

**МІМД-СИМУЛЯТОРИ НА ОСНОВІ МОВ ПАРАЛЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ****В.А. Святний, А.С. Любимов, О.М. Мірошкін, В.Г. Кушнарєнко**Донецький національний технічний університет,  
пл. Шибанкова, 2, Покровськ, 85300, Україна; e-mail: vsvjatnyj@gmail.com  
Університет Ульм,

Хелмхолштрасе, 16, Ульм, 89081, Німеччина; e-mail: volodymyr.kushnarenko@uni-ulm.de

Аналіз етапів і наявних засобів моделювання складних динамічних систем (СДС) показав, що сучасні паралельні засоби відстають за рівнем сервісу від послідовних блоково-, рівняння- та об'єктно-орієнтованих (БО, РО, ОО) мов моделювання: розробники МІМД-симуляторів вимушені працювати на рівні мов програмування. Запропоновано концепцію розробки мов паралельного моделювання на основі аналогії між принципами функціонування послідовних мов і МІМД-паралельністю. Розв'язання систем рівнянь послідовною мовою відповідає МІМД-паралелізму і може інтерпретуватися як віртуальне призначення «Функціональний елемент мови – МІМД-процес». Показано трансформацію БО-специфікації Simulation-моделі СДС в структуру МІМД-процесів на прикладі моделі мережевого динамічного об'єкту з зосередженими параметрами (МДОЗП). Визначено, що принцип розв'язання систем рівнянь БО-мовою відповідає МІМД-паралелізму. Кожному блоку БО-мови призначено МІМД-процес, який в точності виконує операції блоку, отримано множину процесів, які зв'язуються між собою комунікаційним графом, що синтезується на основі схеми з'єднань між виходами і входами блоків БО-симулятора. Запропоновано трансформацію специфікацій БО-, РО- та ОО-симуляторів в віртуальні паралельні МІМД-симулятори. Введено віртуальну матрицю комутацій, яка формально описує всі зв'язки між процесами МІМД-симулятора, що відповідають функціональним елементам послідовних мов. Визначено девіртуалізацію як процес перетворення специфікацій віртуальних МІМД-симуляторів, що однозначно забезпечує їх реалізацію на заданій цільовій паралельній обчислювальній системі, сформульовано основні теоретичні і практичні задачі цього процесу.

**Ключові слова:** складна динамічна система, Simulation-модель, мови моделювання, функціональний блок, МІМД-симулятор, МІМД-процес, девіртуалізація.

**Вступ**

Складні динамічні системи (СДС) (рис. 1). Математична модель СДС [1] – це рівняння досліджуваних динамічних процесів і формальний опис топології системи (технологічні схеми, графи, структури систем автоматизації, вторинні топології як результати апроксимації систем з розподіленими параметрами та ін.). Simulation-моделлю СДС прийнято називати модель, приведену до форми, яку вимагають обчислювальні методи та програмно-апаратні засоби розв'язання систем рівнянь. З огляду на показники складності (велика розмірність систем рівнянь, просторова розподіленість і багатозв'язність параметрів, ієрархічність структур, різна фізична природа взаємодіючих процесів, різні методи апроксимації моделей відносно просторових координат та ін.) треба відзначити, що побудова Simulation-моделей СДС є нетривіальною задачею і потребує суттєвої комп'ютерної підтримки. Вибором певного обчислювального методу зумовлюється дискретна Simulation-модель СДС, що в процесі апаратно-програмної імплементації трансформується в симулятор СДС. Послідовні симулятори СДС пройшли шлях від реалізацій засобами мов програмування [2] до засобів блоково-(БО), рівняння-(РО) та об'єктно-орієнтованих (ОО) мов моделювання [3,4,5].



Рис. 1. Етапи та засоби математичного моделювання складних динамічних систем

Розробка паралельних MIMD-симуляторів ведеться, як і раніше, за допомогою мов програмування з використанням засобів бібліотек MPI, OpenMP для обміну даними та синхронізації MIMD-процесів. Внаслідок цього експерти предметних областей, що розробляють паралельні симулятори, вимушені працювати з засобами колишніх традиційних систем моделювання другого і третього покоління [2], що за рівнем сервісу та дружності до користувачів поступаються послідовним мовам моделювання. В теорії і практиці технологій паралельного моделювання (Parallel Simulation Technology, ParSimTech) однією з ключових проблем є розробка розподілених паралельних моделюючих середовищ (РПМС) з повнофункціональним програмним забезпеченням розробки, налагодження й експлуатації паралельних симуляторів СДС (Parallel Modeling and Simulation Software). Для того, щоб наблизитись за рівнем сервісу до засобів моделювання п'ятого покоління [1, 2], необхідно в РПМС мати мови паралельного моделювання, що забезпечують перетворення специфікацій моделей СДС в виконувані програмні модулі паралельних симуляторів і звільняють експертів предметних областей від питань вибору обчислювальних методів, побудови дискретних Simulation-моделей СДС та їх програмної реалізації. Аналіз показує, що розроблені та експериментально досліджені пари «топологічні аналізатори – генератори рівнянь» [1] дають Simulation-моделі, що дозволяють безпосередньо застосовувати принципи БО-, ОО- та РО-мов моделювання для розв'язання систем рівнянь. Розглянемо концепцію розробки мов паралельного моделювання.

