

УДК 004.358

**ВИЗУАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ****О. М. Гайтан, Н. А. Фурсова, М. І. Гавріліна**

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

просп. Першотравневий, 24, м. Полтава, 36011, Україна. E-mail: natali\_f2004@ukr.net

Виконано формальний опис та імітаційне моделювання технологічного процесу виробництва систем опалення на підприємстві, а також візуалізацію результатів такого моделювання. Як база для побудови моделей розглядається апарат часових мереж Петрі з подальшим візуальним імітаційним моделюванням у середовищі AnyLogic із використанням дискретно-подійного підходу. Застосування розроблених моделей дає змогу перевірити ефективність впровадження нового обладнання на підприємстві без зайвих витрат на придбання обладнання, а також визначити максимально можливий рівень випуску продукції при новому технічному оснащенні для прийняття адекватних управлінських рішень керівництвом підприємства і досягнення оптимальних показників виробництва. Завдяки використанню графічних компонентів у середовищі AnyLogic створена імітаційна модель, яка крім кількісно-часової оцінки системи забезпечує також візуалізацію результатів моделювання. Така модель має реалістичний вигляд і зрозуміла навіть людям, які не є спеціалістами AnyLogic.

**Ключові слова:** виробничий процес, дискретно-подійне моделювання, імітаційне моделювання, мережі Петрі.

**ВИЗУАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ****Е. Н. Гайтан, Н. А. Фурсова, М. И. Гаврилина**

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

просп. Первомайский, 24, г. Полтава, 36011, Украина. E-mail: natali\_f2004@ukr.net

Выполнено формальное описание и имитационное моделирование технологического процесса производства систем отопления на предприятии, а также визуализацию результатов такого моделирования. В качестве базы для построения моделей рассматривается аппарат временных сетей Петри с последующим визуальным имитационным моделированием в среде AnyLogic с использованием дискретно-событийного подхода. Применение разработанных моделей позволит проверить эффективность внедрения нового оборудования на предприятии без лишних затрат на приобретение оборудования, а также определить максимально возможный уровень выпуска продукции при новом техническом оснащении для принятия адекватных управленческих решений руководством предприятия и достижения оптимальных показателей производства. Благодаря использованию графических компонентов в среде AnyLogic созданная имитационная модель, кроме количественно-временной оценки системы, обеспечивает также визуализацию результатов моделирования. Такая модель имеет реалистичный вид и понятна даже людям, которые не являются специалистами AnyLogic.

**Ключевые слова:** производственный процесс, дискретно-событийное моделирование, имитационное моделирование, сети Петри.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Конкуентоспроможність виробничих підприємств в умовах сучасних реалій залежить від рівня застосування інформаційних технологій для автоматизації процесів на виробництві.

Традиційні моделі не здатні врахувати усі складні керуючі впливи і промодельовати їх наслідки, тому для реалізації складної системи виробничого процесу, здатної оцінювати вплив керуючих чинників в режимі реального часу, доцільно поєднувати ефективні засоби формального опису системи та можливості такого сучасного інструменту як імітаційне моделювання.

Перспективним засобом формального опису та аналізу дискретних систем є використання методології мереж Петрі. Теорія мереж Петрі є математичним апаратом, призначеним для роботи з паралельними і асинхронними системами, до яких належать виробничі системи, зокрема виробництво систем опалення.

Високий рівень формалізації мереж Петрі дозволяє легко будувати на їх основі алгоритми й програми імітаційного моделювання процесів функціонування виробничих систем. На сьогодні іміта-

ційне моделювання – це найпоширеніший інструмент, який використовується для оцінки ефективності функціонування автоматизованих виробничих систем різноманітного призначення, оптимізації їхніх параметрів і структури, вибору найкращої системи за визначеними критеріями.

Основна цінність імітаційного моделювання полягає у використанні методології системного аналізу – дослідженні системи, що аналізується чи проектується, за схемою операційного дослідження.

