

УДК 519.95:681.51.001

**Д. И. Басырова, О. М. Матренина, А. П. Кирпичников
О. Т. Шипина, А. В. Косточко**

ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДИСКРЕТНО НЕПРЕРЫВНЫХ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Ключевые слова: моделирование, дискретно-непрерывные производства, сети Петри.

Выделен класс дискретно-непрерывных производств технической химии. Разработана модификация сетей Петри проблемно ориентированная на их моделирование. Предложенная методика моделирования дискретно непрерывных производств, применима для широкого класса дискретных динамических систем.

Key Words: modeling, discretely-uninterrupted productions, nets Petri.

The class of discretely-uninterrupted productions of technical chemistry was allotted and highlighted. There is the worked out modification of the Petri nets, which are problematically oriented onto their modeling. The methods of modeling discretely uninterrupted productions have been suggested. It was shown that the suggested methodic is applicable for the wide class of the discretely dynamic systems.

Представление химического производства в виде сложной системы предполагает разделение его на взаимосвязанные подсистемы, характеризующиеся иерархической структурой. Первая ступень иерархической структуры – типовые химико-технологические процессы (химические, тепловые, гидродинамические, диффузионные и т.д.) и локальные системы управления, в основном системы автоматического управления (САУ), которые строятся на основе логических контроллеров PLC (Programmable Logic Controller), microPC и т.п. Вторая ступень – это агрегаты и комплексы, представляющие взаимосвязанную совокупность типовых процессов и аппаратов, выполняющих определенную операцию, на данной ступени используются автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП), реализованные системами типа SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) или DCS (Distributed Control Systems). Третья ступень – химические производства, в которых получают целевой продукт и АСУ технологического и организационного функционирования производств (АСУ второго уровня) – системы класса MES (Manufacturing Execution Systems). Четвертая ступень – химическое предприятие в целом и автоматизированные системы управления предприятием (АСУП) – системы ERP (Enterprise Resource Planning) или MRP II (Manufacturing Resource Planning).

В рамках MES выделим класс дискретно-непрерывных химико-технологических систем (ДНХТС), обладающих следующими особенностями:

1. Существование общей цели функционирования – выпуск продукции согласно плану в рамках заданной номенклатуры и согласно технологическому регламенту.
2. Большие размеры ДНХТС сложная топология связей внутри ХТС.
3. Параллельность и асинхронность функционирования ее элементов – технологических модулей. Химико-технологический процесс, реализуемый ДНХТС, носит дискретный характер.
4. Как правило, ДНХТС имеет выраженный многостадийный характер. Отдельная стадия может включать десятки параллельно функционирующих, функционально одинаковых аппаратов.

5. Совокупность аппаратов образует последовательно-параллельную технологическую схему со сложным характером связей между аппаратами смежных стадий (частично-доступное сопряжение).

6. Взаимозаменяемость аппаратов в технологических линиях и вариативность технологических маршрутов при реализации многостадийных техпроцессов.

7. Объем буферных емкостей между отдельными стадиями оборудования ограничен, Как следствие, есть стадии, на которых буферные емкости не могут погасить возмущающих воздействий на систему.

8. Невозможность хранения ряда полупродуктов на промежуточных стадиях в силу особенностей технологического регламента производства, требований техники безопасности и т.п.

9. Несогласованность технологических циклов аппаратов смежных фаз, ведущая к простоям оборудования и образованию очереди аппаратов на обслуживание (загрузку и реализацию ХТП).

10. Совмещение в рамках одной аппаратной схемы нескольких технологических процессов производства разных продуктов в режиме разделения времени.

Организация эффективного функционирования подобных производств представляет собой сложную задачу, решение которой требует привлечения новых методов исследования, моделирования и оптимизации ДНХТС.

Для исследования ДНХТС применим математический аппарат теории сетей Петри. Однако анализ сетевых моделей ряда многономенклатурных ДНХТС показал, что при моделировании данных систем, для эффективного применения аппарата СП необходимо использовать их расширенную версию.

Авторами разработана модификация сетей Петри, проблемно ориентированная на моделирование и создание систем управления ДНХТС.

