

# МАТЕМАТИЧНЕ І КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

### MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING

УДК 519.876.2

DOI: 10.20998/2079-0023.2020.02.03

*I. П. ГАМАЮН, С. І. ЄРШОВА*

#### МЕТОДИ КОМПРОМІСНОГО ВИБОРУ ІНТЕРВАЛУ ЗМІН МОДЕЛЬНОГО ЧАСУ В ІМІТАЦІЙНИХ МОДЕЛЯХ

Розглядаються процес імітаційного моделювання як один з основних засобів для вивчення динаміки функціонування реальних систем, зокрема, складних. Система може бути представлена сукупністю компонент. Функціонування компонента представляється реалізацією множини функціональних дій, які представляються відповідними активностями у вигляді пари: алгоритм виконання функціональної дії – тривалість виконання. Проблема відображення в ІМ одночасного або паралельного характеру функціонування всіх компонентів складної системи вирішується введенням модельного або системного часу. Основними методами введення модельного часу є метод фіксованого кроку та метод змінного кроку. В методі фіксованого кроку важливою проблемою є вибір величини інтервалу зміни модельного часу. Існуючі рекомендації для вибору величини інтервалу зміни модельного часу мають якісний характер і їх використання дозволяє підвищити точність моделювання, але при цьому зростають витрати ресурсу часу комп'ютера. Запропоновано при виборі величини інтервалу зміни модельного часу використовувати кількісні оцінки значень критеріїв якості – точність і витрати ресурсу часу комп'ютера. Узагальнений критерій представляється зваженою сумою перетворень локальних критеріїв. Значення коефіцієнтів, на які множаться відповідні перетворення, висловлюють переваги особи, що приймає рішення, локальним критеріям оптимальності. Наводиться геометрична інтерпретація процесу визначення компромісної альтернативи на множині ефективних альтернатив для різних випадків важливості локальних критеріїв. Ці оцінки дозволяють обґрунтувати характер зміни критеріїв якості для різних варіантів значень інтервалу зміни модельного часу та використовувати їх для вибору компромісного варіанту серед ефективних шляхом мінімізації узагальненого критерію. Вибір компромісного значення інтервалу зміни модельного часу реалізується в управляючій програмі моделювання.

**Ключові слова:** складна система, імітаційне моделювання, імітаційні моделі, модельний час, методи, компромісний вибір.

*I. П. ГАМАЮН, С. И. ЕРШОВА*

#### МЕТОДЫ КОМПРОМІСНОГО ВИБОРА ІНТЕРВАЛА МОДЕЛЬНОГО ВРЕМЕНИ В ІМІТАЦІЙНИХ МОДЕЛЯХ

Рассматриваются процесс имитационного моделирования как одно из основных средств для изучения динамики функционирования реальных систем, в частности, сложных. Система может быть представлена совокупностью компонентов. Функционирование компонента представляется реализацией множества функциональных действий, которые представляются соответствующими активностями в виде пары: алгоритм выполнения функционального действия - продолжительность выполнения. Проблема отображения в ИМ одновременного или параллельного характера функционирования всех компонентов сложной системы решается введением модельного или системного времени. Основными методами введения модельного времени является метод фиксированного шага и метод переменного шага. В методе фиксированного шага важной проблемой является выбор величины интервала изменения модельного времени. Существующие рекомендации для выбора величины интервала изменения модельного времени имеют качественный характер и их использование позволяет повысить точность моделирования, но при этом растут затраты ресурса времени компьютера. Предложены при выборе величины интервала изменения модельного времени использовать количественные оценки значений критериев качества - точность и расходы ресурса времени компьютера. Обобщенный критерий представляется взвешенной суммой преобразований локальных критериев. Значения коэффициентов, на которые умножаются соответствующие преобразования, выражают предпочтения лица, принимающего решения, локальным критериям оптимальности. Приводится геометрическая интерпретация процесса определения компромиссной альтернативы на множестве эффективных альтернатив для различных случаев важности локальных критериев. Эти оценки позволяют обосновать характер изменения критериев качества для различных вариантов значений интервала изменения модельного времени и использовать их для выбора компромиссного варианта среди эффективных путем минимизации обобщенного критерия. Выбор компромиссного значения интервала изменения модельного времени реализуется в управляющей программе моделирования.

**Ключевые слова:** сложная система, имитационное моделирование, имитационные модели, модельное время, методы, компромиссный выбор.

