

## ЗАСТОСУВАННЯ МЕРЕЖ ПЕТРІ ПРИ ПРОЄКТУВАННІ МЕМС НА СИСТЕМНОМУ РІВНІ

© Теслюк В.М., 2006

**Обґрунтовано і запропоновано використовувати мережі Петрі для проєктування МЕМС на системному рівні проєктування. Наведені приклади використання кольорових, часових та мереж з пріоритетами для МЕМС з багатьма сенсорами, актюаторами та одним мікропроцесором.**

**In this paper, usage of Petri networks in MEMS design at the system level of design is grounded and proposed. Examples of colored, time and networks with priorities for MEMS with many sensors, actuators and single processor are proposed.**

### Вступ

Останнє десятиліття характеризується інтенсивним розвитком міждисциплінарних наукових галузей, що привело до появи пристроїв нового типу, а саме мікроелектромеханічних систем (МЕМС) [1–7].

Перші МЕМС з'явилися внаслідок інтеграції технологій мікроелектроніки та мікротехнологій механіки. Відповідне поєднання дало змогу отримати мікропристрої, де на одному напівпровідниковому пристрої, окрім статичних елементів (інтегральних схем), можна розмістити і рухомі мікропристрої (актюатори). Приклад структури МЕМС наведено на рис. 1, де сенсор призначений для одержання даних з оточуючого середовища, МП – для обробки отриманої інформації, а актюатор – для виконання певних дій.

МЕМС є надзвичайно складними пристроями, тому під час їхнього розроблення не обійтися без систем автоматизованого проєктування та відповідних методик і алгоритмів [8–9].

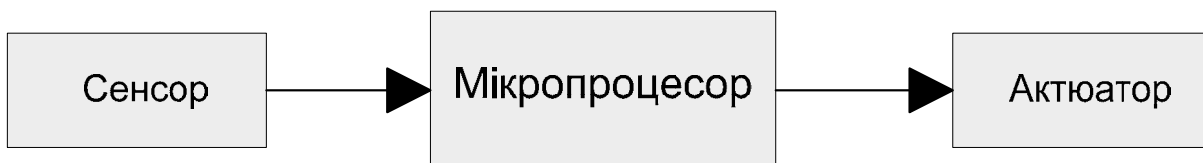


Рис. 1 Базова структура МЕМС

Як правило, для автоматизованого проєктування МЕМС використовується нисхідне проєктування. Проєктування передбачає розв'язання задач проєктування на системному, функціональному, компонентному та елементному рівнях.

Однією з найскладніших задач, що виникають під час проєктування різного роду об'єктів, є задача структурного синтезу, яка полягає в синтезі оптимальної структури та визначенні її вихідних параметрів. Такі задачі характеризуються важкістю математичної формалізації, великими обсягами обчислень і відсутністю ефективних методів та алгоритмів їхнього розв'язання. Найчастіше під час розв'язання задач системного рівня проєктування використовується теорія масового обслуговування та теорія мереж Петрі [10, 11]. Тому ця робота, яка стосується застосування мереж Петрі для розв'язання задач структурного синтезу при проєктуванні МЕМС, є актуальною.

Основна мета подання МЕМС у вигляді мереж Петрі та подальшого їхнього аналізу полягає в отриманні важливої інформації про структуру, динамічну поведінку модельованих систем та у визначенні вихідних параметрів системи та її складових.

### Особливості застосування мереж Петрі

Існує декілька підходів до проектування та аналізу пристроїв з використанням мереж Петрі. В першому випадку мережі Петрі використовують як допоміжний інструмент аналізу. В ньому для побудови систем застосовують загальноприйняті методи проектування. Після цього будують модель МЕМС і аналізують роботу цього пристрою. Якщо під час аналізу виявляються недоліки проєктованої системи, то проєкт модифікується. Цей цикл повторяється до досягнення бажаного результату.

Інший підхід передбачає побудову проєкту одразу ж у вигляді мережі Петрі. Методи аналізу застосовують лише для створення проєкту, що не містить похибок. Після цього мережу Петрі перетворюють на реальну систему.

У першому випадку необхідне розроблення методів моделювання системи мережами Петрі, а у другому випадку мають бути розроблені методи перетворення мереж Петрі в реальні системи.

Отже, згідно з [ ] просту марковану мережу Петрі можна записати у такому вигляді:

$$N = \{S, T, F, M_0\},$$

де  $P = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$  – множина позицій (стани);  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$  – множина переходів;  $F$  – множина дуг, яка включає дві підмножини вхідних та вихідних стосовно переходу;  $M_0$  – множина, яка задає початкове маркування мережі Петрі.

В найпростішому випадку структура МЕМС наведена на рис.1. Для аналізу динаміки цієї структури застосовуємо теорію мереж Петрі. На рис.2 наведена відповідна проста мережа Петрі [ ].

