

## КРИТЕРИЙ АДЕКВАТНОСТИ ТРЕНАЖЕРНОЙ МОДЕЛИ

Н.С. Благодарный, М.В. Кривов, А.Г. Колмогоров, В.Ю. Кобозев  
(Ангарская государственная техническая академия)

*Предложен подход к решению задачи проверки адекватности тренажерной модели ТП. Решение задачи базируется на правильности воспроизведения тренажерной моделью описанных экспертами реальных ситуаций, на которых проводится компьютерный тренинг операторов ТП. Предложен критерий для проверки адекватности тренажерной модели и описана процедура этой проверки. Приведен пример реализации процедуры проверки адекватности тренажерной модели.*

*Ключевые слова: компьютерный тренажер, тренажерная модель, адекватность, нечеткая логика, ситуационная модель.*

### Введение

Разработка качественных компьютерных тренажеров для обучения операторов ТП является сложной, многогранной и далекой от окончательного решения проблемой. Успешное решение этой проблемы предполагает обеспечение функциональности тренажера (достаточного для успешного тренинга набора инструкторских функций), точности модели ТП (ее полноты, связности и адекватности процессу) и масштабы реализации среды управления процессом [1]. Под качественным компьютерным тренажером подразумевается программно-технический комплекс, позволяющий в полной мере выполнить основное свое предназначение — выработку и закрепление профессиональных навыков оператора с помощью имитации реальных ситуаций, возникающих при управлении ТП.

Одна из наиболее значимых и трудно решаемых задач в этой области — построение тренажерной модели (ТМ), а также проверка адекватности ее реальному ТП, а именно тем ситуациям, которые могут возникнуть при управлении процессом. Здесь не будем рассматривать вопросы построения ТМ процесса, укажем лишь, что она должна строиться на основе физико-химических закономерностей протекания ТП, описанных системой нелинейных алгебраических и дифференциальных уравнений с учетом принятых допущений. Подробно остановимся лишь на задаче проверки адекватности ТМ. Значимость решения этой задачи объясняется тем, что от правильности и точности поведения модели при задаваемых инструктором и отрабатываемых оператором ситуациях зависят навыки и умения, приобретаемые на тренажере, и, как следствие, правильность управленческих решений при работе на реальной установке. Сложность решения задачи объясняется рядом причин.

1. Большое число наблюдаемых переменных процесса чрезвычайно усложняет процедуру проверки адекватности и настройки модели и требует выявления наиболее значимых переменных процесса для осуществимости этой процедуры. Оценить значимость тех или иных переменных процесса может только эксперт.

2. Традиционно адекватность модели трактуется как степень соответствия расчетных данных результатам натурных экспериментов.[2]. Однако ТМ должна воспроизводить работу процесса в широком диапазоне его работоспособности, включая нештатные и аварийные ситуации. В этих режимах экспериментальные

данные получить невозможно, поэтому правильность работы модели может быть оценена только экспертом.

3. Даже в нормальном (номинальном) режиме работы ТП невозможно указать точные количественные значения переменных процесса вследствие их постоянного изменения. Следовательно, возникает вопрос о существовании достоверных экспериментальных данных, однозначно описывающих какой-либо технологический режим оборудования.

4. Нерешенным остается вопрос: чему должна быть адекватна тренажерная модель?

### Подход к проверке адекватности тренажерной модели

Вместе с тем при сложности и кажущейся невозможности решения поставленной задачи возможный путь к ее решению лежит в сущности тренажера, то есть в его назначении — выработке и закреплении профессиональных навыков оператора с помощью имитации реальных ситуаций. Типовые, режимные, нештатные и аварийные ситуации, на которых проводится обучение, описаны в нормативных документах (регламенте, инструкциях) ТП или формулируются экспертами — ведущими технологами производства и опытными операторами. Следовательно, правильность воспроизведения тренажерной моделью описанных экспертами ситуаций и может быть положена в основу проверки адекватности этой модели.

Чтобы охарактеризовать работу ТП в различных режимах, необходимо построить ситуационную модель процесса. Такая модель может быть построена на основе экспертных знаний о зависимости наблюдаемых переменных процесса от управляющих воздействий.

Поскольку эксперту свойственно описывать ситуации качественными категориями, а каждая ситуация (описанная экспертом, либо взятая из нормативных документов) характеризуется интервальными значениями переменных, целесообразно при описании ситуаций использовать математический аппарат нечеткой логики. Тогда признаком адекватности ТМ будет служить условие нечеткого равенства  $\tilde{s} \approx \tilde{s}^M$  двух нечетких ситуаций на всем множестве управляющих воздействий. Одна из них  $\tilde{s}$  (прогнозируемая экспертом) может быть получена путем нечеткого логического вывода по экспертным продукционным правилам при известном управляющем воздействии. Другая нечеткая ситуация  $\tilde{s}^M$  получается приведением к нечеткости отклика тренажерной модели на то же уп-

равление. Первую ситуацию назовем *эталонной*, а вторую – *текущей*. Критерием адекватности ТМ может являться степень нечеткого равенства этих ситуаций  $\mu(\tilde{s}, \tilde{s}^M)$ .