*I. P. GAMAYUN, S. I. YERSHOVA*

#### METHOD OF COMPROMISE CHOICE OF INTERVAL OF MODEL TIME CHANGE IN IMITATION MODEL

The process of simulation is considered as one of the main means for studying the dynamics of functioning of real systems, in particular, complex ones. The system can be represented by a set of components. The functioning of a component is represented by the implementation of a set of functional actions, which are represented by the corresponding activities in the form of a pair: algorithm for performing a functional action - duration of execution.

© I. П. Гамаюн, С. І. Єршова, 2020

The problem of displaying the simultaneous or parallel nature of the functioning of all components of a complex system in the MI is solved by introducing model or system time. The main methods for introducing model time are the fixed step method and the variable step method. In the fixed-step method, an important problem is the choice of the value of the model time variation interval. The existing recommendations for choosing the value of the interval for changing the model time are of a qualitative nature and their use makes it possible to increase the accuracy of modeling, but at the same time the consumption of the computer time resource increases. It is proposed to use quantitative estimates of the values of quality criteria - the accuracy and expenditure of the computer time resource when choosing the value of the model time change interval. The generalized criterion is represented as a weighted sum of transformations of local criteria. The values of the coefficients by which the corresponding transformations are multiplied express the preferences of the decision-maker for the local optimality criteria. A geometric interpretation of the process of determining a compromise alternative on a set of effective alternatives for various cases of the importance of local criteria is given. These estimates make it possible to substantiate the nature of the change in the quality criteria for various variants of the values of the interval of change in the model time and to use them to select a compromise option among the effective ones by minimizing the generalized criterion. The choice of the compromise value of the model time variation interval is implemented in the control simulation program.

**Keywords:** complex system, simulation modeling, simulation models, model time, methods, compromise choice.

**Вступ.** Імітаційне моделювання (ІМ) в наш час є одним з основних інструментальних засобів для вивчення динаміки функціонування реальних систем різного виду, які, як правило, відносяться до класу складних систем [1–9]. При цьому система  $S$ , яка вивчається, представляється безліччю компонентів  $K_i$  ( $i \in \overline{1, n}$ ), тобто  $S^* = \{K_i | i \in \overline{1, n}\}$ . Функціонування компонента  $K_i$  ( $i \in \overline{1, n}$ ), представляється реалізацією деякої множини функціональних дій  $\{\Phi D_{ij} | j \in \overline{1, m_i}\}$  згідно встановленому порядку (последовності), що задається відносинами передування. Наприклад:

$$\forall i \in \overline{1, n} : \Phi D_{i1} < \Phi D_{i2} < \dots < \Phi D_{ij} < \dots < \Phi D_{im_i}.$$

В ІМ для вивчення динаміки функціонування системи  $S$  функціональні дії  $\{\Phi D_{ij} | i \in \overline{1, n}; j \in \overline{1, m_i}\}$  представляються відповідними активностями  $\{AK_{ij} | i \in \overline{1, n}; j \in \overline{1, m_i}\}$ . Кожна активність  $AK_{ij}$  наближено виражає відповідну функціональну дію  $\Phi D_{ij}$  та представляється у вигляді пари:

$$i \in \overline{1, n}; \forall j \in \overline{1, m_i} : AK_{ij} = \langle AL_{ij}, \tau_{ij} \rangle,$$

де  $AL_{ij}$  – алгоритм, що наближено відображає виконання функціональної дії  $\Phi D_{ij}$ , а  $\tau_{ij}$  – тривалість її виконання.

Динаміка функціонування кожної компоненти  $K_i$  ( $i \in \overline{1, n}$ ) описується зміною її стану в локальному часі  $t_i$  ( $i \in \overline{1, n}$ ). При цьому функціональні дії  $\{\Phi D_{ij} | j \in \overline{1, m_i}\}$  компоненти  $K_i$  ( $i \in \overline{1, n}$ ) в ІМ реалізуються відповідними активностями  $\{AK_{ij} | j \in \overline{1, m_i}\}$ , так, що з початку при фіксованому значенні локальної координати  $t_i$  ( $i \in \overline{1, n}$ ) виконується алгоритм  $AL_{ij}$  активності  $AK_{ij}$ , а потім локальна координата  $t_i$  змінюється на величину  $\tau_{ij}$ . У результаті в ІМ відбувається подія  $C_{ij}$  в момент локального часу  $t_{ij}$ . Змістовність події  $C_{ij}$  означає, що активність  $AK_{ij}$  реалізована в ІМ.

Надалі моделюється виконання наступної функціональної дії  $\Phi D_{ij+1}$  так, що у фіксований момент локального часу  $t_{ij}$  виконується алгоритм  $AL_{ij+1}$  активності  $AK_{ij+1}$ , а потім змінюється локальний час  $t_i$  на величину  $\tau_{ij+1}$ . В момент локального часу  $t_{ij+1} = t_{ij} + \tau_{ij+1}$  в ІМ відбувається ще одна подія  $C_{ij+1}$ , що відображає завершення функціональної дії  $\Phi D_{ij+1}$ .