Модифицированную сеть Петри, проблемно ориентированную на моделирование рассматриваемого класса ДНХТС определим следующим образом :

$NP = (NP_0, C, Mc, Ic, Oc, Is, Os, F, \tau, PrT, PrC)$, где $NP_0 = (P, T, I_0, O_0, M)$ – классическая СП, в которой $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ – конечное, непустое множество позиций; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ – конечное, непустое множество переходов, $P \cap T = \emptyset$; $I_0, O_0 : T \times P \rightarrow \{0, 1\}$ – входная и выходная функции, определяющие структуру графа СП; $M : P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$ – функция маркировки позиций.

$C = \left\{ c = \begin{pmatrix} E \\ Q \end{pmatrix} \right\}$ – множество цветов (атрибутов, раскрасок) дуг и меток сети.

$E = (E_1, E_2, \dots, E_{NG})$, где $E_i = (e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{iN_i})$ $e_{ij} \in \{0, 1\}$ – набор качественных характеристик. Значение $e_{ij} = 1$ указывает на наличие определенного атрибута у метки или дуги, $e_{ij} = 0$ предполагает его отсутствие. $Q = (Q_1, Q_2, \dots, Q_{NG})$, где $Q_i = (q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{iN_i})$ $q_{ij} \in \{0, 1, 2, \dots\}$ – количественные характеристики соответствующих признаков.

$Mc : P \rightarrow C \cup \{0\}$ – функция «раскраски» меток в позициях,

$Mc(p_s) = \begin{cases} (mc^1, mc^2, \dots, mc^{M(p_s)}), mc^j \in C, j = \overline{1, M(p_s)}, \text{ если } M(p_s) > 0 \\ 0, \text{ если } M(p_s) = 0 \end{cases}, s = \overline{1, n}$

Обозначим $mc^k(p_s) = \begin{pmatrix} E^{mc_k}(p_s) \\ Q^{mc_k}(p_s) \end{pmatrix}$ и $E^{mc_k}(p_s) = (E_1^{mc_k}(p_s), E_2^{mc_k}(p_s), \dots, E_{NG}^{mc_k}(p_s))$,

$E_s^{mc_k}(p_i) = (e_{i1}^{mc_k}(p_s), e_{i2}^{mc_k}(p_s), \dots, e_{iN_i}^{mc_k}(p_s))$, $Q^{mc_k}(p_s) = (Q_1^{mc_k}(p_s), Q_2^{mc_k}(p_s), \dots, Q_{NG}^{mc_k}(p_s))$,

$Q_i^{mc_k}(p_s) = (q_{i1}^{mc_k}(p_s), q_{i2}^{mc_k}(p_s), \dots, q_{iN_i}^{mc_k}(p_s))$ – атрибуты раскраски метки с номером k в позиции p_s .

$lc, Oc : T \times P \rightarrow C$ – функции раскраски дуг, приписывающие каждой дуге сети некоторый цвет из множества C .

$ls, Os : T \times P \rightarrow P$ – функции, определяющие входные и выходные самомодифицируемые дуги.

С учетом раскрашенных и самомодифицируемых дуг, входная и выходная функции модифицированной СП могут быть определены следующим образом:

$$l(t, p) = \begin{cases} c, c \in C, \text{ если } (l_0(t, p) = 1) \wedge (lc(t, p) = c) \\ Mc(p_k), \text{ если } (l_0(t, p) = 1) \wedge (ls(t, p) = p_k) \\ 0, \text{ если } l_0(t, p) = 0 \end{cases}$$

$$O(t, p) = \begin{cases} c, c \in C, \text{ если } (O_0(t, p) = 1) \wedge (Oc(t, p) = c) \\ Mc(p_k), \text{ если } (O_0(t, p) = 1) \wedge (Os(t, p) = p_k) \\ 0, \text{ если } O_0(t, p) = 0 \end{cases}$$

Обозначим $I^*(t) = (c^l(p_1), c^l(p_2), \dots, c^l(p_n)) = (c^{l^1}, c^{l^2}, \dots, c^{l^n})$, где $c^l(p_i) = c^{li} = l(t, p_i)$ и $O^*(t) = (c^o(p_1), c^o(p_2), \dots, c^o(p_n)) = (c^{o^1}, c^{o^2}, \dots, c^{o^n})$, где $c^o(p_i) = c^{oi} = O(t, p_i)$ – модифицированные входную и выходную функции переходов. Полная структура модифицированной сети, таким образом может быть определена функциями инцидентности $l(t, p)$, $O(t, p)$, либо функциями переходов $I^*(t)$, $O^*(t)$. Причем первый вариант будет соответствовать матричному способу задания СП, а второй – аналитическому.

