

І. В. Стеценко, *д.т.н., доцент*,

А. О. Титарчук, *д.т.н., доцент*

Черкаський державний технологічний університет
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна,
stiv66@yandex.ua, a.o.tit@mail.ru

МОДЕЛЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ МАШИНИ

Запропоновано формалізовану структуру технологічної машини для задачі моделювання надійності. Побудовано імітаційну модель надійності та виконано дослідження впливу надійності структурних елементів машини на її продуктивність. Реалізацію моделі виконано з використанням Петрі-об'єктної технології.

Ключові слова: машина-автомат, надійність, продуктивність, стохастична мережа Петрі, імітаційне моделювання.

Вступ. На етапі проектування технічної системи одним із найважливіших етапів є визначення таких параметрів експлуатації, які б забезпечували задану продуктивність. Помилки проектування важко виправляються у практичних умовах, тому задача визначення продуктивності в умовах експлуатації є актуальною. Важливість урахування специфічних вимог щодо надійності та продуктивності під час проектування технічної системи підкреслюється в [1].

Математичні методи оцінювання надійності ґрунтуються на положеннях теорії ймовірностей і надають можливість розрахувати ймовірність відмови складної технічної системи. Така оцінка є достатньо грубою в умовах, коли процеси усунення несправностей в технічній експлуатації системи відіграють суттєву роль.

Імітаційні методи дають змогу відтворити як процес експлуатації, так і процес виникнення та усунення несправностей у технічній системі. Програмне забезпечення імітаційного моделювання надійності RAMP [2] надає можливість побудови моделей надійності складних технічних систем, проте не дає можливості використовувати його для визначення продуктивності технічної системи.

Для автоматних систем найбільш прийнятною є формалізація процесу функціонування мережею Петрі. Мережі Петрі застосовувалися в [1], але тільки для опису окремих елементів складної системи.

У роботі розглядається побудова моделей надійності з використанням мережі Петрі як для опису елементів, так і для опису функ-

ціонування всієї технічної системи. На відміну від попередніх розробок, таке моделювання дає можливість враховувати зовнішні умови (такі як надходження виробів на обробку) та специфічні умови функціонування машини-автомата (такі як синхронізація дій її структурних елементів).

Постановка задачі – для технологічної машини-автомата розробити формалізоване представлення її структури і технологію моделювання надійності технологічної машини-автомата за її структурою та визначити вплив показників надійності на продуктивність технологічної машини-автомата.

Опис технологічної машини. Технологічна машина-автомат (металорізальні верстати, прокатні стани, пакувальні машини і т.д.) змінює форму, розміри, властивості, стан вихідних матеріалів і заготовок відповідно до технологічного процесу.

Основними структурними елементами технологічної машини-автомата є виконавчі органи, за допомогою яких виконуються окремі технологічні операції. Виконавчі органи рухаються за певними законами та долають при цьому зусилля з боку об'єкта, що обробляється. Для цього виконавчі органи повинні одержати рух від привідного двигуна. У сучасних машинах двигун, як правило, приводить у дію кілька виконавчих органів. У цьому разі в машині є розподільний орган (головний вал), який реалізує цю функцію в дію окремих виконавчих органів. Циклічними є виконавчі органи, які працюють погоджено один з одним, роботою яких управляє розподільний орган машини. Поряд з цим у маши-

нах є й виконавчі органи, що працюють безперервно (нециклічні). Ці органи одержують рух і енергію безпосередньо від приводу машини. За призначенням виконавчі органи поділяють на робочі та допоміжні механізми живлення, встановлювально-затискальні, транспортні тощо. Робочі виконавчі органи безпосередньо обробляють предмет праці.

Розгорнуту структурну схему технологічної машини-автомата зображено на рис. 1. Двигун, муфта, вал приводу, передавальний механізм являють собою привід машини. Від головного вала одержують рух і енергію циклічні виконавчі органи, від вала приводу через передавальні механізми отримують рух і енергію нециклічні виконавчі органи. За допомогою пристроїв керування забезпечується керування циклом роботи машини та здійснюється керування роботою окремих виконавчих органів.

