

УДК 519.87:004.942

О. В. ГОРБОВА^{1*}, М. С. МУРКОВИЧ^{2*}

^{1*}Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта alexandra.gorbova@gmail.com, ORCID 0000-0002-5612-2715

^{2*}Каф. «Комп'ютерні інформаційні технології», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 35, ел. пошта nikolay.murkovich@gmail.com, ORCID 0000-0002-1031-8245

Дослідження складних процесів на основі поетапного моделювання

Мета. Для вирішення практичних завдань, що вимагають створення й подальшого аналізу моделі, важливим критерієм є трудомісткість моделювання. У зв'язку з цим метою статті є формалізація процесу моделювання та використання методики поетапного моделювання для проектування технологічних процесів. Такий підхід дозволяє проектувати процеси та завдання за такими етапами: фізичне моделювання, математичне моделювання, дискретне комп'ютерне моделювання та імітаційне моделювання. **Методика.** Для розв'язку задачі використовують методологію поетапного моделювання. Для моделювання використовують алгоритм декомпозиції, тобто розглядають задачу від глобального до детального. На першому етапі цієї реалізації проводять збір необхідної інформації для експерименту. Цю інформацію представляють у вигляді статистики. На другому етапі здійснюють подальшу обробку інформації шляхом перевірки на відповідність вхідних даних і процесу та питання, як потрібно виконувати цей процес. На останньому етапі відбувається моделювання проходжень цього фрагмента, який представлений ланцюгом переходів, отримання статистики часової ефективності процесу, його слабких місць і можливість порівняти результати отримані під час моделювання та в реальному процесі, а також можливість спрогнозувати результати й дії в системі на майбутнє. **Результати.** Методика може бути використана для дослідження складних технологічних процесів на підприємстві. Вона дозволяє моделювати складні процеси для отримання інформації про часову ефективність виконання технологічної операції, знаходження слабких місць у ній та закономірностей у виниканні випадкових подій, що можуть вплинути на операцію. Використання цього підходу може бути досить ефективним у рамках систем, у яких необхідний постійний контроль у режимі реального часу, оскільки цей підхід можна модифікувати додаванням наборів датчиків, що будуть постійно надсилати інформацію до системи, або доповнити додатковою системою, що буде надавати вже готові пакети інформації. **Наукова новизна.** Удосконалено методику поетапного моделювання представлення, що полягає в одночасному використанні фізичного, математичного та імітаційного моделювання складних процесів з набором етапів їх реалізації. **Практична значимість.** Запропонована методика призначена для поетапного моделювання технологічного процесу з подальшою побудовою імітаційного програмування.

Ключові слова: технологічний процес; імітаційне програмування; моделювання технологічного процесу; математичне моделювання

Вступ

В основі проектування технічного забезпечення, автоматизованих систем управління, розробки різноманітних технологічних процесів лежить моделювання предметної області, процесів або складових системи. Під час моделювання технологічних процесів застосовують різні методи й підходи [13].

Побудова моделей технологічних процесів є досить важливим завданням, тому що дозволяє передбачити їх особливості, що сприяють досягненню необхідних характеристик та влас-

тивостей. Дерево рішення дозволяє поліпшити оптимізацію складних процесів шляхом їх поетапного моделювання, а завдяки імітаційному моделюванню можна побачити та перевірити цю модель у часі [1, 2].

Під час вирішення практичних завдань зі створення й подальшого аналізу моделі важливим критерієм є трудомісткість цих процесів. Унаслідок цього постає питання формалізації процесу моделювання [13]. На базі формалізованого підходу до побудови й дослідження моделей доцільним є створення програмного ком-

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

плексу, що автоматизує та впорядковує діяльність фахівців.

У [10] автори пропонують поетапний підхід до побудови моделі, що передбачає фізичне, математичне, дискретне комп'ютерне та імітаційне моделювання (рис. 1).

На кожному з етапів передбачена активна взаємодія з базою знань із метою накопичення типових рішень їх подальшого використання. Для єдності моделей об'єктів і систем управління, а також для адаптації типових рішень запропоновано застосування інтелектуального структурно-параметричного синтезу, заснованого на ідеї використання еволюційних алгоритмів як засобів автоматичної генерації моделі у вигляді мережі Петрі.

На етапі фізичного моделювання проводять дослідження технологічного процесу – ряд експериментів на наявному обладнанні. За відсутності такої можливості створюють фізичні моделі, що відображають основні закономірності досліджуваних процесів.

