

Для исследования модели гибридной сети воспользовались данными, не вошедшими в обучающую выборку. Сравнивая полученные значения, с фактическими (тестирующими) значениями получили, что средняя относительная погрешность не превышает 22%. По результатам проверки построили графические зависимости (рис.4).

Визуальный анализ графиков и расчетные значения погрешности позволяют судить о достаточно высокой степени совпадения, что может свидетельствовать об адекватности построенной модели.

#### Список литературы

1. Сидельников С.И. Сравнительный анализ математических моделей химико-технологических процессов / С.И. Сидельников, И.Ю. Машутин // Труды НИ РХТУ им. Д.И. Менделеева. Серия: Кибернетика, автоматизация, математика, информатизация / РХТУ им. Д.И. Менделеева. Новомосковск. Вып. №3 (140). 2004. С.53-58.
2. Дьяконов В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник/ В.Дьяконов, В.Круглов. – СПб.: Питер, 2001.– 480 с.

УДК 519.25

С.И. Сидельников, Д.С. Бобрик, Р.О. Плясунков

Новомосковский институт российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева, Новомосковск, Россия

### МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ В ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМАХ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ СИТУАЦИОННОГО ТИПА

During the realtime control of production the technology regime of sub-systems is coordinated by the human operator to achieve the production goal in a most efficient way. Making decisions, the operator uses an incomplete model where disturbances and control actions may be recognized quickly. A fuzzy Petri net is the model that may be created from the traditional Petri net by associating membership functions with transitions and places which are the result of the specialists' intuition and experience.

В оперативном управлении производством технологический режим выдерживается в подсистемах оператором-человеком для достижения производственной цели с наибольшей возможной эффективностью. В процессе принятия решений оператор может применять неполную модель, в которой возмущения и управляющие воздействия вычисляются быстро. Такой моделью является нечёткая сеть Петри, получаемая из традиционной сети Петри путём связывания с позициями и переходами функций принадлежности нечётких множеств, являющимися результатом интуиции и опыта специалистов.

Задача максимизации основных производственных показателей (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. В таких случаях обычно управляющие решения принимает ответственное лицо, либо экспертный совет согласно их собственного опыта и интуиции. Автоматизация подобных производств, как правило, реализуется с помощью ситуационных советующих систем поддержки принятия решений, обобщающих опыт экспертов с учётом экологических требований к загрязнению окружающей среды. 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. Блок оценки состояний (БОС), на основе поступающей информации от объекта и от опера-

тора строит формализованное описание ситуации, возникшей на объекте управления. Для оценки семантики нечётких понятий используются лингвистические переменные [2], 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, определяемых формой задания нечётких ситуаций. 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 (БПР), где на основе нечётких логических заключений определяются необходимые управляющие решения. В блоке выдачи управляющих воздействий (БВУВ) 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 состояний (ситуаций) объекта 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) [1]. Сопоставление описаний в обоих классах решается одинаково: по нечёткому описанию текущего состояния объекта с помощью специальных мер близости выбирается из имеющегося набора эталонных описаний состояний объекта управления, по которым принимаются решения, соответствующая эталонная ситуация. Например, текущая ситуация на объекте управления в химической промышленности может быть описана как совокупность нечётких значений давления, температуры, расхода в аппарате и концентрации аммиака в стоках  $\tilde{S}_n = \{\tilde{P}_i, \tilde{T}_j, \tilde{G}_k, \tilde{C}_m\}$ .

Различием между классами рассмотренных ситуационных советующих систем является процедура просмотра продукций при выводе решений. В системах С–Д продукции описаны в явном виде и представляют собой нечёткую базу знаний, состоящую из набора нечётких эталонных ситуаций  $S_S$  и сопоставленных каждой ситуации управляющих решений  $R_j$  вида: «если текущая ситуация на объекте управления есть  $\tilde{S}_i$ , то управляющее решение –  $R_j$ ». В системах (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 может задаваться явно, либо определяться исходя из анализа степеней предпочтения управляющих решений  $\alpha(\tilde{S}_i, R_j)$ . 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. Управляющее решение, соответствующее входной ситуации, представляет собой последовательность решений, приводящих систему от текущей входной ситуации к целевой по оптимальному «маршруту» в НСС, называемому стратегией управления (СУ).

Таким образом, можно сказать что ситуация с возможными управляющими решениями по сути представляет собой продукцию системы (С–Д), а СУ задаёт после-

довательность просмотра продукции в системе (С–Д), соответствующее оптимальному переводу объекта управления в целевое состояние. Системы (С–СУ–Д), в отличие от систем (С–Д), менее критичны к качеству экспертной информации.

Из недостатков систем типа С–СУ–Д можно отметить тот факт, что при выполнении процедуры принятия решения ЛПР не имеет возможности визуально контролировать динамику процесса принятия решений. Определенные трудности возникают и при исследовании этих систем, на этапе моделирования. Лишены этого недостатка нечёткие сети Петри (НСП), в которых нечёткий логический вывод (НЛВ) определяется явно – перемещением метки по сети Петри, в то же время НСП имеют в своем составе формальные методы проверки корректности модели принятия решений, путём проверки правильности и адекватности соответствующей НСП.

