

PETRI NET VÀ ỨNG DỤNG TRONG MÔ HÌNH HÓA, PHÂN TÍCH CÁC HỆ THỐNG SẢN XUẤT

TS. Hồ Khánh Lâm

Tập đoàn Bưu chính Viễn thông Việt Nam (VNPT)

Tác giả liên hệ: lamhokhanh@gmail.com

Ngày nhận: 29/11/2022

Ngày nhận bản sửa: 09/12/2022

Ngày duyệt đăng: 20/12/2022

Tóm tắt

Mạng Petri, còn được gọi là mạng địa điểm/chuyển tiếp (PT), là một trong một số ngôn ngữ mô hình hóa toán học được phát minh bởi nhà khoa học máy tính người Đức Carl Adam Petri trong luận án tiến sĩ năm 1962 của ông về K Truyền thông mit Automaten. Kể từ đó, Petri Net đã được phát triển và ứng dụng rộng rãi để mô hình hóa, phân tích và tối ưu hóa các hệ thống trong nhiều lĩnh vực như: Công nghệ thông tin, điện tử viễn thông, giao thông vận tải, hóa sinh, y tế, hệ thống sản xuất, kinh tế...; lý thuyết cơ bản về Petri Net và các ví dụ ứng dụng trong việc tối ưu hóa quy trình sản xuất.

Từ khóa: Petri Net, mô hình hóa, phân tích, hệ thống sản xuất.

Petri Net and its Applications in Modeling and Analysis of Production Systems

Abstract

A Petri net, also known as a place/transition (PT) net, is one of several mathematical modeling languages were invented by The German computer scientist Carl Adam Petri in his 1962 dissertation *Kommunikation mit Automaten*. Since then, Petri Net has been developed and widely used in modeling, analyzing and optimizing systems in such fields as: Information Technology, Electronics and Telecommunication, Traffic transportation, Biochemistry, medical, manufacturing systems, economic, etc. This paper presents the basic theory of Petri Net and its application examples in optimization of production process.

Keywords: Petri Net, modeling, analyzing, manufacturing system.

1. Giới thiệu

Để duy trì khả năng cạnh tranh sản phẩm trên thị trường khi có quá nhiều sản phẩm cùng loại, các nhà sản xuất phải đảm bảo các hệ thống sản xuất đạt được sự tối ưu về hiệu suất và chất lượng sản phẩm, thậm chí cả tính thẩm mỹ. Thiết kế và vận hành hiệu quả một hệ thống sản xuất tự động (AMS) có hoặc không có nhân công là quan trọng đối với các nhà sản xuất để đạt được mục tiêu này. Một hệ thống sản xuất phức tạp có thể gồm các nhân công, dây chuyền các máy công cụ, rô-bốt, bộ đệm, đồ gá, các phương tiện có điều khiển tự động và các thiết bị xử lý vật liệu khác. Các loại bộ phận khác nhau đi vào hệ thống tại các thời điểm rời rạc và được xử lý đồng thời; những phần

này gây ra mức độ chia sẻ tài nguyên cao. Rất khó để dự đoán tính toán các hành vi của các hệ thống sản xuất mà không mô hình hóa, phân tích và kiểm soát kỹ thuật. Do đó, một số kỹ thuật đã được phát triển để mô tả hành vi của các hệ thống sản xuất. Một trong số đó là Petri Net (PN). PN [1] là một công cụ đồ họa mạnh mẽ để lập mô hình các hệ thống sản xuất và phân tích theo thời gian xác định hoặc ngẫu nhiên các quá trình, các công đoạn: Đồng thời, song song, đồng bộ, phân tán và chia sẻ tài nguyên. Các mô hình đồ thị (graph) Petri Net cho phép trực quan hóa dễ dàng các hệ thống sản xuất phức tạp, có thể mô hình một hệ thống theo tầng (theo cách từ trên xuống dưới ở các mức trừu tượng và chi tiết khác nhau), và có thể trên các ứng

dụng của các loại PN khác nhau đã được đề xuất cho mô hình hóa, phân tích và kiểm soát các hệ thống sản xuất. Nội dung bài báo bao gồm: phần 1: Giới thiệu, phần 2: Cung cấp kiến thức cơ bản về mạng Petri, phần 3: Các ứng dụng của các loại Petri Net trong các hệ thống sản xuất, cuối cùng là phần 4: Kết luận và hướng nghiên cứu.

2. Cơ bản về Petri Net

Petri Net (PN) [2-4] là một đồ thị song hướng có trọng số gồm 4 bộ tham số: Tập hợp các vị trí P (place), tập hợp các chuyển tiếp T (transition), hàm vào I (input function) và hàm ra O (output function).

$$PN = (P, T, I, O) \tag{1}$$

Trong đó:

$$\left. \begin{aligned} P &= \{p_1, p_2, \dots, p_m\}; \quad m \geq 0 \\ T &= \{t_1, t_2, \dots, t_n\}; \quad n \geq 0 \\ P \cap T &= \emptyset; \\ I : T &\rightarrow P^\infty \\ O : P^\infty &\rightarrow T \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

Gọi $O(t_i)$ là tập hợp các vị trí ra đối với chuyển tiếp t_i , và A là tập hợp các cung được hình thành bởi các cặp (p_j, t_i) hoặc (t_i, p_j) . Vị trí p_j là vị trí vào của chuyển tiếp t_i nếu $p_j \in I(t_i)$, và p_j là vị trí ra nếu $p_j \in O(t_i)$.

$$\left. \begin{aligned} I(t_i) &= \{p_j \in P : (p_j, t_i) \in A\} \\ O(t_i) &= \{p_j \in P : (t_i, p_j) \in A\} \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

Như vậy, PN có hai tập hợp các nút (vị trí và chuyển tiếp) và một tập hợp các cung nối các cặp nút (vị trí, trạng thái).

Nếu PN có trọng số, thì W là tập hợp các giá trị nguyên mà mỗi thành phần của nó được ghi trên cung là trọng số của cung và nó chỉ ra số cung (cùng hướng) nối từng cặp nút (vị trí, chuyển tiếp) trong trường hợp có nhiều cung nối cặp nút). PN có trọng số được biểu diễn ở dạng:

$$PN = (P, T, A, W) \tag{4}$$

Trong đó: $A \subseteq (PxT) \cup (TxP)$ là tập hợp các cung từ nút vị trí đến nút chuyển

tiếp (p_j, t_i) hoặc từ các nút chuyển tiếp đến các nút vị trí (t_j, p_i) .

Ta có các biểu diễn của trọng số như sau:

$w : A \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$ là hàm trọng số trên các cung.

$w(p_j, t_i)$: là trọng số, hay số cung đi từ vị trí p_j đến chuyển tiếp t_i .

$w(p_j, t_i) = 0$ khi $p_j \notin I(t_i)$: p_j không thuộc tập hợp vào I của các chuyển tiếp t_i ;

$w(t_i, p_j)$: là trọng số, hay số cung đi từ chuyển tiếp t_j đến vị trí p_i .

$w(t_i, p_j) = 0$ khi $p_j \notin O(t_i)$: p_j không thuộc tập hợp ra O của các chuyển tiếp t_i ;

Nếu không có giá trị trọng số gắn trên cung thì cung này có trọng số mặc định = 1 (tức là, chỉ có một cung nối giữa vị trí và chuyển tiếp). Khi chỉ có một cung vào và một cung ra nối các cặp nút (vị trí, chuyển tiếp) và (chuyển tiếp, vị trí) thì đó là mạng Petri thông thường OPN (Ordinary PN).