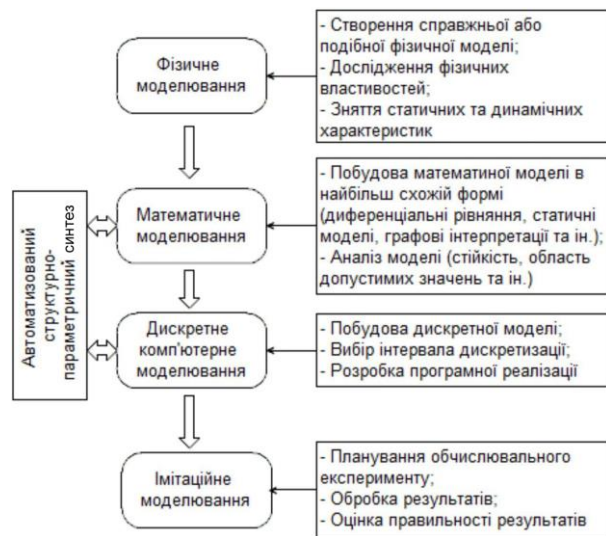


Рис. 1. Схема поетапного моделювання

Fig. 1. The scheme of step-by-step modeling

Основною метою побудови фізичної моделі є отримання статичних і динамічних характеристик процесу, який моделюють. Таким чином, реалізована й вивчена фізична модель дає можливість формально описати властивості досліджуваного процесу, визначити чисельні значення актуальних параметрів, оцінити їх кореляцію й динаміку зміни.

Після збору й обробки даних про функціонування фізичної моделі настає етап математичного моделювання. Залежно від особливостей технологічного процесу та цілей моделювання можуть бути обрані різні математичні апарати [4].

У разі моделювання схожих процесів доцільно використати шаблонні підходи, що дають приріст швидкості синтезу моделі. У цьому випадку виникає задача зберігання бази шаблонів і вибору необхідного шаблону моделі за заданими критеріями. Застосування систем управління базами даних і базами знань дає можливість створити автоматизовану систему, що пропонує на етапі математичного моделювання найбільш відповідну методологію й шаблон для створення математичного опису досліджуваного процесу.

У деяких випадках виникають труднощі в побудові математичної моделі у зв'язку зі складністю опису досліджуваного об'єкта. У такому разі може бути застосований підхід «чорної скриньки», коли модель синтезують лише на підставі накопиченої статистичної інформації про поведінку об'єкта. Для автоматизації цього процесу пропонують використати еволюційний алгоритм як засіб спрямованого пошуку структури й параметрів моделі, що адекватно описує отримані раніше вихідні емпіричні дані.

Етап імітаційного моделювання пов'язаний із дослідженням властивостей реалізованої на попередньому етапі дискретної комп'ютерної моделі. Застосування статистичних та аналітичних інструментів обробки результатів чисельних експериментів, а також їх планування дозволяє отримати не тільки окремі чисельні результати функціонування моделі технологічного процесу для одиничних вибірок вихідних умов, але й виявити якісні особливості поведінки модельованих систем та об'єктів, що володіють схожими характеристиками [6, 7].

Імітаційне моделювання, як правило, передбачає ітеративний процес запуску дискретної комп'ютерної моделі з різними наборами вихідних даних. Отримані результати підлягають подальшій обробці для виявлення функціональних залежностей та узагальнення результатів [1, 5, 7].

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

З узагальнення цього дослідження можна зробити висновок про схожість основної структури програмних засобів цієї категорії, а водночас про різницю в підходах у реалізації та властивостях програмних засобів.

У статті [11] показано, що для дослідження складних процесів соціальної взаємодії на сучасному етапі розвитку системного моделювання все частіше використовують ієрархічні системи когнітивних моделей, когнітивні архітектури та інтегровані системи моделювання. Щодо складних процесів система моделей повинна відображати різні абстракції опису структури, різноманітні аспекти її поведінки, етапи (ітерації) її еволюції в процесі функціонування й розвитку. Запропоновано розглядати архітектуру в сукупності моделей у контексті необхідності для вирішення завдання на конкретному етапі дослідження.

Як показує практика системного моделювання найбільш значущими і водночас найбільш складними є завдання аналізу й прогнозування розвитку процесів соціальної взаємодії. Такого роду завдання пов'язані з прогнозом досягнення довгострокових цілей шляхом адаптації до змін зовнішнього середовища. Завдання складні і вимагають урахування великої кількості факторів, інтересів, ризиків і наслідків, у їх рішеннях наявний високий ступінь невизначеності в оцінці зовнішнього середовища, слабка формалізація методів управління й широке використання експертних оцінок і знань, багатокритеріальність під час оцінки прийнятих рішень. Для характеристики проблем модельного підходу до аналізу та прогнозування складних процесів соціальної взаємодії необхідно враховувати, що від постановки задачі моделювання до інтерпретації отриманих результатів постає велика група складних науково-технічних проблем, до основних із яких можна віднести такі: ідентифікація реальних об'єктів, вибір виду моделей, побудова моделей і їх програмна реалізація, взаємодія дослідника з моделлю в ході комп'ютерного експерименту, перевірка правильності отриманих у ході моделювання результатів, виявлення основних закономірностей у процесі моделювання. Залежно від об'єкта моделювання та виду використову-

ваної моделі ці проблеми можуть мати різну значимість.