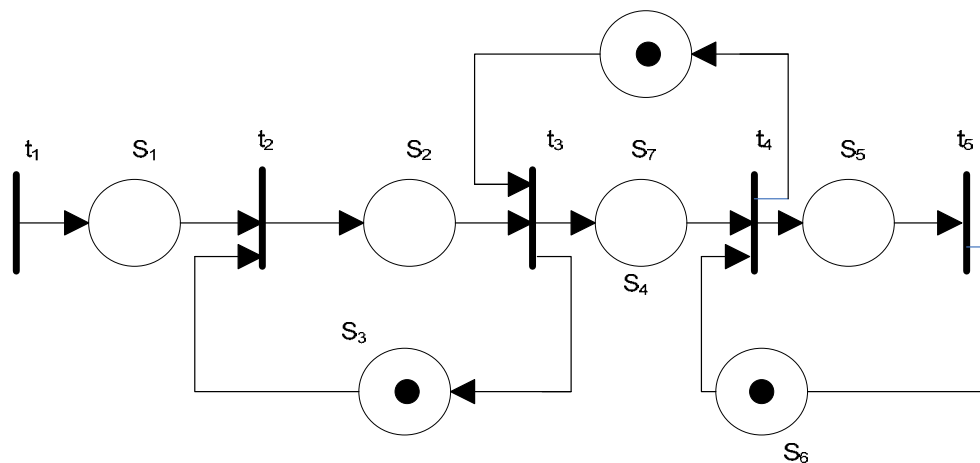


Рис. 2. Мережа Петрі для найпростішої структури МЕМС

Множина позиції містить сім елементів  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_7\}$ , множина переходів –  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_5\}$ , а множина дуг 14 (7 вхідних та 7 вихідних), що можна записати у такому вигляді:

$$F = \{ \langle 0, t_1, s_1 \rangle, \langle s_1 + s_3, t_2, s_2 \rangle, \langle s_2 + s_7, t_3, s_3 + s_4 \rangle, \langle s_4 + s_6, t_4, s_5 + s_7 \rangle, \langle s_5, t_5, s_6 \rangle \},$$

де  $\langle s_1 + s_3, t_2, s_2 \rangle$  – означає, що перехід  $t_2$  має дві вхідні дуги від позицій  $s_1$  та  $s_3$  і одну вихідну, яка спрямована до позиції  $s_2$ .

Початкову розмітку наведеної мережі запишемо у такій формі  $M_0 = S_3 + S_6 + S_7$ , що означає наявність по одному маркеру в позиціях  $S_3, S_6$  та  $S_7$ . Призначення кожної позиції та переходів наведено в табл. 1 та 2.

Робота наведеної на рис. 2 мережі Петрі починається після спрацювання переходу  $t_1$ , який означає наявність на виході сенсора сигналу, що має обробити МП. Ця подія асоціюється з появою маркера в  $S_1$ . Якщо мікропроцесор вільний (наявність маркера в  $S_3$ ), то спрацьовує перехід  $t_2$ , що

означає початок обробки даних МП. Після закінчення обробки МП сигналу та дозволу виведення даних (позиції  $S_2$  і  $S_7$  містять маркери) виконується подія “завершення обробки даних МП”. Цей перехід генерує маркер в позицію  $S_6$ , що означає готовність актюатора до обробки нового сигналу. Відбувається спрацювання переходу  $t_4$ , тобто початок обробки актюатором сигналу від МП. Перехід  $t_4$  переводить актюатор в стан виконання і дає МП змогу вивести оброблені дані, якщо такі є (маркер у позиції  $S_7$ ). Після закінчення роботи актюатором відбувається перехід  $t_3$ , який генерує маркер в позицію  $S_6$ , сигналізуючи цим, що актюатор готовий до обробки наступного сигналу.

Таблиця 1

**Таблиця позицій мережі Петрі**

Позиція	Призначення
$S_1$	Очікування обробки сигналу від сенсора
$S_2$	Обробка даних МП
$S_3$	МП в стані очікування
$S_4$	Дані оброблені
$S_5$	Стан роботи актюатора
$S_6$	Актюатор готовий до роботи
$S_7$	Позиція дозволу вибору оброблених МП даних

Таблиця 2

**Таблиця переходів**

Перехід	Призначення переходу
$t_1$	Активізація сенсора
$t_2$	Початок обробки даних МП
$t_3$	Завершення обробки даних
$t_4$	Початок роботи актюатора
$t_5$	Завершення роботи актюатора

За допомогою наведеної вище мережі Петрі можна оцінити такий параметр, як швидкодія системи. Для цього використовується певне ускладнення ординарної мережі, пов'язане з додаванням до кожного з переходів інформації про нижню та верхню часові границі. У такому разі маємо часову мережу, яку математично можна описати за допомогою такого виразу:

$$N_{time} = \{S, T, F, Eft, L, ft, M_0\},$$

де  $Eft, Lft$  – функції, що ставляться у відповідність до кожного з переходів і визначають нижню ( $Eft$ ) та ( $Lft$ ) часові межі, які задовольняють такі умови  $Eft(t) \leq Lft(t)$ .

