

РОЗДІЛ IV. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004.942:004.021

Володимир Казимир, Аліна Посадська

ДИНАМІЧНА ОЦІНКА РИЗИКУ ВИКОНАННЯ ПЛАНУ РОБІТ МЕТОДОМ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Владимир Казимир, Алина Посадская

ДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РИСКА ВЫПОЛНЕНИЯ ПЛАНА РАБОТ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Volodymyr Kazymyr, Alina Posadska

DYNAMIC RISK ASSESSMENT OF THE WORK PLAN IMPLEMENTATION BY SIMULATION MODELING

Сьогодні при мережевому плануванні в режимі реального часу і невизначеності необхідно враховувати ризики, щоб мінімізувати втрати. У цій статті розглянуто останні дослідження методів визначення ризику. Представлено й обґрунтовано новий підхід до оцінювання ризику в мережевому плануванні методом імітаційного моделювання, головною відмінністю якого є використання теорії ігор разом з математичним апаратом темпоральних логік. Також представлена формалізація і семантика запропонованого методу оцінки ризику.

Такий метод дозволяє розрахувати і спрогнозувати ймовірність виконання плану робіт для систем мережевого планування в режимі реального часу.

Ключові слова: мережеве планування, система мережевого планування в режимі реального часу, методи оцінювання ризику, E-мережі.

Рис.: 5. Табл.: 1. Бібл.: 17.

В настоящее время при сетевом планировании в режиме реального времени и неопределенности необходимо учитывать риски, чтобы минимизировать потери. В данной статье рассмотрены последние исследования методов определения риска. Представлен и обоснован новый подход к оценке риска в сетевом планировании методом имитационного моделирования, главным отличием которого является использование теории игр вместе с математическим аппаратом темпоральных логик. Также представлена формализация и семантика предложенного метода оценки риска.

Данный метод позволяет рассчитать и спрогнозировать вероятность выполнения плана работ для систем сетевого планирования в режиме реального времени.

Ключевые слова: сетевое планирование, система сетевого планирования в режиме реального времени, методы оценки риска, E-сети.

Рис.: 5. Табл.: 1. Библ.: 17.

Currently, it is necessary to account risks during network planning in real time mode and uncertainty to minimize losses. Recent studies of risk assessment methods are reviewed in the article. A new approach to risk assessment in the network planning by simulation modeling method is presented and substantiated. The main difference is the usage of game theory with the mathematical apparatus of temporal logics. Also formalization and semantics of the proposed risk assessment method is provided.

This method allows calculation and forecast the probability of plan implementation for the network planning systems in real time mode.

Key words: network planning, network planning system in real time mode, methods of risk assessment, E-nets.

Fig.: 5. Tabl.: 1. Bibl.: 17.

Постановка проблеми. В умовах сьогодення під час виконання плану робіт умови невизначеності зобов'язують враховувати ризики. У мережевому плануванні під ризиком розуміється результат настання непередбачених подій, внаслідок яких роботи виконуються не вчасно, що веде до затягування всього виробничого процесу, або часу виконання проекту, та до непередбачених втрат фінансових, часових і людських ресурсів [1]. Отже, реалізація будь-якого плану значною мірою залежить від його надійності, яка визначається ймовірністю виконання закладених у план техніко-економічних показників [2].

Ще більші вимоги висуваються до планування робіт у реальному часі. Взагалі задача мережевого планування в реальному часі [3] полягає в тому, щоб забезпечити виконання проекту при заданих обмеженнях, які повинні перевірятися у процесі виконання

плану. В цьому випадку задача планування багато в чому схожа на задачу динамічної верифікації [4], під час вирішення якої часто використовуються різновиди темпоральної логіки [5] для формального визначення обмежень щодо умов функціонування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У науковій літературі останні дослідження методів оцінювання надійності та ризиків відзначено в роботах Я. Д. Гельруда, В. І. Воропаєва, І. В. Дьомкіна, Л. А. Астаніної, Л. В. Кіриної та ін. [1; 2; 6–11]. Розглянемо деякі з них з погляду використання у мережевому плануванні в реальному часі.

Метод, заснований на орієнтованих графах [1] – модель процесу реалізації проекту розглядається у вигляді циклічної альтернативної мережевої моделі (ЦАСМ). За допомогою ЦАСМ можна враховувати альтернативний характер як технології виробництва робіт, так і способів призначення ресурсів на роботи, проводити їх оптимальне призначення з оптимальними темпами використання. Але цей метод враховує тільки послідовні роботи й апріорну оцінку ризиків до експерименту.