Зазначено, що, відповідно до принципу необхідної різноманітності, «різноманітність засобів моделювання повинна бути більшою або, принаймні, такою самою, як різноманітність об'єкта моделювання». У цьому випадку традиційний спосіб опису різних аспектів системи й процесу її створення, що передбачає послідовний розвиток однієї моделі, не є ефективним. Сама наявність такої єдиної моделі викликає сумніви, тому що занадто складний і багатогранний предмет опису – від реальних об'єктів і процесів до абстрактних інформаційних та інших об'єктів.

Наступний крок у дослідженні складних процесів соціальної взаємодії пропонують виконувати на основі інтегрованих систем моделювання. Їх принципова відмінність полягає у використанні різних парадигм моделювання для дослідження відповідних властивостей соціальних процесів.

Кожна з моделей має унікальні властивості, які відсутні в інших, і тому різною мірою відповідає реальним процесам. Використовувана модель, що інтерпретує досліджувану властивість процесів, у свою чергу, визначає й те, як буде осмислено проблему і які рішення буде прийнято.

У [9] запропоновано методи моделювання технологічних процесів із позиції системного аналізу. Подано формальні підходи до описання математичних моделей та показано моделювання технологічних об'єктів, що розрізняються ступенем деталізації процесів.

Для роботи [3] характерним є підхід до створення моделі технологічного процесу з використанням методології поетапного моделювання та її формалізації.

Під час моделювання технологічних процесів застосовують різні методи й підходи. Усі вони мають свої особливості, проте до моделювання предметної області висувають такі вимоги:

- однозначний опис структури предметної області;
- зрозумілість результатів передпроектного обстеження для замовників і розробників на

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

основі застосування графічних засобів відображення моделі;

- реалізованість, під якою розуміють наявність засобів фізичної реалізації моделі предметної області в інформаційних системах;
- забезпечення оцінки ефективності реалізації моделі предметної області на основі певних методів та обчислюваних показників.

Ефективним способом описання функціонування об'єктів, що забезпечує високу інформативність та інтуїтивно зрозуміле представлення інформації, є візуальне моделювання [8, 12]. Під час візуального моделювання кожен елемент виробничого процесу зображують у вигляді графічного позначення. Графічну модель можна створювати як на паперових носіях, так і за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення на ЕОМ. Відображення наявних виробничих процесів у вигляді простих діаграм і коротких описів допомагає досягти єдиного розуміння чинних норм та оперативних процедур між розробником і замовником проектів розвитку залізничних станцій.

Мета

Основною метою цієї статті є представлення методики поетапного моделювання складних процесів шляхом їх декомпозиції.

Методика

Для вирішення поставленого завдання розроблено алгоритм, що відповідає потребам, які виникають під час дослідження.

У задачі «розробка алгоритму» в більшості випадків використовують відомі методики, їх комбінування та різні підходи до реалізації для отримання необхідного результату. Для розв'язку задачі використовують методологію поетапного моделювання. Моделювання передбачає 3 етапи за використанням алгоритму декомпозиції, тобто розглядає задачу від глобального до детального [8, 12].

Результати

Перший етап. На першому етапі цієї реалізації проводять збір необхідної інформації для експерименту. Ця інформація може бути подана у вигляді статистики, наборів інтервалів або

в будь-якому іншому вигляді, лише з одним обмеженням, щоб цю інформацію можна було представити згідно з вимогами методики.

Вимоги до представлення інформації:

- інформацію про процес, який досліджують, представляють у вигляді ієрархічного дерева процесів, де кожен вузол має свій номер, а кожному вузлу ставлять умову, за якою система буде розуміти, куди просуватиметься процес у ході виконання алгоритму. Номер необхідний для розуміння місцеположення та формування шляху проходження цього дерева, приклад інтерпретації зовнішнього вигляду дерева наведено на рис. 2. Після завантаження вся структура має бути записана у відповідному вигляді для зчитування системою необхідної інформації та виконання необхідних дій, приклад запису вхідного файлу з правилами переходів наведено на рис. 3;

- інформація про час виконання кожного вузла або час, необхідний для переходу з одного вузла до іншого, повинна бути записана у окремий файл в відповідній формі, приклад файлу з указаним необхідним часом зображено на рис. 5;

- необхідно вказувати кількість повторень моделювання часу проходження отриманого ланцюга.