Có 3 cách biểu diễn PN: Bằng đồ thị (GPN), bằng đại số (APN) và gắn màu (CPN).

- GPN (Graph PN) là PN được biểu diễn bằng đồ thị gồm: Các vòng tròn - là các vị trí; các thanh đậm (hay hộp chữ nhật) - là các chuyển tiếp; các mũi tên - là các cung nối các vị trí và các chuyển tiếp; và các dấu tròn nhỏ tô màu (đen) bên trong các vị trí - là các thẻ (token).

- APN (Algebraic PN) là PN biểu diễn một hệ thống và một giao thức như là một ngôn ngữ của ngữ pháp (grammar language) hoặc logic ở một dạng đại số (algebraic form).

- CPN (Coloured PN) là PN, trong đó, các cung hay các thẻ được gán dữ liệu gọi là màu của cung hay của thẻ. Giá trị dữ liệu có thể là loại bất kỳ, ví dụ như: Một bản ghi mà trường đầu tiên là đọc, trường thứ hai là chuỗi văn bản, trường thứ ba là danh sách các cặp số nguyên. Đối với một vị trí, tất cả các

thẻ cần phải có các màu thuộc loại cụ thể nào đó, và các màu của các thẻ làm thành một tập hợp màu của vị trí. Sự gán một màu cho từng

thẻ và một tập hợp màu cho từng vị trí cho phép ta sử dụng ít vị trí hơn cần thiết cho mạng chuyển tiếp vị trí.

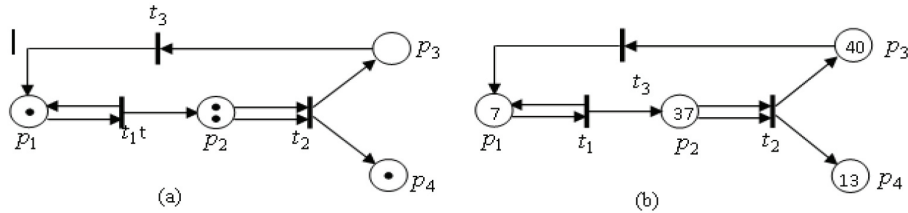
| Bảng 1. Một số biểu diễn đặc trưng các vị trí và chuyển tiếp của PN | | |
|--|---|--------------------------------|
| Các vị trí vào | Các chuyển tiếp | Các vị trí ra |
| Các trạng thái sẵn có | Sự kiện xảy ra | Các trạng thái sau |
| Dữ liệu vào | Bước tính toán, thực hiện của quá trình | Dữ liệu ra |
| Các tín hiệu vào | Bộ xử lý tín hiệu | Các tín hiệu ra |
| Khách hàng đến | Bàn phục vụ | Khách hàng được phục vụ |
| Các tài nguyên cần | Nhiệm vụ hay công việc (Task hay Job) | Các tài nguyên được giải phóng |
| Các điều kiện | Điều khoản logic | Các kết luận |
| Trạng thái của bộ xử lý | Yêu cầu bộ xử lý phục vụ | Bộ xử lý thực hiện xong |
| Thành phần hóa học | Phản ứng hóa học | Kết quả phản ứng hóa học |

Một PN có đánh dấu MPN (marked Petri net) gồm 5 bộ:

$$MPN = (P, T, A, W, M_0) \quad , \quad \text{hay} \\ (PN, M_0) \quad (5)$$

Trong đó, $PN = (P, T, A, W)$ và M_0 là đánh dấu ban đầu của tập hợp các vị trí P ; trạng thái của MPN được xác định bởi đánh dấu. Sự kích hoạt các chuyển tiếp làm thay đổi trạng thái của MPN. Không gian các trạng thái của MPN gồm có n vị trí, là một tập hợp tất cả

các đánh dấu, ký hiệu là N^n . Đánh dấu $M = [M(p_1), M(p_2), \dots, M(p_n)] \in N^n$ là vector hàng, trong đó, n là số nguyên dương. Ví dụ, mạng Petri cho ở hình 1(a) có đánh dấu là $M_0 = [1, 2, 0, 1]$. Khi có nhiều thẻ trong vị trí thì sử dụng các số trí để thay thế biểu diễn thẻ, ví dụ, mạng Petri ở hình 1(b) có đánh dấu $M_0 = [7, 37, 40, 13]$.



Hình 1. MPN

Nguyên tắc kích hoạt của MPN: Các chuyển tiếp có thể được phép hay không được phép kích hoạt. Sự kích hoạt các chuyển tiếp dẫn đến các thẻ được phân bố lại trong các vị trí, và kết quả là một đánh dấu mới. Đánh dấu MPN được thực hiện nhờ các quy tắc cho phép và kích hoạt các chuyển tiếp sau đây:

- Khi vị trí p_j vừa là vị trí vào vừa là vị trí ra của chuyển tiếp t_i , thì sự kích hoạt của chuyển tiếp t_i lấy đi một số thẻ bằng chính trọng số $w(p_j, t_i)$ từ vị trí vào p_j ,

$p_j \in I(t_i)$, và từng vị trí ra p_j của t_i được bổ sung thêm số thẻ mới bằng trọng số từ t_i đến p_j . Đánh dấu mới của vị trí p_j sẽ là:

$$M'(p_j) = M(p_j) - w(p_j, t_i) + w(t_i, p_j) ; i = 1, 2, \dots, n ; j = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

Trong đó, $M(p_j)$: số thẻ của vị trí vào p_j trước khi kích hoạt chuyển tiếp t_i ; và $w(p_j, t_i)$: trọng số của cung đi từ vị trí vào p_j đến t_i ; $w(t_i, p_j)$: trọng số của cung từ t_i đến p_j . Nếu có vị trí p_k là vị

trí ra của chuyển tiếp t_i , khi đó, đánh dấu mới của p_k sẽ là :

$$M'(p_k) = M(p_k) + w(t_i, p_k) \quad ; \quad (7)$$

$i = 1, 2, \dots, n ; k = 1, 2, \dots, m$

Trong đó, $w(t_i, p_k)$: trọng số của cung vào vị trí p_k từ chuyển tiếp t_i .

- Chuyển tiếp t_i chỉ có thể kích hoạt trong trường hợp nó được phép.

- Chuyển tiếp t_i được coi là được phép nếu mỗi vị trí p_j vào của t_i có số thẻ lớn hơn hay bằng số các cung đi từ vị trí p_j đến t_i , nghĩa là:

$$M(p_j) \geq w(p_j, t_i); \text{ với tất cả } p_j \in I(t_i) \quad (8)$$

- Các thẻ trong vị trí vào p_j , mà chúng cho phép chuyển tiếp t_i kích hoạt, được gọi là các thẻ cho phép của chuyển tiếp t_i .

PN có các đặc tính: Tuần tự, đồng bộ, kết hợp, tương tranh, đưng độ, hỗn độn, loại trừ lẫn nhau, ưu tiên.