$F : T \times P \rightarrow \{0, 1\}$ – функция ингибиторных дуг.

$\tau : T \rightarrow \{(\tau^1, \tau^2, \dots, \tau^r), \tau^j \in N, j = \overline{1, r}\}$ – время задержки меток в переходах

$Prt : T \rightarrow N$ – приоритеты переходов

Правила срабатываний переходов модифицируются следующим образом. Каждый переход находится в одном из двух состояний активирован (запущен) или не активирован. Не активированный переход $t \in T$ разрешен и может сработать.

Пусть переход t не активирован, обозначим $r^l \in C$ набор атрибутов (цвет), полученный следующим образом: пусть позиция p_s является входной для перехода t , т.е. $l(t, p_s) \neq 0$ и пусть $mc^k(p_s)$ – раскраска ее метки с номером k , тогда

$$r^l = \begin{pmatrix} E^l \\ Q^l \end{pmatrix}, E^l = (E^l_1, E^l_2, \dots, E^l_{NG}), E^l_i = (e^l_{i1}, e^l_{i2}, \dots, e^l_{iN_i}), Q^l = (Q^l_1, Q^l_2, \dots, Q^l_{NG}), Q^l_i = (q^l_{i1}, q^l_{i2}, \dots, q^l_{iN_i}) -$$

атрибуты метки с номером k , при выполнении перехода t , которые вычисляются следующим образом:

$$e^l_{ij}(t, p_s) = e^{mc_k}_{ij}(p_s) \wedge e^{lc}_{ij}(t, p_s), q^l_{ij}(t, p_s) = e^{mc_k}_{ij}(p_s) \cdot q^{mc_k}_{ij}(p_s) \cdot e^{lc}_{ij}(t, p_s)$$

Для того чтобы переход не активированный t считался разрешенным необходимо чтобы для всех его входных позиций выполнялся ряд условий, а именно:

$\forall p_s : l(t, p_s) \neq 0 \exists mc^k(p_s) \in Mc(p_s)$ такая, что

$$1) \sum_{j=1}^{N_i} e^l_{ij}(t, p_s) > 0, i = \overline{1, NG} - \text{дуга пропускает эту марку}$$

$$2) q^l_{ij}(t, p_s) - a^{lc}_{ij}(t, p_s) \cdot q^{lc}_{ij}(t, p_s) \geq 0 - \text{количества достаточно}$$

$$3) \sum_{j=1}^{N_i} \prod_{p_s: l_0(t, p_s) > 0} a^l_{ij}(t, p_s) > 0 \quad i = \overline{1, NG} - \text{скоординировано с другими входными позициями перехода}$$

$$4) \forall p_s : F(t, p_s) \neq 0 \quad M(p_s) = 0 - \text{в ингибиторных позициях перехода метки отсутствуют}$$

Срабатывание перехода переводит его в активированное состояние на время, соответствующее времени задержки меток в нем $\tau(t)$. Маркировка позиций изменяется по следующим правилам. Для каждой из входных позиций p_s . Меняются параметры выбранной метки $m_s = m(p_s)$ следующим образом:

$m'_{ij}^{(1)}(p_s) = m_{ij}^{(1)}(p_s)$ $m'_{ij}^{(2)}(p_s) = m_{ij}^{(2)}(p_s) - r_{ij}^{(2)}(t, p_s)$, если $\sum_{i=1}^{NC} \sum_{j=1}^{N_i} m'_{ij}^{(2)}(p_s) > 0$ в противном случае

метка с параметрами $m_s = m(p_s)$ удаляется из множества меток позиции p_s полностью.