Метод пошуку оптимальної стратегії в межах марківського процесу прийняття рішень з немарківською винагородою [9] включає завдання перевірки властивостей системи, виражених за допомогою імовірнісної темпоральної логіки. Однак цей метод не підходить для вирішення поставленої у статті задачі, оскільки в загальному випадку процесу планування є немарківськими.

Генетичні алгоритми. Суть методу полягає в тому, що алгоритм дозволяє досить швидко і надійно знаходити серед величезної кількості можливих варіантів реалізації проекту такі, де термін або фінансові показники мінімальні при раніше заданих умовах [10]. Спочатку будується модель процесу, готуються і вводяться вхідні дані (середня тривалість окремих процесів, діапазон розкиду в меншу і більшу сторону та закон розподілу). Закони розподілу також задаються для решти параметрів. Основний обсяг вхідної інформації вводиться за результатами аналізу вхідних даних. Після цього задаються умови розгалуження процесу та вводиться інформація щодо модифікації вхідних умов. У результаті на виході отримується не одна величина шуканого параметра, наприклад, термін завершення проекту, а розподіл можливих значень. Недоліком такого методу є відсутність прогнозування виконання плану робіт.

Метод, заснований на використанні альтернативної стохастичною мережевої моделі [7], включає аналіз стохастичного графа за допомогою імітаційної моделі і являє собою комбінацію алгоритму Форда – Фалкерсона для знаходження максимальної довжини шляху, логічно виправданих розрахунків, а також елементів методу статистичних випробувань (Монте-Карло). Початковий етап аналізу графа складається з моделювання топології графа й обчислення його тимчасових характеристик. Моделювання топології мережі зводиться до вибору альтернативних шляхів. У результаті отримується конкретна реалізація стохастичного графа – детермінованої мережі. Недоліком такого методу є те, що оцінювання виконання йде до початку проекту, а в реальному часі - не працює.

Метод з використанням теорії ігор [11]. Використовується модель «гра з природою». Нехай розглядається така економічна система, як підприємство. У ній є керуюча система, яка є суб'єктом управління, що впливає на об'єкти за допомогою альтернативних рішень в умовах невизначеності. Це призводить до зміни стану керованої системи тією чи іншою мірою. За допомогою функції виграшу знаходиться найкраща альтернатива, або оптимальна стратегія, за одним із критеріїв (максимакса, Вальда, Севіджа, Гурвіца, Лапласа), або ж використовується багатокритеріальна методика оцінювання ризиків. Для прийняття рішення інформація, що аналізується, концентрується у платіжній матриці та в матриці ризиків. Особам, які приймають рішення, пропонується розглядати декілька, а то і всі застосовані для аналізу критерії, зводити їх в єдину таблицю і

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

піддавати ретельному аналізу. Як правило, логічно вдається знайти найкращий варіант рішення.

Узагальнюючи результати наведеного аналізу, можна зробити висновок, що вищевказані методи потребують удосконалення, оскільки не враховують перетини часових інтервалів та зміни станів у процесі виконання робіт з одночасним аналізом альтернативних шляхів у плані робіт.

Метою статті є обґрунтування нового методу оцінювання ризику в процесі мережевого планування в режимі реального часу, який базується на використанні імітаційного моделювання у поєднанні з математичним апаратом темпоральних логік у межах вирішення статистичної гри.

Імітаційна модель плану робіт.

Оскільки задача мережевого планування в реальному часі полягає в тому, щоб забезпечити виконання проекту при заданих обмеженнях з урахуванням причинно-наслідкових зв'язків у часі, то для її вирішення найкраще підходить метод імітаційного моделювання. Саме імітаційна модель плану робіт здатна повно відтворити подібний процес, причому з урахуванням невизначеностей, які стосуються як часу виконання робіт, так і використання ресурсів.

Процес побудови імітаційної моделі зазвичай проходить у три етапи, які зводяться до створення концептуальної, формалізованої та програмної моделей.

Концептуальна модель. Метою створення концептуальної моделі є визначення переліку та послідовності робіт, а також їх параметрів, до яких відносяться терміни та умови виконання робіт з відповідними законами їх розподілу, а також певні характеристики необхідних ресурсів та обмеження для них.

