

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НЕЧЁТКИМИ СЕТЯМИ ПЕТРИ

Чл. корр. Сидельников С.И., Бобрик Д.С.

Задача максимизации основных производственных показателей, в том числе выхода и качества продукта, при условии оптимизации количества промышленных стоков и выбросов является одной из важнейших в современных химических производствах. Зачастую эта задача требует решения с учётом множества технологических параметров в условиях не только количественного, но и качественного их описания, при наличии множества альтернатив управления. Обычно в таких случаях управляющие решения принимает ответственное лицо или экспертный совет согласно их опыта и интуиции. Автоматизация подобных производств, как правило, реализуется с помощью многокритериальных ситуационных советующих систем поддержки принятия решений (СППР), обобщающих опыт экспертов с учётом экологических требований к загрязнению окружающей среды [1]. Такие системы не включаются непосредственно в контур управления объектом, а лишь выдают рекомендации лицу, принимающему решение (ЛПР).

Система поддержки принятия решений состоит из трёх основных блоков [2]. Блок оценки состояний, на основе поступающей как количественной, так и качественной информации от объекта и от оператора строит формализованное описание ситуации, возникшей на объекте управления. Для оценки семантики нечётких понятий используются лингвистические переменные, являющиеся особой формой организации экспертной информации, на основе которой производится семантическая идентификация нечётких категорий. Каждому поступающему на вход блока нечёткому понятию ставится в соответствие нечёткое множество на соответствующей предметной шкале, построенное заранее на основе экспертного опроса, либо получаемое из имеющихся нечётких множеств выполнением некоторых специальных операций.

Далее строится некоторая суперпозиция нечётких множеств, полученных в результате идентификации входной информации. Эта суперпозиция фактически представляет собой формализованное описание текущей (входной) ситуации, она поступает на вход блока принятия решения, где на основе нечётких логических заключений определяются необходимые управляющие решения. В блоке выдачи управляющих воздействий осуществляется переход от внутренней формы задания управляющих решений к удобной для ЛПР форме, и, при необходимости, решаются задачи лингвистической аппроксимации и интерпретации.

Главной задачей создания нечёткой системы вывода решений является сопоставление описаний ситуаций на объекте управления с условиями истинности нечётких продукций и определение последовательности просмотра и анализа этих продукций при выводе решений. В зависимости от способа решения этой задачи ситуационные советующие системы делятся на два класса: модели «ситуация — действие» (С–Д) и «ситуация — стратегия управления — действие» (С–СУ–Д) [2]. Сопоставление описаний в обоих классах решается одинаково: по нечёткому описанию текущего состояния объекта управления из имеющегося набора эталонных описаний ситуаций выбирается с помощью спе-

циальных мер близости соответствующая эталонная ситуация вида $\tilde{S}_n = \{\tilde{y}_1, \tilde{y}_2, \tilde{y}_3, \dots, \tilde{y}_m\}$, где \tilde{y}_i – некоторый признак, описывающий ситуацию, m – количество признаков. Каждый признак \tilde{y}_i описывается соответствующей лингвистической переменной (y_i, T_i, D_i), где $T_i = \{T_{i1}, T_{i2}, \dots, T_{im}\}$ – терм – множество y_i лингвистической переменной; D – базовое множество переменной y_i .

Текущая ситуация на объекте управления может быть описана, к примеру, как совокупность нечётких значений давления, температуры, расхода и т.д., а также концентрации вредных веществ в стоках $\tilde{S}_n = \{\tilde{P}_i, \tilde{T}_j, \tilde{G}_k, \dots, \tilde{C}_m\}$.