Для подальшої обробки те, яким шляхом було отримано ці дані, не є важливим, але для використання цього алгоритму на практиці на цьому етапі можна залучати автоматизовану систему. Завданням такої системи стає відстежування станів її об'єктів під час роботи та передачі цих даних для подальшої обробки. Тобто в перспективі можлива повна автоматизація системи з використанням цього алгоритму, за умови, що до процесу, який відстежують можна застосовувати автоматизований підхід [16, 17].

Другий етап. На цьому етапі відбувається подальша обробка інформації, отриманої на першому етапі.

Обробку виконують шляхом перевірки на відповідність вхідних даних і процесу та питання, як потрібно виконувати цей процес. Алгоритм на відповідність вхідних даних і процесу виконують за допомогою програми, написаної мовою Prolog. Як результат роботи програми будують дерево переходів, що відповідає

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

тим підпроцесам, які відбуваються в системі або об'єкті під час виконання процесу. Побудову дерева виконують за допомогою зворотнього ланцюга виводу. У результаті проходження цього етапу буде отримано проміжний результат у вигляді ланцюга переходів, приклад проміжного файлу із ланцюгом виконання операцій наведено на рис. 7.

Третій етап. На останньому етапі відбувається моделювання проходження цього фрагмента, який представлений ланцюгом перехо-

дів, отримання статистики часової ефективності процесу, його слабких місць і можливість порівняти результати, отримані під час моделювання та в реальному процесі, а також можливість спрогнозувати результати й дії у системі на майбутнє [14, 15].

Залежно від указаної кількості повторів результат може істотно відрізнятись, чим більша кількість повторів, тим точніший буде результат.