Приклад концептуальної моделі мережевого графіка плану робіт наведено на рис. 1.

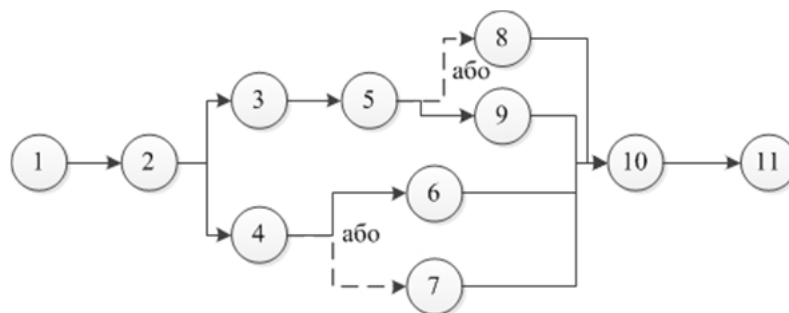


Рис. 1. Концептуальна модель мережевого графіка плану робіт

До вихідної інформації відносяться параметри, що характеризують окремі роботи, загальні вимоги щодо ресурсів та альтернативні шляхи, які показані пунктирною лінією. Ця концептуальна модель є основою для подальшого формального визначення задачі.

Формалізована модель. Для побудови формалізованої моделі будемо використовувати математичний апарат управляючих Е-мереж – Control E-net (CEN) [12], які є різновидом Е-мереж – потужного розширення мереж Петрі. Особливість управляючих Е-мереж полягає у можливості динамічної зміни управляючих функцій переходів, при цьому вирішальна функція, функції активації, затримки і перетворення є функціями часу, здатними змінюватися у процесі виконання мережі.

Формально CEN задається множиною:

$$CEN = (P, T, F, V, U, M_0),$$

де $P = \{P_S, P_R\}$ – кінцева непорожня множина позицій, що складається з непересічних підмножин P_S – простих позицій і P_R – вирішальних позицій, $P_S \cap P_R = \emptyset$; множина

простих позицій може містити підмножину вхідних позицій $P_{in} \subseteq P_S$ і підмножину вихідних позицій, які називаються граничними, допускається $P_{in} = \emptyset$ і $P_{out} = \emptyset$, $P_{in} \cap P_{out} = \emptyset$;

T – кінцева непорожня множина переходів, яка може складатися з переходів п'яти типів $\{ "T_T", "T_F", "T_J", "T_X", "T_Y" \}$, так званих звичайних Е-мереж, та двох типів додаткових переходів-черг $"T_{QL}"$ та $"T_{QF}"$, $T \cap P = \emptyset$;

$F : P \times T \cup T \times P \rightarrow \{0,1\}$ – функція інцидентності;

$V = V_I \cup V_O$ – кінцева множина змінних мережі, що складається з непересічних підмножин V_I – вхідних та V_O – вихідних сигналів, $V_I \cap V_O = \emptyset$;


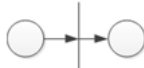
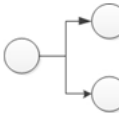
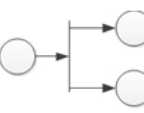
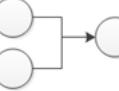
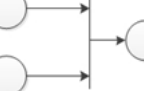
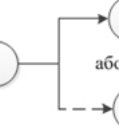
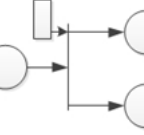
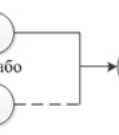
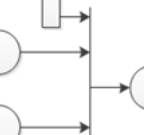
$U = \{r, \sigma, \alpha, \tau, z\}$ – множина керуючих відображень, які визначають правила спрацьовування переходів;

$M_0 : P \rightarrow \{0,1\}$ – функція початкового маркування, що задає присутність або відсутність позначок у позиціях.

Базовий набір переходів СЕН, крім додаткових переходів-черг, традиційно, як це визначено для Е-мереж [13], реалізує п'ять основних типів взаємодії паралельно-послідовних процесів. Саме за допомогою цих переходів можуть бути формально визначені особливості концептуальної моделі мережевого графіка, як це показано в табл. 1.