Sức mạnh chính của PN là nó hỗ trợ phân tích nhiều đặc tính và các vấn đề liên quan đến các hệ thống được mô hình hóa. Có hai loại đặc tính mà ta có thể nghiên cứu với mô hình của PN: loại đặc tính phụ thuộc vào đánh dấu ban đầu, và loại đặc tính không phụ thuộc vào đánh dấu ban đầu. Các đặc tính phụ thuộc vào đánh dấu ban đầu còn được gọi là các đặc tính hành vi, đó là các đặc tính cơ bản như: Tính đạt được (reachability), tính hữu hạn (boundedness), tính tích cực (liveness), tính khứ hồi (reversibility) và trạng thái gốc (home state), tính phủ (coverability), tính cố chấp (persistence), khoảng cách đồng bộ (synchronic distance), tính công bằng (fairness), tính an toàn (safety), tính bảo thủ (conservative), và tính khứ hồi (reversibility).

3. Các ứng dụng của các loại Petri Nets trong các hệ thống sản xuất

3.1. Các loại PN

Khi các vị trí trong MPN có kích hoạt theo thời gian thì MPN được gọi là Petri Net theo thời gian TPN (Timed Petri Net) [5,6]. Các quy tắc kích hoạt được xác định khác nhau phụ thuộc vào cách mà TPN được gán nhãn bằng các biến thời gian. Các quy tắc kích hoạt được xác định cho TPN điều khiển quá trình chuyển các thẻ trong TPN. Những xác định ở trên dẫn đến các loại khác nhau của các TPN, đó là các mạng Petri thời gian xác định DTPN (Deterministic TPN) và các mạng Petri thời gian ngẫu nhiên STPN (Stochastic Timed Petri Net) và thời gian ngẫu nhiên chung GSPN, mà ở chúng các biến thời gian được gắn với các chuyển tiếp, các cung hoặc các thẻ.

3.1.1. DTPN

DTPN được Ramchandani giới thiệu đầu tiên vào năm 1974, trong đó, các nhãn thời gian được gán cho từng chuyển tiếp. Các chuyển tiếp thường được sử dụng để biểu diễn các tác động, và các tác động nhận thời gian thẻ thực hiện. Một DTPN được các định bằng 6 bộ:

$$DTPN = (P, T, I, O, M_0, \tau) \quad (9)$$

Hay: $DTPN = (P, T, A, W, M_0, \tau) \quad (10)$

Trong đó, (P, T, I, O, M_0) hay (P, T, A, W, M_0) là PN thông thường, $\tau : P(\text{or } T) \rightarrow R^+$ là hàm gán các chuyển tiếp với các trễ thời gian xác định trước (R^+ - một tập hợp các số thực ≥ 0).

Một chuyển tiếp t_i trong một DTPN có thể kích hoạt ở thời gian τ nếu và chỉ nếu:

- 1) Đối với bất kỳ vị trí vào p nào của chuyển tiếp t_i , đã có số thẻ bằng trọng số của cung nối trực tiếp p với t_i một cách liên tiếp với quãng thời gian $[\tau - \tau_i]$, trong đó, τ_i gắn với thời gian kích hoạt của chuyển tiếp t_i .

2) Sau khi chuyển tiếp kích hoạt, từng vị trí ra p của chuyển tiếp t_i sẽ nhận được số thẻ bằng trọng số của cung nối trực tiếp t_i với p ở thời gian τ .

3.1.2. STPN

Petri Net thời gian ngẫu nhiên STPN là một Petri Net, trong đó, các thời gian kích hoạt của các chuyển tiếp là ngẫu nhiên. STPN là một mô hình cao cấp cơ bản tạo ra một quá trình ngẫu nhiên. Sự lựa chọn đơn giản nhất cho các phân bố các thời gian kích hoạt các chuyển tiếp là phân bố mũ âm. Bởi vì đặc tính không nhớ của quá trình ngẫu nhiên, nên quá trình đánh dấu của STPN là một chuỗi Markov thuần nhất thời gian liên tục CTMC (continuous time homogeneous markov chain) với không gian trạng thái trong sự tương ứng một-một với đánh dấu là tập hợp đánh dấu đạt được $R(M_0)$. Ma trận tốc độ của chuyển tiếp của chuỗi markov có thể dễ dàng xây dựng từ đồ thị đạt được cho biết bởi các tốc độ kích hoạt của các chuyển tiếp của STPN.

Có hai loại STPN: Petri Net ngẫu nhiên SPN (Stochastic Petri Net) và Petri Net ngẫu nhiên chung GSPN (generalized SPN).

Các SPN có thời gian kích hoạt các chuyển tiếp phân bố mũ âm, thường được gọi tắt là SPN được đề xuất một cách độc lập bởi Natkin (1980) và Molloy (1981).

Một SPN được định nghĩa bằng 6 bộ:

$$SPN = (P, T, I, O, M_0, \lambda) \quad (11)$$

Trong đó:

(P, T, I, O, M_0) là PN với các tập hợp: $P = (p_1, p_2, \dots, p_m)$: tập hợp các vị trí; $T = (t_1, t_2, \dots, t_n)$: tập hợp các chuyển tiếp; $I \subset PxT$: tập hợp các cung vào; $I(t_i) = \{p_j \in P : (p_j, t_i) \in A\}$; $O \subset TxP$: tập hợp các cung ra; $O(t_i) = \{p_j \in P : (t_i, p_j) \in A\}$; $M_0 = (M_{01}, M_{02}, \dots, M_{0m})$: đánh dấu ban

đầu; $\lambda : T \rightarrow R$ là tập hợp các tốc độ kích hoạt, $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_n)$, λ_i là tốc độ kích hoạt của chuyển tiếp t_i , và có thể nó phụ thuộc vào đánh dấu, nên có thể viết $\lambda_i(M_j)$.

Thời gian kích hoạt được phân bố bố mũ và phân bố của biến ngẫu nhiên x_i của thời gian kích hoạt của chuyển tiếp t_i được cho bằng hàm phân bố tích lũy (CDF):

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda_i x}$$

Chuyển tiếp được phép với trễ kích hoạt nhỏ nhất sẽ kích hoạt và thay đổi đánh dấu. Khi một chuyển tiếp có thời gian được phép, thời gian trễ kích hoạt giảm dần ở tốc độ không đổi. Nếu chuyển tiếp không được phép do sự kích hoạt của chuyển tiếp đứng độ, thì thời gian dừng lại, và sự giảm dần thời gian sẽ được phục hồi lại (có thể với tốc độ khác) khi chuyển tiếp được phép trở lại. Khi thời gian đạt đến zero thì chuyển tiếp kích hoạt. Cho rằng có s đánh dấu trong tập hợp các đánh dấu đạt được $R(M_0)$, và chuỗi Markov là ergodic (tất cả các trạng thái là sinh công -ergodic state: Nghĩa là, không theo chu kỳ và truy toán dương – positive recurrent), thì phân bố xác suất trạng thái bền vững $\pi = (\pi_0, \pi_1, \dots, \pi_s)$ có thể tìm được nhờ giải hệ phương trình tuyến tính sau đây:

$$\begin{cases} \pi Q = 0 \\ \sum_{i=1}^s \pi_i = 1; \pi_i \geq 0, i = 0, 1, 2, \dots, s \end{cases} \quad (12)$$