Зазначимо, що в часовій мережі Петрі зміна одного стану на інший відбувається у разі закінчення деякого часу, або при виконанні деякого переходу мережі.

Модифікуємо мережу на рис.2 в часову мережу Петрі, додавши до кожного з переходів значення нижньої та верхньої часових меж, які позначаються  $d_1$  та  $d_2$ .

Отже, якщо перехід можливий в часовій мережі в деякий момент часу  $\tau$ , тобто вхідні місця переходу містять хоча б по одній фішці, то цей перехід відбудеться в деякий момент часу з інтервалу  $[\tau+d_1, \tau+d_2]$ , при виконанні умови про незміну вхідних позицій. Якщо перехід залишався без змін упродовж цього інтервалу і не спрацював, формується спрацювання переходу в момент часу  $\tau+d_2$ .

Для оцінки мінімального часу циклу, у випадку однієї вхідної дуги та вихідної, можна використати таку формулу:

$$C = \max \left\{ \frac{T_k}{N_k} : k = 1, 2, \dots, g \right\},$$

де  $T_k = \sum_{t_i \in L_k} \tau_i$  – сума затримок переходів в сумі  $k$ ;  $T_k = \sum_{p_i \in L_k} M(p_i)$  – загальна кількість маркерів у позиціях у циклі  $k$ ;  $q$  – кількість циклів у мережі Петрі.

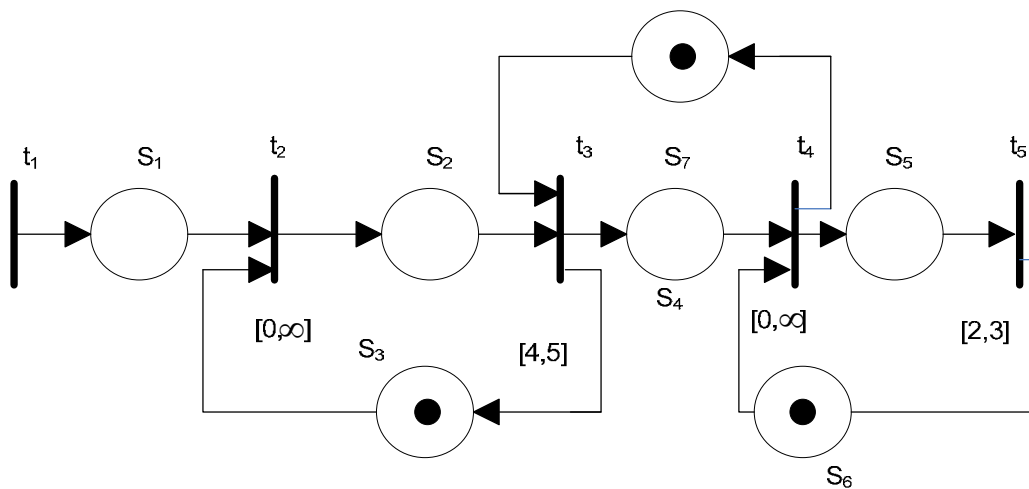


Рис. 3. Приклад часової мережі Петрі

Значно ускладнюється мережа Петрі для структур МЕМС, які містять по декілька сенсорів і актюаторів та один мікропроцесор. Приклад структур з двома сенсорами та двома актюаторами наведено на рис. 4, а відповідна мережа Петрі – на рис. 5.



Рис. 4. МЕМС з двома сенсорами та двома актюаторами

Наведена мережа має істотний недолік, який полягає в тому, що за наявності маркерів в позиціях  $S_1, S_2$  і  $S_3$  – може спрацювати як перехід  $t_3$ , так і перехід  $t_4$ .

В реальних системах така невизначеність, здебільшого, неприпустима. Тому дещо вдосконалимо структуру мережі, додаючи пріоритети при обробці сигналів від сенсорів. У мережах з пріоритетами кожному з переходів надається пріоритет і правило спрацювання модифікують так,

якщо його пріоритет не менший від будь-якого іншого можливого переходу. Відсутність пріоритету відповідає найнижчому значенню пріоритету. Приклад відповідної мережі з пріоритетами наведено на рис. 6.

У такому разі найвищий пріоритет має перехід  $t_3$ , а усі інші – 0. Це означає, що обробка сигналу від сенсора 1 буде мати вищий пріоритет і за наявності маркерів у позиціях  $S_1$ ,  $S_2$  і  $S_3$  – спрацює перехід  $t_3$ , а не  $t_4$ .

Якщо необхідна оцінка часових параметрів структури МЕМС, використовується часова мережа Петрі з пріоритетами. Для нашого випадку відповідний приклад наведено на рис. 7.