Различием между классами рассмотренных ситуационных советующих систем является процедура просмотра продукций при выводе решений. В системах «С–Д» продукции задаются в явном виде: «если текущая ситуация на объекте управления есть \tilde{S}_i , то управляющее решение – \tilde{R}_j ». В системах типа «С–СУ–Д» продукции не задаются явно, а выводятся по нечёткой ситуационной сети (НСС), представляющий собой нечёткий взвешенный граф переходов по эталонным ситуациям. Управляющие решения для текущих (входных) нечётких ситуаций формируются на основе анализа возможных переходов между текущей ситуацией и целевой, в которую желательно перевести объект управления. Целевая ситуация в таких системах определяется исходя из анализа степеней предпочтения применения управляющих решений $\alpha(\tilde{S}_i, \tilde{R}_j)$. В этом случае для постановки целевой ситуации строится НСС, вершины которой соответствуют эталонным нечётким ситуациям, а дуги взвешены необходимыми для перехода по ситуациям управляющими решениями и степенями предпочтения этих решений.

В условиях рыночной экономики в зависимости от времени года, состояния рынка, экологической обстановки и т.д. целевая ситуация неоднозначна, в связи с этим степени предпочтения управляющих решений некоторым образом зависят от ситуации. В этом случае для определения степени предпочтения управляющих решений используется продукционная система типа «Ситуация – предпочтение решений». Управляющее решение, соответствующее входной ситуации, представляет собой последовательность решений, приводящих систему от текущей входной ситуации к целевой по оптимальному в некотором смысле маршруту в НСС, называемому стратегией управления. Критерием оптимальности может быть, средний вес пути, определяемый как отношение суммы предпочтения входящих в него дуг к количеству этих дуг на маршруте, либо прочность пути, равная минимуму степеней предпочтения дуг пути. Оптимальным является путь, имеющий максимальный средний вес либо максимальную прочность.

Следует отметить, что системы типа «С–СУ–Д» при выполнении процедуры принятия решения ЛПР не имеют возможности визуально контролировать динамику процесса принятия решений, что в свою очередь не всегда на интуитивном уровне понятно ЛПР. В тоже время при исследовании этих систем на этапе моделирования есть сложности с проверкой корректности построенной системы и получаемых решений. Отмеченные недостатки в той или иной степени устраняются с применением математического аппарата – нечётких сетей Петри

(НСП) [3], в которых нечёткий логический вывод определяется явно — перемещением метки по сети Петри. Также НСП имеют в своем составе формальные методы проверки модели принятия решений, в частности: безопасность, живость, правильность и адекватность.

Таким образом, нами предлагается строить системы типа «С–СУ–Д» на основе модифицированных НСП, в которых позиции и переходы относятся к нескольким типам.

$$C_f = (P^S, P^R, T^\alpha, T^S, I^\alpha, I^S, O^\alpha, O^S, \lambda, m_0)$$

Признаки, определяющие эталонные ситуации на объекте управления, сопоставляются с позициями первого типа $P^S \subseteq P$, причём каждая позиция $P_i^S \subseteq P^S$ моделирует один терм из терм-множеств каждого признака.

Позиции второго типа $P^R \subseteq P$ сопоставляются множеству решений \tilde{R} , таким образом, что каждая позиция $P_j^R \subseteq P^R$ моделирует один терм из терм-множеств управляющего воздействия. При этом $P^S \cup P^R = P$, $P^S \cap P^R = \emptyset$.

Переходы первого типа $T^\alpha \subseteq T$, моделируют продукции «ситуация - решение» и нагружаются степенями предпочтения α_R этих решений, а переходы второго типа $T^S \subseteq T$ моделируют события, связанные со сменой состояний объекта управления в результате принятия соответствующего решения. При этом $T^\alpha \cup T^S = T$, $T^\alpha \cap T^S = \emptyset$.

$I^\alpha : P^S \times T^\alpha \rightarrow (0, 1)$ – входная функция переходов T^α .

$O^\alpha : T^\alpha \times P^R \rightarrow (0, 1)$ – выходная функция переходов T^α .

$I^S : P^R \times T^S \rightarrow (0, 1)$ – входная функция переходов T^S .

$O^S : T^S \times P^S \rightarrow (0, 1)$ – выходная функция переходов T^S .