Trong đó, $Q = [q_{ij}]$, là ma trận tốc độ chuyển tiếp (là ma trận vuông) bậc s mà các thành phần của nó nằm ở ngoài đường chéo chính là các tốc độ kích hoạt của chuyển tiếp t_k (có thể phụ thuộc đánh dấu) chuyển trạng thái từ M_i đến M_j được xác định bằng $q_{ij} = \lambda_k$. Nếu có một số chuyển tiếp kích

hoạt chuyển trạng thái từ M_i đến M_j thì q_{ij} là tổng của các tốc độ kích hoạt của các chuyển tiếp đó, $q_{ij} = \sum_{t_k \in T_{ij}} \lambda_k \cdot T_{ij}$ là tập hợp các chuyển tiếp được phép ở đánh dấu M_i). Tương tự, $q_{ij} = 0$ nếu không có chuyển tiếp nào chuyển M_i đến M_j , $i \neq j$; và q_{ii} được xác định sao cho thỏa mãn $\sum_{j=1} q_{ij} = 0$ (tổng của từng hàng = 0). Trong khi đó, các thành phần trên đường chéo chính làm thành tổng bằng 0 của các thành phần trên từng hàng. Như vậy:

$$q_{ii} = - \sum_{t_k \in E(\mu_i)} \lambda_k; q_{ij} = \sum_{t_k \in T_{ij}} \lambda_k$$

Cho rằng d_i là trễ kích hoạt của chuyển tiếp t_i : Là lượng thời gian liên tục trôi qua trước khi có thể kích hoạt chuyển tiếp và là một biến ngẫu nhiên x của trễ kích hoạt với hàm mật độ xác suất PDF $f(x)$ phân bố mũ âm:

$$f(x) = \lambda_i e^{-\lambda_i x} \quad (13)$$

Và hàm phân bố tích lũy CDF, mô tả toàn bộ phân bố xác suất của biến ngẫu nhiên x trong khoảng xác định:

$$x \rightarrow F(x) = P[X \leq x] = \int_0^x \lambda_i e^{-\lambda_i t} dt = -\lambda_i \frac{e^{-\lambda_i t}}{\lambda_i} \Big|_0^x = 1 - e^{-\lambda_i x} \quad (14)$$

Thông số của hàm phân bố xác suất PDF gắn với chuyển tiếp t_i là tốc độ kích hoạt λ_i . Trễ kích hoạt trung bình của chuyển tiếp t_i trong đánh dấu M_i được xác định là:

$$\bar{d}_i = \int_0^{\infty} [1 - F(x)] dx = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_i x} dx = \frac{1}{\lambda_i} = [\lambda_i(M_j)]^{-1} \quad (15)$$

Thời gian lưu trú (sojourn time) trong đánh dấu M_i là biến ngẫu nhiên với hàm PDF mũ âm với giá trị trung bình (mean):

$$\left[\sum_{i:t_i \in E(M_j)} \lambda_i(M_j) \right]^{-1} \quad (16)$$

$E(M_j)$ là tập hợp tất cả các chuyển tiếp được phép trong đánh dấu M_j .

Tất cả các trễ kích hoạt đều có hàm PDF mũ cho phép viết một biểu thức cho xác suất mà một chuyển tiếp t_k kích hoạt trước ở đánh dấu M_j :

$$P[t_k | M_j] = \frac{\lambda_k(M_j)}{\sum_{i:t_i \in E(M_j)} \lambda_i(M_j)}; t_k \in E(M_j) \quad (17)$$

3.1.3. GSPN

GSPN là mở rộng của SPN để giải quyết những bài toán không gian trạng thái. Các GSPN tổng quát hóa các PN bằng cách từng chuyển tiếp được gán một thời gian kích hoạt, mà thời gian này là ngẫu nhiên và có thể có phân bố mũ hoặc bằng 0.

GSPN (Generalized SPN) được biểu diễn bằng 4 bộ:

$$GSPN = (PN, T_1, T_2, W) \quad (18)$$

Trong đó:

$PN = (P, T, I, O, M_0)$ là mạng Petri cơ sở; $T_1 \subseteq T$: tập hợp các chuyển tiếp có thời gian kích hoạt; $T_2 \subseteq T$: tập hợp các chuyển tiếp tức thời; $T_1 \cap T_2 = \emptyset; T = T_1 \cup T_2$.

$W = (w_1, w_2, \dots, w_{|T|})$: mảng các giá trị thuộc tập các số thực dương, $w_i \in R^+$, mà w_i hoặc:

- Là tốc độ (có thể phụ thuộc đánh dấu) của phân bố mũ âm xác định trễ kích hoạt, khi chuyển tiếp t_i là chuyển tiếp có thời gian ($t_i \in T_1$); Chuyển tiếp có thời gian chỉ được phép kích hoạt sau một quãng thời gian ngẫu nhiên của phân bố mũ âm.

• Là một trọng số của kích hoạt (có thể phụ thuộc đánh dấu), khi chuyển tiếp t_i là chuyển tiếp tức thời, ($t_i \in T_2$). Chuyển tiếp tức thời kích hoạt ngay khi chúng được phép.

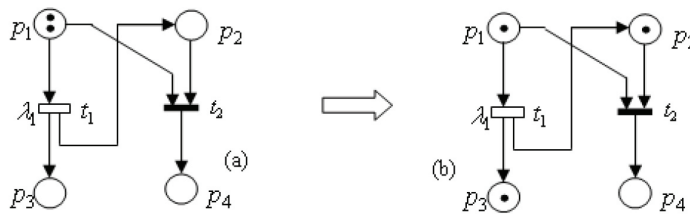
Mức ưu tiên kích hoạt thấp nhất là 0 với các chuyển tiếp có thời gian và các mức ưu tiên cao ≥ 1 với các chuyển tiếp tức thời.

Trong biểu diễn đồ thị của GSPN, hai loại chuyển tiếp: Các chuyển tiếp có thời gian (có trễ kích hoạt) được biểu diễn bằng hộp chữ nhật trắng trên đồ thị và các chuyển tiếp tức thời (thời gian kích hoạt bằng 0) được biểu diễn bằng hộp chữ nhật đen trên đồ thị.

Đối với chuyển tiếp có thời gian, khi được phép, nó bắt đầu kích hoạt, lấy các thẻ

ra khỏi các vị trí vào. Tuy nhiên, các thẻ chỉ được đưa vào các vị trí ra của chuyển tiếp ngay khi trễ kết thúc. Các thẻ bị “giữ trong chuyển tiếp” trong khoảng trễ kích hoạt. Nói một cách khác, sự kích hoạt của một chuyển tiếp có thời gian gồm 3 pha:

- 1) Pha bắt đầu kích hoạt, trong đó, các thẻ bị lấy ra khỏi các vị trí vào của chuyển tiếp.
- 2) Pha kích hoạt trong tiến trình, trong đó, các thẻ bị “giữ trong chuyển tiếp” với thời gian của trễ kích hoạt.
- 3) Pha kết thúc kích hoạt, trong đó các thẻ được chuyển đến các vị trí ra của chuyển tiếp.



Hình 2. Một GSPN đơn giản trước (a) và (b) sau khi kích hoạt chuyển tiếp t_1

Hình 2(a) là một GSPN đơn giản, trong đó, thời gian kích hoạt được phân bố mũ với tốc độ được gán cho chuyển tiếp t_1 có thời gian. Chuyển tiếp tức thời t_2 mặc dù có mức ưu tiên cao hơn chuyển tiếp t_1 nhưng không phép, do đó, sau quãng thời gian trễ chuyển tiếp t_1 kích hoạt và GSPN chuyển đến đánh dấu mới cho ở hình 2(b). Ở trạng thái này, cả hai chuyển tiếp đều được phép, nhưng chỉ có chuyển tiếp tức thời t_2 có mức ưu tiên cao hơn nên nó sẽ kích hoạt trước chuyển tiếp có thời gian t_1 .