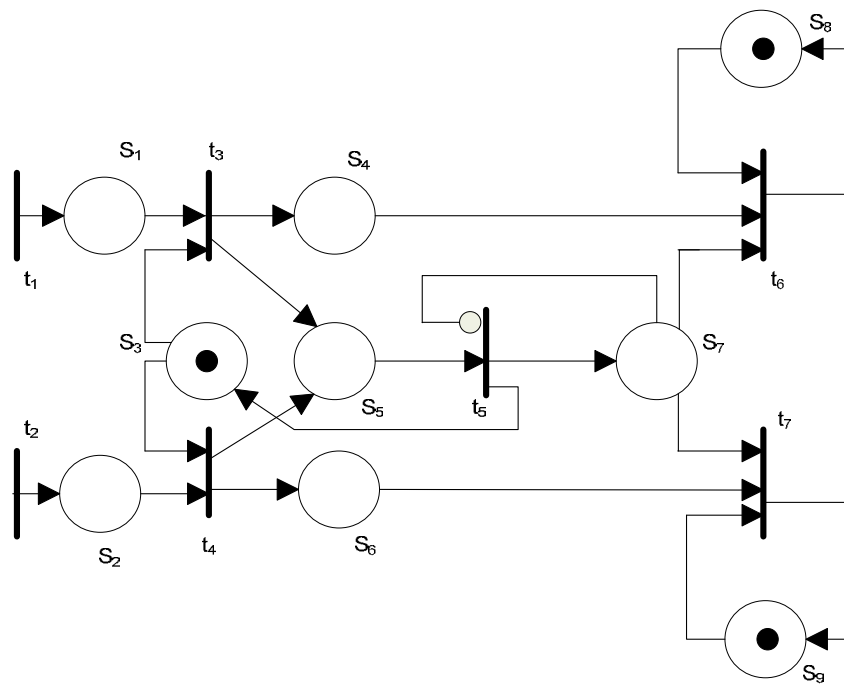


Рис. 5. Приклад мережі Петрі з двома сенсорами, одним МП та двома актюаторами

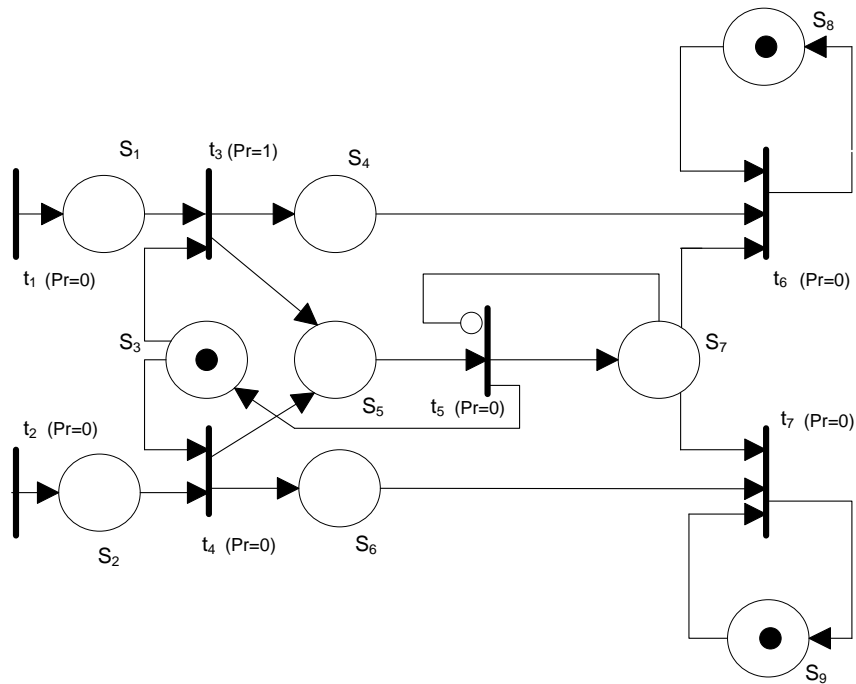


Рис. 6. Мережа Петрі з пріоритетами

Реальна автономна МЕМС може містити  $n$  сенсорів, один мікропроцесор та  $k$  актюаторів, причому  $n \geq k$ . Відповідна структура наведена на рис. 8.

Для аналізу роботи такої структури системи необхідно використати теорію кольорових мереж Петрі. Приклад відповідної мережі наведено на рис. 9. У разі необхідності урахування пріоритетів до мережі на рис. 9 необхідно додати відповідну інформацію (рис. 10), а якщо необхідне урахування часових параметрів, необхідно в кольоровій мережі врахувати часовий механізм (рис. 11).

