

5. Табунщиков, Ю. А. Энергоэффективные здания: мировой и отечественный опыт [Текст] / Ю. А. Табунщиков // Энергия. – 2004. – №10. – С. 20-28.
6. Dincer, I. Thermal energy storage. Systems and Applications [Текст] / I. Dincer, M. A. Rosen. – Chichester (England): John Wiley & Sons. – 2002.
7. Hasnain, S. M. Review on sustainable thermal energy storage technologies, part I: Heat storage materials and techniques [Текст] / S. M. Hasnain // Energy Conversion and Management. – 1998. – Vol. 39. – С. 1127-1138.
8. Hasnain, S. M. Review on sustainable thermal energy storage technologies, part II: Cool Thermal Storage [Текст] / S. M. Hasnain // Energy Conversion and Management. – 1998. – Vol. 39. – С. 1139-1153.
9. Kuznik, F. Experimental assessment of a phase change material for wall building use [Текст] / F. Kuznik, J. Virgone // Applied Energy. – 2009. – vol. 86. – С. 2038-2046.
10. Sharma, A. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications [Текст] / A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, D. Buddhi // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2009. – Vol. 13. – С. 318-345.
11. Anderson, B. R. Calculation of the Steady-State Heat Transfer through a Slab-on-Ground Floor [Текст] / B. R. Anderson // Building and Environment. – 1991. – Vol. 26, No. 4. – С. 405-415.
12. Weitzmann, P. Numerical Investigation of Floor Heating Systems in Low Energy Houses [Текст] / P. Weitzmann, J. Kragh, C. F. Jensen // Proc. of the Sixth Symposium on Building Physics in the Nordic Countries. – 2002. – С. 905-912.
13. Weitzmann, P. Modelling Floor Heating Systems Using a Validated Two-Dimensional Ground Coupled Numerical Model [Текст] / P. Weitzmann, J. Kragh, P. Roots, S. Svendsen // Buildings and Environment. – 2005. – Vol. 40/2. – С. 153-163.
14. Мотес, Э. Микроклимат животноводческих помещений [Текст] / Э. Мотес. – М.: Колос, 1976. – 190 с.
15. Маляренко, В. А. Основы теплофизики будівель та енергозбереження [Текст] / В. А. Маляренко. – Х. : «Видавництво САГА», 2009. – 484 с.
16. Марчук, Г. И. Методы вычислительной математики [Текст] / Г. И. Марчук. – М.: Наука, 1977. – 456 с.

У статті представлений огляд парадигм імітаційного моделювання та проблем, що виникають при побудові імітаційних моделей для складних систем з паралелізмом, які потребують використання елементів парадигм з неперервним і дискретним описом властивостей

Ключові слова: імітаційне моделювання, дискретно-подієве моделювання, системна динаміка, агентне моделювання

В статтє представлен обзор парадигм имитационного моделирования и проблем, которые возникают при построении имитационных моделей для сложных систем с параллелизмом, которые требуют использования элементов парадигм с непрерывным и дискретным описанием свойств

Ключевые слова: имитационное моделирование, дискретно-событийное моделирование, системная динамика, агентное моделирование

УДК 519.876:004.94

ПАРАДИГМИ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ СКЛАДНИХ СИСТЕМ З ПАРАЛЕЛІЗМОМ

О. О. Супруненко

Кандидат технічних наук, доцент
Кафедра програмного забезпечення
автоматизованих систем
Черкаський національний університет
ім. Богдана Хмельницького
бул. Шевченка, 81, м. Черкаси, Україна, 18031

1. Вступ

У сучасних умовах інформаційного суспільства, що швидко розвивається, все більшої ваги набувають задачі підвищення ефективності технологій отримання, обробки, розповсюдження та використання інформації [1, 2]. Вирішувати дані задачі дозволяють технології моделювання та дослідження цільових об'єктів.