3.1.4. CPN

CPN được định nghĩa bằng 9 bộ dữ liệu sau đây [7, 8]:

$$CPN = (P, T, A, \Sigma, N, C, E, G, I) \quad (19)$$

Trong đó:

- 1) P - tập hợp hữu hạn các vị trí.

- 2) T - tập hợp hữu hạn các chuyển tiếp.
- 3) A - tập hợp các cung mà $P \cap T = P \cap A = T \cap A = \emptyset$.

P, T, A là các tập hợp xác định cấu trúc của mạng Petri.

- 4) Σ - tập hợp hữu hạn của các tập hợp màu xác định trong CPN. Tập hợp này chứa tất cả các màu có thể, các phép toán và các hàm được sử dụng trong CPN.

- 5) N - hàm nút (node function), được xác định từ A vào trong $P \times T \cup T \times P$.

- 6) C - hàm màu, được xác định từ P vào trong Σ . C ánh xạ các vị trí $p \in P$ vào trong các màu trong tập hợp Σ , được viết là $C : P \rightarrow \Sigma$

- 7) G - hàm giám sát (guard function). G được xác định từ T vào trong các biểu thức mà:

$\forall t \in T : [Type(G(t)) = B \wedge Type(Var(G(t))) \subseteq \Sigma]$, trong đó B thuộc loại Boolean có giá trị boole true hay false. $Type(Vars)$ chỉ tập hợp các kiểu $\{Type(v) \mid v \in Vars\}$, $Vars$ là tập hợp các biến, $Vars(G(t))$ chỉ các biến được sử dụng trong $g(t)$.

8) E - hàm biểu thức của cung. Nó được xác định từ A vào trong các biểu thức mà:

Vào $\forall a \in A : [Type(E(a)) = C(p(a))_{MS} \wedge Type(var(E(a))) \subseteq \Sigma]$, trong đó, $p(a)$ là vị trí trong $N(a)$ và $C(p)_{MS}$ là tập hợp hữu hạn các multiset.

9) I - hàm khởi tạo. I được xác định từ P vào trong trong các biểu thức đóng mà: khởi tạo

$\forall p \in P : [Type(I(p)) = C(p)_{MS} \wedge Var(I(p)) = \emptyset]$. Biểu thức khởi tạo phải đánh giá multiset các thẻ với sự tương ứng màu với mẫu của vị trí $C(p)$.

Công cụ mô phỏng CPNtools (Jensen & Kristensen, 2009) khá nổi tiếng về ứng dụng và nó sử dụng các định nghĩa về CPN trên đây.

CPN được xác định như:

- Là ngôn ngữ mô hình cho các hệ thống mà trong đó: Sự đồng bộ, truyền thông, và chia sẻ tài nguyên là các đặc điểm quan trọng.

- Là kết hợp của các Petri Net và ngôn ngữ lập trình, trong đó: Các cấu trúc điều khiển, đồng bộ, truyền thông, và chia sẻ tài nguyên được mô tả bằng các Petri Net; Dữ liệu và xử lý dữ liệu được mô tả bằng ngôn ngữ lập trình chức năng.

- Mỗi CPN có thể được chuyển đổi về một Petri Net tương đương và ngược lại.

- Nếu CPN có các kiểu dữ liệu không giới hạn, như các số nguyên, các chuỗi văn bản hoặc các số thực, thì Petri Net tương đương có thể trở thành không giới hạn.

Trong CPN, các vị trí được biểu diễn bằng các hình tròn hay hình ellipsis, các thanh chữ nhật hay vuông biểu diễn các chuyển

tiếp, các mũi tên biểu diễn các cung. Nhưng trong khi các thẻ ở mạng Petri thông thường đơn giản, giống nhau và chỉ thể hiện trạng thái của vị trí bằng số lượng, thì trong CPN, các thẻ được gán các giá trị dữ liệu thuộc kiểu nào đó. Giá trị dữ liệu này được gọi là màu. Màu gắn với một thẻ có thể thay đổi bởi một kích hoạt chuyển tiếp. Mỗi vị trí có thể được gắn nhãn bằng một hoặc nhiều thẻ. Số thẻ cùng với các màu của thẻ thể hiện trạng thái của hệ thống, được gọi là đánh dấu của mô hình CPN. Trong mô hình CPN, các vị trí và các chuyển tiếp được gọi là các nút. Cùng với các cung chúng tạo thành một cấu trúc mạng. Trạng thái của hệ thống được thể hiện bằng các vị trí, các mô tả bằng văn bản đặt bên cạnh các vị trí, các chuyển tiếp và trên các cung. Biểu thức trên các cung mô tả trạng thái của CPN chuyển đổi như thế nào khi các chuyển tiếp xuất hiện. Các mô tả văn bản được viết ở ngôn ngữ lập trình ML của CPN, là mở rộng của ngôn ngữ ML chuẩn (là ngôn ngữ lập trình chức năng). Để thuận tiện, tên của các vị trí viết bên trong các hình ellip. Các tên không có ý nghĩa hình thức nhưng chúng rất quan trọng đối với khả năng đọc được của mô hình CPN, giống như ta sử dụng các tên ở mã ngữ (mnemonic name) trong lập trình hợp ngữ.

Các CPN tạo nên những mô hình mạng cô đọng nhờ sử dụng định nghĩa các màu. Điều này có thể minh họa bởi ví dụ sau đây:

Xét một hệ thống sản xuất gồm hai máy M1 và M2 xử lý các sản phẩm thô thuộc 3 loại khác nhau. Sản phẩm loại của các loại 1, 2, và 3 đi qua một công đoạn thao tác có thể được thực hiện bởi hoặc M1 hoặc M2. Sau khi hoàn thành xử lý, các sản phẩm được đưa ra khỏi hệ thống và sản phẩm mới cùng loại được đưa vào hệ thống. Hình 3 là mô hình PN của hệ thống. Các vị trí và các chuyển tiếp trong mô hình là:

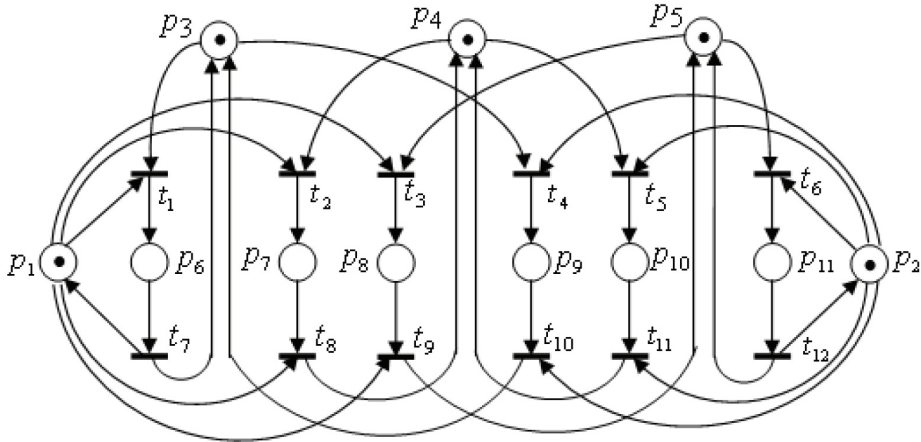
$p_1(p_2)$: các máy M1 (M2) sẵn sàng;