Даний метод охоплює низку послідовних етапів: змістовна постановка завдання; створення концептуальної моделі; розроблення алгоритму і програми реалізації імітаційної моделі; перевірка адекватності моделі та оцінка точності результатів моделювання; планування і проведення комп'ютерних експериментів; прийняття рішень на основі отриманих даних.

Метою даної роботи є формальний опис та аналіз за допомогою імітаційного моделювання процесу виробництва систем опалення на підприємстві, а також візуалізація результатів такого моделювання.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.**  
*Аналіз публікацій.* Мережі Петрі були вперше введені К. Петрі у докторській дисертації "Зв'язок

автоматів", де були сформульовані основні поняття теорії зв'язку асинхронних компонентів обчислювальної системи [1].

Сьогодні в Європі проблемами моделювання систем на базі мереж Петрі займаються провідні наукові центри в Данії (University of Aarhus) та Німеччині (University of Hamburg), які проводять теоретичні дослідження, розробляють програмні засоби моделювання та впроваджують стандарти стосовно використання мереж Петрі [2].

На Україні проблемами розробки та моделювання мереж Петрі, зокрема композиційним аналізом та побудовою розширень мереж Петрі (універсальної, інгібіторної мереж тощо), займається Зайцев Д.А. [3, 4]. Сучасна класифікація мереж Петрі та приклади їх застосування для розв'язання прикладних задач наведені в роботі [5].

На даний час теорія мереж Петрі має широке застосування практично в усіх галузях наукових досліджень, в тому числі для моделювання виробничих і транспортних систем. Як приклад такого моделювання наведемо використання мереж Петрі при моделюванні експедиційного обслуговування на автомобільному транспорті [6] або використання модифікованих мереж Петрі (I – мереж) для моделювання бортового обчислювального комплексу у космічних тренажерах (дискретного контуру управління орієнтацією пілотованого космічного апарату) [7]. Активно розробляються на основі мереж Петрі паралельні алгоритми та моделі мультипроцесорних обчислювальних систем [5].

Використання імітаційного моделювання розглядалося протягом багатьох років безліччю дослідників – від Ф. Мартина до В. Кельтона [8]. Виробничі та технологічні процеси, до яких належить і процес виробництва систем опалення, – один із основних типів систем, де переваги застосування імітаційного моделювання виявляються найбільш помітно.

*Формальне визначення мереж Петрі.* Відповідно до праці [8] мережу Петрі можна визначити трьома елементами:

$$П = \langle P, T, F \rangle, \quad (1)$$

де  $P$  – непорожня множина позицій (вузлів);  $T$  – непорожня множина переходів;  $F$  – функція інцидентності, що задає зв'язок між елементами множин  $P$  і  $T$ .

Для мережі Петрі, визначеної елементами  $\langle P, T, F \rangle$ , повинні виконуватися такі умови:

1.  $P \cap T = \emptyset$ , тобто множини позицій та переходів не перетинаються.

2.  $(F \neq \emptyset) \wedge (\forall x \in P \cap T, \exists y \in P \cup T : xFy \vee yFx)$ , тобто будь-який елемент мережі інцидентний хоча б одному елементу іншого типу.

3. Якщо для елемента мережі  $x \in X$  позначити через  $*x$  множину його вхідних елементів, а через  $x^*$  – множину його вихідних елементів, то  $\forall p_1, p_2 \in P : (*p_1 = *p_2) \wedge (p_1^* = p_2^*) \Rightarrow (p_1 = p_2)$ , тобто мережа не міститиме пари вузлів, інцидентних до однієї й тієї ж множини переходів.

На основі поняття мережі Петрі, яка описує тільки статичну топологію модельованого процесу, вводяться динамічні мережні структури, в яких позиціям приписуються спеціальні розмітки для моделювання виконання умов. З мережею пов'язують поняття її функціонування, яке описується зміною її розмітки (умови) у результаті спрацювання переходів.

Зміну позицій маркерів у вузлах можна визначити, якщо задати мережу Петрі як структуру

$$П = \langle P, T, F, M \rangle, \quad (2)$$

де  $\langle P, T, F \rangle$  – скінчена мережа;  $M$  – початкова розмітка мережі, яка ставить у відповідність будь-якому вузлу  $p_i \in P$  деяке число  $n$ . Розмітка використовується для відображення виконання передумов в системі.