В актуальних прикладних задачах з паралелізмом об'єкти моделювання мають велику складність [1, 3 – 6],

що проявляється у структурній складності, складності функціонування та розвитку. Для вивчення конкретних цільових об'єктів з врахуванням впливу зовнішнього середовища та внутрішніх динамічно змінюваних чинників приходится будувати кілька моделей [2]. Для подальших досліджень потрібно обрати найбільш вдалі варіанти моделей з метою забезпечення ефективності моделювання, які враховують структуру, варіанти функціонування моделі, механізми адаптації до умов зовнішнього середовища [1, 3]. Технологіями моделювання, що

забезпечують дослідження складних систем з паралелізмом, є технології імітаційного моделювання [1, 7].

2. Парадигми імітаційного моделювання

Імітаційна модель будується на множині правил (диференційних рівнянь, карт станів, автоматів, мереж і т.і.), що визначають наступний стан системи, в який вона перейде з поточного [8]. Імітація є процесом відображення функціонування моделі, який представляє собою зміни станів компонентів моделі в часі. Зміни станів в моделі можуть представлятися як неперервний процес (наприклад, диференційними рівняннями), так і як дискретний процес послідовного переходу з одного стану в ряд інших. В залежності від цього розрізняють неперервні та дискретні моделі. В реальному світі процеси, що характеризуються неперервністю та дискретністю, часто суміщаються в одній системі. Моделі, що мають неперервні і дискретні процеси називаються гібридними [7, 9]. При описі характеристик системи у імітаційних моделях застосовуються детерміновані і стохастичні елементи, що дозволяє більш адекватно відображати процеси реального світу. Реальні системи часто мають кілька паралельних процесів, що періодично взаємодіють між собою, імітаційні експерименти на моделях цих систем дозволяють відобразити множину варіантів взаємодії паралельних процесів між собою та їх вплив на стабільність функціонування системи.

Імітаційне моделювання (Simulation Modeling) є великою областю моделювання [7, 10 – 12], яку за сучасними дослідженнями складають чотири парадигми [7]: моделювання динамічних систем, дискретно-подієве (процесно-орієнтоване) моделювання, системна динаміка та агентне моделювання. Парадигма є підходом до формулювання задач, що спирається на узгоджену множину принципів, способів та методів [13, 14]. Парадигма підтримує ряд понять, які пристосовані до певних класів задач, має набір способів та методів для побудови й дослідження моделей (за схемою «поняття-метод-модель») [12, 13]. Кожна парадигма вирізняється особливістю постановки задач, формується як формальна теорія і реалізується у засобах моделювання. Практичне значення парадигм полягає у способах формалізованого опису певної задачі та інструментарії розв'язання певного класу задач з метою використання раніше накопиченого досвіду дослідження подібних систем (у вигляді формалізмів, примітивів, моделей окремих компонентів та підсистем).

По ступеню деталізації систем моделювання поділяють на стратегічне (вищий рівень абстракції), тактичне (середній рівень абстракції) та оперативне (нижчий рівень абстракції) [15]. На оперативному рівні будують моделі фізичних систем, транспортні моделі мікрорівня (з врахуванням руху транспорту та пішоходів), моделі систем керування та комп'ютерних систем. На тактичному рівні абстракції можливе часткове абстрагування від елементарних функцій компонентів моделі, тому на цьому рівні будують моделі виробничих процесів, систем обслуговування (наприклад – охорона здоров'я) та логістичні моделі. Найвищий рівень абстракції характеризується розглядом узагальнених елементів систем – агрегатів та їх кількості. До цього рівня абстракції належать моделі фінансових ринків, динаміки населення, управління проектами, екосистем та інші [8, 16].

2.1. Моделювання динамічних систем

Динамічна система при математичному описі представляється множиною змінних стану і алгебраїчними аналогами диференційних рівнянь різного виду, які задані для цих змінних і описують їх перетворення в часі. Змінні в динамічних моделях, як правило, мають «фізичний» сенс (координати об'єкта, швидкість, прискорення, сила та ін.), є неперервними і характеризують конкретний об'єкт, а не відображають загальну кількість чи середнє значення кількох сутностей, як, наприклад, у системній динаміці. Динамічні моделі належать до концепції якісного моделювання [7, 11]. Для опису динамічних моделей використовуються алгебраїчні, диференційні та змішані системи рівнянь, що розв'язуються чисельними методами. Для систем алгебраїчних та трансцендентних рівнянь використовують методи Ньютона, Зейделя та ін., для розв'язання звичайних диференційних рівнянь – методи Рунге-Кутта, Хемінга та ін., для диференційних рівнянь в частинних похідних – сіткові методи: метод кінцевих різниць та метод кінцевих елементів.

