушкова, 40,
тел.: (044) 526 4107, vera@icfcsst.kiev.ua

Представлено базований на концепції оптимізаційно-імітаційної інтеграції підхід до реалізації імітаційного інструментарію та відповідного програмного середовища на основі дискретно-подійної системи НЕДИС-Р, метаевристичного оптимізатора та уніфікованої схеми пошуку оптимальних рішень щодо задач аналізу, модернізації або проектування складних систем. Зазначений підхід забезпечує скорочення витрат часових та фінансових ресурсів на проведення експериментів. Розглянуто перспективи подальшого розвитку такого підходу.

Here is presented the approach based on the concept of optimization-simulation integration to implement the simulation toolkit and the corresponding environment on the platform of discrete event simulation system NEDIS-R, metaheuristic optimizer and unified scheme for search of optimal decisions concerning problems of analysis, modernization or designing of complex systems. The specified approach provides reduction of time and financial expenses for experiments realizations. The perspectives of further development of such approach are considered.

Вступ

Однією з основних тенденцій, що намітилися за останні роки в галузі розробки і практичного застосування методів та засобів імітаційного моделювання, є підвищення вимог до ефективності імітаційного інструментарію. Це пояснюється насамперед зміною рівня застосувань імітаційних систем. Якщо традиційно такі системи використовувалися головним чином для одержання широкого спектра статистичних характеристик основних показників функціонування досліджуваних систем, то в даний час існує нагальна потреба в рішенні різнопланових стратегічних проблем із застосуванням методів імітаційного моделювання. Тут можна зазначити проблеми глобальної оптимізації, що виникають сьогодні в рамках різного роду міжнародних і національних програм, проблем управління бізнес-процесами, фінансами, сучасними виробничими системами, маркетингом. Сьогодні на передній план виступає потреба отримання зиску від застосування методів імітаційного моделювання, іншими словами, одержання оптимальних рішень за умов значного скорочення витрат часових і фінансових ресурсів. Саме тому розробка методів та засобів, що підвищують ефективність імітаційного моделювання, є актуальною проблемою.

У світовій практиці імітаційного моделювання до цього часу склалися такі найбільш відомі підходи до підвищення ефективності методів імітації: використання технологій розподілених та високопродуктивних паралельних обчислень [1, 2]; використання концепцій і методів оптимізаційно-імітаційної інтеграції [3–5]; застосування методолого-технологічних стандартів для розробки імітаційних моделей та їх компонент [6, 7] і рішення задач оцінки вірогідності таких моделей [8–10]; розробка розвинутих систем аналізу вихідних даних моделювання, що забезпечують накопичення досвіду моделювання та представлення результатів експериментів у персоналізованих форматах, орієнтованих на різних користувачів (особи, що планує та виконує імітаційні експерименти, експерта, особи, що приймає рішення) та підготовку відповідних звітів за результатами проведених імітаційних експериментів [2, 11].

Мета доповіді - представлення розробленого в Інституті кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України підходу до підвищення ефективності імітаційного інструментарію, що базується на концепціях оптимізаційно-імітаційної інтеграції та метаевристичних стратегіях оптимізації. Програмне середовище підтримки вказаного підходу (умовна назва – НЕДОПТ), сформоване на основі інтеграції системи дискретно-подійного моделювання НЕДИС-Р та системи оптимізації НЕДИС-ОПТИМІЗАТОР [12–14].

Основні принципи розробки системи НЕДОПТ

В основу розробки системи НЕДОПТ покладено принципи, сформульовані на базі концепцій та підходів прийнятих в сучасній практиці оптимізації імітаційного моделювання:

- використання парадигми компонентної архітектури для структурної організації інтегрованого програмного середовища підтримки оптимізаційно-імітаційних експериментів. Відповідно до зазначеної парадигми програмне середовище системи НЕДОПТ реалізоване у вигляді двох автономно функціонуючих компонентів (оптимізатора й імітатора), взаємодіючих через спеціально розроблені засоби інтерфейсу;

- використання системи дискретно-подійного моделювання НЕДИС-Р як системної (резидентної) компоненти імітатора [12], а імітаційні застосування, що розробляються для кожної конкретної системи й відповідних задач її дослідження, як проблемно-орієнтованої складової ("змінної частини імітатора").