Функціонування мережі Петрі описується за допомогою множини послідовностей спрацювань і множини досяжних у мережі розміток. Ці поняття визначаються через правила спрацювання переходів мережі.

Мережу Петрі також можна визначити такою сукупністю елементів [10]:

$$П = \langle P, T, I, M \rangle, \quad (3)$$

де  $P$  – множина позицій;  $T$  – множина переходів;  $I$  – вхідна функція переходів;  $O$  – вихідна функція переходів;  $M$  – початковий вектор маркування.

Функції входу і виходу визначаються відображенням бінарного добутку множини переходів і множини позицій на множину  $\{0 \dots n\}$ :

$$I : T \times P \rightarrow \{0 \dots n\} \quad (4)$$

$$O : T \times P \rightarrow \{0 \dots n\} \quad (5)$$

Маркування визначається відображенням множини позицій на множину натуральних чисел  $N$ :

$$M : P \rightarrow N \quad (6)$$

Графічно Мережа Петрі являє собою дводольний орієнтований мультиграф, множина вершин якого складається з позицій  $p_i \in P$  і переходів  $t_j \in T$ .

Моделювання в мережах Петрі здійснюється на дискретно-подійному рівні. Переходи відображають дії, що відбуваються в системі, а позиції – стани, що передують цим діям, та стани, в які переходить система після виконання дії.

Таким чином, модель мережі Петрі служить для відображення та аналізу причинно-наслідкових зв'язків у системі. Аналіз результатів моделювання дозволяє визначити, в яких станах перебувала система.

*Результати досліджень.* Розглянемо принцип роботи виробничого підприємства систем опалення (рис. 1).



Рисунок 1 – Структурна схема процесу виробництва систем опалення

До виробничого цеху надходять сталеві пластини на пресування за експоненційним розподілом часу, в яких створюються отвори і поглиблення різної форми і глибини для поєднання радіаторів з опалювальними трубами.

Після пресування відбувається з'єднання по дві сталеві пластини та здійснюється їх зварювання. Далі прес згладжує гострі та виступаючі краї деталі. Захоплюючий пристрій відбирає шість труб для зварювання та до них приварюються створені деталі. На кожну деталь припадає по дві труби, тому одночасно може зварюватися три секції радіаторів.

Зварені секції поміщають на верстат для ретельного шліфування, область між трубами залиша-

ється не обробленою, її обробляють за допомогою більш дрібного шліфувального пристрою.

На наступному етапі здійснюється тестування секції, для цього її занурюють у воду і починають подавати повітря, якщо немає бульбашок, – зварювання надійне і виробництво триває.

Є ймовірність появи браку, у цьому випадку радіатори знову направляються на зварювання. Далі кілька секцій з'єднують: для цього їх кладуть одну на іншу і приварюють до верхньої частини. Для готового радіатора повторюється тест у воді. Потім радіатор поміщають у ґрунт, по ньому пускають електричний заряд, що сприяє кращому зчепленню, отже, забезпечує кращий захист від корозії. Після ґрунтування та фарбування радіаторів проводиться пакування та відвантаження готової продукції.

Модель даного виробничого процесу, реалізована у вигляді мережі Петрі (рис. 2), містить 21 позицію та 21 перехід:

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_{21}\}; \quad (7)$$

$$T = \{t_1, t_2, \dots, t_{21}\}. \quad (8)$$

Елементи множини позицій:  $p_1$  – наявність пластин на складі;  $p_2$  – пластини після пресування;  $p_3$  – пластини з отворами та поглибленнями;  $p_4$  – з'єднані пластини;  $p_5$  – зварені пластини;  $p_6$  – відшліфовані пластини;  $p_7$  – наявність труб на складі;  $p_8$  – пластини та труби відібрані для захоплення;  $p_9$  – зварювальний пристрій вільний (одночасно відбувається зварення 3 секцій);  $p_{10}$  – процес зварювання пластин з трубами;  $p_{11}$  – зварені секції;  $p_{12}$  – відшліфовані секції;  $p_{13}$  – брак;  $p_{14}$  – секції відібрані для захоплення;  $p_{15}$  – процес зварювання секцій радіаторів;  $p_{16}$  – зварювальний пристрій вільний (одночасно може відбуватися зварення  $m$  радіаторів);  $p_{17}$  – зварені радіатори;  $p_{18}$  – брак;  $p_{19}$  – пофарбовані радіатори;  $p_{20}$  – сляковані радіатори;  $p_{21}$  – готова продукція.