### Основна частина

Головним компонентом блоково-орієнтованої мови моделювання [3] є функціональний блок (рис. 2), який реалізується програмно. Блок має  $n$  входів і один вихід, в ньому можуть задаватись коефіцієнти при вхідних змінних та початкові умови щодо змінної на виході, яка є результатом певної операції:

$$Y = F(X_1, X_2, \dots, X_n, a_1, a_2, \dots, a_n, t).$$

Для розв'язання систем звичайних диференціальних рівнянь в БО-мові моделювання передбачено наступну множину основних математичних операцій:

$$F \in \left\{ \sum_{i=1}^n a_i x_i; \int_{i=1}^n a_i x_i dt; f(x_i), \varphi(x_i, x_k); f(t), x_i * x_k, x_i / x_k \right\}.$$

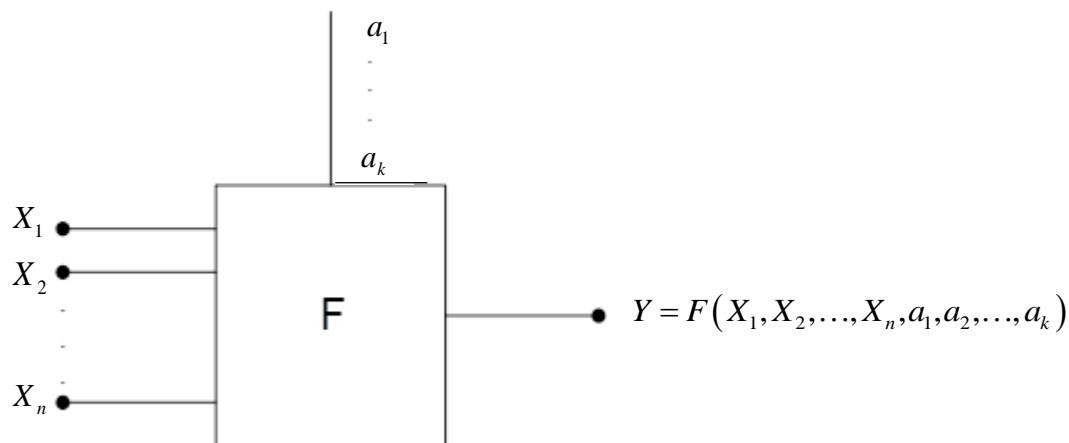


Рис. 2. Функціональний блок БО-мови моделювання

Покажемо аналогію між БО-специфікацією Simulation-моделі СДС і МІМД-принципом розпаралелювання на прикладі моделі простого мережевого динамічного об'єкту з зосередженими параметрами (МДОЗП), що описується системою рівнянь (1) з потоками повітря в гілках  $X, Y_1, Y_2$ , коефіцієнтами інерційності потоків  $K_x, K_1, K_2$ , аеродинамічними опорами  $R_x, R_1, R_2$  та характеристикою вентилятора  $f(X)$ :

$$\begin{cases} X = Y_1 + Y_2 \\ K_x \frac{dX}{dt} + R_x X |X| + K_1 \frac{dY_1}{dt} + R_1 Y_2 |Y_1| = f(X) \\ K_x \frac{dX}{dt} + R_x X |X| + K_2 \frac{dY_2}{dt} + R_2 Y_2 |Y_2| = f(X) \end{cases} \quad (1)$$

Simulation-модель МДОЗП:

$$\begin{cases} X = Y_1 + Y_2 \\ \frac{d}{dt} \left( Y_1 + \frac{K_x}{K_1} X \right) = [f(x) - R_x X |X| - R_1 Y_1 |Y_1|] / K_1 \\ \frac{d}{dt} \left( Y_2 + \frac{K_x}{K_2} X \right) = [f(x) - R_x X |X| - R_2 Y_2 |Y_2|] / K_2 \end{cases} \quad (2)$$