Нечёткие сети Петри, являясь подклассом сетей Петри с неопределённостью субъективного характера, позволяют решать задачи нечеткого моделирования принятия решений. Нечёткая сеть Петри типа  $C_f$  определяется из традиционной сети Петри введением нечёткости в начальную маркировку и в правила срабатывания переходов:  $C_f = (N, f, \lambda, m_0)$  [2], где:

- $N = (P, T, I, O)$  – структура НСП, аналогичная структуре традиционных 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;
- $f = (f_1, f_2, \dots, f_n)$  – вектор значений функции принадлежности нечёткого срабатывания переходов, при этом  $f_j \in [0, 1] (\forall j \in \{1, 2, \dots, u\})$ ;
- $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$  – вектор значений порога срабатывания переходов, при этом  $\lambda_j \in [0, 1] (\forall j \in \{1, 2, \dots, u\})$ ;
- $m_0 = (m_0^1, m_0^2, \dots, m_0^n)$  – вектор начальной маркировки, каждая компонента которого определяется значением функции принадлежности нечёткого наличия одного маркера в соответствующей позиции данной НСП, при этом  $m_0^i \in [0, 1] (\forall i \in \{1, 2, \dots, n\})$ .
- Функции принадлежности нечёткого наличия маркеров в позициях и нечёткого срабатывания переходов основываются на формализованных знаниях и опыте оператора-человека и могут быть использованы для моделирования его поведения при управлении производственным процессом.

Представление НСП модели принятия решений «ситуация—действие» на понятийном уровне дано в [2].

Нами предлагается методология моделирования систем «С–СУ–Д» модифицированной нечеткой сетью Петри типа  $C_f'$ .

При этом позиции разделить на два типа:

- $P_S \subseteq P$  – подмножество позиций первого типа, сопоставленных терм - множествам переменных состояний объекта;
- $P_R \subseteq P$  – подмножество позиций второго типа, сопоставленных терм - множествам управляющих воздействий (решений). Причем  $P_S \times P_R = \emptyset$ .

Переходы также разделить на два типа:

- $T_\alpha \subseteq T$  – подмножество переходов первого типа, сопоставленных степеням предпочтения соответствующих управляющих решений;
- $T_S \subseteq T$  – подмножество переходов второго типа, моделирующих события, связанные со сменой состояний объекта управления. Причем  $T_\alpha \times T_S = \emptyset$ .

Начальная и текущая маркировка такой сети 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. Таким образом, начальная маркировка определяется маркировкой од-

ной из определённых заранее эталонных ситуаций с наибольшей степенью близости к текущей нечёткой ситуации на объекте.

Динамика изменения начальной и последующих маркировок НСП типа  $C_f$  после момента её запуска описывается следующими правилами  $P(C_f')$ :

– правило определения текущей маркировки. Любое текущее состояние  $C_f'$  НСП определяется вектором  $m = (m_1, m_2, \dots, m_n)$ , компоненты которого ( $m_i = [0, 1]$ ) интерпретируются как значения функции принадлежности нечёткого наличия одного маркера в соответствующих позициях  $p_i \in P$  НСП  $C_f'$ . Начальное состояние НСП определяется вектором начальной маркировки  $m_0$ , который, в свою очередь, формируется в зависимости от текущей (эталонной) ситуации. Компонента  $m_i$  определяется как степень принадлежности лингвистической переменной, например, температуре  $\tilde{T}_j$ , терму «высокая». В НСП определим устойчивую маркировку, соответствующую целевой ситуации, до момента изменения состояния объекта управления.

– правило (условие) активности перехода. Переход  $t_k \in T$  НСП  $C_f'$  называется активным (возбуждённым) при некоторой текущей маркировке  $m$ , если выполнено следующее условие:

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

где  $\lambda_k$  – значения порога срабатывания  $t_k \in T$ ;

– правило нечёткого срабатывания перехода. Если переход  $t_k \in T$  НСП  $C_f'$  является активным при некоторой текущей маркировке  $m$ , то нечёткое срабатывание данного перехода осуществляется мгновенно и приводит к новой маркировке  $m_v = (m_v^1, m_v^2, \dots, m_v^n)$ , компоненты вектора которой определяются следующим образом: для каждой из входных и выходных позиций  $p_i \in P$ , для которых  $I(p_i, t_k) > 0$  и  $O(p_i, t_k) > 0$ :

$$m_j^v = \max \left\{ m_j, \min_{(i \in \{1, 2, \dots, n\}), (I(p_i, t_k) > 0) \wedge (O(t_k, p_i) > 0)} \{m_i, f_k\} \right\}$$

при  $(\forall p_i \in P) \wedge (I(t_k, p_i) > 0) \wedge (O(t_k, p_i) > 0)$ ,

где  $f_k$  – значение функции принадлежности нечёткого срабатывания переходов, равно степени предпочтения решения.

Формально задача заключается в том, чтобы в зависимости от исходной эталонной ситуации, используя построенную НСП и правила её функционирования  $P(C_f')$ , получить последовательность управляющих воздействий (решений) для приведения объекта в целевую ситуацию и оценить правильность полученной совокупности решений.

Достоинством представления базы правил в форме НСП и последующей задачи вывода заключений на их основе является наглядность и визуализация всех промежуточных результатов.

#### Список литературы

1. 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.
2. Леоненков А.В. Нечёткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ – Петербург, 2003. – 736 с.