

УДК 504.064.36:574

А.И.Рязанцев, И.С.Скарга-Бандурова, Л.А.Шумова

Технологический институт Восточноукраинского национального университета им. В. Даля

СЕТИ ПЕТРИ КАК ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ АНАЛИЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИТУАЦИЙ

Изложены результаты практического использования сетей Петри для анализа технологических ситуаций в действующем химическом производстве. Для построения моделей предложено использовать расширение традиционных сетей Петри в виде нечёткой ординарной сети с приоритетами. Сформулированы алгоритм нечёткого срабатывания переходов сети и условия устойчивой активности перехода.

Ключевые слова: *сеть Петри, анализ ситуации, технологический процесс.*

Существенной особенностью большого класса современных технологических процессов является наличие неопределенности параметров их функционирования различной природы, которая объясняется отсутствием или неполнотой знаний о физико-химических параметрах процесса, широким спектром различных возмущающих и управляющих воздействий, присутствующих в реальных производственных системах и сложным характером их влияния [1]. Для эффективного функционирования систем управления такими процессами и обеспечения безопасной работы в различных производственно-технологических ситуациях необходимо разрабатывать методы оценки их состояний.

При создании и исследовании информационных систем в задачах проектирования параллельных вычислительных процессов широкое распространение нашли сети Петри. Значительно меньшее распространение они получили в технологических областях. Именно в этом направлении в контексте моделирования на основе сетей Петри в данной работе рассматриваются прикладные вопросы, возникающие при исследовании технологических систем.

Поскольку сети Петри обеспечивают имитацию процессов, моделирование с использованием данного аппарата имеет два существенных преимущества. Во-первых, объем вычислений не так сильно нарастает, как это происходит с большими моделями при использовании других математических методов. Во-вторых, аналитические методы обычно приспособляются для специфических проблем, и они будут в силе только при определенных условиях. К тому же, неоспоримым достоинством сетей Петри и их многочисленных модификаций является возможность адекватного представления не только структуры сложных организационно-технологических систем и комплексов, но также и логико-временных особенностей процессов их функционирования.

Рассматривая аппарат сетей Петри как инструмент моделирования, основным методологическим вопросом является вопрос использования в качестве набора базовых состояний экспертной информации в виде деревьев отказов, традиционно используемых на этапах проектного анализа или модернизации сложных технических систем и производств. Учитывая имеющийся опыт применения сети Петри для анализа связанных деревьев отказов [2], считая, что деревья отказов содержат в себе полный набор критических состояний исследуемой системы, возможно расширить область применения имеющейся информации для анализа динамических систем.

Рассмотрим задачу анализа ситуации применительно к химическому производству аммиака. Основной задачей анализа ситуаций является выявление факторов, определяющих динамику их развития. При компьютерной имитации ситуаций реального производства применение математического аппарата классических сетей Петри затруднено недетерминизмом функционирования сети (если несколько переходов могут сработать, то срабатывает любой из них). Поэтому, в качестве исследуемого подкласса выбрана сеть типа C_p , – нечёткая ординарная сеть Петри с приоритетами (C_{PR}), которая характеризуется введением нечеткости в начальную маркировку и правила срабатывания переходов формализма ординарных сетей Петри [3], и введением отношения приоритетности PR.

Формально, нечітка сеть Петри с приоритетами определяется как:

$$C_{\text{PR}} = (N, f, \lambda, m_0, \text{PR}), \quad (1)$$

где $N = (P, T, I, O)$ – структура сети C_{PR} , которая аналогична структуре ординарных СП и для которой $I: P \times T \rightarrow \{0, 1\}$ и $O: T \times P \rightarrow \{0, 1\}$ — входная и выходная функции переходов соответственно;

$f = (f_1, f_2, \dots, f_u)$ – вектор значений функции принадлежности нечеткого срабатывания переходов, при этом $f_j \in [0, 1] (\forall j \in \{1, 2, \dots, u\})$;