За методом неявних функцій отримаємо БО-специфікацію Simulation-моделі у вигляді структури функціональних блоків, що необхідні для знаходження невідомих змінних  $X, Y_1, Y_2$  системи рівнянь (2) (рис. 3). Аналіз показує, що функціональному блоку БО-мови моделювання (рис.2) можна співставити МІМД-процес, що виконує операцію блоку і програмується за аналогічним алгоритмом (рис. 4): зчитування вхідних даних  $VE$ , обчислення вихідної змінної  $Y = F(VE)$ , можлива  $Y$ -реплікація для подальшого паралельного використання та вивід на схему зв'язку між процесами. Принцип розв'язання систем рівнянь БО-мовою відповідає МІМД-паралелізму і може інтерпретуватися як віртуальне призначення «Функціональний блок – МІМД-процес» (рис. 5): кожному блоку БО-мови призначаємо МІМД-процес, який в точності виконує операції блоку; отримаємо множину  $n$  процесів, які зв'язуються між собою комунікаційним графом, що синтезується на основі схеми з'єднань між виходами і входами блоків БО-симулятора (рис. 3).

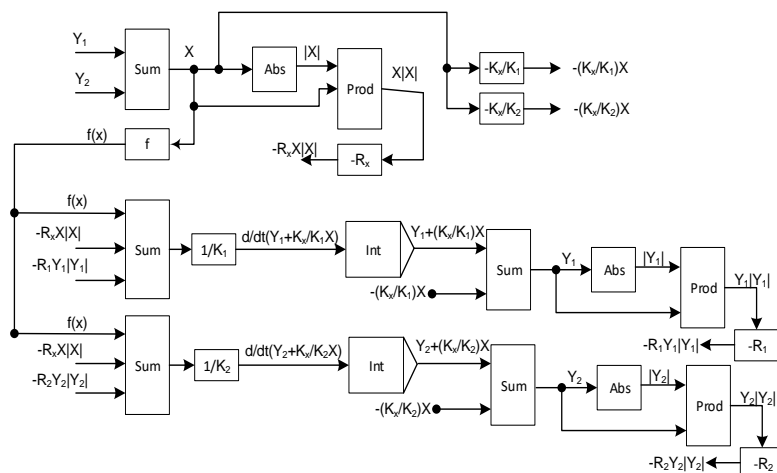


Рис. 3. Структура блоків для розв'язання системи рівнянь (2), БО-симулятор

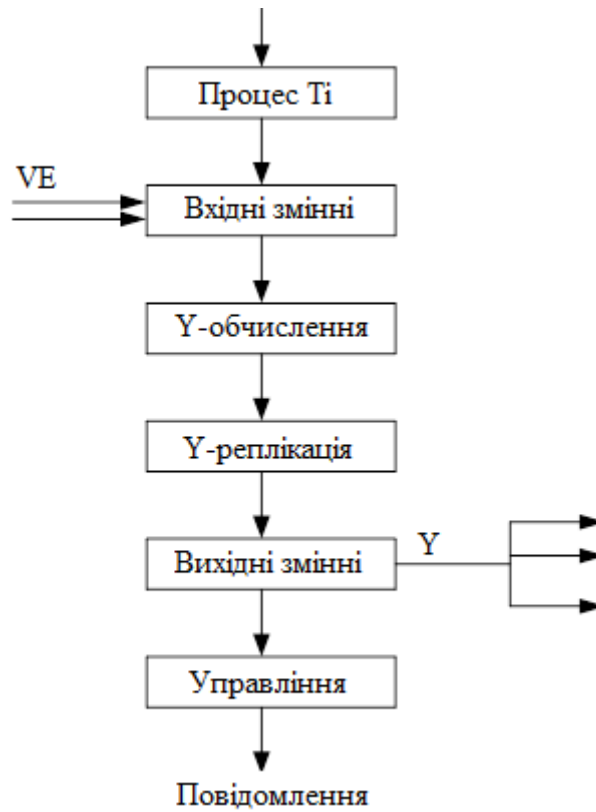


Рис. 4. MIMD-процес, аналогічний функціональному блоку

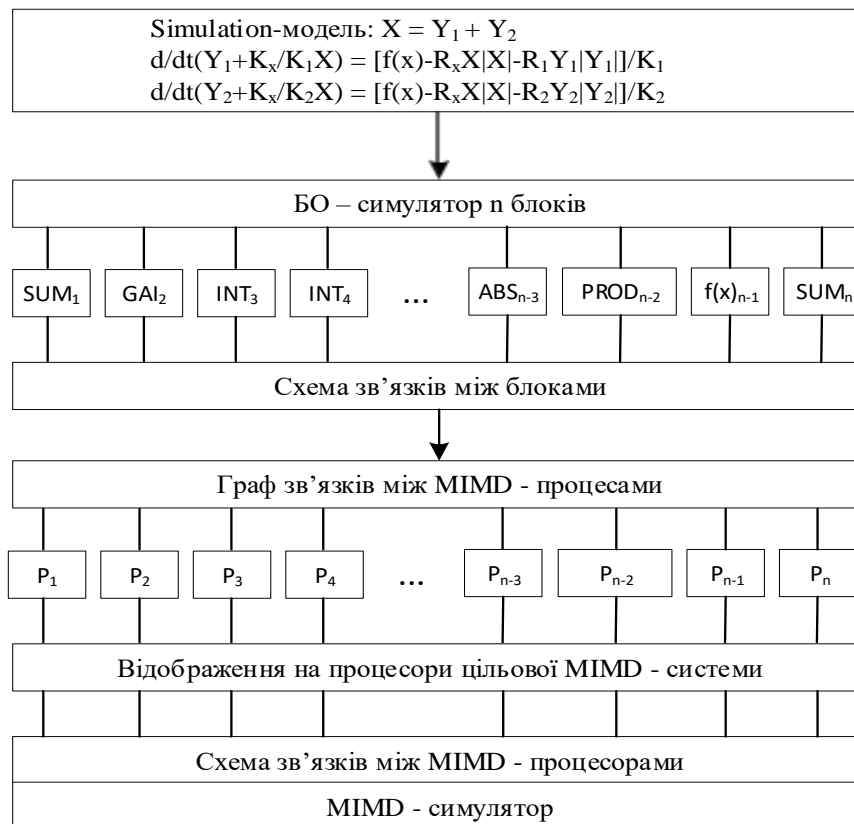


Рис. 5. MIMD-паралельність і принцип БО-мови,  $n$  – кількість блоків

В ОО-мові моделювання використовуються об'єкти (рис. 6) за визначенням ОО-програмування і об'єкти досліджуваної предметної області з фізичним змістом і відповідними рівняннями динамічних процесів [4, 5]. Структурно об'єкт нагадує функціональний блок БО-мови, він також може мати  $n$  входів ( $X_1, \dots, X_n$ ), має один вихід і входи для коефіцієнтів. Вихідна змінна є результатом деякої операції:

$$Y = O(X_1, X_2, \dots, X_n, a_1, a_2, \dots, a_n).$$

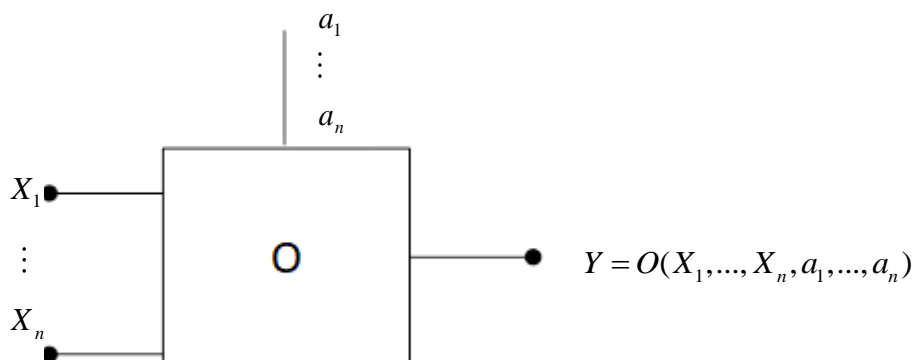


Рис. 6. Об'єкт ОО-мови моделювання

Специфікація ОО-симулятора виконується у вигляді структури об'єктів, що виконують математичні операції, необхідні для розв'язання системи рівнянь Simulation-моделі. ОО-підхід розширює можливості побудови симуляторів за рахунок маніпуляцій з об'єктами за принципами об'єктно орієнтованого програмування, а саме – спадкування, поліморфізм, зв'язок між об'єктами за допомогою відправки повідомлень, динамічна прив'язка та ін. Так, спадкування дозволяє будувати багаторівневі ієрархічні структури об'єктів, які відповідають моделям складних динамічних систем. Також завдяки спадкуванню, поліморфізму та зв'язку між об'єктами за допомогою відправки повідомлень можлива реплікація об'єктів та їх структур, щоб пришвидшити обмін даними за рахунок паралельної організації передачі/прийому. Завдяки цьому ОО-підхід дозволяє наблизити специфікацію симулятора до структури динамічної системи, що підлягає моделюванню. Так, об'єкти ОО-мови можуть структурно і функціонально відображати гілки графа МДОЗП (рис. 7). Якщо об'єкту ОО-мови (рис. 6) поставити у відповідність МІМД-процес (рис. 4), то виявиться аналогія між принципами дії послідовного ОО-симулятора і його можливою МІМД-реалізацією (рис. 8): ОО-принцип розв'язання системи рівнянь відповідає паралелізму МІМД і може розглядатися як віртуальне призначення «об'єкт – процес».