Таблиця 1

Базовий набір переходів

Вузол плану робіт	Е-мережевий вузол	Семантика
		T-перехід («виконання роботи»). Перехід спрацьовує за наявності мітки у вхідній позиції і відсутності її у вихідній позиції
		F-перехід («розгалуження шляхів»). Спрацьовує за наявності мітки у вхідній позиції і відсутності міток у вихідних позиціях
		J-перехід («злиття шляхів»). Перехід спрацьовує при наявності міток в обох вхідних позиціях і відсутності у вихідній
		X-перехід («перемикач між альтернативними шляхами»). Напрямок розвитку процесу визначається значення вирішальної процедури R.
		Y-перехід («вибір»). Y-перехід здатний відображати умови продовження процесу у випадку злиття декількох шляхів. Корисний для відображення зворотних зв'язків, які можуть допускатися у плані

Формалізована модель у вигляді управляючої Е-мережі для мережевого графіка, наведеного на рис. 1, представлена на рис. 2.

Програмна модель. Для побудови програмної моделі мережевого графіка будемо використовувати систему розподіленого імітаційного моделювання EMS [14], створену на основі математичного апарату управляючих Е-мереж. Така система дозволяє, використовуючи графічний веб-інтерфейс, відтворити у зручний спосіб всі особливості формалізованої моделі, а також задати умови для забезпечення надійності планів в умовах невизначеності.

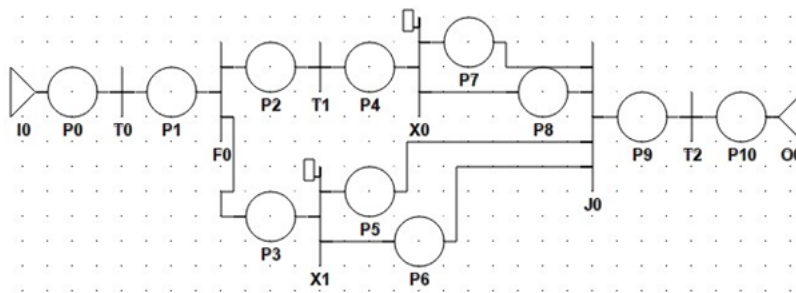


Рис. 2. Формалізована модель мережевого графіка

Графічне представлення програмної моделі мережевого графіка, створеної в EMS, показано на рис. 3.

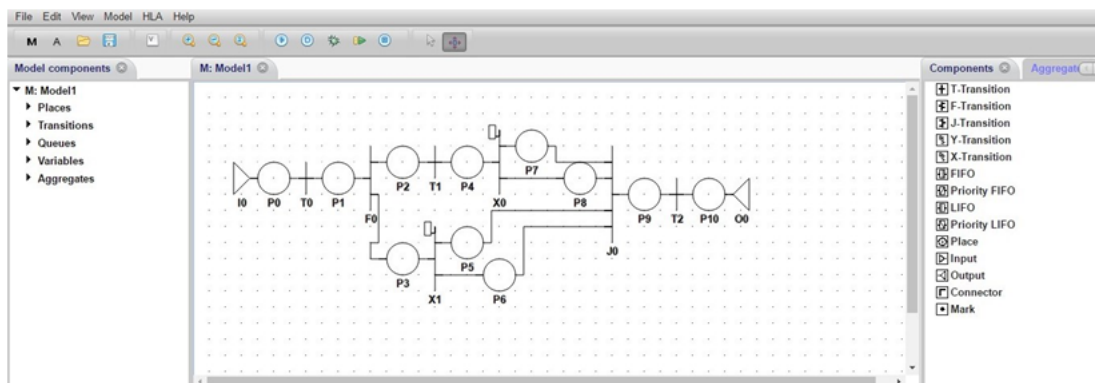


Рис. 3. Графічне представлення програмної моделі мережевого графіка

Формальне визначення властивостей плану робіт.

Властивості плану робіт визначають обмеження щодо плану в перспективі його виконання у часі. Для специфікації властивостей плану пропонується використовувати параметричну темпоральну логіку реального часу PTCTL (Parametric Timed Computation Tree Logic) [15], що дозволяє враховувати як часові обмеження, так і обмеження щодо значень параметрів.