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

Начальная m_0 и текущая m_i маркировка, когда метки находятся в P^S позициях, в общем случае может быть нечёткой и определяется текущей ситуацией, в которую переходит объект управления, как в результате неконтролируемого возмущающего воздействия, так и возмущениями по управлению, осуществляемых на основе матриц решений \tilde{R}_j . Либо текущая m_i маркировка определяет управляющее R_j решение, когда метки находятся в P^R позициях. Таким образом, начальная маркировка определяется маркировкой одной из определённых заранее эталонных ситуаций с наибольшей степенью близости к текущей нечёткой ситуации на объекте.

Экспертным опросом выявляется исходное множество эталонных ситуаций $\{\tilde{S}_i\}$, в которых может находиться объект управления, включающее в себя ситуации, требующие ввода управляющих воздействий и целевые ситуации, которые необходимо при этом достичь. Критерием определения целевой ситуации может служить, например, достижение заданного выхода конечной продукции и её качественные показатели при соблюдении экологических требований. Для каждой эталонной ситуации \tilde{S}_{i_i} экспертным опросом определяются допустимые управляющие решения \tilde{R}_j и степени их предпочтения α_j . Каждую из ситуаций $\tilde{S}_{i_{i+n}}$, в которые переходит объект управления при применении соответствующего решения R_j можно определить в результате композиции ситуации \tilde{S}_{i_i}

с отношением, заданным решением \tilde{R}_j [2]. При этом если полученная ситуация \tilde{S}_{i+n} не входит в исходное множество эталонных ситуаций $\{\tilde{S}_j\}$, то оно, по согласованию с экспертами, дополняется этой ситуацией. Окончательно множество эталонных ситуаций $\{\tilde{S}_j\}$ строится таким образом, чтобы не содержать нечётко равных ситуаций.

Для упрощения экспертного опроса можно избежать необходимости формирования матриц M_j [2] описывающих силу воздействия значения управляющего решения в терминах значений признака u_j . А использовать нечеткую модель объекта управления, функционирующую в рамках системы поддержки принятия решений [4]. Используя такую нечёткую модель объекта управления можно спрогнозировать значения признаков состояния объекта, тем самым, определив ситуацию \tilde{S}_{i+n} , в которую перейдёт объект по результатам принимаемого решения.

Построение нечёткой сети Петри осуществляется по результатам экспертного опроса путём соединения дугами каждой из позиций P_i^S , соответствующих базовым термам эталонных ситуаций с каждой позицией P_j^R , соответствующей каждому возможному в этой ситуации решению \tilde{R}_j через переход T_k^α , нагруженный степенью предпочтения этого решения для данной ситуации, а затем соединением дугами позиции P_j^R с каждой из позиций P_{i+1}^S , соответствующих базовым термам ситуации, в которую переходит объект в результате применения решения \tilde{R}_j , через переход T_n^S .

Рассмотрим пример нечёткой сети Петри, реализующий систему поддержки принятия решений для объекта, характеризуемого двумя признаками: *давление* и *температура*. Где каждый признак, в свою очередь, описывается тремя термножествами «большое», «среднее», «малое» (рис.1).

