

УДК 519.179.2, 004.942

# КЛАСИФІКАЦІЯ МЕРЕЖ ПЕТРІ ТА ПРИКЛАДИ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ПРИКЛАДНИХ ЗАДАЧ

**В. В. Кузьмук**

Доктор технічних наук, професор, заступник керівника\*

E-mail: Valeriy\_kuzmuk@ukr.net

**А. М. Парнюк**

Аспірант\*

Контактний тел.: 066-187-99-50

E-mail: oho\_@mail.ru

\*Відділення гібридних моделюючих та управляючих систем в енергетиці

Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є.

Пухова НАН України

**О. А. Супруненко**

Кандидат технічних наук, доцент

Кафедра програмного забезпечення автоматизованих систем

Черкаський національний університет імені Богдана

Хмельницького

бульв. Шевченко, 79, корп. №3, ауд. 275, г. Черкаси,

Україна, 18006

Контактний тел.: 066-187-99-50

E-mail: ra-oks@mail.ru

*В статті розглядається класифікація мереж Петрі, основні характеристики класів мереж та рекомендації по їх застосуванню до розв'язання прикладних задач*

*Ключові слова: класифікація мереж Петрі, інтерпретації та модифікації мереж Петрі, застосування*

*В статье рассматривается классификация сетей Петри, основные характеристики классов сетей и рекомендации по их применению для решения прикладных задач*

*Ключевые слова: классификация сети Петри, интерпретации и модификации сетей Петри, применение*

*In this article the classification of Petri nets, the basic characteristics of main classes and recommendations as to the applied problems solving are considered*

*Keywords: classification of Petri nets, classes and modification of Petri nets, application*

## 1. Вступ

У зв'язку з поширенням модельного підходу при дослідженні систем [1] апарат мереж Петрі (PN) все частіше використовується при моделюванні паралельних, асинхронних, розподілених, недетермінованих та інших типів систем. Моделювання це не тільки конструювання об'єкту, а й метод його пізнання [2], тому важливо при підборі засобів моделювання враховувати дану важливу компоненту. Саме для цього при розв'язанні прикладних задач мережі Петрі надають можливість побудови структури моделі, відображення основних характеристик, імітації функціонування моделі та перевірки моделі на критичні властивості.

Наочність подання та імітування роботи моделі, аналітичний опис та визначені критичні властивості дозволяють значно ефективніше проводити аналіз побудованих моделей [3].

Різноманітність задач, для моделювання яких застосовуються мережі Петрі, викликала розробку численних інтерпретацій та модифікацій даних мереж [4, 5]. Більше чотирьох десятиліть при моделюванні апаратних пристроїв у прикладних досліджен-

нях та техніці, процесів життєдіяльності у біології та медицині, інформаційних та управляючих потоків у програмних системах та багато інших, класи мереж Петрі набули характерних властивостей для відображення реальних процесів у спеціалізованих системах.

Моделювані системи та процеси, що в них відбуваються, характеризуються різною складністю та потребують специфічних форм відображення властивостей, внаслідок чого приводять до побудови моделей специфічних за своєю структурою і рівнем деталізації. При аналізі прикладних моделей класична теорія мереж Петрі не завжди дає відповіді на всі питання, які цікавлять розробника, що викликає необхідність створення безлічі видів мереж Петрі. Створені види мереж можна згрупувати у класи – інтерпретації та підкласи – модифікації, які відображають особливості побудови та дослідження моделей, що є корисним при обранні апарату реалізації конкретної моделі.

У даній статті розглядаються інтерпретації та модифікації мереж Петрі, базовими для яких є класична теорія мереж Петрі [3], сформульована Карлом-Адамом Петрі.