Оператор рівняння-орієнтованої (РО) мови моделювання [6] (рис. 9), який реалізується програмно, є аналогією МІМД-процесу: оператор може мати  $n$  входів, вихідна змінна є результатом операції ОР

$$Y = OP(X_1, X_2, \dots, X_n).$$

Специфікація симулятора РО-мовою ACSL [6] – це текст програми з синтаксисом мови FORTRAN, іменами і діями використовуваних операторів.

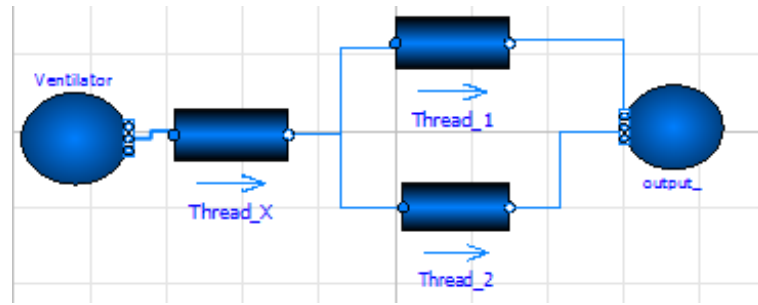


Рис. 7. Об'єктно-орієнтована модель розв'язання системи рівнянь (2), ОО-симулятор

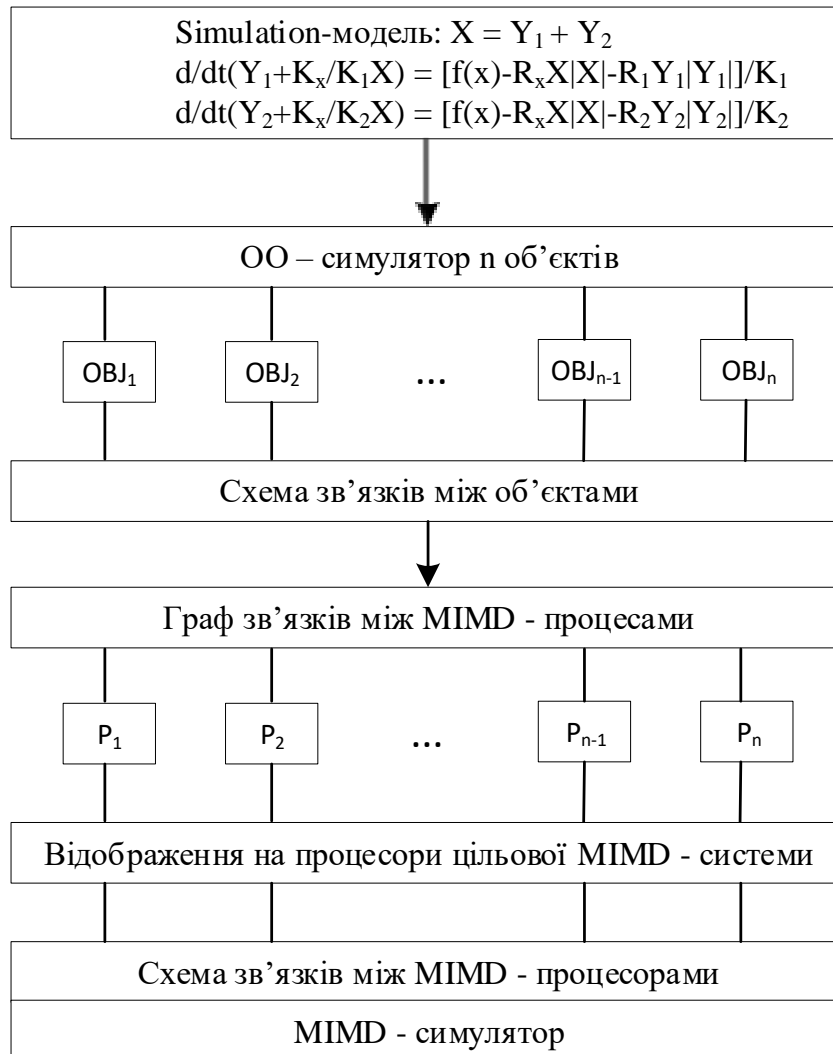


Рис. 8. MIMD-паралельність і ОО-принцип розв'язання рівнянь

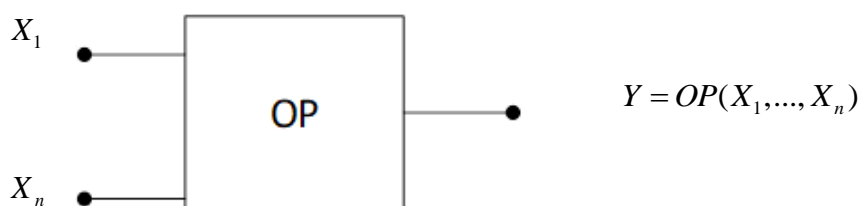


Рис. 9. Оператор РО-мови моделювання



Оператори РО-мови за об'ємами обчислень суттєво менші, ніж блоки БО-мови і об'єкти ОО-мови. Цим об'ємам можуть відповідати MIMD-процеси мінімальної гранулярності, і РО-специфікація трансформується в віртуальний MIMD-симулятор з кількістю процесів, що суттєво перевищує кількість процесорів цільових MIMD-систем.