У моделях динамічних систем можна описувати гібридну (неперервно-дискретну) поведінку систем, вивчати взаємовплив неперервних і дискретних елементів на динаміку системи в цілому [9]. На сьогодні моделювання динамічних систем отримало розвиток у сімействі стандартів IDEF та системно-динамічному підході [7, 11, 15]. Спеціалізовані динамічні моделі активно використовуються у інженерних областях (електричній, хімічній, машинобудівній) як невід'ємний етап процесу розробки систем [7, 17]. На сьогоднішній день сімейство IDEF нараховує 14 стандартів, для більшості з яких напрацьовані способи, методи та засоби як оптимізації існуючих технологій, так і опису принципово нових підходів. Але не всі з них були реалізовані, так на сьогодні не розробленими залишаються IDEF 2, IDEF 7, IDEF 10 – IDEF 13 [15]. Задачі аналізу динамічних систем є дуже складними, тому стандарт IDEF 2 не реалізований до сьогодні й знайшов своє відображення лише у обмежених динамічних моделях, які, побудовані, наприклад на основі кольорових мереж Петрі (CPN) [15] та часових стохастичних мереж (модифікація мереж Петрі) [18]. Структурно-функціональні технології моделювання, що характеризуються слабким зв'язком процесів і даних у моделі, не дозволяють з високою адекватністю відображати досліджувані системи. Так, численні спостереження за функціонуванням переважної більшості систем [19] показують, що такі моделі є на порядок більш стабільними, ніж процеси, які в них відбуваються.

На противагу структурним були запропоновані об'єктні технології моделювання (об'єктно-орієнтоване моделювання, OOM). Вони ґрунтуються на тісному зв'язку даних і процесів системи [19], які дозволяють створювати більш надійні, адекватно реалізовані та стійкі до змін програмні моделі, що відповідають функціонуванню досліджуваної системи в реальному світі.

Три наступні парадигми імітаційного моделювання – дискретно-подієве моделювання, системна динаміка та агентне моделювання – належать до концепції кількісного моделювання [7, 11] та підтримуються об'єктно-орієнтованими технологіями моделювання.

2.2. Дискретно-подієве моделювання

У 60-х роках минулого століття Джефрі Гордоном запропоноване дискретно-подієве моделювання (Discrete Event Modeling) [11], що використовується на тактично-

му і оперативному рівнях абстракції. Цю парадигму ще називають «процесним» дискретно-подієвим моделюванням [20]. У ній розглядаються лише основні стани системи та моменти часу, в які система переходить з одного стану в інший [7, 11], що розташовуються у хронологічній послідовності. У дискретно-подієвих моделях процеси апроксимуються подіями, об'єкти системи розглядаються як пасивні сутності (характеризуються атрибутами) над якими здійснюється певний перелік операцій, що імітує динаміку системи.

До дискретно-подієвих систем належать реагуючі системи, які визначаються [7] як системи, що постійно очікують зовнішніх та внутрішніх подій і при їх появі реагують на них. Реакція моделі проявляється у зміні змінних стану системи, яка відбувається миттєво.

При описі реагуючих систем використовують карти станів (стейтчарти), введені Д. Харелом [7, 16], які також застосовуються для специфікації, моделювання, верифікації та прототипування протоколів комунікації і вбудованих систем керування в авіації та на транспорті [7]. Карти станів також використовуються в універсальній мові моделювання UML при побудові діаграм станів.

Дискретно-подієва парадигма моделювання призначена для опису та дослідження виробничих процесів, в яких динаміка системи представляється послідовністю операцій. Вона також застосовується у логістиці, системах масового обслуговування (наприклад, у автоматизованих системах для закладів охорони здоров'я, банків і т.і.), транспортних системах. До дискретно-подієвого моделювання належить і мережеве моделювання (Network Based Modeling), яке широко застосовується в управлінні проектами у будівельній, авіаційній та інших прикладних галузях [16, 21].