В сценарії експерименту крім традиційної процедури виміру відгуків моделі, має бути включена процедура обчислення значення функції цілі.

- реалізація НЕДИС-ОПТИМІЗАТОРА на основі парадигми еволюційних обчислень, зокрема генетичного алгоритму, у вигляді сімейства моделей метаевристичних стратегій, що підтримують процеси направлено пошуку оптимальних проектних рішень;
- реалізація дворівневої структури сценаріїв оптимізаційно-імітаційних експериментів;
- використання уніфікованої схеми підтримки оптимізаційно-імітаційних експериментів у відповідності із особливостями та нормами тактико-стратегічного планування таких експериментів;
- розширення базової мови НЕДИС-Р вбудованими засобами спеціального інтерфейсу, що забезпечують багаторазові прогони імітаційних моделей та підтримують взаємодію оптимізатора та системи моделювання як на інформаційному рівні, так і на рівні керування потоками;
- наявність засобів управління сесіями моделювання з підтримкою можливості динамічного формування сценаріїв на кожному моделюванні та вибору відповідних стратегій оптимізації;
- формування вхідної та вихідної інформації для кожної сесії моделювання на базі прийнятих в НЕДОПТ стандартних моделях такої інформації для всіх етапів сесії моделювання та сесії у цілому.

Тактико-стратегічне планування оптимізаційно-імітаційних експериментів

Дослідження на базі системи НЕДОПТ є за своєю суттю оптимізаційно-імітаційними, що спираються на концепцію "популяція рішень". У загальному випадку кожне дослідження має включати три етапи, що реалізуються послідовно: цілі першого етапу визначаються задачами тактичного планування імітаційних експериментів; задачі другого етапу регламентуються специфікою вибраної метаевристичної стратегії оптимізації; третій етап орієнтований на оцінювання вірогідності вихідних результатів експериментів.

Проведення досліджень за першим етапом потребує вирішення наступних задач:

- класифікація відгуків-виходів імітаційної моделі і формування основної та додаткової множини відгуків. До складу основної множини, як правило, включаються показники ефективності функціонування досліджуваних систем. Саме ці показники використовуються в стратегіях пошуку оптимальних рішень. Додаткова множина включає відгуки, що містять різного роду деталізуючу інформацію, необхідну для більш коректного розуміння специфіки функціонування досліджуваної системи;
- ідентифікація істотних (домінантних) факторів, що мають найбільший вплив на основні відгуки імітаційної моделі;
- визначення початкових умов експериментів;
- визначення складу управляючої та вхідної інформації для чисто імітаційних прогонів;
- верифікація і валідація імітаційної моделі. Зауважимо, що незалежно від використовуваної стратегії оптимізації пошук оптимальних рішень може здійснюватися тільки на базі моделі, для якої виконані процедури верифікації і валідації (у загальноприйнятій нотації – цикл операцій VV&T) [8–10];
- аналіз чутливості імітаційних моделей і визначення обмежень, установлення припустимих інтервалів зміни відгуків та факторів;
- визначення довірчого інтервалу моделювання, інтервалу розгону моделі і кроку тактування процесу моделювання;
- визначення формул для підрахунку функцій цілі на підставі відгуків відповідних прогонів імітаційної моделі, факторів, різного роду вартісних і штрафних характеристик.