$p_3(p_4, p_5)$: có sản phẩm thô loại 1 (loại 2,

loại 3); $p_6(p_7, p_8)$: M1 xử lý sản phẩm thô

loại 1 (loại 2, loại 3); $p_9(p_{10}, p_{11})$: M2 xử lý sản phẩm thô loại 1(loại 2, loại 3); $t_1(t_2, t_3)$: M1 bắt đầu xử lý sản phẩm thô loại 1 (loại 2, loại 3); $t_4(t_5, t_6)$: M2 bắt đầu xử lý

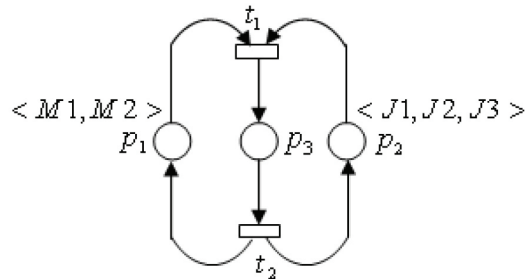
sản phẩm thô loại 1 (loại 2, loại 3); $t_7(t_8, t_9)$: M1 kết thúc xử lý sản phẩm thô loại 1 (loại 2, loại 3); $t_{10}(t_{11}, t_{12})$: M2 kết thúc xử lý sản phẩm thô loại 1 (loại 2, loại 3).



Hình 3. Mô hình PN của một hệ thống sản xuất đơn giản

Bây giờ ta chuyển Petri Net (hình 3) hệ thống sản xuất đơn giản sang mô hình CPN cho ở hình 4. Ta nhận thấy, chỉ có 3 vị trí và 2 chuyển tiếp trong mô hình CPN so với 11 vị trí và 12 chuyển tiếp trong mô hình Petri Net ở hình 3. Vị trí p_1 của mô hình CPN xác định trạng thái của hai máy M1 và M2 (tương ứng với các vị trí p_1, p_2 của mô hình Petri Net), vị trí p_2 của mô hình CPN xác định các loại sản phẩm thô tương ứng với các vị trí p_3, p_4, p_5 của mô hình Petri Net), vị trí p_3 của mô hình CPN xác định

sản xuất đang diễn ra (tương ứng với các vị trí $p_6(p_9), p_7(p_{10}), p_8(p_{11})$ của mô hình Petri Net), chuyển tiếp t_1 của mô hình CPN xác định quá trình sản xuất bắt đầu (tương ứng với các chuyển tiếp $t_1(t_4), t_2(t_5), t_3(t_6)$ của mô hình Petri Net), và chuyển tiếp t_2 xác định quá trình sản xuất kết thúc (tương ứng với các chuyển tiếp $t_7(t_{10}), t_8(t_{11}), t_9(t_{12})$ của mô hình Petri Net).



Hình 4. CPN của Petri Net hệ thống sản xuất đơn giản cho ở Hình 3

Như vậy, CPN của hệ thống sản xuất này có 3 tập hợp màu: Trạng thái máy SM, sản phẩm SP và trạng thái máy x sản xuất

$SM \times SP$, trong đó, $SM = \{M1, M2\}$, $SP = \{J1, J2, J3\}$. Màu của từng nút như sau

$$C(p_1) = \{M1, M2\}, C(p_2) = \{J1, J2, J3\}, C(p_3) = SM \times SP, C(t_1) = C(t_2) = SM \times SP.$$

Sự kết hợp các đặc tính của STPN và CPN tạo ra CPN có thời gian ngẫu nhiên SCPN hay thời gian ngẫu nhiên chung GSCPN.

3.1.5. FPN

Có nhiều định nghĩa khác nhau của FPN, ở đây, theo [9], FPN là sự kết hợp của Petri Net và Logic mờ, và được định nghĩa bởi 9 bộ như sau:

$$FPN = (P, T, D, I, O, \alpha, \beta, \gamma, M0) \quad (20)$$

Trong đó:

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$: tập hợp hữu hạn các vị trí; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$: tập hợp hữu hạn các chuyển tiếp; $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$: tập hợp hữu hạn các định đề (statements); Các tập hợp P, T, D tách biệt từng cặp: $P \cap T = P \cap D = T \cap D = \emptyset$; I, O : hàm của tập hợp các vị trí vào, các vị trí ra tương ứng, trong đó: $I: P \rightarrow T$: hàm vào, ánh xạ từ các vị trí đến các chuyển tiếp; $O: T \rightarrow P$: hàm ra, ánh xạ từ các chuyển tiếp đến các vị trí; $\alpha: P \rightarrow D$: hàm bó định đề (statement binding function) $\alpha(p)$: ánh xạ từ các vị trí đến các định đề; $\beta: T \rightarrow [0,1]$: hàm bậc đúng (truth degree function) $\beta(t)$: ánh xạ từ các chuyển tiếp đến các giá trị thực trong khoảng 0 và 1; $\gamma: T \rightarrow [0,1]$: hàm

ngưỡng (threshold function); $M0: P \rightarrow [0,1]$: đánh dấu ban đầu.

FPN sử dụng các phép toán t -norm, hay là hàm min (hàm Minimum t-norm, còn được gọi là T-chuẩn hoặc chuẩn tam giác) và s -norm, hay là hàm max (Maximum s-norm, còn được gọi là co-norm hoặc T-đối chuẩn) của logic mờ cho các tính toán các giá trị mờ.

Cho rằng ta có một $FPN = (P, T, D, I, O, \alpha, \beta, \gamma, M0)$,

$t \in T, I(t) = \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{ik}\}$ là tập hợp các vị trí vào đối với chuyển tiếp t , $\beta(t)$ là giá trị của hàm bậc đúng β tương ứng với t và $\beta(t) \in (0,1]$ (không bao gồm 0), $\gamma(t)$ là giá trị của hàm ngưỡng γ tương ứng với t , và FPN có đánh dấu hiện tại, được biểu diễn bằng hàm $M: P \rightarrow [0,1]$. Ngoài ra, $min, *, max$ là nhỏ nhất, tích đại số, và lớn nhất tương ứng.