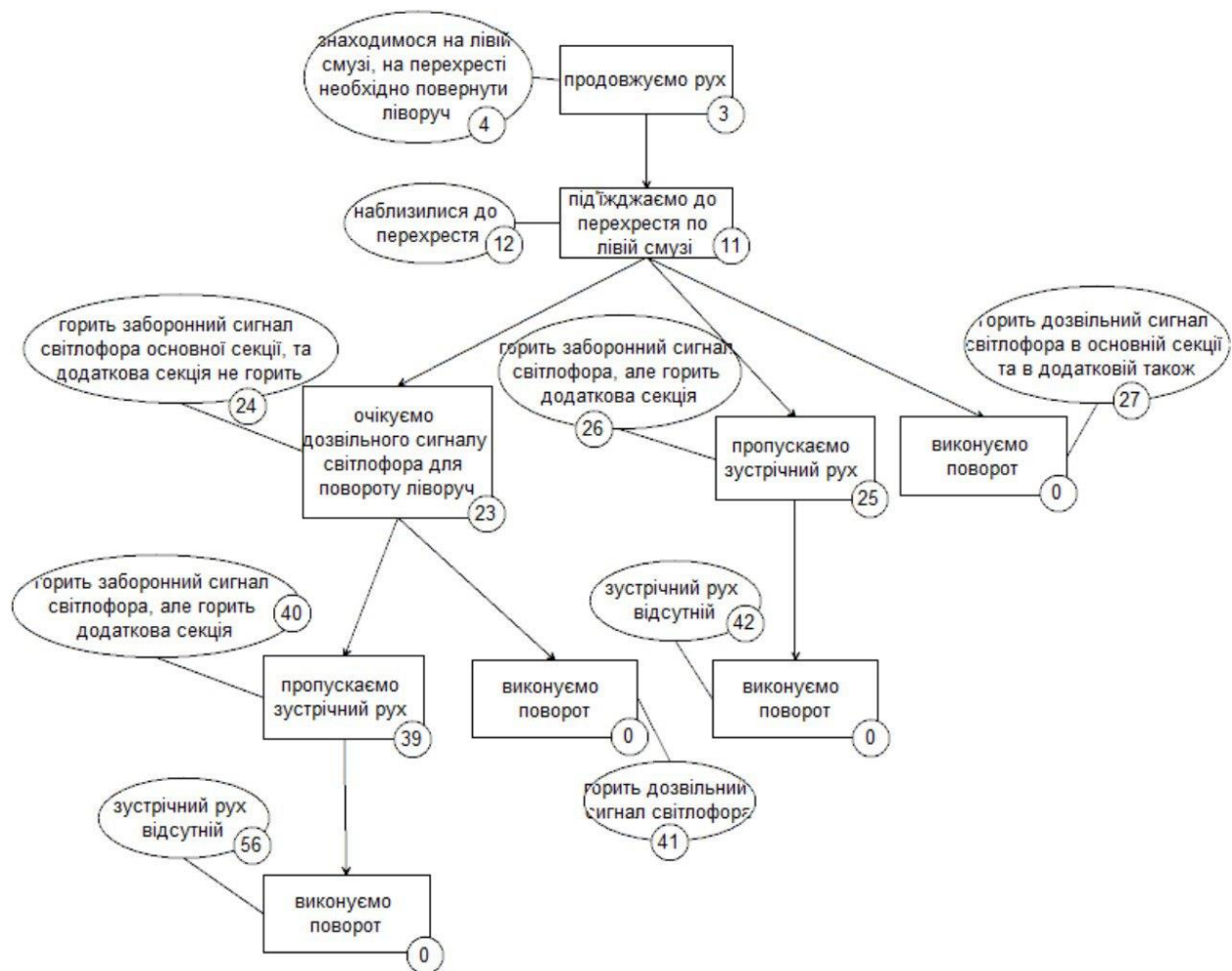


Рис. 2. Схема переходів у дереві ланцюга

Fig. 2. Scheme of transitions in the chain tree

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

```

rules.pl — Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
% база фактів
fact(1, 'приближаемся к перекрестку', [2]).
fact(2, 'видим впереди перекресток', []).
fact(3, 'продолжаем движение', [1,4]).
fact(4, 'находимся в левой полосе, на перекрестке необходимо повернуть налево', []).
fact(5, 'включаем левый указатель поворота для перестроения', [1,6]).
fact(6, 'находимся в правой полосе, на перекрестке необходимо повернуть на лево', []).
fact(7, 'включаем правый указатель поворота для перестроения', [1,8]).
fact(8, 'находимся в левой полосе, на перекрестке необходимо проехать прямо', []).
fact(9, 'продолжаем движение', [1,10]).
fact(10, 'находимся в правой полосе, на перекрестке необходимо проехать прямо', []).
fact(11, 'подъезжаем к перекрестку в левой полосе', [3,12]).
fact(12, 'приблизилась к перекрестку', []).
fact(13, 'выполняем перестроение в левую полосу', [5,14]).
fact(14, 'помеха слева отсутствует', []).
fact(15, 'пропускаем попутный транспорт', [5,16]).
fact(16, 'помеха слева присутствует', []).
fact(17, 'пропускаем попутный транспорт', [7,18]).
fact(18, 'помеха справа присутствует', []).
fact(19, 'выполняем перестроение в правую полосу', [7,20]).
fact(20, 'помеха справа отсутствует', []).
fact(21, 'подъезжаем к перекрестку в правой полосе', [9,22]).
fact(22, 'приблизилась к перекрестку', []).
fact(23, 'ожидаем разрешающего сигнала светофора для поворота на лево', [11,24]).
fact(24, 'горит запрещающий сигнал светофора, дополнительная секция не горит', []).
fact(25, 'пропускаем встречное движение', [11,26]).
fact(26, 'горит запрещающий сигнал светофора, дополнительная секция горит', []).
fact(27, 'горит разрешающий сигнал светофора, дополнительная секция горит', []).
fact(28, 'подъезжаем к перекрестку в левой полосе', [13,29]).
fact(29, 'приблизилась к перекрестку', []).
fact(30, 'выполняем перестроение в левую полосу', [15,31]).
fact(31, 'помеха слева отсутствует', []).
fact(32, 'выполняем перестроение в правую полосу', [17,33]).
fact(33, 'помеха справа отсутствует', []).
fact(34, 'подъезжаем к перекрестку в правой полосе', [19,35]).
fact(35, 'приблизилась к перекрестку', []).
fact(36, 'ожидаем разрешающего сигнала светофора для проезда по прямой', [21,37]).
fact(37, 'горит запрещающий сигнал светофора', []).
fact(38, 'горит разрешающий сигнал светофора', []).
fact(39, 'пропускаем встречное движение', [23,40]).
fact(40, 'горит запрещающий сигнал светофора, дополнительная секция горит', []).
fact(41, 'горит разрешающий сигнал светофора', []).
fact(42, 'встречный движение отсутствует', []).
fact(43, 'ожидаем разрешающего сигнала светофора для поворота на лево', [28,44]).
fact(44, 'горит запрещающий сигнал светофора, дополнительная секция не горит', []).
fact(45, 'пропускаем встречное движение', [28,46]).
fact(46, 'горит запрещающий сигнал светофора, дополнительная секция горит', []).
fact(47, 'горит разрешающий сигнал светофора, дополнительная секция горит', []).
fact(48, 'подъезжаем к перекрестку в левой полосе', [30,49]).
fact(49, 'приблизилась к перекрестку', []).
fact(50, 'подъезжаем к перекрестку в правой полосе', [32,51]).
fact(51, 'приблизилась к перекрестку', []).

```

Рис. 3. Вид вхідного файлу

Fig. 3. View of input file

```

1 ↓
fact(1, 'приближаемся к перекрестку', [2]).
2 ↓
fact(2, 'видим впереди перекресток', []).
3 →
fact(3, 'продолжаем движение', [1,4]).
fact(4, 'находимся в левой полосе, на перекрестке необходимо повернуть налево', []).