Сформулюємо можливі вимоги до плану робіт за допомогою формул PTCTL:

$GA(a \wedge b)$ – «завжди на всіх шляхах повинні виконуватися умови a і b »;

$GE(b \wedge r_{3 \geq \min})$ – «завжди на якому-небудь шляху повинні виконуватися умова b та $r_3 \geq \min$ »;

$FA(a \vee b)$ – «інколи на всіх шляхах повинні виконуватися умови a чи b »;

$A[\text{not } aU_{\leq 15} b]$ – «робота b повинна бути виконана не пізніше 15 одиниць часу після роботи a », та ін.

Перевірка вимог, заданих у вигляді формул PTCTL, здійснюється за допомогою процедури «model cheking» [16]. У нашому випадку це буде означати перевірку виконання формули за результатами експерименту з імітаційною моделлю за кожним з можливих альтернативних шляхів. Вибір альтернативного шляху відбувається завдяки зміні значень вирішальної процедури на переходах типу «X».

Під час проведення експерименту на кожному прогоні моделі отримується вектор значень заданих формул $F = \{F_1, \dots, F_k\}$. Враховуючи те, що значеннями формули можуть бути 0 або 1, за результатами n експериментів може бути обчислена ймовірність виконання певної формули P_{F_1} . Тоді загальна ймовірність виконання всіх формул для шляху μ буде становити:

$$P_{F_1} * P_{F_2} * \dots * P_{F_k} = P_{\mu}$$

Ймовірність P_μ буде визначати ризик виконання плану робіт для можливого шляху μ .

Семантика статистичної гри для визначення оптимального шляху.

Під стратегіями природи будемо розуміти набори параметрів моделі (плану), наприклад, кількість фінансових, людських та часових ресурсів. Будемо також вважати, що для кожного з цих наборів задані апріорні ймовірності, які визначають ймовірності того чи іншого стану природи.

У свою чергу, стратегіями статистика будуть всі можливі шляхи на плані робіт. Якщо позначити цілими числами номери переходів типу «X», що зустрічаються на деякому шляху (наприклад, 1-й та 3-й), то такий шлях буде мати позначку $\mu_{1,3}$.

У результаті проведення запланованого набору експериментів для кожної стратегії природи можна буде отримати матрицю гри:

	ξ	$\mu_{1,3}$	$\mu_{2,3}$...	$\mu_{2,4}$
b_1	0,4	$P_{\mu_{1,3}}^{(1)}$	$P_{\mu_{2,3}}^{(1)}$
b_2	0,6	$P_{\mu_{1,3}}^{(2)}$	$P_{\mu_{2,3}}^{(2)}$

де ξ – ймовірність стратегій природи b_1 та b_2 ;

$P_{\mu_{1,3}}^{(1)}$ – ймовірність виконання шляху 1,3 при стратегії природи b_1 .

Вибір оптимальної стратегії може бути зроблений за правилом Байєса, як стратегії, яка має максимальну ймовірність виконання заданого набору формул, що визначають властивості плану робіт:

$$P_{b_i} = \max_j \sum P_\mu^{(j)} * \xi_{b_i}.$$

Алгоритм динамічного оцінювання ризику плану робіт.

Під час виконання плану робіт на кожному кроці зміни станів оцінюється ризик виконання плану в цілому та обирається оптимальний шлях серед всіх альтернатив.

Передумовою виконання алгоритму є визначення стратегії природи, тобто наборів вхідних даних плану робіт. Введення даних для проведення експериментів у системі EMS відбувається через вікно інтерфейсу, показаному на рис. 4.

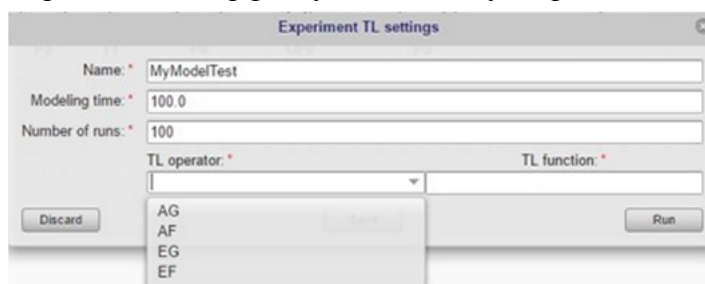


Рис. 4. Введення даних для проведення експерименту

У результаті експерименту отримується оптимальна стратегія для кожного стану плану робіт. Зазначимо, що стан плану в нашому випадку буде визначатися маркуванням позицій побудованої управляючої Е-мережі.

