

ПРИМЕНЕНИЕ ИНДИКАТОРНЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ В РАЗРАБОТКЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

valerymag@nm.ru

**Чуев А.В., аспирант,
Магергут В.З., д-р техн. наук, проф.,
Юдицкий С.А., д-р техн. наук, проф.**
*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Аннотация. В статье рассмотрен математический аппарат бинарных индикаторных сетей (БИС) в разрезе его применения при имитационном моделировании и построении управляющих автоматов для сложных технологических процессов. Приведен пример БИС, моделирующей процесс производства искусственных сапфиров, описаны цели, действия и дополнительные переменные, составлены индикаторные формулы. Приведен абстрактный пример ленты поведения. Составлен алгоритм проведения имитационного эксперимента, дана его блок-схема. Описан алгоритм построения управляющего автомата на основе БИС.

Ключевые слова: бинарная индикаторная сеть, граф целей, граф действий, индикаторное выражение, лента поведения, имитационное моделирование, управляющий автомат, искусственный сапфир, метод Киропулоса.

Проектирование систем управления сложными технологическими процессами зачастую требует проведения предварительного моделирования технологического процесса и работы системы управления. Для этого есть ряд причин. Во-первых, при непрерывном цикле работы реальной системы сложно, а зачастую и невозможно проводить эксперименты при создании новой системы управления. Во-вторых, создание опытного образца требует больших финансовых вложений, которые не всегда окупаются. В-третьих, модель позволяет протестировать работу системы управления в аварийных режимах работы. Не редки случаи, когда построить аналитическую модель достаточно сложно или невозможно. В такой ситуации на помощь приходят методы имитационного моделирования[1], одним из которых

является метод индикаторных сетей Петри, в частности метод бинарных индикаторных сетей (БИС).

Понятие индикаторной сети было введено С.А. Юдицким как основа создания триадносетевых моделей [2]. Индикаторная сеть Петри представляет собой следующий набор:

$$IS = \langle G, F, \beta, \pi_1, \pi_2 \rangle,$$

где G – двудольный граф (состоит из множества вершин-позиций P , вершин-переходов T и функций, задающих множества входных и выходных позиций переходов), $F = \{F_i, i=1, \dots, e\}$ – множество индикаторных выражений, $\beta: T \rightarrow F$ – функция, задающая пометку переходов графа дополнительными условиями, заданными экспертом, $\pi_1: P \times T \rightarrow N$, $\pi_2: T \times P \rightarrow N$ – функции «взвешивания» числами натурального ряда соответственно входных и выходных дуг переходов, $N = \{2, 3, \dots, n\}$. Если дуга графа не помечена, то по умолчанию ее вес равен 1; если не помечен переход, то дополнительное условие отсутствует.

Бинарная индикаторная сеть представляет собой совокупность двух взаимосвязанных индикаторных сетей – графа целей ($IS_{ц}$) и графа действий ($IS_{д}$)[3]:

$$BIS = \{IS_{ц}; IS_{д}\}.$$

Позиции и переходы графа действий обозначаются соответственно d_i и t_i , а графа целей – c_i и q_i .

Каждый из графов дополняется набором индикаторных формул, в которые кроме переменных позиций и переходов входят и другие переменные: оценки состояния проекта s_i , ресурсы r_i , внешние события m_i , воздействия на среду n_i и т.д. При моделировании технологического процесса этот список может дополняться сигналами с кнопок и тумблеров β_i и α_i , показаниями датчиков x_i , таймерами u_i , исполнительными устройствами z_i , органами световой и звуковой индикации v_i и w_i и т.д. При построении обобщенной модели дополнительные переменные можно обозначать как p_i – дополнительные параметры.

Пример БИС, моделирующей процесс производства искусственных сапфиров по методу Киропулоса[4], приведен на рис. 1, где слева изображен граф целей, а справа – граф действий.

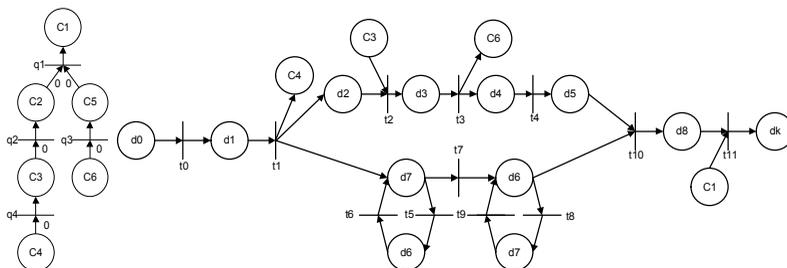


Рисунок 1 – БИС, моделирующая процесс производства искусственных сапфиров

Цели, требующие выполнения в процессе роста кристалла сапфира:

- C1 – получить полуфабрикат массой M кг за τ_1 минут;
- C2 – обеспечить линейное остывание расплава с допустимой погрешностью σ_2 в течение τ_4 минут;
- C3 – обеспечить поддержание температуры на уровне 2044°C с допустимой погрешностью σ_1 в течение времени τ_3 минут;
- C4 – обеспечить разогрев сырья до температуры плавления (2044°C) за τ_2 минут;
- C5 – обеспечить вытягивание заготовки с постоянной скоростью v_1 в течение периода остывания;
- C6 – обеспечить погружение затравки в расплав в момент начала периода остывания.