$\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_u)$ – вектор значений порога срабатывания переходов, при этом $\lambda_j \in [0, 1] (\forall j \in \{1, 2, \dots, u\})$;

$m_0 = (m_1^0, m_2^0, \dots, m_n^0)$ — вектор начальной маркировки, каждая компонента которого определяется значением функции принадлежности нечеткого наличия одного маркера в соответствующей позиции данной сети, при этом $m_i^0 \in [0, 1] (\forall i \in \{1, 2, \dots, n\})$;

PR – Отношение приоритетности, задаваемое на $\{t_j\}$ и определяющее порядок потребления меток. С каждым переходом t_j сети C_{PR} связан его приоритет $\text{pr}(t_j) \in \text{PR}$. Причём, $\text{pr}: \text{pr}(t_j) = j$.

Процесс изменения маркировок СП происходит в результате запуска переходов, который определяется условием активности и подчиняется алгоритму срабатывания переходов.

Динамика изменения начальной и последующих маркировок сети C_{PR} после момента ее запуска определяется в соответствии с алгоритмом и характеризуется следующими показателями: текущей маркировкой, активностью перехода, устойчивой активностью перехода и нечётким срабатыванием перехода.

1. Определение текущей маркировки.

Любое текущее состояние сети C_{PR} определяется вектором $m = (m_1, m_2, \dots, m_n)$, компоненты которого ($m_i \in [0, 1]$) интерпретируются как значения функции принадлежности нечеткого наличия одного маркера в соответствующих позициях $p_i \in P$ сети C_{PR} . Начальное состояние сети определяется вектором начальной маркировки m_0 .

2. Выявление активности перехода.

Переход $t_k \in T$ сети C_{PR} является активным при некоторой текущей маркировке m , если выполнено следующее условие:

$$\min_{(i \in \{1, 2, \dots, n\}) \wedge (I(p_i, t_k) > 0)} \{m_i\} \geq \lambda_k \quad (2)$$

где λ_k – значения порога срабатывания перехода.

Другими словами, переход $t_k \in T$ сети C_{PR} является активным, если во всех его входных позициях имеются ненулевые значения компонентов вектора текущей маркировки, а минимальное из них — не меньше порога срабатывания рассматриваемого перехода.

3. Выделение устойчиво активного перехода.

Два перехода вступают в конфликт, если оба имеют возможность срабатывания, но после запуска одного перехода предусловие или постусловие другого перехода становится невыполнимыми. В этом случае переход, который действительно должен сработать, определяется стратегией приоритета.

Переход $t_k \in T$ сети C_{PR} является устойчиво активным при некоторой текущей маркировке m , если выполняется условие (2) и одно из следующих условий:

1) не существует ни какого другого активного перехода;

2) любой другой переход $t_k \in T$, также активный при маркировке m не имеет общей с переходом t_k предшествующей позиции

$$p_i, i \in \{1, 2, \dots, n\} \text{ т.е.} \\ \{p_i \in P | I(p_i, t_k) = 1\} \cap \{p_i \in P | I(p_i, t_l) = 1\} = \emptyset \quad (3)$$

3) любой другой активный переход $t_l \in T$, имеющий общую с переходом t_k предшествующую позицию p_i , обладает меньшим приоритетом:

$$\forall t_i \in T(t_i \neq t_k) | I(p_i, t_i) > 0; i \in \overline{1, n},$$

$$\{p_i \in P | I(p_i, t_k)=1\} \cap \{p_i \in P | I(p_i, t_i)=1\} = \emptyset, pr(t_k) > pr(t_i). \quad (4)$$

4. Нечеткое срабатывание перехода

Нечеткое срабатывание устойчиво активного перехода t_k , приводит к новой маркировке $m^v = (m_1^v, m_2^v, \dots, m_n^v)$,

компоненты вектора которой определяются в соответствии с приведенными ниже формулами.