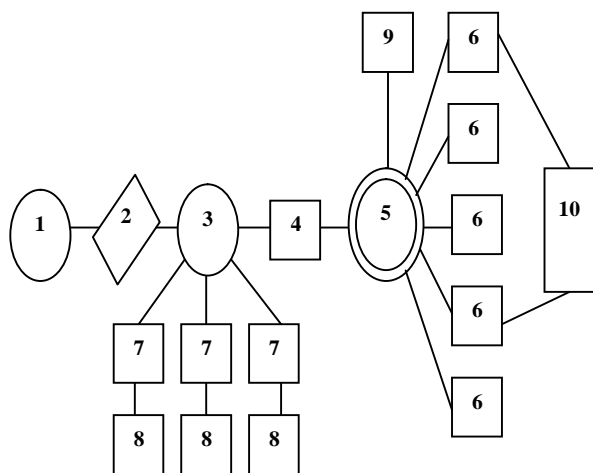


Рис. 1. Структурна схема технологічної машини-автомата: 1 – двигун, 2 – муфта, 3 – вал приводу, 4, 7 – передавальні механізми, 5 – головний вал, 6 – циклічні виконавчі органи, 8 – нециклічні виконавчі органи, 9 – пристрій керування циклом роботи машини, 10 – пристрій керування роботою окремих виконавчих органів

Виконання машинного технологічного процесу машиною можливе за умови чітко організованих рухів виконавчих органів циклових механізмів у кінематичному циклі машини. Для цього роботою усіх циклових пристроїв повинен керувати розподільчий пристрій. У машинах з механічною системою автоматизації розподільчим пристроєм служить головний вал, на якому розміщені ведучі ланки циклових пристроїв. У пневматичних та гідравлічних машинах роль розподільчого

виконує золотниковий пристрій, а в машинах з електричною системою автоматизації – комутаційний пристрій. Погодженою роботою виконавчих органів є їх кінематичний цикл з періодом часу $t_{\text{ц}}$ та відносним розташуванням цих органів у загальному кінематичному циклі машини.

Циклограмою машини називають зображення, на якому відображено погоджену протягом кінематичного циклу машини циклограму окремих виконавчих органів циклових пристроїв.

При проектуванні машини-автомата:

1. Виконують аналіз запропонованого замовником технологічного процесу Tr_0 , можливих Tr_i та здійснюють вибір оптимального з них:

$$Tr = \text{opt}\{Tr_0, Tr_1, Tr_2, \dots, Tr_n\}.$$

При виборі оптимального технологічного процесу необхідно ретельно вивчити властивості матеріалу предмета праці та властивості виконавчих органів, що будуть застосовуватися. При цьому слід враховувати вплив теплових, звукових, електромагнітних та інших явищ, які можуть виникнути у ході виконання процесу.

2. Здійснюють розробку машинного технологічного процесу Mp : поділ технологічного процесу Tr на окремі операції O та операцій на дії P :

$$Mp = \{O_1 \dots O_n\}, O_i = \{P_1 \dots P_k\}.$$

3. Опрацювання циклограми роботи машини. Циклічна діаграма, приклад якої зображено на рис. 2, встановлює зв'язок машинного технологічного процесу з циклічним рухом виконавчих органів. Діаграма відображає, в якій послідовності і в які моменти кінематичного циклу окремі виконавчі органи починають виконання свого циклу.

При виконанні технологічного процесу виконавчі органи періодично (циклічно) повторюють свої рухи. Кожний виконавчий орган здійснює кінематичний цикл руху і має своє розміщення відносно до кінематичного циклу машини. Кінематичний цикл машини являє собою сукупність усіх кінематичних циклів виконавчих органів. Виконання технологічного процесу вимагає, щоб виконавчі органи періодично повторювали свої рухи і приходили у висхідне положення. Кожний виконавчий орган має своє відносне розміщення в загальному кінематичному циклі машини, який характеризується кутом повороту головного вала.