Розвиток сценаріїв експериментів для другого етапу визначається алгоритмами стратегічного планування, які істотно залежать від прийнятої стратегії пошуку оптимальних рішень. Оскільки в нашому випадку мова йде про метаевристичні стратегії оптимізації, то основними питаннями тут є:

- визначення оцінюваних альтернатив A_i , характеристики яких формують склад і структуру хромосом-рішень;
- формування початкової популяції з урахуванням границь та рівнів квантування факторів, визначених на першій фазі експерименту;
- визначення керуючих параметрів для процесу пошуку оптимальних рішень у залежності від оптимізаційної стратегії, яка буде використовуватись;
- визначення відгуків та значення функцій цілі, що характеризують оцінювані та оптимальні альтернативи.

Третій етап – етап реплікаційних прогонів, пов'язаний з рішенням питань валідації результатів моделювання і призначений для підтвердження вірогідності та стійкості цих результатів.

Особливості реалізації НЕДИС–ОПТИМІЗАТОРА

НЕДИС-ОПТИМІЗАТОР для кожного етапу досліджень визначає відповідну модель оптимізаційної стратегії.

Для рішення всіх задач першого етапу використовується модель послідовного перебору варіантів рішень, що базується на схемі послідовного читання з апріорно сформованої популяції рішень наборів відповідних факторів і запуску прогонів імітаційної моделі.

Другий етап визначається моделлю генетичного алгоритму. Сутність будь-якої еволюційної оптимізаційної стратегії (зокрема генетичному алгоритму) полягає в представленні простору пошуку

оптимальних рішень як еволюціонуючої популяції хромосом-рішень. Першорядна роль у цих стратегіях надається механізмам добору особин-рішень для їхньої участі в процесі репродукції наступних поколінь. Як міра потенційної можливості такої участі використовуються так звані fitness-значення, які формуються у відповідності із представленням функцій цілі. У генетичному алгоритмі моделі репродукції нових хромосом-рішень базуються на операторах рекомбінації і мутації генів хромосом-батьків.

Реалізована в НЕДИС-ОПТИМІЗАТОРі загальна схема розвитку еволюційного процесу виглядає наступним чином:

- процес пошуку оптимальних рішень і, як наслідок, оптимальних проектних альтернатив, представляється поетапною еволюцією початкової популяції хромосом-рішень;

- кожен етап включає зміни декількох поколінь, кількість яких визначається випадковим чином, або задається апіорі. За аналогією з процесами комп'ютерної імітації введено етап розігріву процесу пошуку оптимальних рішень, протягом якого здійснюється "збовтування – струс" початкової популяції;

- кожне покоління популяції характеризується своїм вектором fitness-значень, що визначають рівень придатності відповідного рішення для можливої участі в наступних етапах еволюції. При цьому вектор fitness-значень виступає у ролі інформаційного агента популяції. Fitness-значення оцінюються на основі відгуків, отриманих у результаті прогону імітаційної моделі, що запускається за допомогою спеціально реалізованого в системі НЕДОПТ інтерфейсу RunModel();

- перехід від поточного покоління популяції до наступного здійснюється як двоступеневий процес. Спочатку на основі поточного покоління популяції формується "проміжне покоління", а потім на базі цього елітного покоління за допомогою моделі репродукції формується нове покоління. Тут виникає необхідність наявності спеціального механізму фільтрації, за допомогою якого відбирається і формується елітна підмножина особин-рішень, що отримують право участі в процесі репродукції. Особини, що не отримали доступ у зазначену підмножину, умирають (видаляються з популяції). В НЕДИС-ОПТИМІЗАТОРі використовується найбільш розповсюджений підхід до фільтрації, а саме – сортування номерів рішень у відповідності до fitness-значень за схемою $(m - t)$, де m – розмір популяції, t – кількість умираючих особин. Помітимо, що в моделі фільтрації використовується спеціальний масив SortchNum, що містить упорядковані за fitness-значеннями номери хромосом-рішень в залежності від постановки оптимізаційної задачі. Якщо мова йде про максимізацію відгуків або fitness-значень, то номери упорядковуються відповідно до зменшення fitness-значень, у протилежному випадку – відповідно до збільшення fitness-значень. Модель репродукції випадковим чином вибирає з елітної підмножини номери хромосом-батьків та відповідно до заданого типу оператора кросоверу (рекомбінації) відтворює нащадків;