Khi đó:

Chuyển tiếp t được phép đối với đánh dấu hiện tại M nếu min đối với tất cả các vị trí vào của chuyển tiếp t là dương và lớn hơn hoặc bằng giá trị của hàm ngưỡng γ theo t , nghĩa là:

$$min(M(p_{i1}), M(p_{i2}), \dots, M(p_{ik})) \geq \gamma(t) > 0 \text{ for } p_{ij} \in I(t), j = 1, \dots, k \quad (21)$$

Sự kích hoạt của chuyển tiếp t kéo theo sự lấy ra các thẻ từ các vị trí vào của t và sự bổ xung các thẻ vào các vị trí ra của t . Có hai chế độ vận hành của FPN:

Mode 1: Nếu M là đánh dấu hiện tại của FPN cho phép chuyển tiếp t và M' là đánh dấu nhận được bởi chuyển tiếp t kích hoạt, thì đối với từng vị trí $p \in P$:

$$M'(p) = \begin{cases} 0 & \text{if } p \in I(t) \\ max(min(M(p_{i1}), M(p_{i2}), \dots, M(p_{ik})) * \beta(t), M(p)) & \text{if } p \in O(t) \\ M(p) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (22)$$

Trong mode 1, thủ tục để tính đánh dấu M' như sau:

(1) Các thẻ được lấy ra từ các vị trí vào của chuyển tiếp t : Điều kiện thứ nhất của (22);

(2) Các thẻ trong tất cả các vị trí ra của chuyển tiếp t được thay đổi theo cách sau: Trước tiên, giá trị của min cho tất cả các vị trí vào của t được tính, sau đó, tích của min cho tất cả các vị trí vào của t và giá trị của hàm bậc đúng $\beta(t)$ được xác định, và cuối

$$M'(p) = \begin{cases} \max(\min(M(p_{i1}), M(p_{i2}), \dots, M(p_{ik})) * \beta(t), M(p)) & \text{if } p \in O(t) \\ M(p) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (23)$$

Trong khi ở Mode 1, với điều kiện thứ nhất, các thẻ chỉ bị lấy ra khỏi các vị trí vào $p \in I(t)$ của chuyển tiếp t , thì ở Mode 2, các thẻ không bị lấy đi khỏi các vị trí vào mà được sao chép đến các vị trí ra $p \in O(t)$ của chuyển tiếp t .

Ví dụ minh họa sau đây về FPN: Cho FPN ở hình 5, với tập hợp các vị trí là $P = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5\}$, tập hợp các chuyển tiếp là $T = \{t_1, t_2\}$, các hàm vào: $I(t_1) = \{p_1, p_2\}$, $I(t_2) = \{p_2, p_3\}$, các hàm ra: $O(t_1) = \{p_4\}$, $O(t_2) = \{p_5\}$, tập hợp định đề $D = \{d_1, d_2, d_3, d_4, d_5\}$, các hàm bố định đề $\alpha: \alpha(p_1) = d_1$, $\alpha(p_2) = d_2$, $\alpha(p_3) = d_3$, $\alpha(p_4) = d_4$, $\alpha(p_5) = d_5$, các hàm bậc đúng $\beta: \beta(t_1) = 0.7$, $\beta(t_2) = 0.8$, các hàm ngưỡng $\gamma: \gamma(t_1) = 0.5$, $\gamma(t_2) = 0.4$, và đánh dấu ban đầu $M_0 = \{0.6, 0.5, 0.7, 0, 0\}$

cùng, giá trị tương ứng với $M'(p)$ cho từng $p \in P$ nhận được như là kết quả của max của giá trị tích và đánh dấu $M(p)$: Điều kiện thứ hai của (22);

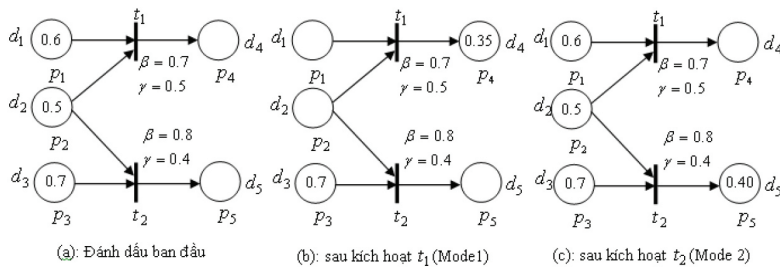
(3) Các thẻ trong các vị trí còn lại của FPN không thay đổi: Điều kiện thứ ba của (22).

Mode 2: Nếu M là đánh dấu hiện tại của FPN cho phép chuyển tiếp t và M' là đánh dấu nhận được bởi chuyển tiếp t kích hoạt, thì đối với từng vị trí $p \in P$:

Ở hình 5(a), đánh dấu ban đầu đều làm cho cả hai chuyển tiếp được phép bởi thỏa mãn điều kiện (5.11) vì đánh dấu tối thiểu $M(p_2) = 0.5 \geq \gamma(t_1) > \gamma(t_2)$. Ở hình 5(b), chuyển tiếp t_1 kích hoạt theo Mode 1, khi đó, các vị trí vào p_1, p_2 có đánh dấu $M'(p_1) = M'(p_2) = 0$ theo điều kiện 1 của (22), vị trí ra p_4 có đánh dấu mới thỏa mãn điều kiện 2 của (22):

$$M'(p_4) = 0.35 = \max(\min(M(p_1), M(p_2)) * \beta(t_1), M(p_4)) = \max(\min(0.6, 0.5) * (0.7), 0) = 0.5 * 0.7$$

Chuyển tiếp t_2 lúc này không được phép kích hoạt nữa. Ở hình 5(c), sự kích hoạt của chuyển tiếp t_2 theo Mode 2 không lấy đi các thẻ ở các vị trí vào của t_2 mà chỉ sao chép số thẻ ít nhất (bằng 0.5) từ vị trí p_2 sang vị trí ra của t_2 là p_5 đồng thời nhân với giá trị hàm bậc đúng $\beta(t_2) = 0.8$, thỏa mãn điều kiện 1 của (22):



Hình 5. FPN trước và sau kích hoạt các chuyển tiếp

3.2. Các ứng dụng của các loại PN cho các hệ thống sản xuất

Các hệ thống sản xuất phức tạp trong nghiên cứu ngành công nghiệp. Vì thế, có nhiều nghiên cứu ứng dụng các loại PN để mô hình hóa và phân tích các hệ thống sản xuất và kinh doanh. Nhóm nghiên cứu Imam Mukhlash [10] đặt ra các phân tích có thể được thực hiện bằng cách mô hình hóa quy trình kinh doanh bằng CPN. Trong nghiên cứu này, mục tiêu là xác định mức độ kiểm tra sự phù hợp của các quy trình kinh doanh, biểu đồ khả năng tiếp cận và phân tích nút cổ chai. Kết quả phân tích được sử dụng để xây dựng mô hình đề xuất. Dựa trên phân tích của nghiên cứu trường hợp, ví dụ: Thép công nghiệp ở Indonesia, mô hình được đề xuất có giá trị tốt hơn so với mô hình ban đầu. Nhóm Florin Blaga [11] có cách tiếp cận vấn đề cân bằng của các dây chuyền đặc trưng trong ngành dệt may quần áo. Họ sử dụng TPN để mô hình hóa và mô phỏng để phân tích ba dây chuyền, sản xuất các sản phẩm sau: áo khoác, váy và quần dựa trên thời gian, theo đó, làm nổi bật các tắc nghẽn và mang lại thông tin cho những người ra quyết định quản lý. Do sự các hệ thống sản xuất càng ngày càng phức tạp, việc ra quyết định bảo trì trở thành ngày càng thách thức. Mô phỏng đã trở nên hiệu quả cách để tránh các quyết định tốn kém thông qua phân tích what-if của các chính sách bảo trì khác nhau và lịch trình bảo trì trước khi triển khai thực tế. Nhóm của Yong Lei trong nghiên cứu [12] đã xây dựng một gói mô phỏng mới được mô đun hóa cho các hệ thống sản xuất đã được phát triển bằng cách sử dụng STPN. Bằng cách sử dụng các mô-đun chức năng cơ bản, nghiên cứu có thể nhanh chóng xây dựng các dây chuyền sản xuất với các cấu hình và chính sách bảo trì khác nhau. Những năm gần đây, ngành sản xuất hàng may mặc của nhiều nước đang có sự phát triển rất lớn và cũng gặp nhiều cạnh tranh trên thị trường, đã có nhiều nghiên cứu ứng dụng các loại PN để mô hình hóa, phân tích