## 2. Аналіз досліджень і публікацій

Різновиди мереж Петрі можна згрупувати за такими основними класами [5]: 1) *безпечні мережі Петрі (SPN)* – інтерпретації, в яких кожна вершина місця може містити не більше однієї мітки ( $N = 1$ ), всі дуги мають одиничну вагу; 2) *оціночні (обмежені) мережі Петрі (BPN)* – інтерпретації, в яких вершини місць мають ціле число міток  $N$  ( $N \geq 1$ ), а цілочислові оціночні дуги визначають кількісний розподіл міток в мережі після проходження їх через вершини переходів; 3) *числові (EN) та макрочислові мережі (MEN)* – мережі Петрі, в яких вершини переходів належать до кількох задалегідь встановлених типів, кожен з яких спрацьовує при визначеному числі  $N$  в мережі, а вершини макропереходів мають можливість деякої зміни своєї структури; 4) *кольорові мережі Петрі (CPN)* – інтерпретації, в яких мітки у вершинах місць є механізмом синхронізації і, разом з тим, засобом відображення різної інформації; 5) *часові мережі Петрі (TPN)* [4, 5, 6] – інтерпретація мереж Петрі, до вершин місць, вершин переходів та дуг якої як параметр додається час відпрацювання певної, пов'язаної з елементом, функції. Причому часовий параметр може додаватися до вершин переходів [7], які асоціюються з дією, і моделювати час виконання цієї дії. Також час можна задавати і для вершин місць [8], в даному випадку він відобразить час відпрацювання умови чи часову затримку, яка може пов'язуватися з технологічними особливостями моделі. Часові параметри можуть призначатися до елементів перших чотирьох інтерпретацій мереж Петрі, що свідчить про сполучення властивостей цих інтерпретацій. Даний клас PN дозволяє відобразити в моделі часові параметри системи, їх застосовують при моделюванні технічних пристроїв, технологічних систем, організаційних функцій підприємств [9] та ін.

**Е - мережі** (evaluation - «обчислення») – являються окремим класом мереж Петрі, які мають розширений набір вершин місць та вершин переходів ( $T = T, E^{(d)}, A^{(d)}, F^{(q)}, J^{(c)}, T^{(c, q)}$ ), що створені з метою відображення різновидів функцій зі складною управляючою складовою [10]. У Е-мережах передбачені 1) кілька типів вершин-позицій: прості позиції, позиції-черги, дозволяючі позиції; 2) мітки можуть забезпечуватися набором ознак (атрибутів); 3) з кожним переходом може бути пов'язана ненульова затримка і функція перетворення атрибутів фішок; 4) введені додаткові види вершин-переходів; 5) в будь-яку позицію може входити і виходити не більше однієї дуги. Розглянуті осо-

бливості Е-мереж істотно розширюють їх можливості для моделювання апаратних систем з паралелізмом та паралельних процесів у програмних системах.

Перелічені вище інтерпретації взаємопов'язані між собою. Кольорові мережі Петрі фактично сполучують властивості оціночних і макрочислових мереж Петрі, але типи міток розрізняються за забарвленням. Вони переважно застосовуються у моделях з однорідними даними, окремі потоки яких потрібно відобразити і проаналізувати поелементно. Найчастіше застосовують триколірні мережі Петрі [11]. Їх використовують, наприклад, для побудови моделей даних в інформаційних системах, ресурсів в управляючих організаційних системах, управляючих та технологічних потоків в апаратних засобах та для моделювання апаратно-програмних комплексів.

На сьгоднішній день сформовані загальні структурні і функціональні елементи інтерпретацій мереж Петрі (PN), чітко визначені правила побудови і відпрацювання цих інтерпретацій.

*Інтерпретацією мережі Петрі* називається [5] визначений набір понять і правил, в основі яких лежить принцип побудови розмічених графів, що складаються з двох типів вершин – вершин місць  $T = \{t_i\}$  та вершин переходів  $P = \{p_e\}$  – з'єднаних між собою напрямленими дугами  $K = \{k_q\}$  за певними функціональними правилами  $S$ . У загальному випадку мережі Петрі  $PN = (P, T, K, S)$  мають структурні ( $P, T, K$ ) та функціональні ( $S$ ) елементи.