Действия, выполняющиеся для достижения поставленных целей:

- d0 – начало процесса моделирования;
- d1 – нагрев расплава до температуры плавления;
- d2 – доведение расплава до оптимального состояния (отсутствие кипения);
- d3 – погружение затравки в расплав;
- d4 – включение подачи хладагента в кристаллодержатель;
- d5 – вытягивание кристаллодержателя со скоростью v мм/мин;
- d6 – включение нагревателя;
- d7 – выключение нагревателя;
- d8 – извлечение готового кристалла;
- dk – завершение моделирования.

Дополнительные параметры срабатывания переходов:

- P1 – масса образовавшегося кристалла;
- P2 – коэффициент снижения температуры;

- P3 – скорость вытягивания;
- P4 – температура расплава;
- P5 – ток в питающей сети;
- P6 – напряжение в питающей сети;

Графовая форма представления БИС дополняется и однозначно определяется алгебраическим описанием в виде набора индикаторных выражений, моделирующих переходы. Такое представление удобно использовать при создании программы для проведения имитационного эксперимента или алгоритма работы управляющего автомата, поскольку индикаторные формулы представляют собой логические выражения, которые легко реализовать как на языках программирования высокого уровня, так и на языках программирования промышленных контроллеров (например, FBD)[5].

Применительно к БИС на рис. 1 набор индикаторных формул выглядит следующим образом:

Для графа целей:

$$\Phi(q_1): (C4=1) \wedge (C5=1) \wedge (C1=0) \rightarrow (C4=1) \wedge (C5=1) \wedge (C1=1)$$

$$\Phi(q_2): (C3=1) \wedge (C4=0) \rightarrow (C3=1) \wedge (C4=1)$$

$$\Phi(q_3): (C6=1) \wedge (C5=0) \rightarrow (C6=1) \wedge (C5=1)$$

$$\Phi(q_4): (C2=1) \wedge (C3=0) \rightarrow (C2=1) \wedge (C3=1).$$

Для графа действий:

$$F(t_0): (d0=1) \wedge (P6=1) \wedge (P5=1) \wedge (d1=0) \rightarrow (d0=0) \wedge (P6=0) \wedge (P5=0) \wedge (d1=1)$$

$$F(t_1): (d1=1) \wedge (C2=0) \wedge (P4 > T_{нл}) \wedge (d2=0) \wedge (d6=0) \wedge (t \leq t_2) \rightarrow \\ \rightarrow (d1=0) \wedge (C2=1) \wedge (d2=1) \wedge (d6=1)$$

$$F(t_2): (d2=1) \wedge (C3=1) \wedge (d3=0) \rightarrow (d2=0) \wedge (C3=1) \wedge (d3=1)$$

$$F(t_3): (d3=1) \wedge (d4=0) \rightarrow (d3=0) \wedge (d4=1)$$

$$F(t_4): (d4=1) \wedge (d5=0) \rightarrow (d4=0) \wedge (d5=1)$$

$$F(t_5): (d7=1) \wedge (d6=0) \wedge (P4 < T_{нл}) \wedge (t < t_3) \rightarrow (d7=0) \wedge (d6=1)$$

$$F(t_6): (d6=1) \wedge (d7=0) \wedge (P4 > T_{нл}) \rightarrow (d6=0) \wedge (d7=1)$$

$$F(t_7): (d7=1) \wedge (d6=0) \wedge (t > t_3) \rightarrow (d7=0) \wedge (d6=1)$$

$$F(t_8): (d6=1) \wedge (d7=0) \wedge (P4 > T_{зд}) \wedge (t < t_4) \rightarrow (d6=0) \wedge (d7=1)$$

$$F(t_9): (d7=1) \wedge (d6=0) \wedge (P4 < T_{нл}) \rightarrow (d7=0) \wedge (d6=1)$$

$$F(t_{10}): (d5=1) \wedge (d6=1) \wedge (P2=1) \wedge (P3=1) \wedge (d8=0) \wedge (t > t_4) \rightarrow \\ \rightarrow (d5=0) \wedge (d6=0) \wedge (P2=0) \wedge (P3=0) \wedge (d8=1)$$

$$F(t_{11}): (d8=1) \wedge (C1=1) \wedge (P1=0) \wedge (dk=0) \wedge (t \leq t_1) \rightarrow \\ \rightarrow (d8=0) \wedge (C1=1) \wedge (P1=1) \wedge (dk=1).$$

Динамика индикаторной сети отображается лентой поведения (рис. 2), которая строится с учетом ограничений на порядок срабатывания переходов двудольного графа (например, в момент t

может сработать не более одного перехода, и для любого перехода известно подмножество переходов, которые могут сработать в следующий момент $\tau+1$) и представляет собой таблицу, где в первой строке обозначаются дискретные отсчеты времени, в первом столбце – имена целей, действий и дополнительных переменных, далее по столбцам записываются значения этих переменных в каждый из дискретных отсчетов.

| τ перем. | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------|---|---|---|---|---|---|
| x_1 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 |
| x_2 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| s_1 | 3 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| s_2 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 0 |
| r_1 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 0 |
| r_2 | 3 | 5 | 7 | 7 | 7 | 7 |

Рисунок 2 – Пример ленты поведения

Алгоритм проведения имитационного эксперимента на основе БИС выполняется в виде последовательности шагов, определенных блок-схемой, изображенной на рис. 3.