Віртуальним паралельним MIMD-симулятором назвемо структуру MIMD-процесів, яка будується на основі розглянутих аналогій між БО-, ОО- та РО-специфікаціями і MIMD-паралельністю за співвідношеннями «блок – процес», «об'єкт – процес» та «оператор – процес». Пропонується наступний підхід до трансформації БО-специфікації в віртуальну структуру MIMD-процесів.

Хай послідовний БО-симулятор динамічної системи складається з  $n$  блоків, яким в MIMD-симуляторі мають відповідати  $n$  процесів-аналогів.

Введемо вектор з'єднань для процесу  $T_i$ :

$$VST_i = (S_{i1}T_1S_{i2}T_2\dots S_{ik}T_k\dots S_{in}T_n), \quad (3)$$

де  $i$  – номер процесу,  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $S_{ik}$  – параметр комутації:  $S_{ik} = 1$  – якщо є зв'язок між процесами  $T_i \leftrightarrow T_k$  і  $S_{ik} = 0$  – якщо зв'язок  $T_i \leftrightarrow T_k$  відсутній. У випадку  $k=i$  маємо  $S_{ii} = 1$ , тому що проміжний результат  $i$ -процесу використовується в ньому для подальших розрахунків. Вектор  $VST_i$  характеризує віртуальний процес  $T_i$ : один вихід і  $n$  входів, на які по  $S_{ij}$  підключені виходи інших процесів. Множина векторів  $VST_i$  для загальної структури БО-симулятора має вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} VST_1 = (S_{11}T_1S_{12}T_2\dots S_{1k}T_k\dots S_{1n}T_n) \\ VST_2 = (S_{21}T_1S_{22}T_2\dots S_{2k}T_k\dots S_{2n}T_n) \\ \dots \\ VST_k = (S_{k1}T_1S_{k2}T_2\dots S_{kk}T_k\dots S_{kn}T_n) \\ \dots \\ VST_n = (S_{n1}T_1S_{n2}T_2\dots S_{nk}T_k\dots S_{nn}T_n) \end{array} \right. \quad (4)$$

Simulation-модель досліджуваної динамічної системи описується системою рівнянь, кожне з яких є неявною функцією, що визначає невідому змінну і розв'язується відповідним блоком та по аналогії – MIMD-процесом  $T_i$ . Ця змінна  $VART_i$ , будучи вихідною величиною процесу  $T_i$ , є результатом певної операції над множиною змінних, що подаються на входи процесу  $T_i$  згідно з рівняннями Simulation-моделі. В загальному випадку змінні  $VART_k$  є вихідними величинами всіх інших процесів, тому віртуальна специфікація MIMD-симулятора зі всіма можливими зв'язками між процесами є наступною множиною змінних:

$$\left\{ \begin{array}{l} VART_1 = FUNT_1(S_{11}VART_1S_{12}VART_2\dots S_{1n}VART_n) \\ VART_2 = FUNT_2(S_{21}VART_1S_{22}VART_2\dots S_{2n}VART_n) \\ \dots \\ VART_k = FUNT_k(S_{k1}VART_1S_{k2}VART_2\dots S_{kn}VART_n) \\ \dots \\ VART_n = FUNT_n(S_{n1}VART_1S_{n2}VART_2\dots S_{nn}VART_n) \end{array} \right. \quad (5)$$



де  $VART_i$  – вихідні результуючі змінні процесів  $T_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $FUNT_i$  – операції процесів  $T_i$  над вхідними змінними, що подаються з виходів всіх інших процесів-учасників розв’язання системи рівнянь Simulation-моделі.

Для подальших дій з трансформації специфікацій знадобиться віртуальна матриця комутацій

$$KM = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1(n-1)} & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2(n-1)} & S_{2n} \\ & & \vdots & & \\ S_{k1} & S_{k2} & \cdots & S_{k(n-1)} & S_{kn} \\ & & \vdots & & \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{n(n-1)} & S_{nn} \end{pmatrix} \quad (6)$$

яка формально описує всі зв’язки між блоками БО-симулятора і між процесами MIMD-симулятора. Матриця  $MZM=KM*DT$  стану симулятора отримується як результат операції:

$$MZM = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1(n-1)} & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2(n-1)} & S_{2n} \\ & & \vdots & & \\ S_{k1} & S_{k2} & \cdots & S_{k(n-1)} & S_{kn} \\ & & \vdots & & \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{n(n-1)} & S_{nn} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} T_1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & T_2 & \cdots & 0 & 0 \\ & & \vdots & & \\ 0 & 0 & \cdots & T_k & 0 \\ & & \vdots & & \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & T_n \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Тут  $DT$  – це діагональна матриця процесів. Формальні засоби (3) ... (7) можуть використовуватись і для трансформації OO- та PO-симуляторів в відповідні віртуальні MIMD-симулятори.