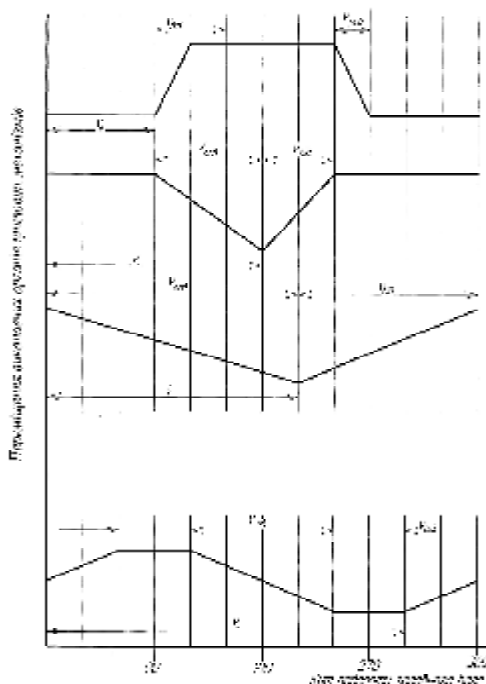


Рис. 2. Приклад циклічної діаграми машинного технологічного процесу

Кінематичний цикл виконавчих органів складається з віддалення від початкового положення, повернення в початкове положення, зупинок усередині кінематичного циклу машини. Залежно від кількості виконавчих органів та їх відносного розміщення циклограми машини мають різну структуру.

Формалізація технологічного процесу засобами Петрі-об'єктної моделі. Технологія Петрі-об'єктного моделювання описана в [3]. Для реалізації Петрі-об'єктної моделі використаємо java-бібліотеку класів PetriObjLib [4]. Для графічної розробки мереж Петрі скористаємось java-бібліотекою класів PetriObjPaint [5].

З опису технологічної машини-автомата випливає, що вона складається з виконавчих органів та генератора надходжень заготовок до технологічної машини-автомата. Відповідно до цієї структури модель системи складемо з Петрі-об'єктів «Операція» та «Надходження». Для опису динаміки Петрі-об'єкта «Операція» виділимо події, які відбуваються в цій підсистемі:

1) обробка заготовки відповідно до технологічного процесу (виконання однієї технологічної операції) з детермінованою часовою затримкою, що дорівнює тривалості циклу технологічної машини – подія «Serve»;

2) виникнення поломки виконавчого органу з часовою затримкою, що є випадко-

вою величиною з експоненціальним законом розподілу – подія «Refusal»;

3) ремонтування виконавчого органу з часовою затримкою, що є випадковою величиною з експоненціальним законом розподілу – подія «Repair».

Кількість маркерів у позиції «Resource» – це кількість виконавчих органів, що виконують обробку одночасно на даній технологічній операції.

Для опису динаміки Петрі-об'єкта «Генератор» виділимо події, які відбуваються в цій підсистемі:

1) надходження заготовки на обробку до ТМ-А з часовою затримкою, що є випадковою величиною з експоненціальним законом розподілу – подія «Come»;

2) допуск заготовки на обробку до ТМ-А за умови, що ТМ-А знаходиться у працюючому стані – подія «Do»;

3) відкидання заготовки з потоку надходження з причини, якщо машина-автомат знаходиться у непрацюючому стані – подія «Reject».

Зауважимо, що конфлікт переходів «Reject» і «Do» вирішується наданням більшого значення пріоритету переходу «Do».