На первом этапе формируется начальная БИС, соответствующая началу горизонта моделирования. Здесь последовательно задаются конфигурации графов целей и действий, устанавливаются связи между ними, вводятся индикаторные выражения. На следующем шаге лицом, проводящим моделирование, (ЛПМ) осуществляется мониторинг процесса с определением критической точки. Под критической точкой понимается недостижение цели за нормативное время (например, сырье не разогрелось до температуры плавления за заданное время), выход показателя за допустимые пределы и т.д. Если критическая точка не обнаружена, то ЛПМ завершает эксперимент. Если точка обнаружена, то осуществляется преобразование БИС с применением «графохирургического» подхода [2], например, замена двухпозиционного алгоритма регулирования на адаптивный позиционный алгоритм. Далее снова осуществляется мониторинг работы системы на периоде стабильности.

После окончания имитационного эксперимента ЛПМ получает БИС, которая будет удовлетворять требованиям, которые ставились перед началом моделирования. Если рассматривать производство

искусственных сапфиров, то здесь итогом эксперимента может быть, например, выбор оптимального алгоритма регулирования температуры.

Для удобства проведения имитационных экспериментов авторами была разработана программа для ЭВМ «Приложение для моделирования бинарных индикаторных сетей» [6].

Бинарные индикаторные сети находят применение не только в моделировании систем и процессов, но и в синтезе управляющих автоматов. В этом смысле они схожи с помеченными сетями Петри (графом операций) [7]. Однако БИС являются с одной стороны более информативными за счет наличия в их структуре обособленного графа целей, а с другой стороны они просты в программной реализации за счет наличия их полного алгебраического описания – набора индикаторных выражений.

Алгоритм построения управляющего автомата, основанного на БИС, достаточно прост, поскольку индикаторные формулы представляют собой логические выражения, определяющие конфигурацию сети на следующем этапе, исходя из текущей ее конфигурации. Блок-схема алгоритма построения управляющего автомата приведена на рис. 4.

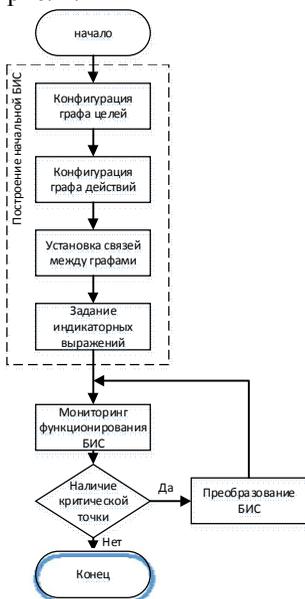


Рисунок 3 – Блок-схема проведения имитационного эксперимента

На первом этапе проводится имитационный эксперимент, описанный выше, для выбора наиболее оптимальной конфигурации БИС. Далее задаются массивы целей, действий и дополнительных условий, а также их начальные значения. Затем программируются индикаторные выражения как набор условных операторов. На завершающем этапе задается цикл работы программы и условия его начала и завершения, поскольку принцип действия управляющего автомата заключается в циклической проверке на истинность индикаторных выражений БИС.



Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма построения управляющего автомата

Таким образом, бинарные индикаторные сети – это аппарат, с которым удобно работать как на этапе построения имитационной модели системы и проведения имитационного эксперимента, так и на этапе синтеза управляющего автомата.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08016 «р_офи_м».

Список литературы:

1. Бондаревский А.С., Лебедев А.В. Имитационное моделирование: определение, применимость и техническая реализация // *Фундаментальные исследования*. 2011. № 12-3. С. 535-541.
2. Юдицкий С.А. Моделирование динамики многоагентных триадных сетей. М.: СИНТЕГ. 2012. 112 с.
3. Юдицкий С.А., Магергут В.З., Чуев А.В. Бинарные сетевые дорожные карты процессов управления проектами // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. 2013. № 4. С. 1-9.
4. Мюллер Г. Выращивание кристаллов из расплава. Конвекция и неоднородности / Г. Мюллер: Пер. с англ. М.: Мир, 1991. 143 с.
5. Деменков Н.П. Языки программирования промышленных контроллеров / Учебное пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 172 с.
6. Свидетельство 2014616595 Российской Федерации о гос. регистрации программы для ЭВМ. Приложение для моделирования бинарных индикаторных сетей / А.В. Чуев, В.З. Магергут, С.А. Юдицкий; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». №2014616595, заявл. 05.05.2014; опубл. 27.06.2014.
7. Юдицкий С.А., Магергут В.З. Логическое управление дискретными процессами. Модели, анализ, синтез. М.: Машиностроение, 1987. 176 с.