Динаміка функціонування компоненти  $K_i$  ( $i \in \overline{1, n}$ ) в ІМ буде представлена повністю в момент локального часу  $t_{im_i}$ , коли настає подія  $C_{im_i}$ , яка відображає завершення останньої функціональної дії  $\Phi D_{im_i}$  компоненти, яка розглядається.

В складній системі  $S = \{K_i | i \in \overline{1, n}\}$  всі її складові компоненти функціонують одночасно або паралельно. У ІМ основним засобом обробки інформації є комп'ютер, який в кожний момент часу обробляє інформацію тільки одного з компонентів, що зводиться до виконання деякого алгоритму  $AL_{ij}$  та зміну значення відповідної локальної координати  $t_i$ . Таким чином, виникає проблема відображення в ІМ одночасного або паралельного характеру функціонування всіх компонентів складної системи.

Ця проблема вирішується введенням модельного або системного часу, який зазвичай позначається як  $t_0$ . За допомогою цього часу в ІМ встановлюється порядок обробки інформації в різних компонентах системи комп'ютером, що працює послідовно. Основними методами введення модельного часу є метод фіксованого кроку або постійного інтервалу та метод змінного кроку або кроку до наступної події. Їх ще інакше називають принципом  $\Delta t$  та принципом  $\delta z$  відповідно [2, 7].

Використання кожного з цих методів в ІМ істотно залежить від характеру розподілу моментів часу  $t_{ij}$  ( $i \in \overline{1, n}; j \in \overline{1, m_i}$ ).

**Постановка задачі.** В методі фіксованого кроку або постійного інтервалу важливою проблемою є вибір величини інтервалу зміни модельного часу  $\Delta t$ .

Існуючі рекомендації для вибору мають якісний характер і зводяться, як правило, до того що зменшення  $\Delta t$  дозволяє підвищити точність моделювання, але при цьому зростають витрати ресурсу часу комп'ютера.

В статті розглядаються кількісні оцінки значень двох використовуваних при виборі критеріїв якості - точності і витрат ресурсу часу комп'ютера для різних варіантів значень  $\Delta t$ . Ці оцінки дозволяють більш обґрунтовано висловити характер зміни зазначених критеріїв для різних варіантів значень  $\Delta t$  та використовувати їх для вибору компромісного варіанту.

**Метод вибору.** Вибір компромісного значення  $\Delta t$  реалізується в управляючій програмі моделювання (УПМ), що є однією з частин структурного визначення ІМ у вигляді кортежу [2, 7]:

$$IM = \{ \{ (AK_{ij} | i \in \overline{1, n}; j \in \overline{1, m_i}) \}, \text{ УПМ} \}.$$

УПМ в зазначеному визначенні ІМ забезпечує взаємодію активностей  $AK_{ij}$  ( $i \in \overline{1, n}; j \in \overline{1, m_i}$ ) і виконує організуючі функції:

- зміну модельного часу  $t_0$  на величину  $\Delta t$ ;
- зміну локальних координат  $t_i$  на  $\tau_{ij}$ ;
- запуск на виконання алгоритмів  $AL_{ij}$ ;
- перевірку умов закінчення імітації, що

виражається у вигляді досягнення деякого значення модельного часу, або у вигляді виникнення деякої події.

Очевидно, що реалізація зазначених функцій залежить від значення  $\Delta t$ . Модельний час  $t_0$  згідно методу постійного інтервалу, змінюється на величину  $\Delta t$  і набуває значення:

$$t_0 \in \{0, \Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots\} = \{k \Delta t \mid k \in 0, 1, 2, 3, \dots\}.$$

Нехай  $k = 1$ . В БД виявляються ті значення  $t_{i1}$ , які належать інтервалу  $(0, \Delta t)$ , тобто інтервалу, який охоплює перехід від попереднього до наступного моменту модельного часу  $t_0$ . Оскільки механізм зміни поточного значення  $j$  не вмикався, то  $j = 1$  і розглядається чи належать значення  $t_{i1}$  інтервалу  $(0, \Delta t)$ .

Через  $I_1$  позначається підмножина індексів компонентів  $K_i$  ( $i \in \overline{1, n}$ ), для яких:

$$\forall i \in I_1; t_{i1} \in (0, \Delta t).$$

Це означає, що в інтервалі  $(0, \Delta t)$ , відбуваються події  $C_{i1}$  ( $i \in I_1$ ) завершення виконання перших функціональних дій  $\Phi D_{i1}$  ( $i \in I_1$ ) в різних компонентах складної системи.