Побудовані мережі Петрі зображено на рис. 3, 4 відповідно. Обробка виконавчими органами в технологічній машині-автоматі здійснюється відповідно до технологічного процесу. Технологічні операції виконуються послідовно. Отже, модель технологічної машини-автомата отримаємо, послідовно поєднуючи моделі виконавчих органів – Петрі-об'єкти «Операція» так, щоб позиція «P7» попереднього «Операція» збігалася з позицією «P6» наступного «Операція» (рис. 5). Позиція «Permission» призначена для відображення працюючого стану виконавчого об'єкта. Конструювання моделі організуємо таким чином, щоб позиція «Permission» була спільною для усіх Петрі-об'єктів «Операція», тоді наявність маркера в ній означатиме одночасний працюючий стан усіх виконавчих органів, а відсутність маркера – наявність хоч одного непрацюючого виконавчого органу. Надходження заготовок до технологічної машини-автомата моделюємо Петрі-об'єктом «Генератор». Синхронізація подій «Serve» відбувається за рахунок однакової часової затримки в переходах «Do», «Serve» та одночасного надання дозволу на виконання маркером позиції «Permission».

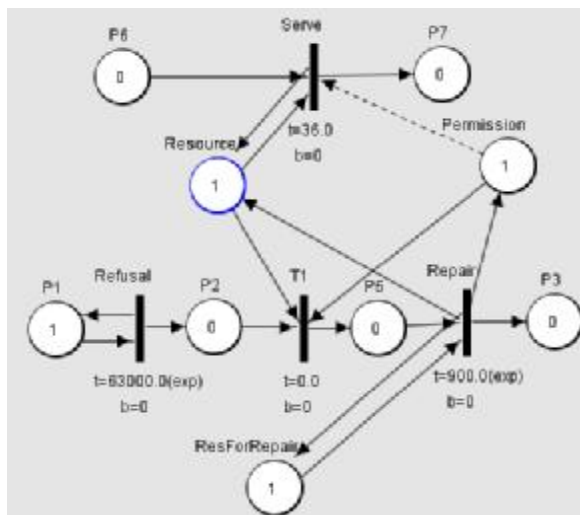


Рис. 3. Мережа Петрі-об'єкта «Операція»

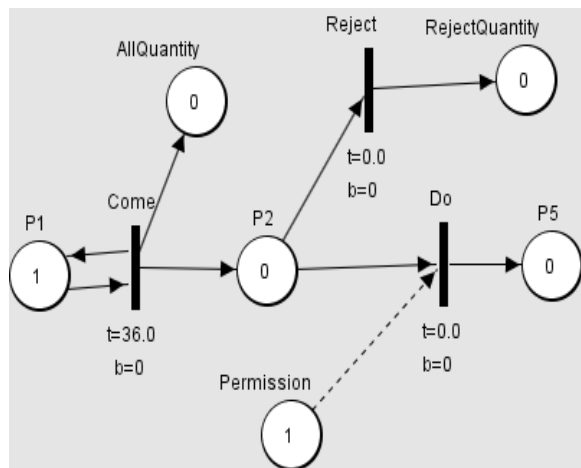


Рис. 4. Мережа Петрі-об'єкта «Генератор»