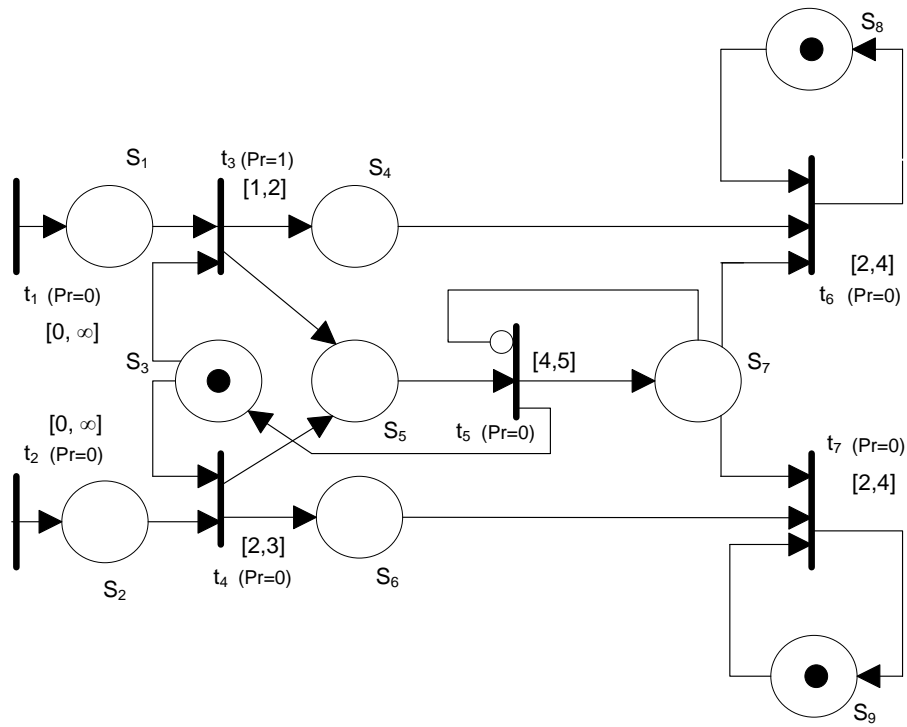


Рис. 7. Часова мережа Петрі з пріоритетами

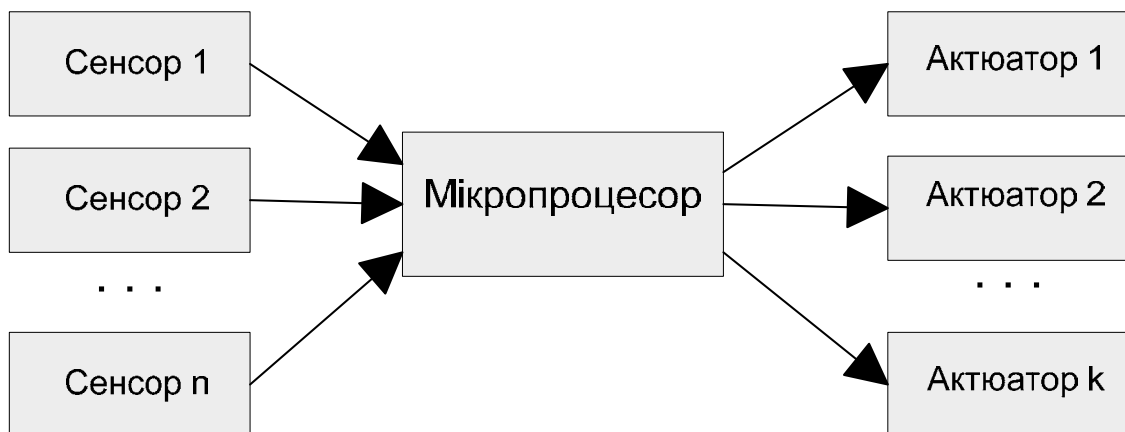


Рис. 8. Структура МЕМС з  $n$  сенсорами,  $k$  актюаторами і одним МП





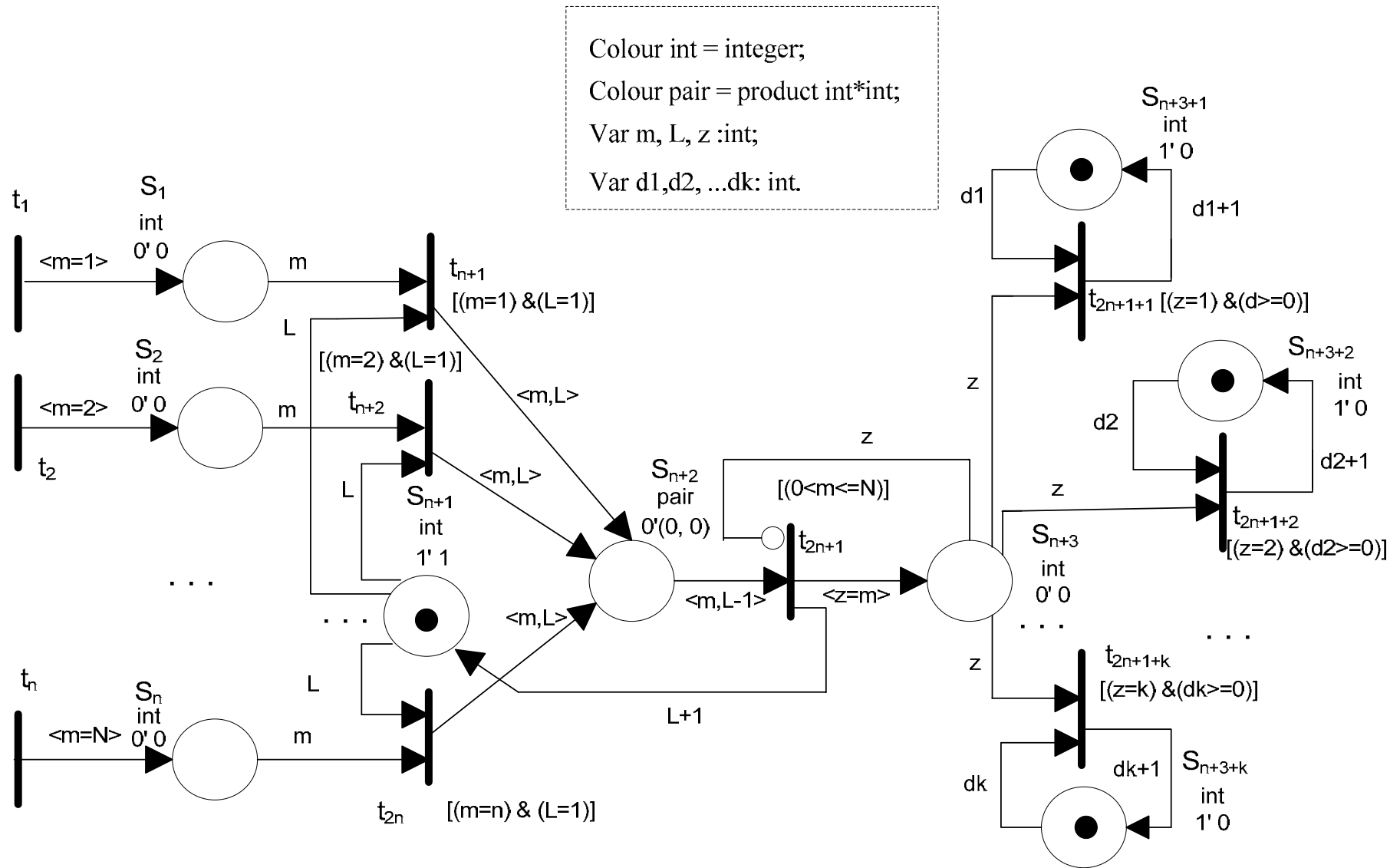