Сам алгоритм виконання експерименту для поточного стану включає такі кроки.

1. Вибір чергової стратегії природи.
2. Запуск імітаційних експериментів для поточного початкового стану моделі з визначенням значень формул темпоральної логіки для кожного альтернативного шляху плану робіт.
3. Визначення ризику виконання плану робіт на цьому кроці.

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

4. Перевірка виконання всіх існуючих стратегій природи. За наявності неперевіре-них стратегій перехід до п. 1.

5. Знаходження оптимального шляху для переміщення з поточного стану через при-своєння значень вирішальних функцій.

6. Виконання плану до зміни стану.

Таким чином, весь процес оцінювання ризику виконання плану робіт буде носити динамічний характер, аналогічний задачі динамічного програмування [17]: уточнення керуючого впливу відбувається на кожному кроці наближення до остаточної мети, як показано на рис. 5.

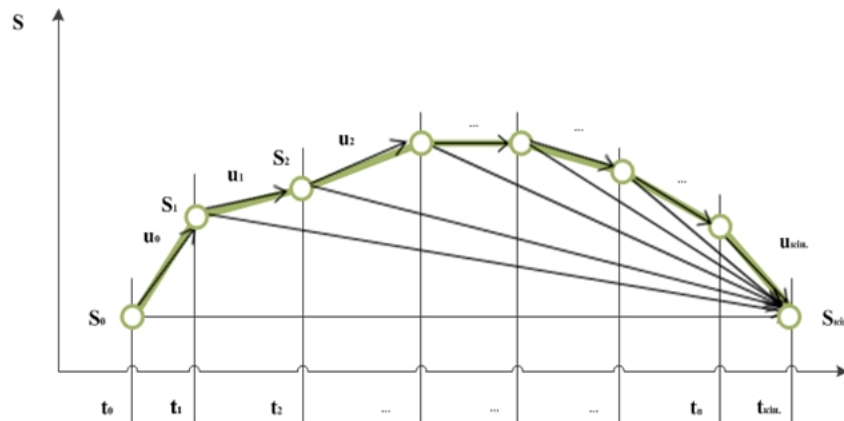


Рис. 5. Графічне представлення задачі динамічного програмування

Під час виконання плану робіт система переходить з початкового стану S_0 до кінцевого стану S_{kin} за деякий час t з урахуванням керуючого впливу u на кожному кроці.

Висновки. У цій статті розглянуто новий підхід до оцінювання ризику виконання плану робіт у мережевому плануванні в режимі реального часу методом імітаційного моделювання. Даний метод дозволяє за схемою динамічного програмування обирати оптимальні шляхи розвитку плану з урахуванням ризику виконання плану робіт, обчисленого за сукупною ймовірністю зберігання властивостей плану, визначених набором формул темпоральної логіки.

Список використаних джерел

1. *Авербах Л. И.* Моделирование задач планирования и управления проектами в условиях риска и неопределенности с использованием циклической сетевой модели [Электронный ресурс] / Л. И. Авербах, В. И. Воропаев, Я. Д. Гельруд. – Режим доступа : <http://www.sovnet.ru/pages/casm2.doc.3-4>.
2. *Принципы планирования и обеспечение надежности плана.* Классификация планов на предприятии [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://studme.org/49340/ekonomika/printsiyu_planirovaniya_obespechenie_nadezhnosti_plana_klassifikatsiya_planov_predpriyatii.
3. *Еремеев А. П.* Компонента временных рассуждений для интеллектуальных систем поддержки принятия решений реального времени / А. П. Еремеев, И. Е. Куриленко // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2009. – № 1. – С. 31–45.
4. *Методы тестирования и верификации программного обеспечения* : [монография] / В. В. Литвинов, В. В. Казимир, А. Л. Ляхов, И. В. Путиенко, И. В. Богдан. – Нежин : ФОП Лукьяненко В.В. ТПК «Орхидея», 2013. – 359 с.
5. *Казимир В. В.* Мережеве планування в режимі реального часу з використанням апарату темпоральних логік / В. В. Казимир, А. С. Посадська // Технічні науки і технології. – 2015. – № 1 (1). – С. 61–67.
6. *Гельруд Я. Д.* Обобщенные стохастические сетевые модели для управления комплексными проектами / Я. Д. Гельруд // Вестник НГУ. Серия: Математика, механика, информатика. – 2010. – Т. 10, вып. 4. – С. 36–51.