На основі базових та прикладні інтерпретацій мереж Петрі розроблені їх численні модифікації (рис. 1).

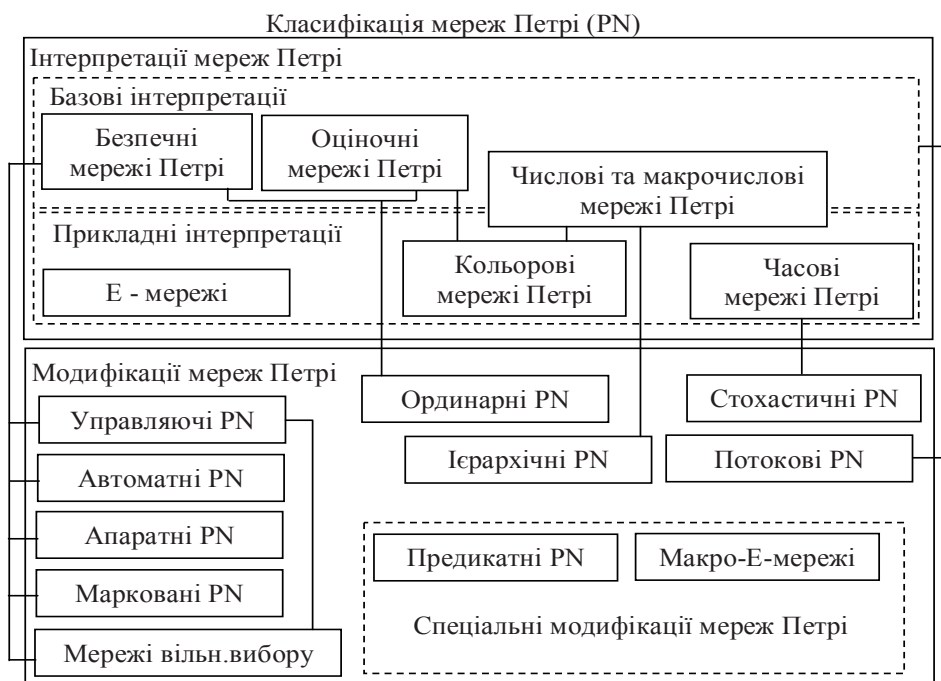


Рис. 1. Класифікація Мереж Петрі

## 3. Основне дослідження

Поява нових інтерпретацій та модифікацій мереж Петрі пов'язана з широким застосування мереж Петрі

для відображення об'єктів у багатьох областях науки і техніки та з намаганням позбавитися їх критичних властивостей. *Модифікацією мережі Петрі* є біхроматичний несумісний граф, що складається зі структурних елементів (**P**, **T**, **K**) та правил (**S**), які визначені принципами, що закладені в моделі певних досліджуваних об'єктів та систем.

На сьогоднішній день розроблені численні інтерпретації та модифікації мереж Петрі. За їх характеристиками вони сполучують певні властивості базових класів.

**Управляючі мережі Петрі** (Steuernetze (нім.) - SN) – безпечні мережі Петрі, які складаються з основних структурних елементів (**P**, **T**, **K**) та мають розширені правила ( $SSN = (I_Q, I_R, m, b, f, g, L)$ ), що дозволяють відображати внутрішні і зовнішні потоки сигналів управління [3, 5]. Відображення сигналів управління проводиться за допомогою узагальненої управляючої функції ( $f: \{0, 1, \dots, N\}^n \times X \rightarrow \{0, 1, \dots, N\}^n$ ), алфавіт **L** вміщує **X** – вхідний та **Y** – вихідний алфавіти сигналів управління. Управляючі мережі Петрі застосовуються для моделювання систем автоматичного управління, адаптивних та самоналаштовуваних систем.