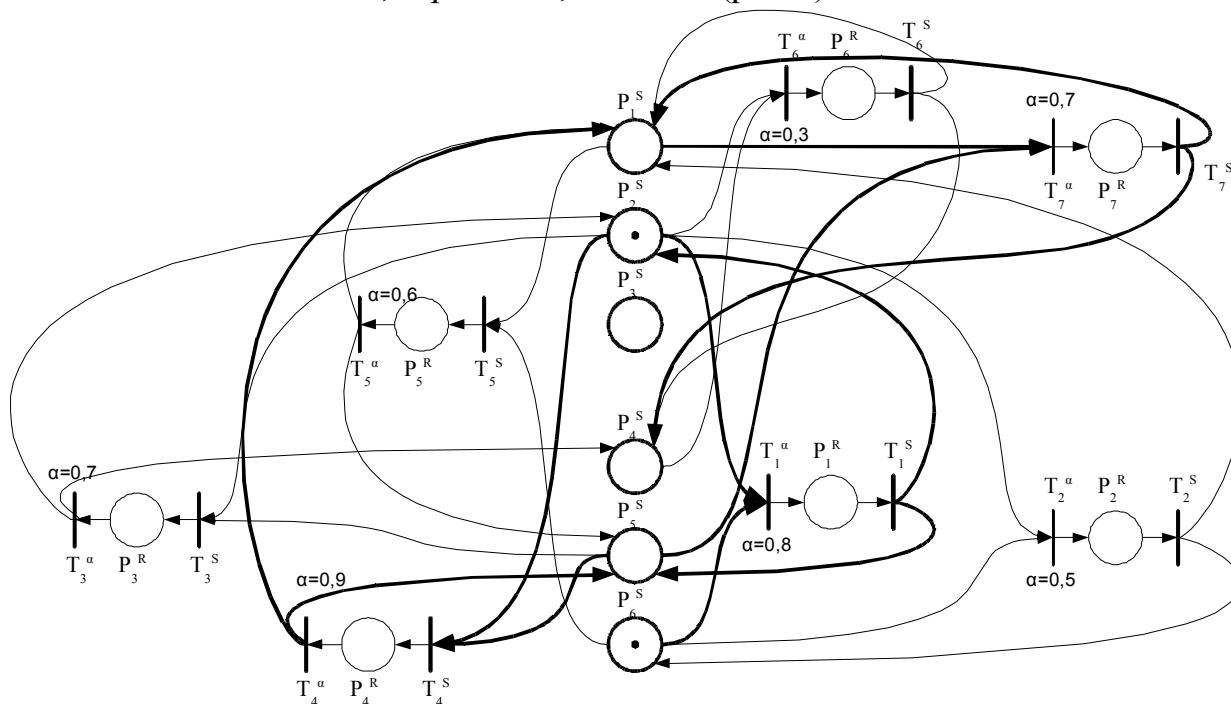


Рис.1. Фрагмент модифицированной сети Петри для моделирования системы «С-СУ-Д»

Позиции P_1^S, P_2^S, P_3^S обозначают термы «*большое*», «*среднее*», «*малое*» соответственно для признака y_1 «*давление*». Позиции P_4^S, P_5^S, P_6^S обозначают аналогичные термы для признака y_2 «*температура*». Позиции P_1^R, P_2^R обозначают соответственно управляющие решения «*расход 1-го компонента увеличить*» и «*расход 1-го компонента уменьшить*». Позиция P_3^R обозначает решение «*расход 2-го компонента уменьшить*». Позиции P_4^R, P_5^R обозначают одинаковые решения «*расход 2-го компонента увеличить*». Позиции P_6^R, P_7^R обозначают одинаковые решения «*расход 3-го компонента увеличить*».

Возможность применения этих решений моделируется дугами, соединяющими позиции соответствующие терм-множествам ситуации с позициями, соответствующими решениям, через переходы типа T^α , моделирующими выбор соответствующего управляющего воздействия. При этом переходы типа T^S в результате перемещения метки через соединяющие дуги моделируют переход системы в новое состояние по результатам применения управляющего воздействия.

Начальная и текущая маркировки такой сети определяются текущей ситуацией, в которую переходит объект управления, как в результате неконтролируемого возмущающего воздействия, так и в результате возмущений по управлению. Начальная маркировка M_0 подмножества позиций типа P^S определяется эталонной ситуацией, в некотором смысле наиболее близкой к текущей ситуации, в которой находится объект управления. При этом, исходя из условия отсутствия нечётко равных ситуаций среди множества эталонных ситуаций, для описания любой эталонной ситуации всегда есть возможность по каждому её признаку выделить терм-множество с максимальным значением функции принадлежности μ_i и обозначить ситуацию базовыми значениями этих термов, например «*давление среднее*», «*температура низкая*». Помещая маркеры (метки) в позиции P_2^S, P_6^S , соответствующие этим термам, определяем текущую эталонную ситуацию в виде начальной маркировки нечёткой сети Петри.