Для каждой из выходных позиций $p_s : O(t, p_s) \neq 0$ вычисляется цвет $q = \begin{pmatrix} q^{(1)} \\ q^{(2)} \end{pmatrix}$, где $q \in C$, т.е.

$$q^{(1)} = (q_1^{(1)}, q_2^{(1)}, \dots, q_{NC}^{(1)}), \quad q_i^{(1)} = (q_{i1}^{(1)}, q_{i2}^{(1)}, \dots, q_{iN_i}^{(1)}) \quad q_{ij}^{(1)} \in \{0, 1\}$$

$$q^{(2)} = (q_1^{(2)}, q_2^{(2)}, \dots, q_{NC}^{(2)}), \quad q_i^{(2)} = (q_{i1}^{(2)}, q_{i2}^{(2)}, \dots, q_{iN_i}^{(2)}) \quad q_{ij}^{(2)} \in \{0, 1, 2, \dots\}$$

$$\text{и } q_{ij}^{(1)}(t, p_s) = Oc_{ij}^{(1)}(t, p_s) \vee \prod_{p_s: l(t, p_s) > 0} r_{ij}^{(1)}(t, p_s), \quad q_{ij}^{(2)}(t, p_s) = q_{ij}^{(1)}(t, p_s) \cdot Oc_{ij}^{(2)}(t, p_s)$$

В множестве меток $M(p_s)$ позиции p_s ищется метка, качественные характеристики которой совпадают с соответствующим цветом $q_{ij}^{(1)}(t, p_s)$, т.е. $m_{ij}^{(1)}(p_s) = q_{ij}^{(1)}(t, p_s)$. Количественные характеристики этой метки изменяются. При отсутствии такой метки в позиции она туда помещается

Функционирование сети осуществляется в тактовом режиме. На каждом такте системного времени проверяются все активированные переходы, те из них, чье время функционирования истекло, переводятся в неактивное состояние. Все неактивированные переходы проверяются на возможность срабатывания. Среди разрешенных переходов срабатывают те, чей приоритет выше.

Данный класс модифицированных СП позволяет эффективно моделировать и исследовать особенности многономенклатурных ДНХТС, такие как

1. Нелинейная структура многономенклатурных материальных потоков, предполагающая:

- разные технологические маршруты следования партий продуктов разных марок по аппаратным стадиям ХТС;
- возможность изменения размеров партий продуктов в ходе переработки, их дробления или укрупнения.

2. Реализация совмещенных техпроцессов, что подразумевает:

- селекцию (сортировку) продуктов по маркам;
- разные материальные индексы для продуктов разных марок;
- управляемую последовательно-параллельную порционную загрузку и исключение нерегламентированных смещений полупродуктов.

Методика моделирования сложных ДНХТС сетями Петри базируется на следующих принципах. Основой для построения модели аппарата является фрагмент сети Петри, представленный на рис. 1.

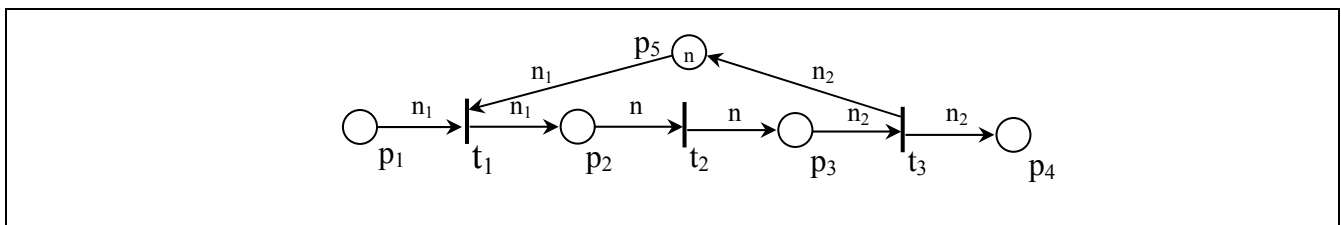


Рис. 1 - СП-модель аппарата периодического действия

Емкость аппарата моделируют позиции p_2 и p_3 а помещенные в них метки интерпретируются как порции полупродукта, суммарная маркировка этих позиций указывает количество и марку загруженного в аппарат полупродукта. Метки в позиции p_2 интерпретируются как полупродукт загруженный в аппарат, но не обработанный, метки в позиции p_3 – полупродукт, прошедший обработку в аппарате и готовый к выгрузке. Позиции

p_2 , p_3 моделирующие состояние аппарата, назовем аппаратными позициями (А-позиции). Позиция-источник p_1 моделирует отдельный аппарат предыдущей стадии, либо склад исходного сырья. Позиция-сток p_4 рассматривается как отдельный аппарат следующей стадии или как склад продукции. Переход t_1 моделирует вход аппарата, его срабатывание интерпретируется как событие загрузки. Выходу аппарата соответствует переход t_3 , срабатывание которого интерпретируется как событие разгрузки аппарата. Разметка дуг инцидентных данным переходам должна соответствовать количеству и марке перемещаемого при операциях загрузки и разгрузки полупродукта. Если аппарат начал технологический цикл, то переход t_1 не может быть разрешенным до срабатывания перехода t_3 . Для реализации данного условия введена дополнительная позиция p_5 , которую назовем сигнальной (С-позицией). Маркировка позиции p_5 – условие готовности аппарата к новому технологическому циклу, ее начальная маркировка соответствует максимальной вместимости аппарата.