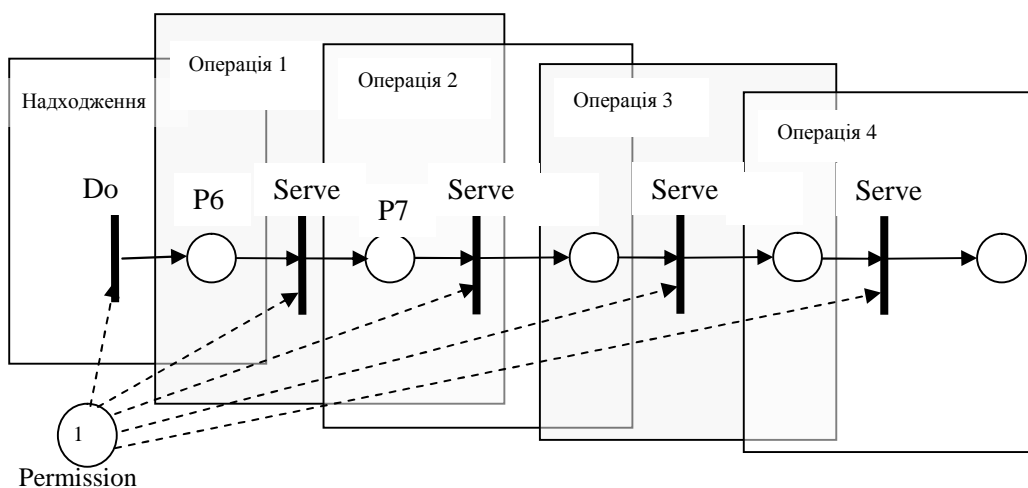


Рис. 5. Структура Петрі-об'єктної моделі технологічного процесу машини-автомата

Оцінювання впливу показників надійності на продуктивність. Для проведення експериментів скористаємося методикою проведення експериментів з імітаційною моделлю. Для забезпечення точності результату на рівні середнього квадратичного відхилення достатньо чотирьох прогонів. Результати експериментів зображено на рисунках. Для представлення результатів у графічному вигляді використано java-бібліотеку класів jFreeChart (<http://www.jfree.org/jfreechart/index.html>).

З дослідження випливає, що технологічна машина-автомат з заданими показниками надійності витримує інтенсивність вхідного потоку 0,0275 виробів/с = 99 виробів/год. Продуктивність технологічної машини-автомата при цьому становить 93 вироби/год. Тобто продуктивність зменшилась на 6 %

порівняно з технологічною-машинною без відмов.

Результати дослідження збільшення часу безвідмовної роботи на продуктивність машини-автомата зображено на рис. 6, 7. З наведених графіків випливає, що продуктивність 100 виробів/год. не вдається досягти навіть при збільшенні часу безвідмовної роботи кожного з чотирьох виконавчих органів на 68400 с (=19 год) порівняно з початковими (63000, 42000, 54000, 36000), тобто більш ніж вдвічі. Досяжною при такому поліпшенні показників надійності стає відносна продуктивність 0,97 (абсолютна – 97 виробів/год.). Можна стверджувати, що для даної ТМ-А поліпшення показників надійності вдвічі приводить до підвищення ефективності на 3 %.

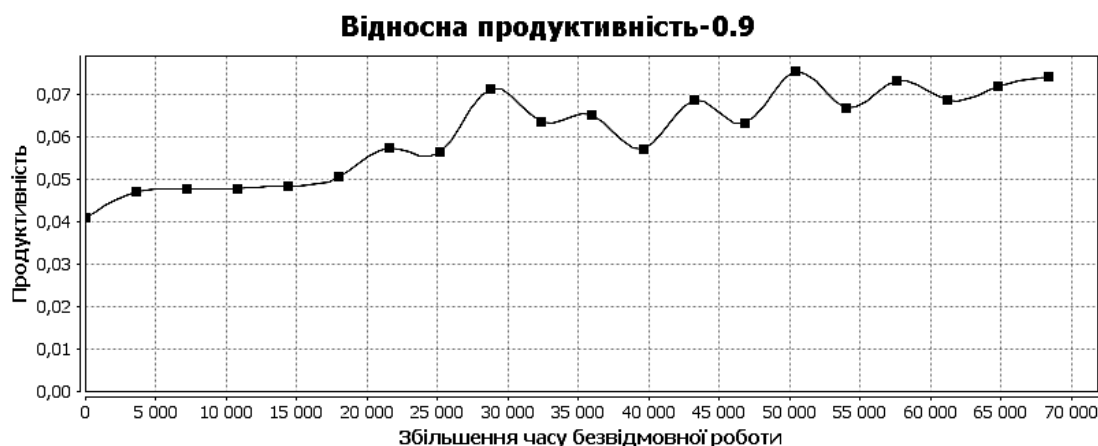


Рис. 6. Результати дослідження середнього часу безвідмовної роботи на відносну продуктивність машини