Для определения по выбранной стратегии управления оптимального маршрута строится граф (дерево) достижимых маркировок (ГДМ) (рис.2). Построение каждой ветви дерева останавливается по достижению целевой ситуации, задаваемой явно или определяемой проверкой текущей ситуации по некоторому правилу, например, величины степени неконфликтности [2]. Затем из нескольких полученных ветвей-«маршрутов» достижения целевых ситуаций определяется наиболее оптимальный по одному из критериев (прочности пути, среднего веса и т.д.). Неоптимальные маршруты отсекаются путём расстановки блокирующих порогов срабатывания λ на соответствующих переходах типа T^α .

В рассмотренном примере, применяя maxmin критерий, оптимальным маршрутом будет маршрут, состоящий из последовательной смены следующих маркировок и отмеченный жирными дугами на рис.1 и рис. 2:

$$\begin{aligned} (P_2^S, P_6^S) &\xrightarrow{T_1^\alpha} (P_1^R) \xrightarrow{T_1^S} (P_2^S, P_5^S) \xrightarrow{T_4^\alpha} (P_4^R) \xrightarrow{T_4^S} \\ (P_1^S, P_5^S) &\xrightarrow{T_7^\alpha} (P_7^R) \xrightarrow{T_7^S} (P_1^S, P_4^S) \end{aligned}$$

Работа полученной нечёткой сети Петри визуализирует процесс принятия решения в динамике перемещением меток по сети, формируя совокупное управляющее решение из множества решений $\{\tilde{R}\}$, получаемое в виде упорядоченного подмножества (кортежа) всех промежуточных решений \tilde{R}_i , в соответствующих позициях P_i^R в которых побывала метка. В рассматриваемом примере получаем совокупное решение $\tilde{R} = \{\tilde{R}_1, \tilde{R}_4, \tilde{R}_7\}$, или, в словесной форме, «расход 1-го компонента увеличить, расход 2-го компонента увеличить, расход 3-го компонента увеличить».