При моделировании аппаратов периодического действия с технологическим циклом $\tau = \tau_{\text{загр}} + \tau_{\text{обр}} + \tau_{\text{разгр}}$, для учета временных характеристик операций вводится функция $\tau: T \rightarrow N$, которая характеризует время задержки меток в переходах. Переходу t_1 , моделирующему вход, приписывается время $\tau(t_1) = \tau_{\text{загр}}$. Переходу t_3 , как выходу аппарата приписывается время $\tau(t_3) = \tau_{\text{разгр}}$, а переходу t_2 соответствует время, необходимое для обработки загруженной порции $\tau(t_2) = \tau_{\text{обр}}$.

Общая сеть Петри многономенклатурного производства может быть сгенерирована на основе структурной схемы этого производства путем подстановки СП-моделей отдельных аппаратов на их места в ячейки схемы и генерацией соответствующей системы приоритетов срабатываний аппаратов и схемы их междстадийного взаимодействия, которые могут быть реализованы с использованием ингибиторных дуг, а также, при необходимости введением дополнительных С-позиций и управляющих переходов.

В процессе формирования СП-модели многономенклатурной ДНХТС из СП-шаблонов ее элементов необходимо выполнить следующие этапы:

- определение ассортимента выпускаемой продукции, выявление состава технологических стадий и операций, реализующих многостадийный химико-технологический процесс, формирование технологических графов, описывающих технологические маршруты для каждого продукта выпускаемого ассортимента;
- обследование ДНХТС с целью выявления основного и вспомогательного оборудования для определения глубины детализации элементов и связей ДНХТС;
- анализ структуры связей, выявление видов сопряжения между стадиями функционально одинакового оборудования, формирование двудольного ориентированного аппаратного графа,
- формализация ДНХТС как сложной дискретно-событийной динамической системы;
- выбор СП-шаблонов отдельных аппаратов ДНХТС из альбома СП шаблонов элементов ДНХТС, их детализация, корректировка;
- графический синтез СП-модели ДНХТС из иконографической модели ДНХТС;
- генерация системы приоритетности, принятой на производстве;
- аналитическое описание СП-модели ДНХТС;
- разработка спецификаций СП-модели ДНХТС.

Исходной информацией на первом этапе является директивный техпроцесс, описание аппаратного оформления, реализующего технологический процесс для всех продуктов выпускаемого ассортимента.

Результатом работы является полное аналитическое либо матричное описание СП-модели ДНХТС по ее графическому представлению. Предложенная методика позволяет синтезировать модель в сетях Петри химико-технологических периодических производств, имеющих сложную последовательно-параллельную структурную схему. Выполнение сети моделирует функционирование аппаратов: обработку и продвижение порций полупродукта. Модель многоассортиментной производственной системы в виде СП, таким образом,

отражает топологию аппаратного оформления производства, организацию управления функционированием цеха, динамику движения дискретных материальных энергетических и информационных потоков. В частности авторами была построена модель в виде сети Петри системы обеспечения безопасности техпроцесса регенерации компонентов из полимерных композиций [1].

Литература

1. *Басырова, Д.И.* Система безопасности техпроцесса регенерации компонентов из полимерных композиции / Д.И. Басырова, А.П.Кирпичников, О.Т.Шипина // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2010. -№9. – С.203-209.

© **Д. И. Басырова** - асп. КНИТУ; **О. М. Матренина** - канд. техн. наук., ст. преп. ИЭУП КНИТУ; **А. П. Кирпичников** - д-р физ.-мат. наук проф., зав. каф. интеллектуальных систем и управления информационными ресурсами КНТУ; **О. Т. Шипина** – д-р техн. наук, проф. каф. химии и технологии высокомолекулярных соединений КНИТУ; **А. В. Косточко** - д-р техн. наук проф., зав каф. химии и технологии высокомолекулярных соединений КНИТУ.