Як правило, значення  $t_{i1}$  ( $i \in I_1$ ) різні і розподіляються певним чином в інтервалі  $(0, \Delta t)$ . Проте в ІМ передбачається, що всі ці моменти однакові та їх значення прирівнюються до значення правого кінця інтервалу, тобто  $\forall i \in I_1, t_{i1} = \Delta t$ .

Таким чином, допускається похибка моделювання  $F_1$ , яка на першому інтервалі  $(0, \Delta t)$ , оцінюється величиною  $F_1 = \sum_{i \in I_1} (\Delta t - t_{i1})$ .

У момент модельного часу  $t_0 = \Delta t$  вироблюється сигнал для УПМ на обробку інформації компонент  $K_i$  ( $i \in I_1$ ).

Перш за все включається механізм зміни поточного значення індексу  $j$  так, що виконується умова:  $\forall i \in I_1; j = j + 1$ .

Потім реалізується ініціалізація активностей  $AK_{ij}$  ( $i \in I_1$ ), що передбачає послідовне виконання алгоритмів  $AL_{ij}$  ( $i \in I_1$ ).

Локальні координати  $t_i$  ( $i \in I_1$ ) змінюються так, що моменти виникнення подій  $C_{ij}$  ( $i \in I_1$ ) визначаються як  $\forall i \in I_1, t_{ij} = \Delta t + \tau_{ij}$ , а отримані значення вносяться в БД і запам'ятовуються. Перевіряється умова завершення імітації. Якщо вона не виконується, то процес моделювання продовжується. Значення  $k$  збільшується так, що  $k = 2$ .

У БД виявляються значення  $t_{ij}$ , які належать наступному інтервалу модельного часу  $(\Delta t, 2\Delta t)$ . Визначається множина індексів  $I_2$  така, що

$$\forall i \in I_2, t_{ij} \in (\Delta t, 2\Delta t).$$

На інтервалі  $(\Delta t, 2\Delta t)$ , який розглядається, відбуваються події  $C_{ij}$  ( $i \in I_2$ ), які завершують функціональні дії  $\Phi D_{ij}$  ( $i \in I_2$ ) в різних компонентах складної системи  $S$ .

Всі моменти  $t_{ij}$  ( $i \in I_2$ ) в ІМ вважаються рівними значенню правого кінця інтервалу, що розглядається, тобто  $\forall i \in I_2, t_{ij} = 2\Delta t$ .

Припущення призводить до похибки, значення якої оцінюється величиною:

$$F_{12} = \sum_{i \in I_2} (2\Delta t - t_{ij}),$$

де  $t_{ij}$  розподіляються в межах інтервалу  $(\Delta t, 2\Delta t)$ .

В момент модельного часу  $t_0 = 2\Delta t$  УПМ починає обробку інформації компонент  $K_i$  ( $i \in I_2$ ).

Як і раніше, включається спочатку механізм зміни поточного значення індексу  $j$  так, що  $\forall i \in I_2, j = j + 1$ .

Ініціалізація активностей  $AK_{ij}$  ( $i \in I_2$ ) зводиться до послідовного виконання алгоритмів  $AL_{ij}$  ( $i \in I_2$ ).

Моменти виникнення подій  $C_{ij}$  ( $i \in I_2$ ) визначаються як  $\forall i \in I_2, t_{ij} = 2\Delta t + \tau_{ij}$ .

Отримані значення  $t_{ij}$  ( $i \in I_2$ ) вносяться до БД та запам'ятовуються.

Перевіряється умова завершення імітації  $i$ , якщо вона не виконується, то збільшується значення  $k$ , що означає перехід до наступного моменту модельного часу.

В загальному випадку, коли здійснюється перехід до моменту модельного часу  $k\Delta t$ , в БД виявляються значення  $t_{ij}$  які належать черговому інтервалу модельного часу  $((k-1)\Delta t, k\Delta t)$ .

Визначається множина індексів  $I_k$  така, що  $\forall i \in I_k, t_{ij} \in ((k-1)\Delta t, k\Delta t)$ .

На інтервалі  $((k-1)\Delta t, k\Delta t)$  відбуваються події  $C_{ij}$  ( $i \in I_k$ ). Як і раніше, всі моменти  $t_{ij}$  ( $i \in I_k$ ), в яких відбуваються події  $C_{ij}$  ( $i \in I_k$ ) прирівнюються до значення правого кінця розглянутого інтервалу, тобто  $\forall i \in I_k, t_{ij} = k\Delta t$ .