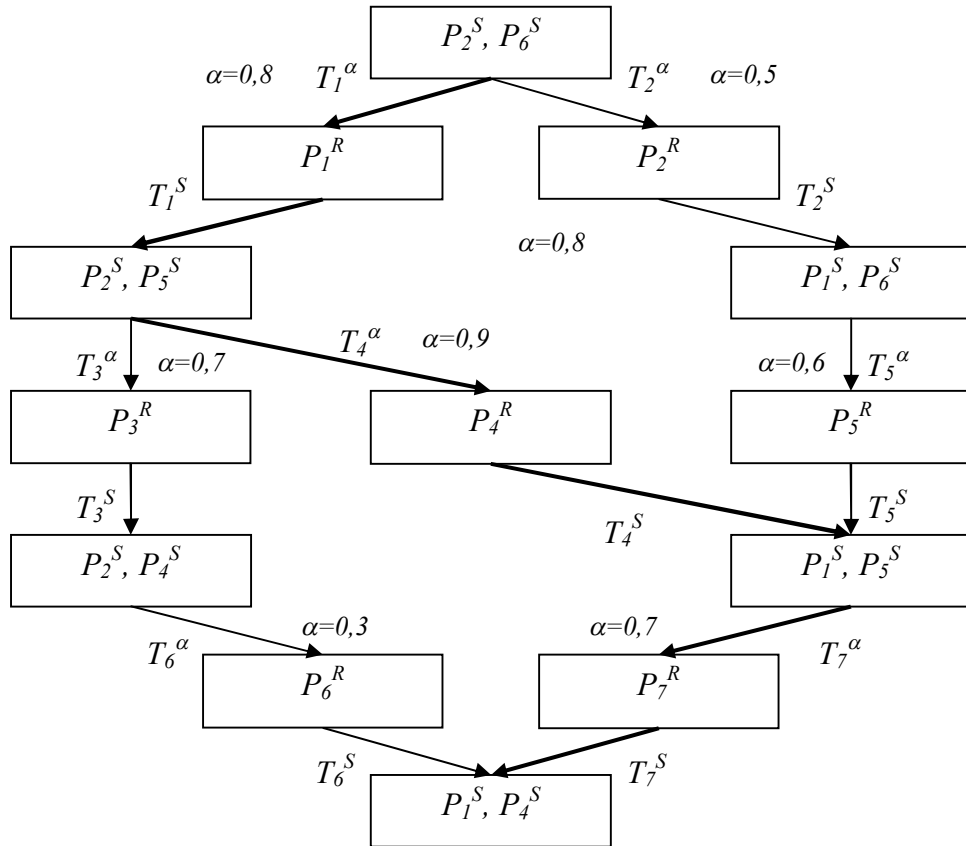


Рис.2. Фрагмент графа достижимых маркировок для фрагмента НСП на рис.1

При этом описываемая модифицированная сеть Петри функционирует по следующим правилам:

- Текущая маркировка $M_T \subseteq M$ сопоставляется либо с текущей (эталонной) ситуацией $\tilde{S}_{\alpha i}$, либо с принимаемым промежуточным решением в зависимости от положения меток в позициях типа P^S или P^R соответственно.
- Активность перехода $T_j^\alpha \subseteq T$ определяется наличием меток во всех входных позициях $P(in) \subseteq P$ типа P^S для данного перехода и значением порога срабатывания данного перехода $\lambda < 1$.
- Активность перехода $T_j^S \subseteq T$ определяется наличием меток в входной позиции $P(in) \subseteq P$ типа P^R для данного перехода.

При срабатывании T_j перехода осуществляется мгновенный перенос меток из входных позиций $P(in) \subseteq P$ данного перехода в его выходные позиции

$P(out) \subseteq P$, при этом маркировка M_i заменяется маркировкой M_{i+1} по следующему правилу:

$$M_{i+1} = M_i - I(P(in), T_j) + O(T_j, P(out))$$

Таким образом, по достижению маркировки позиций типа P^S , соответствующей целевой ситуации, сеть Петри формирует по ГДМ совокупное управляющее решение \tilde{R} , которое оптимальным образом приводит систему из текущей ситуации в целевую. По достижению целевой ситуации и соответствующей ей маркировки работа сети прекращается. В НСП определим устойчивую маркировку, соответствующую целевой ситуации, до момента изменения состояния объекта управления. Возобновление работы сети происходит при переходе объекта в нецелевую ситуацию в результате возмущающего воздействия, при этом начальная маркировка изменяется.

Достоинством представления СППР в виде нечётких сетей Петри является возможность формального анализа свойств получаемой базы знаний на этапе её построения и работы [5]. Можно отметить такие свойства, как достижимость принимаемых решений, т.е. достижимость маркировки M_C , соответствующей целевой ситуации, из маркировки M_0 , соответствующей любой из возможных эталонных ситуаций; полнота описания пространства ситуаций; оптимизация поиска альтернативных решений, выявление нерациональных зацикливаний и избыточности на этапе формирования исходной сети Петри. Достоинством также является наглядная формальная визуализация динамики ведения процесса, так как текущая маркировка сопоставляется с терм множествами лингвистических переменных и определяет текущее состояние процесса. В тоже время по ходу работы сети моделируются все возможные альтернативные решения и результаты этих решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сидельников С.И. Комплексное решение задачи управления загрязнением окружающей среды на химических предприятиях. Датчики и системы. 2009, №10. 3-10с.
2. Мелихов А.Н., Берштейн Л.С., Коровин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечёткой логикой. – М.: Наука. Гл.ред. физ.-мат. лит., 1990. – 272 с.
3. Леоненков А.В. Нечёткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ – Петербург, 2003. – 736 с.
4. Сидельников С.И. Применение модели объекта для прогнозирования его состояния по результатам управляющих решений. Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2009, №3. 53-56с.
5. Бодянский Е.В., Кучеренко Е.И., Михалёв А.И. Нейро-фаззи сети Петри в задачах моделирования сложных систем. - "Системные технологии", 2005.