Рис. 9. Кольорова мережа Петрі для проектування та аналізу структури MEMC

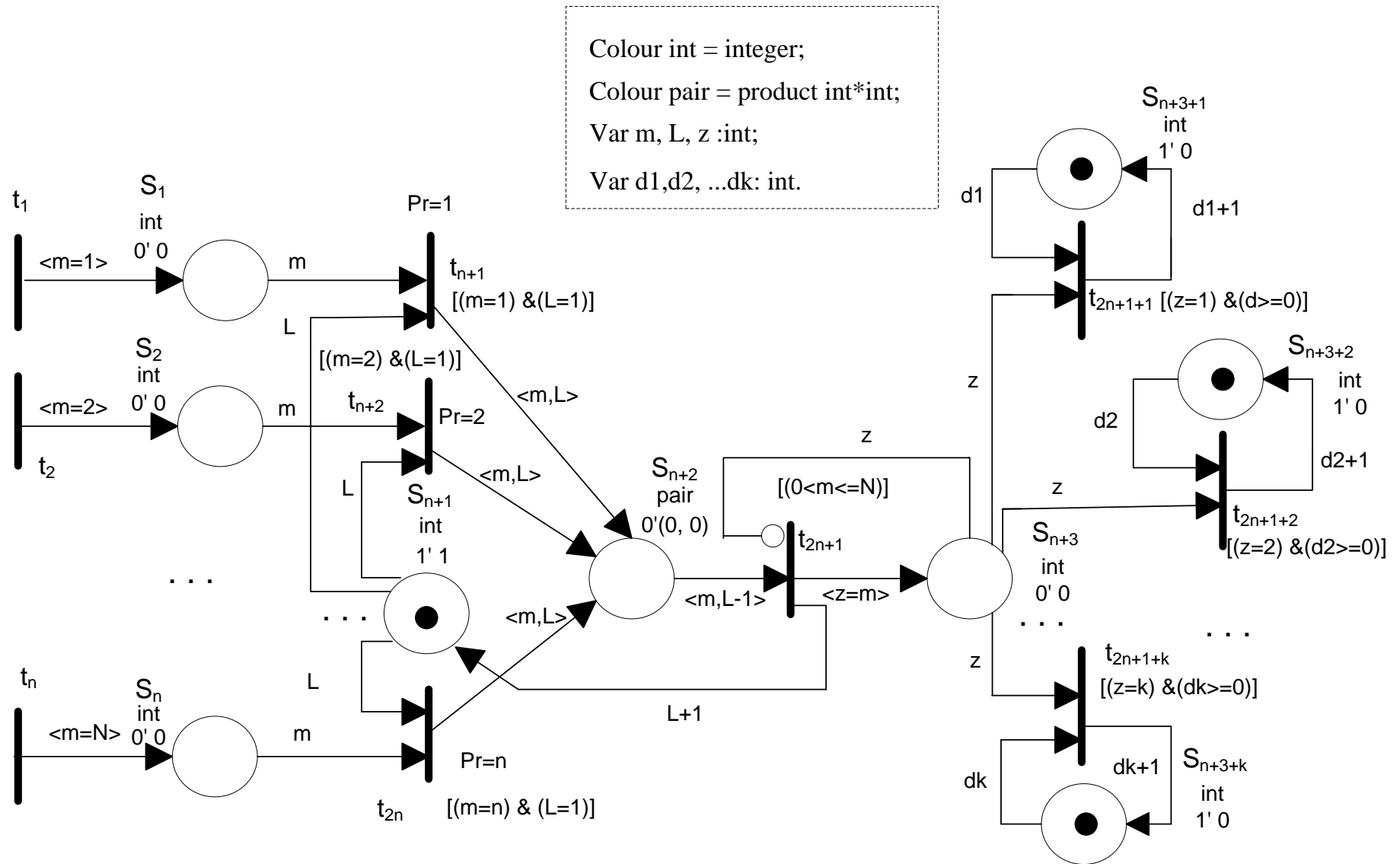


Рис. 10. Кольорова мережа Петрі для проектування та аналізу структури МЕМС з пріоритетами