Елементи множини переходів:  $t_1$  – надходження пластин;  $t_2$  – пресування пластин;  $t_3$  – створення отворів та поглиблень для поєднання радіаторів з трубами;  $t_4$  – з'єднання 2 пластин;  $t_5$  – зварювання з'єднаних пластин;  $t_6$  – шліфування пластин;  $t_7$  – надходження труб;  $t_8$  – відбір 3 пластин та 6 труб;  $t_9$  – захоплення відібраних пластин та труб захоплюючим пристроєм;  $t_{10}$  – зварювання 3 секцій радіаторів;  $t_{11}$  – шліфування секцій радіаторів;  $t_{12}$  – утилізація бракованих секцій, що не підлягають повторному зварюванню;  $t_{13}$  – повернення на повторне зварювання секцій, що не пройшли тестування;  $t_{14}$  – відбір  $n$  секцій;  $t_{15}$  – захоплення відібраних секцій захоплюючим пристроєм;  $t_{16}$  – зварювання секцій радіаторів;  $t_{17}$  – повернення на повторне зварювання радіаторів, що не пройшли тестування;  $t_{18}$  – утилізація бракованих виробів, що не підлягають повторному зварюванню;  $t_{19}$  – ґрунтування та фарбування радіаторів;  $t_{20}$  – пакування радіаторів;  $t_{21}$  – відвантаження готової продукції.

Після тестування можливі такі варіанти подальших дій:

- подальша обробка виробу, якщо тестування пройшло успішно;
- повернення на повторне зварювання радіаторів або секцій, які не пройшли тестування;

в) утилізація бракованого виробу, якщо прийняте рішення, що ліквідувати недоліки неможливо.

Таке розгалуження призводить до наявності в мережі Петрі конфліктних переходів  $t_{12}$ ,  $t_{13}$  та  $t_{14}$ , а також  $t_{17}$ ,  $t_{18}$  та  $t_{19}$ . Спрацювання таких переходів у імітаційній моделі відбувається за імовірністю.

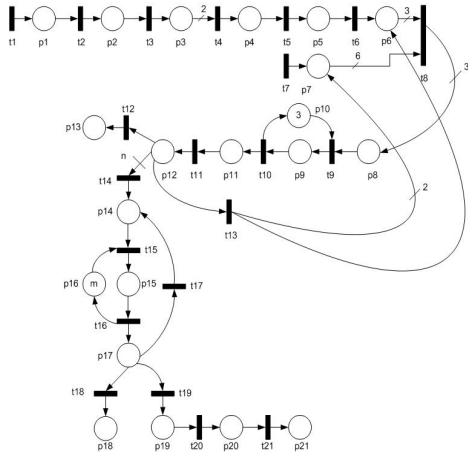


Рисунок 2 – Модель даного виробничого процесу, реалізована у вигляді мережі Петрі

**Програмна реалізація моделі.** В якості засобу для імітаційного моделювання роботи описаної мережі Петрі було вибрано середовище AnyLogic [10–12] та вбудована бібліотека елементів Enterprise Library, яка дає змогу моделювати системи з точки зору вимог, процесів та ресурсів.

AnyLogic – програмне забезпечення для імітаційного моделювання, розроблене компанією The AnyLogic Company, яке має сучасний графічний інтерфейс і дає змогу використовувати мову Java для розробки моделей.

AnyLogic – це інструмент нового покоління, який об'єднав підходи системної динаміки, дискретно-подійного та агентного моделювання.