2.3. Системна динаміка

Системна динаміка, запропонована Джеймсом Форрестером [22], орієнтована на загальні кількісні оцінки системи, використовується на найвищому стратегічному рівні абстракції, на якому описується система в цілому. Опис системи у цій парадигмі проводиться шляхом створення потокових (причинно-наслідкових) діаграм [20, 23], основними елементами яких є накопичувачі, потоки і допоміжні змінні. Системно-динамічні моделі мають петлі зворотного зв'язку, які дозволяють формувати поведінку системи [23] і виявляти взаємозв'язки між найбільш впливовими змінними, досліджувати можливі коливання та нестійкість у функціонуванні досліджуваної системи [20]. У моделях системної динаміки розглядаються тільки агреговані кількісні характеристики потоків, які Дж. Форрестер запропонував застосовувати для моделювання виробничих і соціальних систем, функціонування яких суттєво залежить від структури зв'язків і часових затримок у прийнятті рішень та діях, які відбуваються в досліджуваній системі [7].

Системно-динамічні моделі належать до неперервних моделей, формування яких проводиться зверху вниз [20, 23]. Математичний опис характеристик потокових діаграм представляється у вигляді диференційно-інтегральних рівнянь [23] і забезпечує здійснення кількісного аналізу модельованої системи. Методи системної динаміки у сучасних імітаційних моделях використовують разом з когнітивним підходом [24, 25], що представляє модельовану систему у вигляді зваженого орієнтованого графа з розповсюджуваними по ньому ім-

пульсами [24]. Вершини графа відповідають елементам системи (коефіцієнти, що асоціюються з вершинами, є показниками якісного стану елементів), ребра – зв'язкам між елементами (їх вага позначає супротив впливам). Динаміка розповсюдження імпульсів (зовнішніх дестабілізуючих впливів) описується функціями, як зміна показників якісного стану елементів системи. Розповсюдження імпульсів імітують в межах нормованого дискретного часу $T = 0, t_1, t_2, \dots, t_{n-1}, 1$.

Парадигма системної динаміки дозволяє найбільш вдало виявити причинно-наслідкові зв'язки між об'єктами та явищами у досліджуваній системі. Системно-динамічні моделі застосовують для дослідження виробничих, соціально-економічних та політичних систем в умовах раптових зовнішніх впливів [24, 25]. Сполучення моделей системної динаміки з когнітивним підходом дозволяє будувати кількісно-якісні моделі, що розширюють можливість дослідження складних систем. Її застосовують для стратегічного управління, наприклад, у ресурсному підході до організації RBV (Resource-Based View), а також для моделювання організаційних систем (у яких функціональними складовими є бізнес-процеси), моделей розвитку епідемій та інших [20, 22, 24, 25].

2.4. Агентне моделювання

Агентне моделювання як сучасна парадигма моделювання розвинулась у 1990-2000 роках і застосовується для дослідження децентралізованих систем, поведінка яких визначається поведінкою певного набору активних агентів, які мають локальні правила функціонування у системі, правила взаємодії з іншими агентами та правила розвитку [7, 26]. Ця парадигма моделювання призначена для опису кожного об'єкта системи, як окремої сутності, з притаманною йому поведінкою [7]. Глобальні правила і закономірності в таких моделях є результатом взаємодії агентів. Агентне моделювання найчастіше застосовується на оперативному рівні абстракції, хоча такі моделі можуть будуватися і на стратегічному та тактичному рівнях [26]. Формування багатоагентної моделі ведеться знизу вгору [23]. Важливою перевагою агентних моделей є можливість адаптації до змінюваних умов зовнішнього середовища. Так, у системно-динамічних моделях структура визначається при їх формуванні і не може бути змінена в процесі імітації, на противагу цьому агентні моделі успішно адаптуються до зміни зовнішніх умов. Деякі агентні моделі дозволяють прослідкувати еволюцію агентів у детермінованих і стохастичних описах їх змінюваних характеристик [23]. У системно-динамічних моделях джерелом нелінійності характеристик системи є концепція акумуляції (у потоках і накопичувачах), яка створює ефект запізнювання. У агентних моделях цей феномен більш природно створюється з використанням подій, які викликають змінення поведінки системи при певних накопичених ознаках [23].