Визначається величина оцінки похибки на розглянутому інтервалі:

$$F_{1k} = \sum_{i \in I_k} (k\Delta t - t_{ij}).$$

УПМ в момент модельного часу  $t_0 = k\Delta t$  починає обробку інформації, яка відноситься до реалізації функціональних дій в компонентах  $K_i$  ( $i \in I_k$ ).

Змінюється поточне значення індексу  $j$  тих активностей, які ініціалізуються в розглянутому інтервалі так, що  $\forall i \in I_k, j = j + 1$ .

Ініціалізація активностей  $AK_{ij}$  ( $i \in I_k$ ) передбачає послідовне виконання відповідних алгоритмів  $AL_{ij}$  ( $i \in I_k$ ) і визначення моментів виникнення подій  $C_{ij}$  ( $i \in I_k$ ):

$$\forall i \in I_k, t_{ij} = k\Delta t + \tau_{ij}.$$

У результаті БД поповнюється значеннями  $t_{ij}$  ( $i \in I_k$ ).

Черговий раз перевіряється умова завершення імітації. Якщо вона не виконується, то процес моделювання продовжується. В іншому випадку, завершується.

Нехай в деякий момент модельного часу  $t_0 = k'\Delta t$  утворюється така множина  $I$ , що  $\forall i \in I_k, j = m_i$ .

Оскільки всі індекси  $i$ , для яких зазначена умова виконується, повинні бути виключені із множини  $I$ , то отримуємо, що  $I = \emptyset$ . Це означає, що ініціалізовані всі активності  $AK_{ij}$  ( $i \in \overline{1, n}, j \in \overline{1, m_i}$ ), процес моделювання динаміки функціонування складної системи  $S$  завершений і він може бути відповідним чином представлений. На рис. 1 наведено приклад такого представлення для варіанта, коли  $\Delta t = 8$ .

Вихідні дані розглянутого прикладу такі:

$$\begin{aligned}
 S &= \{K_i | i \in \overline{1, 3}\}, \\
 K_1 &= \{\Phi D_{ij} | j \in \overline{1, 4}\}, \\
 \Phi D_{11} &< \Phi D_{12} < \Phi D_{13} < \Phi D_{14}, \\
 K_2 &= \{\Phi D_{2j} | j \in \overline{1, 3}\}, \\
 \Phi D_{21} &< \Phi D_{22} < \Phi D_{23}, \\
 K_3 &= \{\Phi D_{3j} | j \in \overline{1, 3}\}, \\
 \Phi D_{31} &< \Phi D_{32} < \Phi D_{33}, \\
 \tau_{11} &= 5, \tau_{12} = 8, \tau_{13} = 9, \tau_{14} = 7, \\
 \tau_{21} &= 10, \tau_{22} = 7, \tau_{23} = 9, \\
 \tau_{31} &= 8, \tau_{32} = 12, \tau_{33} = 10.
 \end{aligned}$$

Шляхом реалізації вказаних дій ІМ, покажімо для випадку, коли  $\Delta t = 8$ , динаміку функціонування складної системи у вигляді сукупності паралельних процесів функціонування складових компонент системи  $K_i$  ( $i \in \overline{1, 3}$ ). При цьому кожний з процесів відображає виконання апроксимуючих функціональних дій  $\Phi D_{ij}$  алгоритмів  $AL_{ij}$ . Це призводить до зміни стану компоненти у відповідних локальних часових координатах  $t_i$ .

Отримане на основі ІМ представлення динаміки функціонування складної системи дозволяє отримати повну оцінку похибки моделювання для заданого значення  $\Delta t$ :

$$F_1 = \sum_{k \in \overline{i, k'}} F_{1,k} = \sum_{k \in \overline{i, k'}} \sum_{i \in I_k} (k\Delta t - t_{ij}),$$

де  $t_{ij} \in ((k-1)\Delta t, k\Delta t)$ .

Як зазначалося, іншою оцінкою якості моделювання є витрати ресурсу часу комп'ютера на отримання зазначеного представлення динаміки. Непрямою оцінкою цих витрат з урахуванням групової обробки інформації різних компонент в момент модельного часу може бути число звернень до УПМ. Цю оцінку позначимо як  $F_2$ .

Очевидно, що  $F_2 = k'$ , оскільки в момент модельного часу  $t_0 = k'\Delta t$  забезпечується завершення ініціалізації всіх активностей  $AK_{ij}$  ( $i \in \overline{1, n}, j \in \overline{1, m_i}$ ).