Девіртуалізація – це перетворення специфікацій віртуальних MIMD-симуляторів, що однозначно визначає реалізацію симуляторів на заданій цільовій паралельній обчислювальній системі (ЦПОС) і потребує вирішення наступних основних теоретичних і практичних задач:

- розробка програм MIMD-процесів, що є аналогами блоків, об’єктів і операторів розглянутих мов моделювання. Основним елементом, що визначає ефективність розв’язання систем диференціальних рівнянь в мовах моделювання (швидкодія, точність, збіжність, стійкість, здатність вирішувати жорсткі системи тощо), є інтегратор, в якому програмно реалізуються обчислювальні методи. Аналіз показує, що в MIMD-симуляторах доцільно реалізувати інтегратори на основі паралельних блокових обчислювальних методів, які мають суттєві переваги над відомими послідовними методами [7]. Це дозволить також інтегруватись з підсистемою вирішувачів рівнянь розподіленого паралельного моделюючого середовища (РПМС) [1, 7];

- синтез віртуальних комутаторів зв’язку між MIMD-процесами-аналогами за БО-, OO-, PO-специфікаціями та їх відображення в реальних системах зв’язку ЦПОС з використанням функцій обміну повідомленнями MPI- та OpenMP-бібліотек;

- апріорний аналіз специфікацій віртуальних MIMD-симуляторів з врахуванням синтезованих комутаторів на відповідність наступним критеріям: рівномірність завантаження MIMD-процесів; мінімізація обсягів обміну даними між збалансованими по завантаженості MIMD-процесами; наявність очікуваного прискорення паралельної реалізації Simulation-моделей в порівнянні з послідовними симуляторами; можливість реалізації в ЦПОС за принципом «процес-процесор»;

- пропозиції щодо трансформації БО-, ОО-, РО-специфікацій з врахуванням результатів апіорного аналізу та можливих підходів до розпаралелювання й рівнів паралельності віртуальних Simulation-моделей предметної області;
- архітектурно релевантна програмна імплементація;
- інтеграція з функціональними підсистемами РПМС [1, 8].

## Висновки

Зростаючі вимоги предметних областей до методів і засобів моделювання складних динамічних систем з зосередженими (СДСЗП) і розподіленими (СДСРП) параметрами стимулюють застосування високопродуктивних паралельних комп'ютерів існуючих і майбутніх MIMD-архітектур та викликають нові теоретичні та практичні проблеми технологій паралельного моделювання (ParSimTech-проблематика). Одним із аспектів проблеми дружності паралельних обчислювальних систем до експертів предметних областей є перехід від програмування паралельних симуляторів до їх побудови засобами мов моделювання. Запропонована концепція розробки мов паралельного моделювання базується на аналогії між MIMD-процесами та основними функціональними елементами послідовних мов моделювання. Реалізація концепції є перспективним напрямком розробок і досліджень в області паралельного моделювання СДСЗП, СДСРП.

## Список літератури

1. Feldmann, L.P. Software-Architektur für parallele Simulationsumgebungen. Plenarvortrag am ASIM'2014-Symposium Simulationstechnik / L.P. Feldmann, M. Resch, V.A. Svjatnyj, M. Zeitz. - Tagungsband. - Pp.3-7.
2. Schmidt, B. Simulationssysteme der 5. Generation / B. Schmidt, 1994. - Pp. 5-6.
3. Angermann, A. Matlab-Simulink-Stateflow / A. Angermann, M. Beuschel, M. Rau, U. Wohlfarth. - München, 2009.
4. Modelica – A Unified Object-Oriented Language for Physical Systems Modeling. Language Specification. Version 2.0, 2002.
5. Åkesson, J. Implementation of a Modelica compiler using JastAdd attribute grammars. Science of Computer Programming 75 / J. Åkesson, T. Eklund, G. Hedinc, 2010. - Pp. 21–38.
6. Advanced Continuous Simulation Language (ACSL). Reference Manual, 4th Edition. Mitchell and Gauthier Associates. - Concord, 1986.
7. Kushnarenko, V. Zur Entwicklung des Gleichungslösersubsystems der verteilten parallelen Simulationsumgebung. ASIM'2014 / V. Kushnarenko, M. Resch, V. Svjatnyj, S. Wesner, - Berlin, 2014. - Pp. 357-363.
8. Svjatnyj, V. Dekomposition der verteilten parallelen Simulationsumgebung / V. Svjatnyj, V. Kushnarenko, V. Shcherbakov, M. Resch // Проблеми моделювання й автоматизованого проектування, 2012. – №1(10)-2(11). – Pp. 227-234.