- вектор fitness-значень для останнього покоління кожного з етапів запам'ятовується для використання в процедурах контролю закінчення процесу еволюції;

- спеціальна модель керування процесом еволюції забезпечує відстеження поетапного розвитку процесу еволюції, перевірку умов закінчення процесу еволюції після завершення кожного наступного етапу згідно з критерієм

$$d \leq \varepsilon, \quad d = \sqrt{\sum_{i=1}^T \frac{(f_{ik} - f_{ik-1})^2}{T}}$$

де ε – апіорно задана точність досягнення оптимального рішення (з урахуванням порядку fitness-значень); T – поріг відсікання для добору особин ($T = m - t$); f_{ik}, f_{ik-1} – значення fitness-функції для i -ї хромосоми – рішення останнього покоління популяції для k -го та $(k - 1)$ -го етапу відповідно;

- у випадку невиконання умов завершення еволюції у залежності від стану еволюційного процесу передбачається або повторне сортування (фільтрація) рішень, або репродукція нових рішень.

Уніфікована схема підтримки оптимізаційно-імітаційних експериментів

Дослідження складних систем у рамках НЕДОПТ базуються на спеціально розробленій уніфікованій схемі реалізації оптимізаційно-імітаційних експериментів. Структурна організація вказаної схеми та властиві їй інформаційно-обмінні процеси представлені на рисунку.

У загальному випадку будь-який експеримент може включати три фази. При цьому кожній фазі відповідає своя схема оптимізаційної стратегії і свої моделі вхідної та вихідної інформації.

Виконання однієї чи декількох фаз експериментів в інтегрованому середовищі НЕДОПТ прийнято називати сесією (сеансом) моделювання. У рамках однієї сесії допускаються наступні комбінації фаз: (1,0,0), (1,2,0), (1,0,3), (0,2,0), (0,2,3), (0,0,3), (1,2,3). Тривалість сесії моделювання залежить від заданої комбінації фаз експерименту, розміру популяції рішень та відповідних характеристик процесу еволюції.

Для схеми послідовного перебору варіантів ($N = 1$) характерні два аспекти використання. Перший аспект пов'язаний з рішенням задач першої фази реалізації оптимізаційно-імітаційних експериментів визначених схемою тактичного планування. Другий аспект стосується пошуку оптимальних рішень на основі зазначеної стратегії, сформованої популяції хромосом-рішень та імітаційної моделі, для якої виконані процедури VV&T.