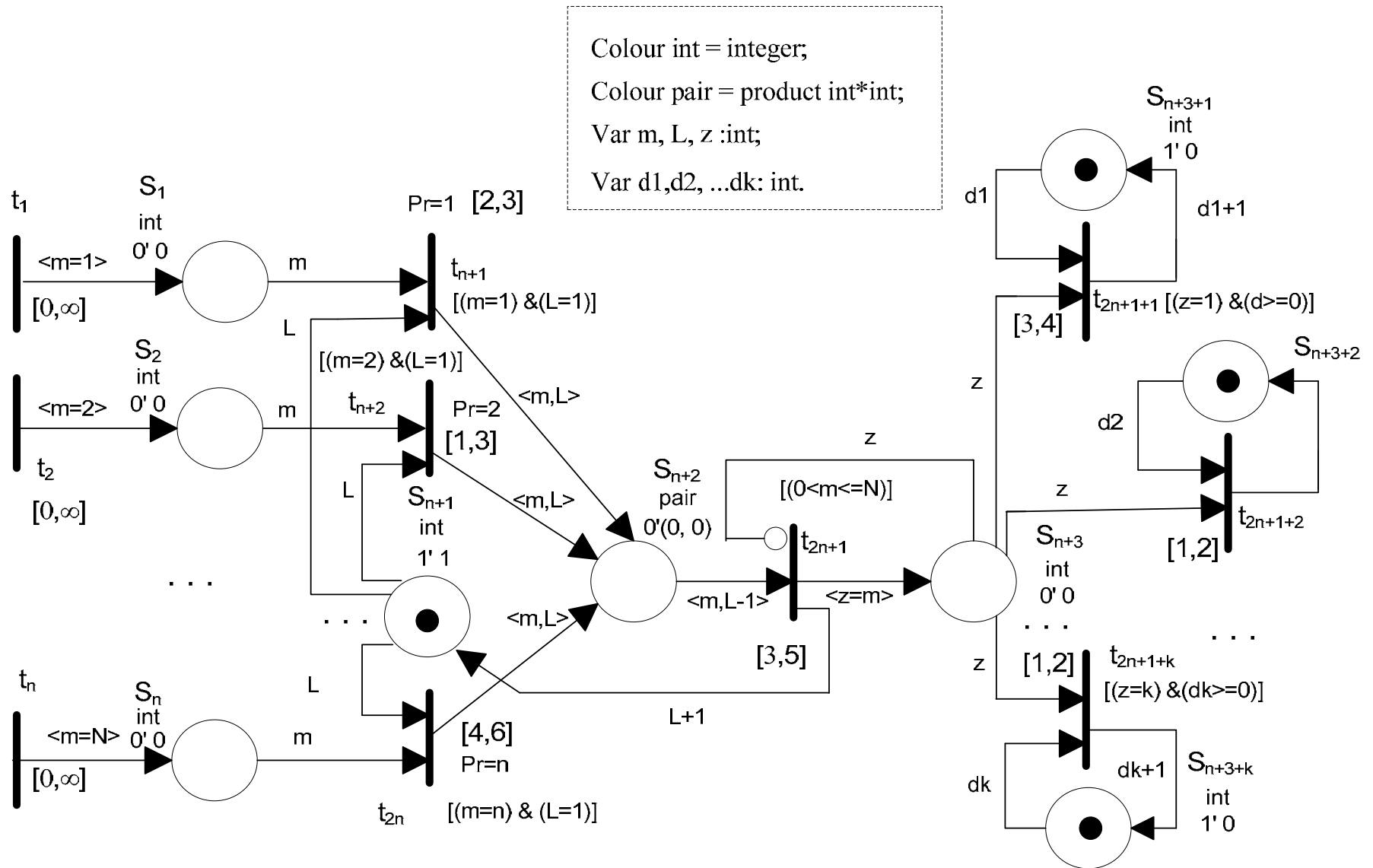


Рис. 11. Кольорова мережа Петрі для проектування та аналізу структури MEMC з пріоритетами та часовим механізмом

## Висновки

Розглянутий вище приклад показує доцільність застосування мереж Петрі при проектуванні MEMS на системному рівні для аналізу динаміки системи та визначення низки вихідних параметрів.

1. Gupta R.K., Zorian Y. *Introducing in Core-Based System Design // Design & Test of Computer, Oct/Dec, 1997.* 2. Биосенсоры // *Итоги науки и техники. Сер. Биотехнология. М.: ВИНТИ, 1990. Т. 26.* 3. Krishnamoorthy U., Solgaard O. *Self-Aligned Vertical Comb-drive Actuators for Optical Scanning Micromirrors // 2000 IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMS, Okinawa, Japan, Sep. 2001.* 4. Krishnamoorthy, U., Li, K., Yu, K., Lee, D., Heritage, J.P and Solgaard, O. *Dual-Mode micromirrors for Optical Phased Array Applications // Transducers'01, Munich, Germany, June 2001.* 5. Torsten Gerlach, Helmut Wurmus *Working principle and performance of the dynamic micropump // Sensors and Actuators A50, 1995. – P.135–140.* 6. Тернер Э., Карубе И. *Биосенсоры: основы и приложения. – М., 1992.* 7. Fatikow, S and Rembold, U, (1997). *Microsystems Technology and Microrobotics, Springer, New York.* 8. Петренко А. И., Семенов А. И. *Основы построения систем автоматизированного проектирования, – К., 1984.* 9. Петренко А. И. *Основы автоматизации проектирования. – К., 1982.* 10. Дж. Питерсон. *Теория сетей Петри и моделирование систем. – М., 1984.* 11. Котов В.Е. *Сети Петри. – М., 1984.*

УДК 004.942.001.57

П.В. Сердюк

Національний університет “Львівська політехніка”  
кафедра програмного забезпечення

## КОНСТРУКТИВНО-ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ ОБМЕЖУВАЧІВ СТРУМУ НА ОСНОВІ ТОНКОЇ НАДПРОВІДНОЇ ПЛАСТИНИ

© Сердюк П.В., 2006