**Автоматні мережі Петрі** (State-machine Petri Nets - SM) – мережі, в яких вершина переходу має одну вхідну та одну вихідну дуги і не вміщує паралельного руху міток. Вона фактично описує граф-схему алгоритму чи граф автомата. У автоматній мережі рухається лише одна мітка, тому вона відображає одну послідовність дій. Автоматні мережі застосовуються для дослідження управляючих мереж, тобто є фактично додатковим засобом їх аналізу [3].

**Апаратні Петрі** (APN) – модифікація управляючих мереж Петрі, в яких додатково введені накопичувальні вершини місць [5], що можуть вміщувати  $n$  міток, а також додаткова функція керування, яка враховує стан переходів, що активовані, але ще не завершили відпрацювання. Апаратні мережі Петрі застосовуються для моделювання мікроелектронних пристроїв та систем управління.

**Марковані мережі** (Petri Nets - MG) – мережі, в яких кожна вершина місця має не більше одного входу і не більше одного виходу. За допомогою даного виду мереж Петрі моделюють послідовно-паралельні процеси. MG-мережі називають також синхрографами. Синхрограф є живим, якщо кожен його цикл не порожній при початковій розмітці. Живий синхрограф є безпечним тоді і тільки тоді, коли кожне його місце входить в певний цикл, у якому міститься тільки одна фішка [12]. Цей вид мереж є модифікацією безпечних мереж Петрі.

**Мережі вільного вибору** (Free-Choice Petri Nets - FC) – мережі Петрі, в яких кожна дуга, що виходить з вершини місця, є єдиним виходом з неї, або єдиним входом у вершину переходу. FC-мережі використовуються для опису процесів управління. Для мереж вільного вибору розроблений механізм виявлення пасток та тупиків. Необхідною умовою живості мереж вільного вибору є відсутність тупиків, які містять в собі пастки. [11]. Даний тип мереж є частинним випадком управляючої модифікації безпечних мереж Петрі.

**Ординарні мережі** (Ordinary Petri Nets - ON) – мережі, які не мають обмежень, крім одного: кратність дуг повинна бути не більше одиниці. Неординарна мережа може бути перетворена в ординарну. Для цьо-

го знаходять максимальну кратність дуг кожного місця і здійснюють розмноження позиції відповідно до встановленої кратності. Ці позиції з'єднуються одна з одною в кільце, при цьому кожна дуга прорізається переходом. Напрямок дуг є одно напрямленим (для утворення циклу). Далі відновлюють зв'язки даної розмноженої позиції з усіма переходами. Алгоритм перетворення зв'язків жорстко не встановлений, його проводять так, щоб зв'язки залишалися ординарними [11].

**Потокові мережі** (Work Flow Petri Nets - WF). Формалізм WF-мереж введений Віл ван дер Аальстом (англ. Wil van der Aalst) для моделювання потоків робіт в workflow-системах [13]. Мережа Петрі  $PN = (P, T, F)$  називається мережею потоків робіт (WF-мережею), якщо виконуються наступні умови: 1) мережа має тільки одну початкову вершину  $t_0$  та тільки одну кінцеву вершину  $t_k$ , тобто є розімкненою, 2) кожна проміжна вершина даної мережі розташована на шляху від  $t_0$  до  $t_k$ . WF-мережі використовуються для перевірки графів потоків робіт на наявність таких структурних конфліктів, як «тупики» (deadlocks) і «недоліки синхронізації» (lack of synchronization). Структурні конфлікти відсутні, якщо WF-мережа є бездефектною. Властивість бездефектності відповідає таким вимогам: 1) кінцева вершина  $t_k$  досяжна за будь-якій послідовності переходів від вершини  $t_0$ ; 2) WF-мережа не містить зайвих позицій, які ніколи не будуть виконані; 3) при досягненні кінцевої вершини даної мережі не повинно залишатися міток в проміжних позиціях. Властивість бездефектності відповідає двом відомим властивостям мереж Петрі – жвавості й обмеженості.