Для розглянутого прикладу  $F_1 = 21$ ,  $F_2 = 4$ . При цьому  $F_1$  вимірюється в одиницях часу, а  $F_2$  – безрозмірна величина, яка за умови реалізації вимірювання витрат ресурсу часу комп'ютера також може вимірюватися в одиницях часу.

В задачах вибору або прийняття рішення різні значення  $\Delta t$  є варіантами альтернатив  $\Delta t_l$  ( $l \in L$ ), де  $l$  – індекс альтернативи, а  $L$  – загальна кількість альтернатив. Оцінки  $F_1$  і  $F_2$  є критеріями оптимальності або цільовими функціями, які необхідно мінімізувати в результаті вибору альтернативи [10–12].

Значення  $F_1$  і  $F_2$ , що отримані в результаті імітації для розглянутого прикладу і відповідають відповідним різним альтернативам  $\Delta t_l$  ( $l \in \overline{1, L}$ ), наведені в табл. 1.

Аналіз результатів у табл. 1 з урахуванням мінімізації критеріїв  $F_1$  і  $F_2$  показує, що альтернативи  $l = 3, 4$ , для яких  $F_2 = 5$ , а  $F_1 = 19$  і  $F_1 = 25$  відповідно можуть не враховуватися в задачі вибору, оскільки є альтернатива  $l = 2$ , для якої

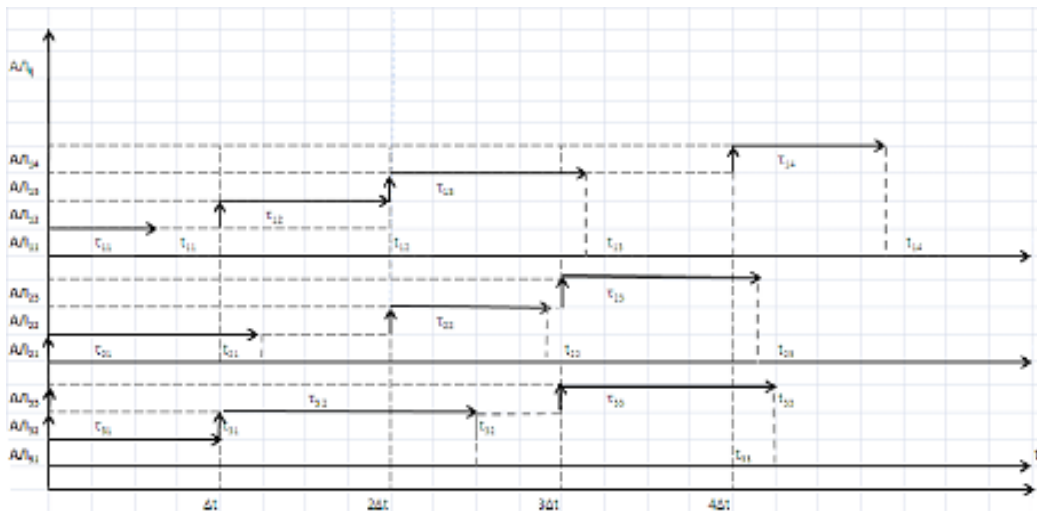


Рис. 1. Наочне представлення результатів ІМ динаміки функціонування системи  $S = \{K_i | i \in \overline{1, 3}\}$

$F_2 = 5$ , як і для  $l = 3, 4$ , але при цьому  $F_1 = 11$ , що менше ніж для  $l = 3, 4$ .

Таблиця 1 – Значення локальних критеріїв на множині альтернатив

$l$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\Delta t_l$	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$F_1$	9	11	19	25	21	22	22	29	25	32	39
$F_2$	7	5	5	5	4	3	3	3	3	3	3

З цієї ж причини альтернативи  $l = 8, 9, 10, 11$  для яких  $F_2 = 3, F_1 = 29, 25, 32, 39$  відповідно, можуть не враховуватися при виборі, оскільки є альтернативи  $l = 6, 7$  з тим самим значенням для  $F_3$ , так як  $F_1 = 22$ . Крім цього, оскільки альтернативи  $l = 6, 7$  рівнозначні, то для вибору може використовуватися одна з них, наприклад  $l = 6$ .

Таким чином, допустима множина альтернатив для рішення задачі вибору складають альтернативи  $l = 1, 2, 5, 6$ . Для визначення компромісної альтернативи на множині локальних критеріїв  $\{F_1, F_2\}$  використовуються перетворення:

$$W_1(l) = \frac{F_1(l) - F_{1min}}{F_{1max} - F_{1min}},$$

$$W_2(l) = \frac{F_2(l) - F_{2min}}{F_{2max} - F_{2min}},$$

де  $F_{1min}, F_{2min}, F_{1max}, F_{2max}$  – відповідно мінімальні і максимальні значення критеріїв  $F_1, F_2$ , які мінімізуються на множині допустимих альтернатив  $l = 1, 2, 5, 6$ .