Для каждой из входных позиций $p_i \in P$, для которых $I(p_i, t_k) > 0$:

$$m_i^v = 0, (\forall p_i \in P | I(p_i, t_k) > 0; i \in \overline{1, n}); \quad (5)$$

для каждой из выходных позиций $p_j \in P$, для которых $O(t_k, p_j) > 0$:

$$m_j^v = \max_{i \in \{1, 2, \dots, n\} \wedge (I(p_i, t_k) > 0)} \{m_j, \min\{m_i, f_k\}\} (\forall p_j \in P) \wedge (O(t_k, p_j) > 0), \quad (6)$$

где f_k – значение функции принадлежности нечеткого срабатывания перехода $t_k \in T$, которое задается при определении конкретной сети S_{FPR} .

Структура N сети S_{FPR} имеет обычный (не нечеткий) вид, определяемый матрицами входных I и выходных O позиций. Поэтому графически сети Петри S_{FPR} изображаются ориентированным двудольным графом аналогично ординарным сетям Петри.

Таким образом, структура сети содержит в себе полную информацию для определения возможных последовательностей событий. Ввиду того, что в ходе исследуемого технологического процесса возможно восстановление параметров во время предаварийного состояния при внешнем воздействии оператора на систему, на любом такте моделирования предусмотрено изменение параметров маркировки. Кроме того, в исследуемой модели два разрешенных не-взаимодействующих события могут происходить независимо друг от друга.

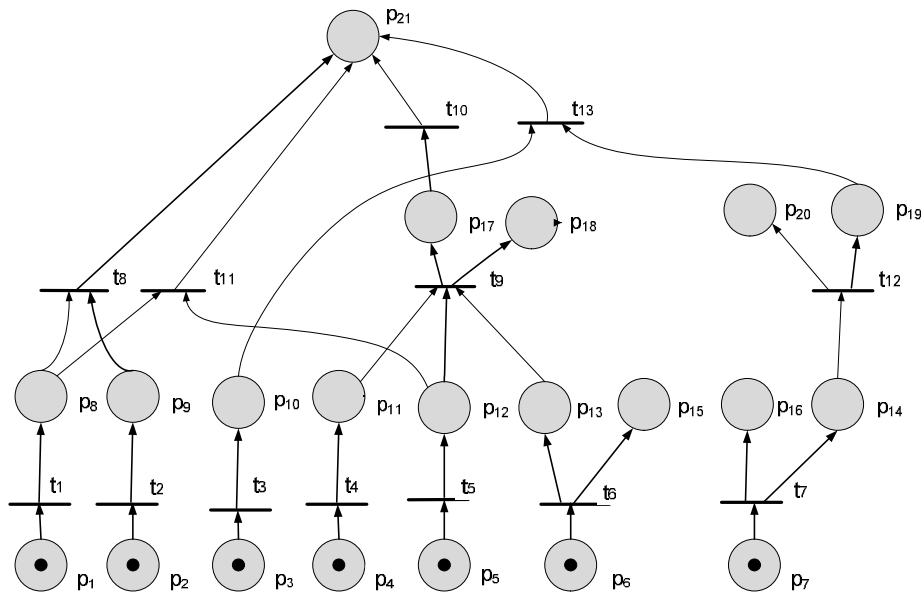
В качестве примера рассмотрим фрагмент нечеткой сети Петри с возможными вариантами предаварийных событий, приводящих к блокировке процесса производства аммиака (рис.1).

Исходными данными для формирования вектора начальной маркировки сети S_{FPR} являются оценки значений параметров системы.

Структура сети содержит в себе полную информацию для определения возможных последовательностей событий.

Изображенная на рис. 1 сеть S_{FPR} имеет множество позиций: $P = \{p_1, p_2, \dots, p_{21}\}$ и множество переходов $T = \{t_1, t_2, \dots, t_{13}\}$. Для каждого перехода $t_j \in T$ заданы значения функции принадлежности f_j и порогов λ_j нечеткого срабатывания: $f = (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0.9, 0.85, 0.8, 0.8, 0.7)$; $\lambda = (0.2, 0.2, 0.5, 0.9, 0.7, 0.8, 0.6, 0.3, 0.9, 0.9, 0.9, 0.85, 0.7)$.