Дані мережі моделюють потокові системи, в яких здійснюється управління даними. Операції виконуються миттєво при готовності даних. У поточної мережі Петрі вершини переходів інтерпретуються як оператори або обчислювальні функції, вершини місць – як черги, а дані – як мітки. Якщо перехід має  $n$  входів, то він реалізується  $n$ -вимірною функцією, яка спрацює відразу ж при наявності міток у всіх вхідних місцях. Даний клас мереж Петрі широко використовується для моделювання бізнес-процесів [11 - 13].

**Ієрархічні мережі Петрі** (Hierarchical Petri Nets - HPN) є узагальненням мереж Петрі і служать для моделювання ієрархічних систем, які разом з неподільними, атомарними компонентами містять складні компоненти, які представляють окремі підсистеми [5]. Для побудови HPN безліч переходів розбивається на підмножини простих і ієрархічних переходів. Простим переходам відповідають елементарні інтерпретації мережі Петрі. Ієрархічні переходи подаються певними фрагментами мережі Петрі в розгалуженнях [5, 11]. Введення ієрархічної будови в мережеві PN-моделі істотно розширює моделюючі можливості мереж Петрі.

**Стохастичні мережі Петрі** (Stochastic Petri Nets) – ряд часових мереж що розглядаються як сукупність взаємодіючих процесів, може бути віднесений до класу систем, у якому ймовірності переходів з одного стану в інший залежать від поточного стану всієї системи. Описані вище мережі Петрі не дозволяють досліджувати системи, взаємодіючі процеси яких носять імовірнісний характер. З цією метою вводиться клас стохастичних PN характеристики яких є імовірнісними, тобто вводиться функція щільності ймовірності

часу спрацьовування переходів чи часу знаходження міток у позиціях. [9, 11].

**Вкладені мережі Петрі (Nested Petri Nets - NPN)** є одним із сучасних інструментів моделювання і дослідження паралельно працюючих систем, що володіють певною незалежністю і власною активністю. Вони є розширенням макрочислових мереж Петрі. Поява зазначеного типу мереж Петрі пов'язана з бажанням дослідників мати інструмент для адекватного і зручного представлення систем зі складною ієрархічною і мультиагентною структурою [12].

У вкладених мережах Петрі мітки представляють локальні ресурси у вершинах системної мережі, вони можуть бути складними об'єктами з мережевою структурою і моделюватися мережами Петрі іншого виду – сателітними мережами. Структурно така мережа складається з системної мережі і набору мереж-міток (сателітів)  $EN_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ . При цьому, між деякими переходами системної мережі і переходами мереж-міток може бути встановлений зв'язок, що дозволяє тільки їх спільне спрацьовування. Такі переходи називаються поміченими. Відмінність від ієрархічних мереж Петрі становлять механізми синхронізації роботи мереж Петрі різного рівня. У зв'язку з цим у NPN розрізняють чотири види кроків спрацьовування: 1) системно-автономний крок, який відповідає спрацьовуванню непозначеного переходу в системній мережі; 2) сателітно-автономний крок, який відповідає спрацьовуванню непозначеного переходу в мережі-мітці  $EN_i$ ; 3) крок горизонтальної синхронізації, при якому одночасно спрацьовують переходи в мережах-мітках  $EN_i$ , помічені однаковими мітками; 4) крок вертикальної синхронізації, при якому одночасно спрацьовують

переходи в системній мережі і мережах - мітках  $EN_i$ , що мають однакові позначки.

При цьому передбачається, що у всіх мережах всі переходи, що беруть участь у роботі є активними, тобто в їх вхідних позиціях є необхідні для спрацьовування ресурси.