Розподіл альтернатив у двовірному просторі значень функцій  $W_1$  і  $W_2$  показано на рис. 2, на якому у вигляді темних кіл представляються ефективні альтернативи. Компромісна альтернатива визначається серед ефективних шляхом мінімізації узагальненого критерію:

$$W(l) = \sum_{r \in \overline{1, R}} \alpha_r W_r(l),$$

де  $\forall r \in \overline{1, R}, \alpha_r \geq 0, \sum_{r \in \overline{1, R}} \alpha_r = 1$ .

Значення  $\alpha_r \geq 0 (r \in \overline{1, R})$  показують переваги особи, що приймає рішення, локальним критеріям оптимальності.

На рис. 2 стрілкою показується напрямок переміщення лінії рівня узагальненого критерію  $W(l) = \alpha_1 W_1(l) + \alpha_2 W_2(l) = b$  при його мінімізації в разі, коли локальні критерії рівнозначні ( $b \rightarrow \min$ ), коли локальні критерії рівноправні ( $\alpha_1 = \alpha_2$ ).

У цьому випадку ефективна альтернатива  $l = 2$  вибирається як компромісна. Інша ефективна альтернатива може бути обрана в якості компромісної, якщо змінити орієнтацію лінії рівня в просторі функцій  $W_1, W_2$  шляхом змін значень  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$ , які виражають важливість відповідних функцій для особи, що приймає рішення.

**Висновки.** Таким чином, проведено аналіз проблеми вибору величини інтервалу зміни модельного часу в методі фіксованого кроку, що визначає порядок обробки інформації комп'ютером при реалізації імітаційного моделювання процесу функціонування складної системи, яка складається багатьох паралельно працюючих компонент.

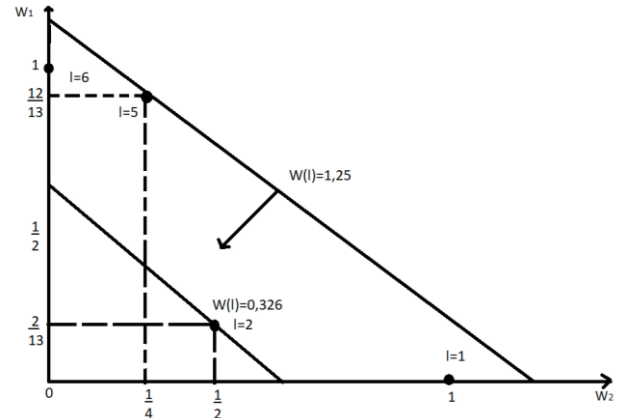


Рис. 2. Розподіл ефективних альтернатив і пошук серед них компромісної

Було показано, що існуючі рекомендації мають лише якісний характер.

У статті запропоновано метод вибору, який заснований на розрахунку кількісних оцінок значень двох критеріїв якості: точності та витрат ресурсу комп'ютеру для різних значень інтервалу зміни модельного часу. Ці оцінки дозволяють більш обґрунтовано показати характер зміни критеріїв, які розглядаються для різних варіантів значень інтервалу зміни модельного часу і використовувати їх для вибору компромісного варіанту.

#### Список літератури

1. Шеннон Р. *Имитационное моделирование систем – искусство и наука*. Москва: Мир, 1978. 352 с.
2. Максимей И. В. *Имитационное моделирование на ЭВМ*. Москва: Радио и связь, 1988. 232 с.
3. Литвинов В. В., Марьянович Т. П. *Методы построения имитационных систем*. Киев: Наукова думка. 120 с.
4. Гульятев О. К. *Имитационное моделирование в среде Windows: практическое пособие*. Санкт-Петербург: Корона принт, 1999. 288 с.
5. Томашевський В. М., Жданова О. Г. *Имитационное моделирование в среде GPPS*. Москва: Бестселлер, 2003. 416 с.
6. Кисилева М. В. *Имитационное моделирование в среде AnyLogic: Учебно-методическое пособие*. Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2009. 88 с.
7. Гамаюн І. П., Чередніченко О. Ю. *Моделювання систем: навчальний посібник для студентів спеціальностей «Програмна інженерія», «Комп'ютерні науки»*. Харків: Факт, 2015. 228 с.
8. Гамаюн И. П. *Имитационное моделирование процессов сборки. Электронное моделирование*. 2000, № 1. С. 100–106.
9. Гамаюн И. П. *Разработка имитационных моделей на основе сетей Петри: Учебное пособие*. Харьков: НТУ «ХПИ», 2002. 143 с.
10. Гамаюн И. П. *Определение компромиссной альтернативы в одной задаче структурного синтеза. Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. Харьков: НАКУ «ХАИ», Торнадо, 2001, № 10. С. 3–10.
11. Михалевич В. С., Волкович В. Л. *Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем*. Москва: Наука, 1982. 288 с.