Ниже приведены три производственные ситуации, вызывающие различные результаты работы модели.



- p₁ – Оценка расхода воздуха FC3A-3 во вторичный риформинг.
- p₂ – Оценка температуры TSA-4 в лобовом слое катализатора вторичного риформинга.
- p₃ – Оценка давления на выходе из реакционных труб печи риформинга PCSA-5.
- p₄ – Оценка уровня нагрузки.
- p₅ – Оценка температуры окружающей среды ($t > 20^{\circ}\text{C}$).
- p₆ – Оценка остаточного ресурса компрессора 101-J.
- p₇ – Оценка остаточного ресурса реакционных труб печи риформинга.
- p₈ – Недопустимое снижение расхода воздуха FC3A-3 во вторичный риформинг.
- p₉ – Недопустимое снижение температуры TSA-4.
- p₁₀ – Недопустимое снижение давления на выходе из реакционных труб печи риформинга.
- p₁₁ – Предельно-высокая нагрузка.
- p₁₂ – Критически высокая температура окружающей среды.
- p₁₃ – Нулевой остаточный ресурс компрессора 101-J.
- p₁₄ – Нулевой остаточный ресурс реакционных труб печи риформинга.
- p₁₅ – Рекомендация: износ компрессорного оборудования.
- p₁₆ – Рекомендация: износ реакционных труб печи риформинга, проведите диагностику, следите за PCSA 5.
- p₁₇ – Остановка компрессора 101-J.
- p₁₈ – Рекомендация: возможна остановка компрессора 101-J.
- p₁₉ – Пропуск на линии реакционных труб.
- p₂₀ – Рекомендация: возможен пропуск на линии реакционных труб.
- p₂₁ – Аварийная остановка.

Рис.1. Нечёткая сеть Петри C_{TPR}

Ситуация 1. При начальной маркировке $m^0 = (0.4, 0.1, 0.05, 0.9, 0.6, 0.7, 0.5, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$ активными и так же устойчиво-активными являются два перехода: t₁ и t₄, поскольку для каждого из них выполнено условие (2), т.е. $0.4 > 0.2$, $0.9 = 0.9$, где $\lambda_1 = 0.2$, $\lambda_4 = 0.9$ – значения порогов срабатывания переходов t₁ и t₄ соответственно, и переходы не имеют общих предшествующих позиций (3).

Других разрешенных переходов при данной начальной маркировке нет.

Нечёткое срабатывание переходов t₁ и t₄ на первом такте приводит к новой маркировке m^1 , компоненты вектора которой определяются по формулам (5)-(6): $m^1 = (0, 0.1, 0.05, 0, 0.6, 0.7, 0.5, 0.4, 0, 0, 0.9, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$. При данной маркировке ни один переход не является активным. Маркировка в позиции p₂₁ (аварийная остановка) равна нулю – система находится в нормальном режиме.

Ситуация 2. При начальной маркировке $m^0 = (0.3, 0.1, 0.7, 0.8, 0.8, 0.85, 0.5, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$ активными и так же устойчиво активными являются переходы: t₁, t₃, t₅ и t₆,

поскольку для каждого из них выполнено условие (2). Других разрешенных переходов при данной начальной маркировке нет.

На первом такте нечеткое срабатывание переходов t_1 , t_3 , t_5 и t_6 приводит к изменению начальной маркировки m^0 на новую: $m^1 = (0, 0.1, 0, 0.8, 0, 0, 0.5, 0.3, 0, 0.7, 0, 0.8, 0.85, 0, 0.85, 0, 0, 0, 0, 0)$. При данной маркировке ни один переход не является активным. Сеть отработала. Маркировка в позиции r_{21} равна нулю, система находится в нормальном режиме. Однако, поскольку в позиции r_{15} маркировка не нулевая ($m_{15}^1=0.85$), это генерирует предупреждение: «Высокий износ компрессорного оборудования».