7. Астанина Л. А. Альтернативные стохастические графы в проектном менеджменте / Л. А. Астанина, Л. В. Кирина // Сборник научных трудов Sworld. – 2012. – Т. 24. Экономика. – С. 71–78.
8. Демкин И. В. Управление инновационным риском на основе имитационного моделирования. Основные подходы к оценке инновационного риска. Часть 1. Оценка риска / И. В. Демкин // Проблемы анализа риска. – 2005. – Т. 2. – № 3. – С. 249–273.
9. Littman, Michael L. Markov games as a framework for multi-agent reinforcement learning. In Proceedings of the Eleventh International Conference on Machine Learning (ICML-1994). New Brunswick, NJ, 1994. – Pp. 157–163.
10. Назимко В. В. Учет рисков в сетевом планировании развития горных работ при отработке выемочного участка угольной шахты / В. В. Назимко, И. В. Назимко, А. А. Яйцов // Наукові праці ДонНТУ. Серія: економічна. – 2010. – Вип. 38-3. – С. 94–103.
11. Методы количественной оценки рисков [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://studme.org/45514/ekonomika/metody_kolichestvennoy_otsenki_riskov.
12. Казимир В. В. Модельно-ориентированное управление интеллектуальными производственными системами : дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.13.06 / Казимир Владимир Викторович. – К., 2005. – 328 с.
13. Nutt, G. Evaluation Nets for Computer Systems Performance Analysis / G. Nutt // FJCC, AFIPS PRESS. – 1972. – Pp. 279–286.
14. Казимир В. В. Розподілена система імітаційного моделювання EMS / В. В. Казимир, Г. А. Сіра, І. І. Мушкетик // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – 2011. – № 3. – С. 144–153.
15. Parametric Computation Tree Logic with Knowledge [Electronic resource]. – Access mode: <http://csp2011.mimuw.edu.pl/proceedings/PDF/CSP2011286.pdf>.
16. Казимир В. В. Верификация реактивных систем с помощью формул темпоральной логики на E-сетевых моделях // Математичні машини і системи. – 2002. – № 1. – С. 29–40.
17. Динамічне програмування [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://pidruchniki.com/14250725/menedzhment/dinamichne_programuvannya.

References

1. Averbah, L.I., Voropaev, V.I., Gelrud, Ya.D. (2010). Modelirovanie zadach planirovaniia i upravleniia proektami v usloviakh riska i neopredelennosti s ispolzovaniem tsiklicheskoj setevoi modeli [Simulation of tasks of planning and management of the project in the conditions of risk and uncertainty using a cyclic network model]. Retrieved from <http://www.sovnet.ru/pages/casm2.doc.3-4>.
2. Printsipy planirovaniia i obespechenie nadezhnosti plana. Klassifikatsiia planov na predpriatii [Principles of planning and ensuring the reliability of the plan. The classification of plan for the enterprise] (2016). Retrieved from http://studme.org/49340/ekonomika/printsipy_planirovaniya_-_obespechenie_nadezhnosti_plana_klassifikatsiya_planov_predpriatii.
3. Eremeev, A.P., Kurilenko, I.E. (2009). Komponenta vremennykh rassuzhdenii dlia intellektualnykh sistem podderzhki priniatii reshenii realnogo vremeni [Component of temporal reasoning for intelligent systems of decision support in real-time]. *Iskusstvennyi intellekt i priniatie reshenii – Artificial intelligence and decision-making*, no. 1, pp. 31–45 (in Russian).
4. Litvinov, V.V., Kazimir, V.V., Liahov, A.L., Putienko, I.V., Bogdan, I.V. (2013). Metody testirovaniia i verifikatsii programmogo obespecheniia [Methods of testing and verification of the software]. *Nizhyn: FOP V. Lukyanenko TPK «Orchid»* (in Russian).
5. Kazymur, V.V., Posadska, A.S. (2015). Merezheve planuvannia v rezhymi realnoho chasu z vykorystanniam aparatu temporalnykh lohik [Network planning in real time mode using the temporal logic]. *Tekhnichni nauky i tekhnolohii – Technical sciences and Technology*, no. 1 (1), pp. 61–67 (in Ukrainian).
6. Gelrud, Ya.D. (2010). Obobshhennye stokhasticheskie setevye modeli dlia upravleniia kompleksnymi proektami [Generalized stochastic network models for the management of complex projects]. *Vestnik NGU. Serii: Matematika, mehanika, informatika - Vestnik NGU. Series: Mathematics, Mechanics and Computer Science*, vol. 10, no. 4, pp. 36–51 (in Russian).