## MIMD-SIMULATORS BASED ON PARALLEL SIMULATIONS LANGUAGE

V.A. Svjatnyj, A.S. Liubymov, O.M. Miroshkin, V.G. Kushnarenko

Donetsk national technical university,

2, Shybankova Square, Pokrovsk, 85300, Ukraine; e-mail: vsvjatnyj@gmail.com

University Ulm,

16, Helmholtstraße, Ulm, 89081, Germany; e-mail: volodymyr.kushnarenko@uni-ulm.de

The analysis of the stages and available simulation tools of complex dynamic systems (CDS) showed that modern parallel tools lag behind the level of service from sequential block, equation and object-oriented (BO, EO, OO) simulation languages: MIMD simulators are forced developers work at the programming language level. The concept of developing parallel modeling languages based on the analogy between the principles of the functioning

of consecutive languages and MIMD-parallelism is proposed. The solution of the systems of equations in the sequential language corresponds to MIMD-parallelism and can be interpreted as a virtual assignment "Functional language element - the MIMD-process". The transformation of the BO-specification of the simulation-model of CDS into the structure of MIMD-processes is shown on the example of a network dynamic object model with lumped parameters (NDOLP). It was defined that the principle of solving of systems of equations by BO-language corresponds to MIMD-parallelism. To each block of the BO-language was assigned a MIMD-process that accurately performs block operations, also was obtained set of processes, that are connected by a communication graph, which is synthesized on the base of the connection scheme between the outputs and inputs of the BO-simulator blocks. The transformation of the specifications of BO-, EO- and OO-simulators into virtual parallel MIMD-simulators is proposed. A virtual matrix of commutations was entered, which formally describes all the relationships between the processes of the MIMD-simulator that correspond to the functional elements of sequential languages. De-virtualization is defined as the process of transforming the specifications of virtual MIMD-simulators, which uniquely provides the implementation of simulators on a given objective parallel computing system, the main theoretical and practical tasks of this process was formulated.

**Keywords:** complex dynamic system, Simulation-model, modeling language, functional block, MIMD-simulator, MIMD-process, de-virtualization.

## МІМД-СИМУЛЯТОРИ НА ОСНОВЕ ЯЗЫКОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В.А. Святный, А.С. Любимов, А.Н. Мирошкин, В.Г. Кушнарченко

Донецкий национальный технический университет,  
пл. Шибанкова, 2, Покровск, 85300, Украина; e-mail: vsvjatnyj@gmail.com

Университет Ульм,  
Хелмхолтштрассе, 16, Ульм, 89081, Германия; e-mail:  
volodymyr.kushnarenko@uni-ulm.de

Анализ этапов и существующих средств моделирования сложных динамических систем (СДС) показал, что современные параллельные средства отстают по уровню сервиса от последовательных блочно-, уравнения- и объектно-ориентированных (БО, УО, ОО) языков моделирования: разработчики МІМД-симуляторов вынуждены работать на уровне языков программирования. Предложена концепция разработки языков параллельного моделирования на основе аналогии между принципами функционирования последовательных языков и МІМД-параллельностью. Решение системы уравнений последовательным языком соответствует МІМД-параллелизму и может интерпретироваться как виртуальное назначение «Функциональный элемент языка – МІМД-процесс». Показана трансформация БО-спецификации Simulation-модели СДС в структуру МІМД-процессов на примере модели сетевого динамического объекта с сосредоточенными параметрами (СДОСП). Выявлена аналогия между схемами решения систем уравнений средствами БО-языка и МІМД-параллелизмом. Каждому блоку БО-языка назначен МІМД-процесс, выполняющий операции блока, получено множество процессов, связываемых между собой коммуникационным графом, который синтезируется на основе схемы соединений между выходами и входами блоков БО-симулятора. Предложена трансформация спецификаций БО-, УО- и ОО-симуляторов в виртуальные параллельные МІМД-симуляторы. Введена виртуальная матрица коммутации, которая формально описывает все связи между процессами МІМД-симулятора, соответствующие функциональным элементам последовательных языков. Определена девиртуализация как процесс преобразования спецификаций виртуальных МІМД-симуляторов, однозначно обеспечивающий реализацию симуляторов на заданной целевой параллельной вычислительной системе, сформулированы основные теоретические и практические задачи этого процесса.

**Ключевые слова:** сложная динамическая система, Simulation-модель, языки моделирования, функциональный блок, МІМД-симулятор, МІМД-процесс, девиртуализация.