#### 4. Висновки

Поряд з описаними розширеннями PN в сучасній літературі зустрічається ряд інших типів PN [6, 9, 11-12, 14], які враховують специфіку тієї предметної області, в якій використовується апарат PN. Серед даних розширень можна виділити PROT-мережі, предикатні (інтерпретовані, конструйовані) мережі Петрі, мережі Петрі для опису процедур прийняття рішень (нейронні, нечіткі, числові, абстрактні), Макро-Е-мережі (MEN), О-мережі (O-Net), Про-мережі (Pro-Net), біполярні мережі (BP), сильнозв'язані мережі (SC), регулярні мережі, мережі зі зміною структурою та ін.

Широкий вибір інтерпретацій та модифікацій мереж Петрі дозволяє обрати для моделювання конкретної системи саме той засіб відображення моделі, який дозволить максимально наочно відтворити її властивості та надасть перелік правил для аналізу та імітації функціонування моделі.

Автори, працюючи в області прикладних аспектів теорії мереж Петрі (Petri nets), внесли в класифікаційну схему тільки ті інтерпретації та модифікації, для яких чітко і однозначно описані правила побудови і реалізації.

#### Література

1. Евгенийев Б.Г. Модели вместо алгоритмов. Смена парадигмы разработки прикладных систем. [Электронный ресурс]. // Наука и образование. – № 12. – 2005. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/56632.html>. – 09.07.2010. – Загл. с экрана.
2. Карпов А. Введение в проблематику разработки параллельных программ. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.viva64.com/ru/a/0016/>. – 09.03.2011. – Загл. с экрана.
3. Кузьмук В.В. Сети Петри, параллельные алгоритмы и модели мультипроцессорных систем. [Текст] / Кузьмук В.В., Васильев В.В. – К.: Наукова думка, 1990. – 216 с.
4. A. Spiteri Staines, Supporting Requirements Engineering With Different Petri Net Classes. // International journal of computers. – 2010. – Volume 4. – Issue 4. – p.215-222.
5. Кузьмук В.В. Модифицированные сети Петри и устройства моделирования параллельных процессов [Текст] : Монография. / Кузьмук В.В., Супруненко О.О. – К.: Маклаут, 2010. – 260 с. – Библиогр. – с. 244-251. - ISBN 978-966-2200-07-2.
6. Jensen K. Coloured Petri Nets. Vol. 2. – Berlin a.o.: Springer, 1995.
7. А.с. 1405070 СССР, кл.G06F 15/20. Устройство для моделирования графов Петри. [Текст]. / Васильев В.В., Кузьмук В.В., Лисицин Е.Б., Шумов В.А. (СССР) // № 4150088/24-24, заявлено 21.11.86; опубл. 23.10.1988, Бюл. № 39. – 10 с.
8. А.с. 1432550 СССР, кл.G06F 15/20. Устройство для моделирования графов Петри. [Текст]. / Васильев В.В., Кузьмук В.В., Лисицин Е.Б., Шумов В.А. (СССР) // № 4219160/24-24, заявлено 03.04.87; опубл. 23.10.1988, Бюл. № 39. – 12 с.
9. Захаров Н.Г., Рогов В.Н. Синтез цифровых автоматов: Учебное пособие. – Ульяновск: УлГТУ, 2003 -135 с.
10. Кузьмук В.В. Применение модифицированных E-сетей для построения параллельных алгоритмов. [Текст]. / Доклады АН УРСР. Сер. А: Физико-математические и технические науки. – К.: "Наукова думка", 1985, №8, С.65-68.
11. Кулагин В.П. Моделирование структур параллельных вычислительных систем на основе сетевых моделей: [Текст]. Учебное пособие. – М: Московский государственный институт электроники и математики (технический университет), 1998. – 102 с.
12. Классификация сетей Петри. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://minska.ru/klassifikaciya-setej-petri.html>. – 17.03.2011. – Загл. с экрана.
13. WF-сети. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/WF-сети>. – 15.03.2011. – Загл. с экрана.
14. Бройнль Томас. Параллельне програмування: Початковий курс: [Текст]. / Пер. з нім. В.А. Святого. – К.: Вища школа, 1997. – 358 с.