Специфіка підходів до імітаційного моделювання, які підтримуються AnyLogic, представлена на рис. 3. У даному випадку був застосований дискретно-подійний підхід.

Завдяки використанню графічних компонентів в середовищі AnyLogic створена імітаційна модель крім кількісно-часової оцінки системи, забезпечує також візуалізацію результатів моделювання. Така модель має реалістичний вигляд і зрозуміла навіть людям, які не є спеціалістами AnyLogic.



Рисунок 3 – Підходи до імітаційного моделювання, реалізовані в середовищі AnyLogic

Візуалізація результатів імітаційного моделювання процесу виробництва систем опалення в середовищі AnyLogic, яка реалізує представлену мережу Петрі, наведена на рис. 4.

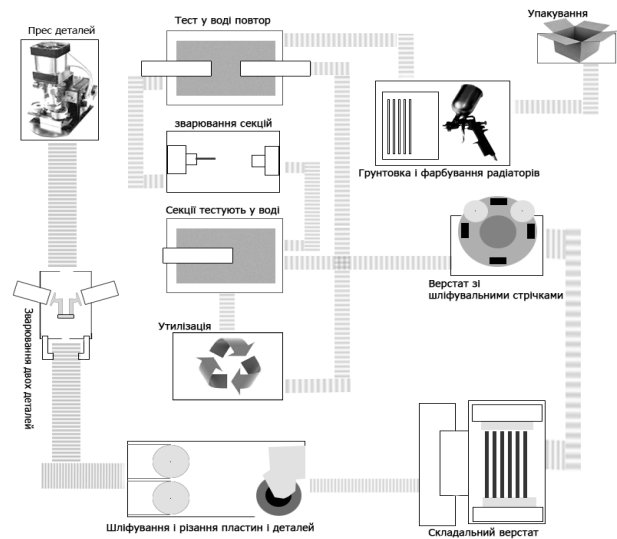


Рисунок 4 – Візуалізація результатів імітаційного моделювання процесу виробництва радіаторів опалення в середовищі AnyLogic

**ВИСНОВКИ.** На підставі виконаної роботи та отриманих результатів можна зробити такі висновки:

1. Розроблена імітаційна модель визначає максимально можливий рівень випуску продукції при новому технічному оснащенні і організації управління виробничими процесами. Її використання дозволить перевірити ефективність впровадження нового обладнання на підприємстві без зайвих витрат на придбання обладнання.

2. Проведення імітаційних експериментів з моделлю дасть змогу також оцінювати вплив зміни параметрів проходження технологічного процесу для прийняття адекватних управлінських рішень керівництвом підприємства і досягнення оптимальних показників виробництва.

3. Створення імітаційної моделі в середовищі AnyLogic дозволило виконати візуалізацію результатів моделювання. Такий підхід можна використовувати також при моделюванні інших виробничих систем.

4. Використання розроблених моделей дозволить перевірити ефективність впровадження нового обладнання на підприємстві без зайвих витрат на придбання обладнання, яке може виявитися неефективним. Проведення експериментів з використанням моделі рятує від необхідності проведення експериментів у реальному житті і не заважає роботі виробництва.

**ЛІТЕРАТУРА**

1. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. – М.: Мир, 1984. – 264 с.  
 2. Welcome to the Petri Nets World. – Режим

доступа: <http://www.informatik.uni-hamburg.de/TGI/PetriNets/>

3. Зайцев Д.А. Инварианты временных сетей Петри // Кибернетика и системный анализ. – 2004. – № 2. – С. 92–106.

4. Зайцев Д.А. Композиционный анализ сетей Петри // Кибернетика и системный анализ. – 2006. – № 1. – С. 143–154.

5. Кузьмук В.В., Супруненко О.О., Парнюк А.М. Класифікація мереж Петрі та приклади їх застосування для розв'язання прикладних задач // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 2/9(50). – С. 40–43.

6. Наумов В.С. Использование сетей Петри при моделировании процесса транспортно-экспедиционного обслуживания // Автомобильный транспорт: сбор. науч. трудов. – 2009. – № 24. – С. 120–124.