và tối ưu các dây chuyền may quần áo được công bố. Xiaohua Wang và nhóm nghiên cứu [13] đã sử dụng TPPN (timed place petri net) để mô hình hóa hệ thống treo quần áo (garment hanging system) trong dây chuyền may quần áo đa nhiệm nhằm để lập lịch trình tối ưu linh hoạt của quy trình trong sản xuất hàng may mặc đa nhiệm. Hệ thống sản xuất linh hoạt (FMS) là một hệ thống sự kiện rời rạc và chứa một tập hợp các máy đa năng, hệ thống vận chuyển tự động, hệ thống ra quyết định, nhiều luồng quy trình công việc đồng thời tạo ra các sản phẩm khác nhau và thường khai thác các tài nguyên dùng chung để giảm chi phí sản xuất (Jeng, 1997a, Zuberek và Kubiak, 1994). Có nhiều phương pháp và công cụ được sử dụng để lập mô hình và phân tích FMS như mạng xếp hàng, chuỗi Markov, mô phỏng và SPN. SPN như một công cụ đồ họa và toán học, có thể được sử dụng để mô hình hóa và phân tích các hệ thống phức tạp có thể được mô tả là đồng bộ, song song, đồng thời, phân tán, chia sẻ tài nguyên, không xác định và/hoặc ngẫu nhiên. Trong các mô hình SPN, chúng ta có thể mô tả rõ ràng mối quan hệ nhân quả của các sự kiện không chắc chắn bằng cách sử dụng các vị trí, chuyển tiếp và cung. Do đó, sử dụng SPN, chúng ta có thể xây dựng mô hình FMS dễ dàng hơn so với sử dụng các mô hình khác. SPN kết hợp sức mạnh mô hình hóa của PN và khả năng dễ phân tích của các quy trình Markov cho mục đích phân tích hiệu suất (Molloy, 1982). Nhưng phân tích và thiết kế các hệ thống sản xuất phức tạp thường liên quan đến hai loại không chắc chắn: Tính ngẫu nhiên và tính mờ. Trong nghiên cứu của Fatih Tüysüz và Cengiz Kahraman [14], họ đã đề xuất một cách tiếp cận để mô hình hóa một FMS bằng cách sử dụng các SPN cùng với lý thuyết tập mờ (Fuzzy theory) để biểu diễn cả tính biến thiên ngẫu nhiên và độ không chính xác. Theo cách tiếp cận này, tham số của phân bố hàm mũ được biểu diễn bằng

một số mờ tam giác. Bằng cách sử dụng tham số mờ và toán học mờ, phân phối trạng thái ổn định mờ thu được. Mặc dù các FPN mờ và SPN ngẫu nhiên đã được sử dụng riêng biệt trong mô hình hóa và phân tích FMS, nhưng đóng góp quan trọng của nghiên cứu này, lần đầu tiên, là gợi ý về việc sử dụng lý thuyết tập mờ cùng với các SPN trong mô hình hóa hệ thống sản xuất phức tạp.

4. Kết luận và hướng nghiên cứu

Trên đây chỉ là cơ sở lý thuyết về Petri Net, và một số nghiên cứu ứng dụng trong mô hình hóa, phân tích các hệ thống sản xuất trong nhiều ngành công nghiệp nhằm mục tiêu tối ưu và tăng hiệu năng các hệ thống sản xuất. Thực tế các loại Petri net là

các công cụ rất thích hợp cho mô phỏng phân tích và tính toán hiệu năng của nhiều hệ thống trong nhiều lĩnh vực mà các nghiên cứu đã và đang ứng dụng như: Công nghệ thông tin, điện tử viễn thông, tự động hóa và robot, sản xuất kinh doanh, logistics, giao thông vận tải, công nghiệp dệt may, y học, hóa sinh, v.v. Ở nhiều nước khoa học phát triển, lý thuyết Petri Net đã được đưa vào giảng dạy ở cấp sau đại học để sử dụng cho các nghiên cứu khoa học, và có các hội thảo khoa học về ứng dụng và phát triển Petri Net. Một luận án về khoa học máy tính, điện tử viễn thông ở VN gần đây đã áp dụng các lý thuyết Petri net cho các nghiên cứu và đạt kết quả tốt.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Petri, Carl A. (1962), "Kommunikation mit Automaten". Ph. D. Thesis. University of Bonn.
- [2]. TS Hồ Khánh Lâm, "Mạng Petri Lý thuyết và ứng dụng". Sách NXB KHKT, 2015.
- [3]. Tadao Murata, Petri Nets: Properties, Analysis and Applications.
- [4]. Peterson, James Lyle (1981), "Petri Net Theory and the Modeling of Systems". Prentice Hall. ISBN 0-13-661983-5.
- [5]. Falko Bause, Pieter S. Kritzinger, "Stochastic Petri Nets". ©Bause and Kritzinger, 2002.
- [6]. M. Ajmone Marsan, Gianfranco Balbo, Gianni Conte, Susanna Donatelli, Giuliana Franceschinis, "Modelling with generalized stochastic Petri nets". Università degli Studi di Torino.
- [7]. Jensen, Kurt (1996), "Coloured Petri Nets". (2 ed.). Berlin: Heidelberg. p. 234. ISBN 3-540-60943-1.
- [8]. Jensen, Kurt. "Coloured Petri Nets: Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use" (Volume 1), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1992.
- [9]. M. H. Aziz, Erik L. J. Bohez, and Chanchal Saha, "Classification of Fuzzy Petri nets, and their applications". World Academy of Science, Engineering and Technology 72 2010.
- [10]. Imam Mukhlash, Widya Nilam Rumana, Dieky Adzkiya, Riyanarto Sarno, "Business Process Improvement of Production Systems Using Coloured Petri Nets". Bulletin of Electrical Engineering and Informatics Vol. 7, No. 1, March 2018, pp. 102-112, ISSN: 2302-9285, DOI: 10.11591/eei.v7i1.845.
- [11]. Florin BLAGA, Voichita HULE, Renata BODEA, Iulian STANASEL, "Evaluation of the Industry Fabrication lines performances using Petri Network Models". ANNALS OF THE ORADEA UNIVERSITY Fascicle of Management and Technological Engineering. ISSUE #3, DECEMBER 2013, <http://www.imtuoradea.ro/auo.fmte/>
- [12]. Yong Lei, Jianbo Liu, Jun Ni and Jay Lee, "Production line simulation using STPN for maintenance scheduling". J Intell Manuf (2010) 21:213-221. DOI 10.1007/s10845-008-0194-1
- [13]. Xiaohua Wang, Ruiqing Wang, Lei Zhang, Hongwei Zhang, "Timed Petri net based optimal scheduling for garment flexible productions". Journal of Textile Engineering & Fashion Technology. Published: July 11, 2017.
- [14]. Fatih Tüysüz and Cengiz Kahraman, "Modeling a flexible manufacturing cell using stochastic Petri nets with fuzzy parameters". *ELSERVER Expert Systems with Applications Volume 37, Issue 5, May 2010, Pages 3910-3920.*