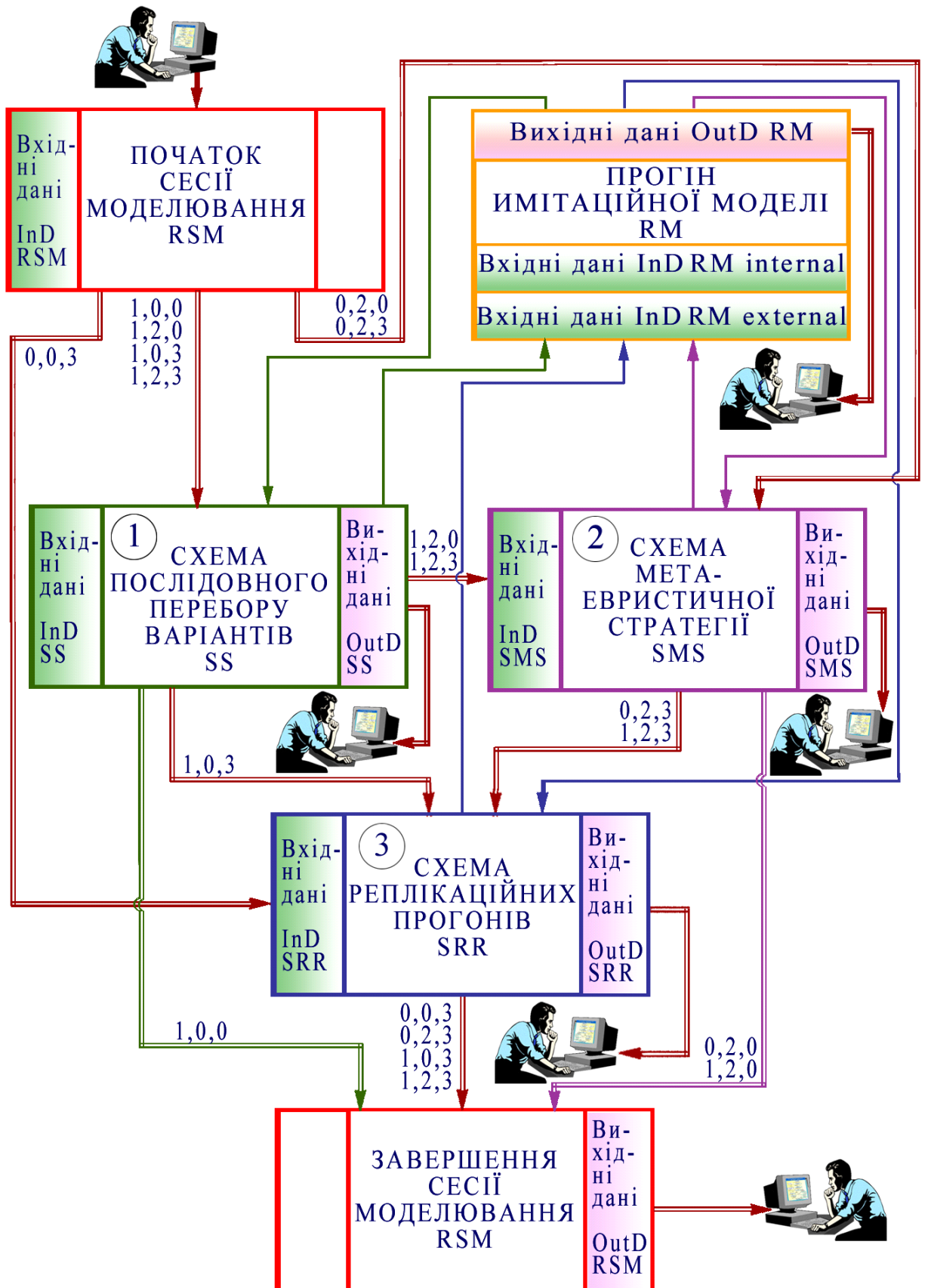


Рисунок. Уніфікована схема реалізації оптимізаційно-імітаційних експериментів

- Ⓝ -номер фази оптимізації; \rightleftarrows -обмін інформацією поміж фазами;
- \rightarrow -обмін інформацією між схемою оптимізації та імітатором;
- локальна точка взаємодії користувача з програмним середовищем НЕДОПТ.

Схема другої фази ($N = 2$) орієнтована на пошук оптимальних рішень і визначається метаевристичною стратегією оптимізації на основі генетичного алгоритму. На цій фазі реалізується направлений пошук оптимальних рішень для досліджуваних систем.

Схема третьої фази ($N = 3$) підтримує процедури оцінювання вірогідності оптимальних рішень, що є вихідними результатами схеми 1 або схеми 2.

У процесі розробки уніфікованої схеми реалізації оптимізаційно-імітаційних експериментів були створені стандартизовані моделі, що визначають структурну організацію вхідних та вихідних даних для сесії моделювання у цілому та її окремих фаз. Вхідні дані **InD** як сесії моделювання так і схем оптимізації, представлених на рисунку, включають інформацію двох типів – управляючі та числові характеристики.

Управляюча інформація для сесії моделювання **InD RSM** включає задану комбінацію схем оптимізації, а числова – ознаки видачі інформації про сесію моделювання, видачі та реєстрації результатів прогонів імітаційної моделі, видачі та представлення знайдених оптимальних рішень.