7. Полунина Е.В., Саев В.Н. Использование мо-

дифицированных сетей Петри для моделирования бортовых вычислительных комплексов в космических тренажерах // Вестник ВИ МВД России. – 2011. – № 1. – С. 166–174.

8. Томашевский В.М. Моделирование систем. – К.: Видавнична група BHV, 2005. – 352 с.

9. Лескин Л.Л., Мальцев П.А., Спиридонов А.М. Сети Петри в моделировании и управлении. – Л.: Наука, 1989. – 133 с.

10. AnyLogic. – Режим доступа: <http://www.anylogic.ru/>

11. Карпов Ю. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic5. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 400 с.

12. Murata T. Petri nets: Properties, Analysis and Applications // Proceedings of the IEEE. – April, 1989. – Vol. 77. – № 44. – PP. 541–580.

## VISUALIZATION OF THE PRODUCTION SYSTEMS MODELING RESULTS

**O. Gajtan, N. Fursova, M. Gavrulina**

Poltava National Technical University named after Yuri Kondratyuk

prosp. Pervomajskij, 24, Poltava, 36011, Ukraine. E-mail: natali\_f2004@ukr.net

Formal description and simulation of the process of heating systems production at the enterprise with visualization of modeling results are considered. As a base for the model construction it was selected the instrument of time Petri nets, followed by a visual modeling in AnyLogic with usage of discrete-event approach. Usage of the developed models allows testing the effectiveness of the new equipment implementation at the plant without extra costs for the equipment purchase, as well as determining the maximum level of the new technical equipment producing. Also, it allows for appropriate management decisions to get the optimal performance of production. Due to the graphical components in the AnyLogic environment, both quantitative and temporal evaluations of the system and visualization of the simulation results were provided. This model has a realistic look and is understandable even for those who are not AnyLogic experts.

**Key words:** production process, discrete-event modeling, simulation, Petri nets.

## REFERENCES

1. Piterson, Dzh. (1984), *Teorija setej Petri i modelirovanie sistem* [The Petri Net Theory and System Modeling]. Mir, Moscow, Russia.

2. <http://www.informatik.uni-hamburg.de/TGI/PetriNets/>

3. Zajcev, D.A. (2004) “The Invariants of Time Petri nets”, *Kibernetika i sistemnyj analiz*, no. 2, pp. 92–106.

4. Zajcev, D.A. (2006) “The compositional Analysis of Petri Nets”, *Kibernetika i sistemnyj analiz*, no. 1. pp. 143–154.

5. Kuz'muk, V.V., Suprunenko, O.O., Parnjuk, A.M. (2011) “Petri Nets Classification and Examples of their Using for Applied Problems Solving”, *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij*, no. 2/9(50), pp. 40–43.

6. Naumov, V. S. (2009) “Usage of the Petri Nets for simulation of Transport-Dispatch Maintenance Process”, *Avtomobil'nyj transport*, no. 24, pp. 120–124.

7. Polunina, E.V., Saev, V.N. (2011) “Usage of the modified Petri Nets for Modeling of Airborne Computer Systems in Space Simulators”, *Vestnik VI MVD Rossii*, no 1, pp. 166–174.

8. Tomashevs'kij, V.M. (2005), *Modeljuvannja sistem*. [The System Modeling], BHV, Kiev, Ukraine.

9. Leskin, L.L., Mal'cev P.A., Spiridonov A.M. (1989), *Seti Petri v modelirovanii i upravlenii* [Petri Nets in modeling and Control], Nauka, Leningrad, Russia.

10. <http://www.anylogic.ru/>

11. Karpov, Ju. (2005), *Imitacionnoe modelirovanie sistem. Vvedenie v modelirovanie s AnyLogic5* [The System Simulation. Introduction to Modeling with AnyLogic5], BHV-Peterburg, St. Petersburg, Russia.

12. Murata, T. (1989) “Petri nets: Properties, Analysis and Applications”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 77, no. 44, pp. 541–580.

Стаття надійшла 16.10.2013.