Описані парадигми імітаційного моделювання базуються на принципах теорії систем і вимагають проведення міждисциплінарних досліджень [7, 20, 25 – 27], які спрямовані на вирішення основних проблем імітаційного моделювання складних систем.

3. Проблеми імітаційного моделювання складних систем

При побудові та аналізі складних моделей у практичних задачах часто виникає потреба вийти за рамки

обраної парадигми. Так, у ідею потоків не вписуються дискретно-подієві системи, поведінка яких керується подіями. У системно-динамічних моделях часто необхідно відобразити дискретні події чи індивідуальні особливості об'єктів різних груп, для чого засоби системної динаміки не призначалися. У таких випадках використовують скриптові мови для інтеграції додаткових програмних модулів з моделлю, що значно ускладнює процес розробки та аналізу імітаційної моделі [7, 28, 29]. Крім того, таку модель можуть побудувати тільки фахівці, які на високому рівні володіють знаннями у прикладній області, у якій будується модель, а також знаннями та навичками використання теорії імовірностей, математичної статистики та програмування [17, 30]. Тому для побудови імітаційної моделі, що потребує інтеграції підмоделей на основі кількох парадигм, потрібно, як мінімум, група з 5-10 спеціально підготованих фахівців [7, 17, 30] і кілька місяців часу [22, 30], що робить дуже складним застосування імітаційного моделювання у практичних задачах.

Проблемами імітаційного моделювання також залишаються задачі аналізу властивостей побудованих моделей складних систем [4, 7, 30], обґрунтованого вибору моделей для розв'язання прикладних задач та багатокритеріальної оцінки їх якості [7, 9].

Поняття «складна система» є консолідуючою назвою систем, що складаються з великої кількості взаємопов'язаних елементів, які взаємодіють між собою, що об'єднані в єдине ціле [4, 25]. На моделі складних систем впливають особливості, які притаманні їй самим складним системам [22, 26, 31, 32].

Це наступні особливості: унікальність кожної окремої складної системи [22, 32]; слабка структурованість знань про складну систему та слабка передбачувана поведінка системи при зміні внутрішніх та зовнішніх впливів [5, 22, 31], в тому числі за рахунок функціонування паралельних асинхронних процесів [1, 7, 33]; визначення властивостей системи не тільки через властивості підсистем, а й через їх взаємодію у системі, що потребує ретельних досліджень [31, 32]; підсистеми складної системи, як правило, мають різну природу, що визначається різноманітністю математичного опису, а також відмінністю опису певних елементів на різних рівнях їх вивчення [31, 32]; потреба вивчення системи в динаміці (здійсненість, закономірності функціонування, потенційна ефективність) з необхідністю враховувати велику кількість факторів, а також стохастичний чи невизначений характер певної кількості компонент

системи [7, 26, 34]; функціонування складної системи неможливо представити тільки формальними кількісними моделями, що є наслідком одночасного функціонування безперервних та дискретних процесів різної фізичної природи [27, 33]; багатокритеріальність оцінок процесів, що визначається великою кількістю підсистем, кожна з яких має різні цілі; великою кількістю показників, що характеризують систему; наявністю неформалізованих емпіричних критеріїв [30 – 32]; початкова модель складної системи при створенні «від простого до складного» ускладнюється через поступову деталізацію і представляється комплексом моделей, об'єднання яких в єдину модель є недоцільним, оскільки така модель буде надскладною у вивченні, тому вивчення складної системи проводиться на ансамблі моделей [9, 31, 32].

4. Висновки

Моделі складних систем, які мають паралельні незалежні в часі процеси, не можуть бути описані диференційними рівняннями по причині дискретності своєї природи. Тому опис даних складних систем має проводитися за допомогою інструментарію моделювання, який відповідає таким вимогам, як цілеспрямованість, «захищеність» системи від абсурдних результатів, зручність у керуванні та інтелектуальна діалогова підтримка користувача [27], адаптивність та можливість розвитку [30]. Засіб моделювання має забезпечувати побудову структури моделі з паралелізмом на визначених рівнях її деталізації [4, 32, 33], відтворення поведінки системи з використанням логіко-аналітичного опису елементів та алгоритмічної імітації її функціонування [4, 6, 32]; механізм дослідження поведінки моделі в динаміці [4, 30, 33].