Ситуация 3. При начальной маркировке $m^0 = (0.3, 0.1, 0.7, 0.9, 0.8, 0.9, 0.85, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$ устойчиво активными являются переходы: t_1 , t_3 , t_4 , t_5 , t_6 и t_7 , т.к. для каждого из них выполнено условие (2). Других разрешенных переходов при данной начальной маркировке нет.

На первом такте нечеткое срабатывание переходов t_1 , t_3 , t_4 , t_5 , t_6 и t_7 приводит к изменению маркировки: $m^1 = (0, 0.1, 0, 0, 0, 0, 0, 0.3, 0, 0.7, 0.9, 0.8, 0.9, 0.85, 0.9, 0.85, 0, 0, 0, 0, 0)$. Не нулевые значения маркировки в позициях r_{15} и r_{16} ($m_{15}^1=0.9$, $m_{16}^1=0.85$), вызывают генерацию следующих сообщений: «Высокий износ компрессорного оборудования» и «Высокий износ реакционных труб печи риформинга, проведите диагностику, следите за PCSA 5». При маркировке m^1 устойчиво активным является один переход: t_{12} , поскольку для каждого из них выполнено условие (2).

На втором такте нечеткое срабатывание перехода t_{12} приводит к изменению маркировки m^1 на новую маркировку: $m^2 = (0, 0.1, 0, 0, 0, 0, 0, 0.3, 0, 0.7, 0.9, 0.8, 0.9, 0, 0.9, 0.85, 0, 0, 0.85, 0.85, 0)$. Маркировка в позиции r_{20} не нулевая ($m_{20}^2=0.85$), что генерирует предупреждение: «Возможен пропуск на линии реакционных труб».

На третьем такте нечеткое срабатывание перехода t_{13} приводит к изменению маркировки m^2 на новую: $m^3 = (0, 0.1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0.9, 0.8, 0.9, 0, 0.9, 0.85, 0, 0, 0, 0.85, 0.7)$. Маркировка в позиции r_{21} не равна нулю, в системе спрогнозирована аварийная ситуация. Сеть отработала, выдав предупреждение о возможной аварийной остановке и рекомендации по принятию решения выхода из опасного состояния: «Высокий износ компрессорного оборудования», «Высокий износ реакционных труб печи риформинга, проведите диагностику, следите за PCSA 5», «Возможен пропуск на линии реакционных труб».

В рамках проводимых работ по анализу сети на возникновение критических ситуаций разработано программное обеспечение, исследованы алгоритмы построения дерева достижимости. Существенным преимуществом использования подобной модели является ее вариативность, позволяющая проводить отслеживание и оценку проводимых корректировок динамического процесса с целью поиска путей выхода из критических ситуаций и изменения состояний в нужном направлении.

Предполагается, что использование рассмотренных методов моделирования и анализа позволит оценить влияние, оказываемое отдельными компонентами на работу системы, определить узкие места в структуре системы и ее надежность, получить перспективный прогноз развития при возникновении опасных технологических ситуаций. В такой схеме, при реализации различных аварийных ситуаций отличаться будут только внутренние параметры, связанные с условиями и временными задержками срабатывания переходов, что позволит проводить динамическое моделирование поведения технологического процесса в режиме реального времени и, тем самым, позволит повысить время и качество прогноза поведения исследуемой системы в критических и предаварийных ситуациях.

1. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта /под ред. Д.А.Поспелова. М.: Наука, 1986. - 396 с.
2. Рязанцев А.И. Анализ аварийных ситуаций на производствах химической отрасли методом построения дерева достижимости нечёткой временной сети Петри //Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. –Харків №5,6. - 2007г.- 62 с.
3. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH/ Леоненков А.В. – Спб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.