**Розглянуто аспекти проектування надпровідних обмежувачів струму. Запропонований ефективний алгоритм синтезу конструктивних параметрів пристрою на підставі одновимірної математичної моделі теплоелектричних процесів у тонкій надпровідній пластині.**

**In this article designing principles of resistive fault current limiters are concerned. Effective algorithm of synthesis of construction parameters based on the one-dimensional mathematical model of thermoelectrical processes in thin superconducting film is proposed.**

### Вступ

Принципово новим розв'язанням проблеми захисту електронних пристроїв та схем від електричного перенавантаження (короткого замикання, електромагнітного імпульсу, удару блискавки тощо) стало використання надпровідних обмежувачів струму (НПОС). Принцип дії резисторних надпровідних обмежувачів струму полягає у нелінійній вольт-амперній характеристиці надпровідного матеріалу. У разі перевищення густини струму у надпровіднику певного критичного значення матеріал переходить із надпровідного у нормальний стан і його опір різко зростає.

Ми розглядаємо резисторні НПОС із надпровідної кераміки, виготовлені у вигляді пластини методом епітаксiального нарощування на діелектричній підкладці [1]. Перевага такого методу полягає у тому, що виготовлені таким способом плівки мають малу кількість дефектів. Для підкладки використовують спеціальні матеріали  $\text{LaAlO}_3$  або  $\text{MgO}$ , кристалічна структура яких подібна до структури надпровідної кераміки. Коефіцієнти температурного розширення цих матеріалів і надпровідної кераміки є близькими, що дає змогу вберегти надпровідні пластини від механічного пошкодження під час їхнього виготовлення.