Вищеназвані особливості складних систем потребують спеціальних підходів та технологій побудови й аналізу моделей складних систем. Застосування імітаційного моделювання [7, 9, 31] у сучасному інтегрованому вигляді розширює можливості дослідження складних систем. На сьогодні перспективними є задачі розробки інструментальних засобів та технологій імітаційного моделювання, які сполучують різні підходи до побудови та дослідження моделей складних систем з паралелізмом; задачі розробки механізмів перевірки надвеликих і складних систем на приховані помилки та стійкість.

Література

1. Васильев, В.В. Сети Петри, параллельные алгоритмы и модели мультипроцессорных систем [Текст] / В.В. Васильев, В.В. Кузьмук. – К.: Наукова думка, 1990. – 216 с.
2. Рыжиков, Ю.И. Проблемы теории и практики имитационного моделирования [Текст] / Ю.И. Рыжиков, Б.В. Соколов, Р.М. Юсупов. // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2007): Сборник докладов III Всерос. науч.-практической конференции. Том I. – СПб: ФГУП ЦНИИ ТС, 2007. – С. 58-70.
3. Самарский, А.А. Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры [Текст] / А.А. Самарский, А.П. Михайлов. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с.
4. Кузьмук, В.В. Применение модифицированных сетей Петри при формировании алгоритмов больших вычислительных задач [Текст] / В.В. Кузьмук, О.А. Супруненко // Материалы 3-й Международной науч.-тех. конференции МЭЭС'10. – К.: ОГМУСЭ ИПМЭ им.Г.Е. Пухова НАНУ, 2010. – С. 36-38.