```

Рис. 4. Пояснення до рис. 3

Fig. 4. Explanation to Fig. 3

На рис. 4 наведено:

- 1 – номер вузла;
- 2 – опис вузла;
- 3 – пов'язані вузли.

```

time.txt — Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
-1,60,600:8.авария на перекрестке
-2,60,420:4.авария на попутной полосе
-3,60,240:4.авария на встречной полосе
-4,10,120:25.тс с вкл спецсигналами
-5,10,240:20.неработает светофор
1,10,50
3,10,50,-1;-4;-5
5,2,10
7,2,10
9,10,50
11,10,50,-1;-4;-5
13,5,15,-4
15,5,15,-2;-4
17,5,15,-2,-4
19,5,15,-4
21,10,50,-1;-4;-5
23,5,130,-1;-5
25,5,50,-1;-3;-4
27,5,30
28,10,50,-1;-4;-5
30,10,20,-4
32,10,20,-4
34,10,50,-1;-4;-5
36,5,130,-1;-5
38,5,30
39,5,50,-1;-3;-4
41,5,30
42,5,30
43,5,130,-1;-5
45,5,50,-1;-3;-4
47,5,30
48,10,50,-1;-4;-5
50,10,50,-1;-4;-5
52,5,130,-1;-5
54,5,30
55,5,30
56,5,30
57,5,50,-1;-3;-4

```

Рис. 5. Файл із необхідним часом

Fig. 5. File with the required time

Легенду до рис. 5 наведено на рис. 6.

```

5 ↓
-1,60,600:8.авария на перекрестке
-2,60,420:4.авария на попутной полосе
-3,60,240:4.авария на встречной полосе
-4,10,120:25.тс с вкл спецсигналами
-5,10,240:20.неработает светофор
1,10,50
3,10,50,-1;-4;-5

```

Рис. 6. Пояснення до рис. 5

Fig. 6. Explanation to Fig. 6

На рис. 6 наведено:

- 1 – номер вузла;
- 2 – початок інтервалу виконання;
- 3 – кінець інтервалу виконання;
- 4 – номер вузла вірогідної випадкової події;
- 5 – вірогідність виникнення події;
- 6 – пояснювальні коментарі.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

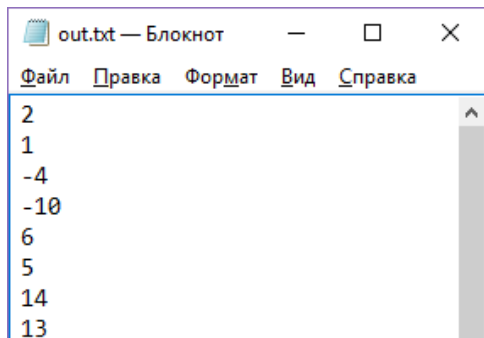


Рис. 7. Проміжний файл із ланцюгом виконання операцій

Fig. 7. Intermediate file with the chain of operations

Розроблена методика може бути використана для розв’язання прикладної задачі або дослідження складних технологічних процесів на підприємстві. Крім того, методика дозволяє моделювати складні процеси для отримання інформації про часову ефективність виконання технологічної операції, знаходження слабких місць у ній та закономірностей у виниканні випадкових подій, що можуть вплинути на операцію. Використання цього підходу може бути досить ефективним у рамках систем, у яких необхідний постійний контроль у режимі реального часу, оскільки цей підхід можна модифікувати додаванням наборів датчиків, що будуть постійно надсилати інформацію до системи, або доповнити додатковою системою, що буде надавати вже готові пакети інформації. Також цей підхід можна модифікувати для використання в мануальному режимі, шляхом модифікації системи створення та збору інформації,

необхідної для моделювання, а отримані результати використати під час побудови нового процесу або модифікації будь-якого іншого процесу. Також теоретично можливе використання цього підходу для роботи з бізнес-процесами, але для підтвердження цього необхідне більш детальне дослідження цього питання.

Наукова новизна та практична значимість

Новим у роботі є одночасне використання фізичного, математичного та імітаційного моделювання складних процесів із набором етапів їх реалізації.

Модель дозволяє будувати дерево рішень розв’язуваної задачі та аналізувати час виконання технологічної задачі в умовах випадкових подій.

Висновки

У цій статті запропоновано методику дослідження складних технологічних процесів та операцій на основі імітаційного програмування та поетапного моделювання.