Рис. 7. Результати дослідження середнього часу безвідмовної роботи на абсолютну продуктивність машини

Висновки. Побудовано модель технологічної машини-автомата для оцінювання впливу показників надійності на продуктивність машини-автомата, яка, на відміну від існуючих моделей, дозволяє враховувати час, який витрачається на ремонт кожного виконавчого органу. Модель враховує такі параметри: кількість виконавчих органів машини-автомата, тривалість технологічного циклу, кількість виконавчих органів на кожній технологічній операції, середній час безвідмовної роботи та середній час ремонтування кожного виконавчого органу. За результатами дослідження впливу надійності на продуктивність машини-автомата можна зробити висновки про доцільність чи недоцільність заходів щодо поліпшення показників надійності в конкретних виробничих умовах.

Список літератури

1. Faulin, J., Juan, A., Martorell, S. and Ramírez-Márquez J. (2010) Simulation

methods for reliability and availability of complex systems. Springer, 315 p.

2. Site of company Reliass. Plant availability modelling with RAMP [Internet]. Available from: http://www.reliability-safety-software.com/products/product_ramp.htm
3. Стеценко І. В. Технологія Петрі-об'єктного моделювання систем / І. В. Стеценко // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – Черкаси : ЧДТУ, 2011. – № 4. – С. 25–30.
4. Стеценко І. В. Алгоритм імітації Петрі-об'єктної моделі / І. В. Стеценко // Математичні машини і системи. – Київ, 2012. – № 1. – С. 154–165.
5. Стеценко І. В. Проектування графічного модуля програмного забезпечення Петрі-об'єктного моделювання систем / І. В. Стеценко, О. В. Василевська // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – Черкаси : ЧДТУ, 2013. – № 2 – С. 13–18.

6. JFree (This site is owned and operated by David Gilbert and Thomas Morqner) [Internet]. Available from: <http://www.jfree.org/jfreechart/index.html>
3. Stetsenko, I. V. (2011) The technology of Petri-object system modeling. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu*, (4), pp. 25-30.
1. Faulin, J., Juan, A., Martorell, S. and Ramírez-Márquez J. (2010) Simulation methods for reliability and availability of complex systems. Springer, 315 p.
4. Stetsenko, I. V. (2012) The algorithm of Petri-object model imitation. *Matematichni mashyny i sistemy*. Kyiv, (1), pp. 154-165.
2. Site of company Reliass. Plant availability modeling with RAMP [Internet]. Available from: http://www.reliability-safety-software.com/products/product_ramp.htm
5. Stetsenko, I. V. and Vasylevska, O. V. (2013) The design of graphic modulus for software support of Petri-object system modeling. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitetu*, (2), pp. 13-18.
6. JFree (This site is owned and operated by David Gilbert and Thomas Morqner) [Internet]. Available from: <http://www.jfree.org/jfreechart/index.html>

References

Стаття надійшла до редакції 20.01.2014.

I. V. Stetsenko, *D.Sc., associate professor*,
A. A Titarchuk, *D.Sc., associate professor*
Cherkasy State Technological University
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine
stiv66@yandex.ua, a.o.tit@mail.ru

THE SIMULATION OF TECHNOLOGICAL MACHINE RELIABILITY

Formal description of technological machine for the problem of reliability modeling is offered. We considered the machine structure and its dynamic diagram. Simulation reliability model is developed with Petri-object simulation technology in which system dynamics is described by stochastic Petri net with multichannel transitions and information ties. Equipment failures and repairs are taken into account in the same way as other technological operation – as event with given non-deterministic time delay. We have developed a set of Petri-objects as constructive elements for reliability model. The reliability impact on machine performance is investigated. The results of this investigation should be used in machine designing. The model is realized with Petri-object simulation Java-class library.

Key words: machine, reliability, performance, stochastic timed Petri net, simulation.