Для кожної із схем оптимізації в моделях **InD SS**, **InD SMS**, **InD SRR** задані розміри популяції та число генів-факторів у хромосомах-рішеннях. Модель **InD SMS** додатково включає тип кроссовера та схеми відбору, поріг відсікання, число етапів в еволюції, число поколінь в одному етапі, у тому числі в етапі "розгону" еволюції, задану точність збіжності процесу еволюції, коефіцієнт мутації. Для схеми з реплікаційними прогонами в **InD SRR** додатково задаються параметри, що управляють процедурою одержання оцінок вірогідності оптимальних рішень. До складу вхідної інформації кожної із схем оптимізації включається сформована популяція хромосом-рішень. Як правило, такі популяції можуть бути сформовані апіорі, в динаміці або як вихідні дані попередньої фази процесу оптимізації.

Вхідні дані для "чисто" імітаційних експериментів **InD RM** (прогонів імітаційних моделей) включають зовнішні (external) параметри (сформовані оптимізатором фактори) та внутрішні (internal), до яких відносяться: управляючі прогоном імітаційних моделей параметри (період моделювання, визначений довірчим інтервалом, крок тактування процесу моделювання, ознака наявності розгону (розігріву – warm-up) моделі – початковий інтервал часу, протягом якого не збирається статистика, часовий інтервал розгону моделі), управляючі процесом реєстрації та накопичення відгуків, структурні, потокові і функціонально-почасові характеристики досліджуваної системи, вартісні характеристики різних видів штрафів та устаткування.

Для вихідних даних сесії моделювання **OutD RSM** використовують моделі двох типів: моделі даних "чисто" імітаційних прогонів (**OutD RM**) та моделі результатів направлено пошуку оптимальних рішень за прийнятими схемами оптимізації представлені відповідними хромосомами-рішеннями із початкової та кінцевої популяції.

Кожен рядок даних із **OutD RSM** включає таку інформацію:

[Номер хромосоми] [Гени-фактори] [Відгуки] [Фітнес-значення]

Число таких рядків залежить від розміру популяції хромосом-рішень.

Дані імітаційних прогонів видаються у стандартному форматі, передбаченому спеціальними об'єктами мови НЕДИС-Р або в обраних користувачем форматах. Якщо користувача не влаштовують стандартні моделі мови НЕДИС-Р для вихідної інформації, він може визначити відповідно до нотації C++ класи об'єктів, що враховують специфіку його проблемної області.

Модель представлення проміжних результатів використовується для відображення ходу процесу моделювання (трасування і візуалізація обраних параметрів). Крім традиційної інформації відладки, що формується власне системою моделювання, включається інформація, яка відображає специфіку конкретної проблемної області. При цьому видача такої інформації здійснюється на підставі процедур замовлених або запропонованих дослідником (користувачем системи). Кожен рядок траси містить інформацію про виконання відповідних подій для активних об'єктів досліджуваної системи (породження об'єктів, встановлення в чергу, чекання обслуговування, видалення). Формування такої інформації за бажанням користувача може супроводжувати весь процес моделювання.

Історія ходу процесу моделювання в кожному прогоні імітаційної моделі та результати пошуку оптимальних рішень записуються в ЖУРНАЛ СЕСІЇ МОДЕЛЮВАННЯ та ЖУРНАЛ НАКОПИЧЕННЯ ДОСВІДУ.

Програмна реалізація уніфікованої схеми окрім модулів підтримки відповідних стратегій оптимізації включає модулі, що управляють початком сесії моделювання та її завершенням. В рамках модуля ПОЧАТОК СЕСІЇ МОДЕЛЮВАННЯ визначається набір схем оптимізації, за якими буде реалізовано пошук оптимальних рішень. На рисунку представлені можливі комбінації схем оптимізації, що можуть бути активізовані на поточну сесію. Допускається активізація тільки однієї схеми.