Завдяки мові UML користувач має можливість описати технологічні процеси методом візуального програмування, а використання методики поетапного моделювання дозволить виділити об’єкти, наділити їх технологічними алгоритмами та переходами, у свою чергу імітаційне програмування дозволить змодельовувати ситуації для виділення окремих місць.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бобровский В. И., Козаченко Д. Н., Вернигора Р. В., Малашкин В. В. *Функциональное моделирование работы железнодорожных станций* : монография. Днепропетр. нац. ун-т ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна. Днепропетровск, 2015. 269 с.
2. Глушков В. М. *Синтез цифровых автоматов*. Москва : Физматлит, 1962. 476 с.
3. Горбова О. В. Формалізація технологічних процесів залізничних станцій на основі поетапного моделювання. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. № 5 (83). С. 71–80.
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/181850>
4. Дозорцев В. М. Динамическое моделирование в оптимальном управлении и автоматизированном обучении операторов технологических процессов. Ч. 2. Компьютерные тренажеры реального времени. *Приборы и системы управления*. 1996. № 8. С.41–50.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

5. Козаченко Д. М., Вернигора Р. В., Коробйова Р. Г. Програмний комплекс для імітаційного моделювання роботи залізничних станцій на основі добового плану-графіка. *Залізничний транспорт України*. 2008. № 4. С. 18–20.
6. Козаченко Д. Н., Вернигора Р. В., Малашкин В. В. Автоматизированное формирование функциональных моделей железнодорожных станций. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2014. № 8. С. 65–73.
7. Козаченко Д. Н. Объектно-ориентированная модель функционирования железнодорожных станций. *Наука та прогрес транспорту*. 2013. № 4 (46). С. 47–55. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2013/16570>
8. Леоненков А. В. *Самоучитель UML*. Санкт-Петербург : БХВ–Петербург, 2002. 576 с.
9. Мальков М. В., Олейник А. Г., Федоров А. М. Моделирование технологических процессов: методы и опыт. *Труды КНЦ РАН*. 2010. № 3 (3). С. 93–101.
10. Петросов Д. А., Игнатенко В. А. Поэтапное моделирование технологических процессов с использованием интеллектуального структурно-параметрического синтеза. *Фундаментальные исследования*. 2017. № 12 (1). С. 97–102. DOI: <https://doi.org/10.17513/fr.41986>
11. Розин М. Д., Свичкарев В. П. Проблемы системного моделирования сложных процессов социального взаимодействия. *Инженерный вестник Дона*. 2012. № 2. С. 609–618.
12. Bianco Vieri del, Lavazza L., Mauri M. *A formalization of UML statecharts for real-time software modeling*. URL: <https://cutt.ly/QueZxM3q>
13. Gorbova O. V. Modeling Work of Sorting Station Using UML. *Science and Transport Progress*. 2015. № 1 (55). P. 129–138. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/38260>
14. Harel D. Statecharts: A visual formalism for complex systems. *Science of Computer Programming*. 1987. Vol. 8. Iss. 3. P. 231–274. DOI: [https://doi.org/10.1016/0167-6423\(87\)90035-9](https://doi.org/10.1016/0167-6423(87)90035-9)
15. Harel D. Statecharts: A visual formalisms. *Communications of the ACM*. 1988. Vol. 31. Iss. 5. P. 514–530.
16. Silva M., Colom J.-M., Julvez J., Mahulea C., Schuppen J. H., van Su R., ... Darondeau P. *On Modeling of Hierarchical and Distributed Discrete-Event Systems*. The DISC Project Perspective, 2007. 85 p.
17. Zimmermann A., Trowitzsch J. *Eine Quantitative Untersuchung des European Train Control System mit UML State Machines*. URL: <https://cutt.ly/HeZxV5r>

O. V. HORBOVA^{1*}, N. S. MURKOVYCH^{2*}

^{1*}Dep. «Computer Information Technologies», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 35, e-mail alexandra.gorbova@gmail.com, ORCID 0000-0002-5612-2715

^{2*}Dep. «Computer Information Technologies», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 35, e-mail nikolay.murkovich@gmail.com, 0000-0002-1031-8245

Research of Complex Processes Based on Step-By-Step Modeling

Purpose. When solving practical problems that require the creation and further analysis of the model, an important criterion is the labour intensity of modeling. In this regard, the article is aimed at formalizing the modeling process and using the method of step-by-step modeling for the design of technological processes. This approach allows you to design processes and tasks according to the following stages: physical modeling, mathematical modeling, discrete computer modeling and simulation. **Methodology.** To solve the problem, a methodology of step-by-step modeling is used. The simulation involves 3 stages and uses the decomposition algorithm, i. e. considers the problem from global to detailed. At the first stage of this implementation, the necessary information is collected for the experiment. This information is presented in the form of statistics. In the second stage, further processing takes place, which is performed by checking the compliance of the input data and the process with the question of how this process should be performed. The last stage is the simulation of passages of this fragment, which is represented by a chain of transitions, obtaining statistics of time efficiency of this process, weaknesses of the process and the ability to compare the results obtained during modeling and in the real process, as well as the ability to predict future results and actions. **Findings.** The technique can be used to study complex technological processes in the enterprise. It allows modeling of complex processes to obtain information about the time efficiency of the technological operation, finding weaknesses in it and patterns in the occurrence of random events that may affect the operation. Using