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

7. Astanina, L.A., Kirina, L.V. (2012). Alternativnye stohasticheskie grafy v proektnom menedzhmente [Alternative stochastic graphs in project management]. *Sbornik nauchnyh trudov Sworld - Collection of scientific papers Sworld*, vol. 24 Economics, pp. 71–78 (in Russian).
8. Demkin, I.V. (2005). Upravlenie innovatsionnym riskom na osnove imitacionnogo modelirovaniia. Osnovnye podkhody k otsenke innovatsionnogo riska. Chast 1. Otsenka riska [Innovative Risk Management, based on simulation modeling. Basic approaches to innovative risk assessment. Part 1: Risk assessment]. *Problemy analiza riska – Problems of risk analysis*, vol. 2, no. 3, pp. 249–273 (in Russian).
9. Littman, Michael L. (1994). *Markov games as a framework for multi-agent reinforcement learning*, in *Proceedings of the Eleventh International Conference on Machine Learning (ICML)*. New Brunswick, NJ, pp. 157–163.
10. Nazimko, V.V., Nazimko, I.V., Yaitsov, A.A. (2010). Uchet riskov v setevom planirovanii razvitiia gornykh rabot pri otrabotke vyemochnoho uchastka ugolnoi shahty [Consideration of risks in network planning of development of mining operations in mining production areas of a coal mine]. *Naukovi pratsi DonNTU. Serii: ekonomichna – Scientific papers of DonNTU. Series: economic*, issue 38-3, pp. 94–103 (in Russian).
11. *Metody kolichestvennoj ocenki riskov (2016)*. [Methods of quantitative risk assessment]. Retrieved from http://studme.org/45514/ekonomika/metody_kolichestvennoy_otsenki_riskov.
12. Kazimir, V.V. (2005). Modelno-orientirovannoe upravlenie intellektualnymi proizvodstvennymi sistemami [Model-Based Management of intellectual manufacturing systems]. *Doctor's thesis*. Kyiv (in Russian).
13. Nutt, G. (1972). *Evaluation Nets for Computer Systems Performance Analysis*. FJCC, AFIPS PRESS, pp. 279–286.
14. Kazymyr, V.V., Sira, H.A., Mushketyk, I.I. (2011). Rozpodilena systema imitatsiinoho modeliuвання EMS [Distributed simulation system EMS]. *Visnyk Chernihivskoho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu – Visnyk of Chernihiv State Technological University*, no. 3, pp. 144–153 (in Ukrainian).
15. *Parametric Computation Tree Logic with Knowledge (2016)*. Retrieved from <http://csp2011.mimuw.edu.pl/proceedings/PDF/CSP2011286.pdf>.
16. Kazimir, V.V. (2002). Verifikatsiia reaktivnykh sistem s pomoshchiu formul temporalnoi logiki na E-setevykh modeliakh [Verification of reactive systems using temporal logic formulas on E-network models]. *Matematichni mashini i sistemi – Mathematical Machines and Systems*, no. 1, pp. 29–40 (in Russian).
17. *Dynamichne prohramuvannia [Dynamic programming] (2016)*. Retrieved from http://pidruchniki.com/14250725/menedzhment/dinamichne_programuvannya.

Казимир Володимир Вікторович – доктор технічних наук, професор, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Казимир Владимир Викторович – доктор технических наук, профессор, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Kazymyr Volodymyr – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: vvkazymyr@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8163-1119>

Scopus Author ID: 56644727300

Посадська Аліна Сергіївна – аспірант, Чернігівський національний технологічний університет (вул. Шевченка, 95, м. Чернігів, 14027, Україна).

Посадская Алина Сергеевна – аспирант, Черниговский национальный технологический университет (ул. Шевченко, 95, г. Чернигов, 14027, Украина).

Posadska Alina – PhD student, Chernihiv National University of Technology (95 Shevchenka Str., 14027 Chernihiv, Ukraine).

E-mail: alinka.posadskaya@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6155-5913>