Модуль ЗАВЕРШЕННЯ СЕСІЇ МОДЕЛЮВАННЯ забезпечує процедури аналізу вихідних даних сесії моделювання, їх форматування та накопичення досвіду моделювання згідно із заданими параметрами таких процедур.

Кожна схема оптимізації включає модуль аналізу процесу оптимізації з метою оцінки можливостей його продовження або завершення. На користувача покладається відповідальність за коректне формування вхідних даних для сесії моделювання в цілому і конкретних схем оптимізації.

Уніфікована схема реалізації оптимізаційно-імітаційних експериментів є універсальною, незалежною від прикладних застосувань, відкрита для розширення новими оптимізаційними стратегіями та моделями вхідної і вихідної інформації.

Висновки

Розроблена вітчизняна версія оптимізаційно-імітаційного інструментарію (система НЕДОПТ), сформульовані принципи тактико-стратегічного планування оптимізаційно-імітаційних експериментів та визначена уніфікована схема їх поетапної реалізації забезпечують скорочення часових та фінансових витрат на пошук оптимальних рішень стосовно задач аналізу, модернізації та проектування складних систем, що потребують великих обсягів моделювання і для яких час приймання проектних або управлінських рішень є критичним.

Одним з перспективних напрямків подальшого використання та розвитку створеного інструментарію та методики його використання є проблеми розв'язання оптимізаційно-імітаційних задач на багато-процесорних та кластерних архітектурах у різних прикладних галузях (дослідження процесів функціонування та проектування транспортних систем та коридорів, систем управління фінансами, маркетингом, сучасними виробничими процесами, логістичними системами).

1. *Fujimoto R.M.* Parallel and Distributed Simulation // In Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference. –1999. – P. 122–131.
2. *Davis D.M., Baer G.D., Gottschalk T.D.* 21st Century Simulation: Exploiting High Performance Computing and Data Analysis // Interservice/Industry Training, Simulation, and Education Conference. –2004. –Paper № 1517.
3. *Whitley D.* An overview of evolutionary algorithms // J. of Information and Software Technology. –2001. – 43. – P. 817–831.
4. *Fu M.* Optimization for Simulation: Theory and Practice // INFORMS J. on Computing. – 2002. –№ 14 (3). –P. 192–215.
5. *April J., Glover F., Kelly J.P., Laguna M.* Practical introduction to simulation optimization // Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference. –2003. –P. 71–78.
6. *Ören T.J., Zeigler B.P.* Concepts for advanced simulation methodologies // Simulation. –1979. –Vol.32, 3. – P. 69–82.
7. High Level Architecture // <http://www.dms0.mil/public/transition/hla>.
8. *Balci O.* Verification, validation and certification of modeling and simulation applications // Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference.–2003. –P. 150–158.
9. *Sargent R.G.* Validation and verification of simulation models // Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference. – 2004. – P. 17–28.
10. *Law A.M., McComas, M.G.* How to build valid and credible simulation models // Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference.–2001. –P. 22–29.
11. *Horne G.E., Meyer T.E.* Data Farming: Discovering Surprise // // Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference. – 2005. – P. 1082–1087.
12. *Галаган Т.Н., Гусев В.В., Марьянович Т.П., Яценко Н.М.* Один подход к автоматизации построения распределённой модели из её сосредоточенного аналога // Проблемы программирования. – 2002. – № 1–2. – С. 182–187.
13. *Пепеляев В.А., Сахнюк М.А., Чёрный Ю.М., Шваб Н.Д.* К вопросу о реализации метаэвристических стратегий оптимизации моделирования // Компьютерная математика. – 2005. – № 2. – С. 26–33.
14. *Коваль В.П., Пепеляев В.А., Черный Ю.М.* Об оценке альтернативных решений на основе методов имитационного моделирования // Теория оптимальных решений. – 2004. – № 3. – С. 19–26.