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

this approach can be very effective in the systems that require constant real-time monitoring, as this tool can be modified by adding sensor kits that will constantly send information to the system or equip an additional system that will provide ready-made information packets. **Originality.** The method of step-by-step modeling of representation has been improved, which consists in the simultaneous use of physical, mathematical and simulation modeling of complex processes with a set of stages of their implementation. **Practical value.** The proposed technique is designed for step-by-step modeling of the technological process with the subsequent construction of simulation programming.

Keywords: technological process; simulation programming; technological process modeling; mathematical modeling

REFERENCES

1. Bobrovsky, V. I., Kozachenko, D. N., Vernigora, R. V., & Malashkin, V. V. (2015). *Funktsionalnoe modelirovaniye raboty zheleznodorozhnykh stantsiy: monografiya*. Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. Dnepropetrovsk. (in Russian)
2. Glushkov, V. M. (1962). *Sintez tsifrovyykh avtomatov*. Moscow: Fizmatlit. (in Russian)
3. Gorbova, O. V. (2016). Formalization of the Technological Processes at Railway Stations Based on the Step-by-Step Modeling. *Science and Transport Progress*, 5(83), 71-80. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/181850> (in Ukrainian)
4. Dozortsev, V. M. (1996). Dinamicheskoe modelirovaniye v optimalnom upravlenii i avtomatizirovannom obuchenii operatorov tekhnologicheskikh protsessov. Ch. 2. Kompyuternye trenazhery realnogo vremni. *Instruments and Systems*, 8, 41-50. (in Russian)
5. Kozachenko, D. M., Vernigora, R. V., & Korobyova, R. G. (2008). The Software Package for Simulation of Railway Stations Based on Plan-Schedule. *Railway Transport of Ukraine*, 4, 18-20. (in Ukrainian)
6. Kozachenko, D. N., Vernigora, R. V., & Malashkin, V. V. (2014). Automated formation of functional models of railway stations. *Transport systems and transportation technologies*, 8, 65-73. (in Russian)
7. Kozachenko, D. M. (2013). Object-oriented model of railway stations operation. *Science and Transport Progress*, 4(46), 47-55. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2013/1657> (in Russian)
8. Leonenkov, A. V. (2002). *Samouchitel UML*. Saint Petersburg: BHV-Petersburg. (in Russian)
9. Malkov, M. V., Oleynik, A. G., & Fedorov, A. M. (2010). Modeling of technological processes: methods and experience. *Transactions Kola Science Centre*, 3(3), 93-101. (in Russian)
10. Petrosov, D. A., & Ignatenko, V. A. (2017). Step-by-modeling of technological processes with use of intelligent structural-parametric synthesis. *Fundamental research*, 12(1), 97-102. DOI: <https://doi.org/10.17513/fr.41986> (in Russian)
11. Rozin, M. D., & Svichkarov, V. P. (2012). Problemy sistemnogo modelirovaniya slozhnykh protsessov sotsialnogo vzaimodeystviya. *Inzhenernyy vestnik Dona*, 2, 609-618. (in Russian)
12. Bianco, Vieri del, Lavazza, L., & Mauri, M. *A formalization of UML statecharts for real-time software modeling*. Retrieved from <https://cutt.ly/QeZxM3q> (in English)
13. Gorbova, O. V. (2015). Modeling Work of Sorting Station Using UML. *Science and Transport Progress*, 1(55), 129-138. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/38260> (in English)
14. Harel, D. (1987). Statecharts: a visual formalism for complex systems. *Science of Computer Programming*, 8(3), 231-274. DOI: [https://doi.org/10.1016/0167-6423\(87\)90035-9](https://doi.org/10.1016/0167-6423(87)90035-9) (in English)
15. Harel, D. (1988). Statecharts: A visual formalisms. *Communications of the ACM*, 31(5), 514-530. (in English)
16. Silva, M., Colom, J.-M., Julvez, J., Mahulea, C., Schuppen, J. H. van, Su, R., ... & Darondeau, P. (2007). *On Modeling of Hierarchical and Distributed Discrete-Event Systems*. The DISC Project Perspective. (in English)
17. Zimmermann, A., & Trowitzsch, J. *Eine Quantitative Untersuchung des European Train Control System mit UML State Machines*. Retrieved from <https://cutt.ly/HeZxV5r> (in German)

Надійшла до редколегії: 28.05.2021

Прийнята до друку: 01.10.21