5. Воеводин, В. В. Решение больших задач в распределённых вычислительных средах [Текст] / В.В. Воеводин. // Автоматика и телемеханика. – 2007. - №5. – С. 32-45.
6. Бородакий, В.Ю. Анализ средств имитационного моделирования распределённых информационных систем [Текст] / В.Ю. Бородакий, Г.Е. Окороченко. // Компьютерные системы и технологии: Науч. сессия МИФИ. – 2007. – Том 12. – С. 129-130.
7. Карпов, Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 [Текст] / Ю.Г. Карпов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 400 с.
8. Борщёв, А.В. Практическое агентное моделирование и его место в арсенале аналитика [Электронный документ]. Режим доступа: <http://www.gpss.ru/immod05/p/borshev/intro.html>. Проверено 06.07.2013.
9. Васильев, В. В. Моделирование динамических систем: Аспекты мониторинга и обработки сигналов [Текст] / В. В. Васильев, Г. И. Грездов, Л. А. Симак, А. В. Васильев и др. – К.: НАН Украины, 2002. – 344 с.
10. Национальное общество имитационного моделирования: беседа с президентом Р.М. Юсуповым [Текст] // Прикладная информатика. – 2011. – №4 (34). – С. 4-9.
11. Vossara, N. Modeling Complex Systems. - Springer-Verlag New York, Inc., 2004. – 397 p.
12. Шилов, Н.В. Парадигма параллельного программирования: учить или не учить [Текст] / Н.В. Шилов, Л.В. Городня, Е.В. Бодин. // Экзафлопное будущее: Труды Международной суперкомпьютерной конференции. – 19-24 сентября 2011 г. Новороссийск. – М.: Изд-во МГУ, 2011. – С. 193-197.
13. Peter van Roy, Seif Haridi. Concepts, Techniques and Models of Computer Programming. The MIT Press, 2004. – 900 p.
14. P. van Roy Programming Paradigms for Dummies: What Every Programmer Should Know. // In G. Assayag and A. Gerzso (eds.) New Computational Paradigms for Computer Music / IRCAM / Delatour, France, 2009, p. 9-38.
15. Верников, Г. Стандарты моделирования IDEF и ABC. [Электронный документ]. Режим доступа: <http://www.cfin.ru/vernikov/idef/idef0>. Проверено 18.12.2012.
16. Рассел, Д.А. Управление высокотехнологичными программами и проектами [Текст]: Пер. с англ. – М.: ДМК-пресс, Компания АйТи, 2006. – 472 с.
17. Строгалев, В.П., Имитационное моделирование [Текст]: учеб. пособие / В.П. Строгалев, И.О.Толкачева. –М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2008.–280 с.
18. Сердюк, А.Г. Компонентная модель распределённых информационных систем [Текст] / А.Г. Сердюк. // Материалы 8-й Междунар. науч.-методической конференции «Новые информационные технологии в университетском образовании: Компьютерные сети, системы телекоммуникаций и инструментальные средства». – Новосибирск: СГУПС, 2001, С. 39.
19. Панкова, Л.А. Способы создания универсального инструментария для компьютерного моделирования [Текст] / Л.А. Панкова, В.А. Пронина. // Проблемы управления (Control Sciences). – 2006. – № 6. – С. 2-5.
20. Лычкина, Н.Н. Инновационные парадигмы имитационного моделирования и их применение в сфере управленческого консалтинга, логистики и стратегического менеджмента [Текст] / Н.Н. Лычкина. // Современные технологии управления логистической инфраструктурой – III: Сборник науч. статей. / Под ред. В.И. Сергеева. – М: Изд-во Эс-Си-Эм Консалтинг, 2012. – С. 9-28.
21. Дикман, Л.Г. Организация строительного производства [Текст]: Учеб. для строит. вузов / Л.Г. Дикман – М.: Изд-во АСВ, 2002. – 512 с.
22. Форрестер, Д. Мировая динамика [Текст]: Пер. с англ. – М.: ООО Изд-во АСТ; СПб.: Terra Fantastica. – 2003. – 379 с.
23. Каталевский, Д.Ю. Системная динамика и агентное моделирование: необходимость комбинированного подхода. [Электронный документ]. Режим доступа: <http://www.anylogic.ru/articles/sistemnaya-dinamika-i-agentnoe-modelirovanie-neobkhodimost-kombinirovannogo-podkhoda>. Проверен 27.08.13.
24. Кочкаров, А.А. Когнитивное моделирование региональных социально-экономических систем [Текст] / А.А. Кочкаров, М.Б. Салпагаров. // Управление большими системами / Сборник трудов. Выпуск 16. – М.: ИПУ РАН, 2007. – С. 137-145.
25. Горелова, Г.В. Когнитивный подход к имитационному моделированию сложных систем [Текст] / Г.В. Горелова. // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – №3 (140). – С. 239-250.
26. Стоян, В.А. Моделювання та ідентифікація динаміки систем з розподіленими параметрами [Текст] / В.А. Стоян. – К.: Київський у-т, 2008. – 201 с.
27. Святний, В.А. Проблеми паралельного моделювання складних динамічних систем, 2011. [Електронний документ]. Режим доступу: <http://masters.donntu.edu.ua/2013/fknt/skorych/library/article8.htm>. Перевірено: 15.06.2013.
28. Kolpakov F, Puzanov M., Koshukov A. BioUML: visual modeling, automated code generation and simulation of biological systems // Proceedings of the 5th International Conference on Bioinformatics of Genome Regulation and Structure (BGRS'2006), July 16-22, 2006, Novosibirsk, v.3, pp. 281-284.
29. Ліссов, П.М. Технологія створення програмного комплексу для моделювання фізіологічних систем. [Текст] / П.М.Ліссов. // Проблеми програмування, спецвипуск. – 2008. – № 2-3. – С. 770-776.
30. Шенон, Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука [Текст]: Пер. с англ. под ред. Е.К. Масловского. – М.: Изд-во „Мир”, 1978. – 418 с.
31. Бусленко, Н.П. Лекции по теории сложных систем [Текст] / Н.П. Бусленко, В.В. Калашников и др. – М.: Сов. радио, 1973. – 440 с.
32. Лычкина, Н.Н. Имитационное моделирование экономических процессов [Текст]: учеб. пособ. для слуш. прогр. eMBI / Н.Н. Лычкина. – М.: Академия АйТи, 2005. – 164 с.
33. Воеводин, В.В. Математические модели и методы в параллельных процессах [Текст] / В.В. Воеводин. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. – 1986. – 296 с.