12. Гамаюн И. П., Ямшанов И. С. Многокритериальная оптимизация на множестве технологических схем сборки. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2003, № 4. С. 27–30.

#### References (transliterated)

- Shannon R. *Imitacionoe modelirovanie sistem – iskusstvo i nauka* [Systems Simulation - Art and Science]. Moscow, Mir Publ., 1978. 352 p.
- Maxcimey I. V. *Imitacionoe modelirovanie na EVM* [Computer simulation]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1988. 232 p.
- Litvinov V. V., Maraynovich T. P. *Metodu postroeniya imitacionnykh sistem* [Methods of constructing imitation systems]. Kiev, Naykova dymka Publ., 1991. 120 p.
- Gyltyaev O. K. *Imitacionoe modelirovanie v srede Windows: prakticheskoe posobie* [Windows Simulation: A Practical Guide]. St. Petersburg, Koronaprint Publ., 1999. 288 p.
- Tomashevski V. M., Jdanova O. G. *Imitacionoe modelirovanie v srede GPPS* [Simulation modeling in the GPPS environment]. Moscow: Bestseller Publ., 2003. 416 p.
- Kicileyva M. V. *Imitacionoe modelirovanie v srede AnyLogic: Uchebno-metodicheskoe posobie* [Simulation modeling in the AnyLogic environment: Educational-methodological guide]. Ekaterinburg, UGTU – UPI Publ., 2009. 88 p.
- Gamaun I. P., Cherednichenko O. Y. *Modeluyannyy sistem: navchalniy posibnik dlya studentiv specialnosti "Programma inzhneriy", "Kompyutri nauki"* [System model: a basic guide for students of specialties "Programming Engineering", "Computers of Science"]. Kharkiv: Fact Publ., 2015. 228 p.
- Gamaun I. P. *Imitacionoe modelirovanie procesov sborki* [Simulation of assembly processes]. *Electronic modeling*. 2000, issue 4, pp. 100–106.
- Gamaun I. P. *Razrabotka imitacionnykh modeley na osnove setey Petri: utchebnoe posobie* [Development of simulation models based on Petri nets: a tutorial]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2002. 143 p.
- Gamaun I. P. *Opredelenie kompromisnoy alternativy v odnoy zadatke strukturnogo synteza* [Determination of a compromise alternative in one structural synthesis problem]. *Opetchnologies*. Kharkiv, NAU "KhAI" Publ., 2001, issue 10, pp. 3–10.
- Myhalevich V. S., Volkovich V. L. *Vychislitelnye metody issledovaniya i proektirovaniya slozhnykh sistem* [Computational methods of research and design of complex systems]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 288 p.
- Gamaun I. P., Ymshanov I. S. *Mnogokriterialnaya optimizatsiya na mnozhestve tehnologicheskikh shem sborki* [Multicriteria optimization of technological assembly schemes]. *Eastern European Journal of Advanced Technologies*. 2003, issue 4, pp. 27–30.

Надійшла (received) 05.09.2020

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Гамаюн Ігор Петрович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2009-4658>; e-mail: [ipgamaun@kpi.kharkov.ua](mailto:ipgamaun@kpi.kharkov.ua)

**Ершова Світлана Іванівна** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3893-117X>; e-mail: [svetlana.ershova.2016@gmail.com](mailto:svetlana.ershova.2016@gmail.com)

**Гамаюн Ігор Петрович** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0009-5527>; e-mail: [ipgamaun@kpi.kharkov.ua](mailto:ipgamaun@kpi.kharkov.ua)

**Ершова Светлана Ивановна** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший преподаватель кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3893-117X>; e-mail: [svetlana.ershova.2016@gmail.com](mailto:svetlana.ershova.2016@gmail.com)

**Gamaun Igor Petrovich** – doctor of technical sciences, professor, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», professor of the department of software engineering and management information technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2009-4658>; e-mail: [ipgamaun@kpi.kharkov.ua](mailto:ipgamaun@kpi.kharkov.ua)

**Yershova Svitlana Ivanivna** – National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Senior Lecturer in Department of Software Engineering and Management Information Technology; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3893-117X>; e-mail: [svetlana.ershova.2016@gmail.com](mailto:svetlana.ershova.2016@gmail.com)