### Построение ситуационной модели

Ситуационная модель процесса формируется в виде нечеткой ситуационной сети [3], представляющей собой ориентированный взвешенный граф  $G = (\tilde{S}, \tilde{R}, \varphi)$  (рис. 1). Здесь:  $\tilde{S} = \{\tilde{s}_0, \tilde{s}_1, \dots, \tilde{s}_w\}$  – множество нечетких эталонных ситуаций,  $\tilde{R} = \{\tilde{r}_1, \tilde{r}_2, \dots, \tilde{r}_f\}$  – нечеткое множество управляющих воздействий,  $\varphi$  – весовой коэффициент предпочтения, определяющий вероятность развития каждой ситуации, (в случае, когда при одинаковых управляющих воздействиях ТП может протекать по-разному). В дальнейшем будем полагать, что процесс развивается однозначно, и  $\varphi = 1$ .

Одна из эталонных ситуаций описывает нормальный (номинальный) режим работы ТП, эту эталонную ситуацию обозначим  $\tilde{s}_0$ , и назовем базовой (на рис. 1 обозначена двойной окружностью).

Каждую ситуацию будем характеризовать значениями нечеткого  $k$ -мерного множества признаков ситуации  $\tilde{P} = \{\tilde{p}_1, \tilde{p}_2, \dots, \tilde{p}_k\}$ , включающего подмножества наблюдаемых переменных процесса и средних скоростей изменения этих переменных (темпов переменных). Каждый признак  $\tilde{p}_i (i \in \{1, 2, \dots, k\})$  будем описывать лингвистической переменной вида:

$$\langle \beta_i, B_i, D_i \rangle, \quad (1)$$

где:  $\beta_i$  – обозначение признака,  $B_i = \{B_{i1}, B_{i2}, \dots, B_{im}\}$  –  $m$ -мерное множество термов лингвистической переменной  $i$ -го признака с функциями принадлежности  $\mu_{B_{ij}}(p_i) (j \in \{1, 2, \dots, m\})$ ,  $D_i$  – базовое множество признака (диапазон шкалы переменной процесса  $p_i$ ). Например, один из признаков ситуаций – температура куба, может быть определен следующей лингвистической переменной:

$$\langle \text{"Ткуба"}, \{ \text{"очень низкий (ОН)"}, \text{"низкий (Н)"}, \text{"нормальный (НР)"}, \text{"высокий (В)"}, \text{"очень высокий (ОВ)} \}, [-30^\circ\text{C}, 10^\circ\text{C}] \rangle. \quad (2)$$

Управляющие воздействия  $\tilde{r}_l (l \in \{1, 2, \dots, f\})$  будем описывать лингвистическими переменными вида:  $\langle \gamma_l, A_l, D_l \rangle$ , где:  $A_l = \{A_{l1}, A_{l2}, \dots, A_{ln}\}$  –  $n$ -мерное множество термов с функциями принадлежности  $\mu_{A_{lq}}(r_l) (q \in \{1, 2, \dots, n\})$ , смысл остальных, входящих в переменную обозначений, тот же, что и в (1). В качестве управляющих воздействий могут выступать как изменения положения клапанов и ручных задвижек, так и изменение расходов, качественного состава сырья в нештатных режимах и другие возмущения.

Функции принадлежности множества термов удобно задавать непрерывными функциями на базовом

множестве  $D$  (рис. 3-5). Вид функций принадлежности термов, введенных для каждого признака и каждого управления, а также расположение их на шкале базового множества должны соответствовать представлению эксперта об особенностях изменения технологических переменных конкретного ТП. Так, функцию принадлежности терма "НР" (нормальный) рекомендуется выбирать трапециидального или колоколообразного вида с наличием горизонтального верхнего участка. Размер этого участка должен определяться оптимальными значениями переменной процесса, взятыми из норм технологического режима, размах нижних ветвей функции – предельно допустимыми значениями технологической переменной. Следует отметить, что функции принадлежности соседних термов должны пересекаться при значениях  $\mu$ , лежащих в диапазоне  $[0,4; 0,6]$ .

Отправной точкой ситуационной сети будет являться базовая ситуация. Базовая ситуация характерна тем, что значения всех переменных процесса соответствуют нормам технологического режима. Поэтому эксперт характеризует эту ситуацию значениями функций

принадлежности термов "нормальный" всех признаков и управлений, равных 1. Далее предполагается изменение одного или одновременно нескольких управляющих воздействий из множества  $\tilde{R}$ . В результате этого воздействия процесс переходит в новую ситуацию  $\tilde{s}_1$ , характеризующуюся изменившимися значениями функций принадлежности. Их вычисление производится путем нечеткого вывода на основе экспертных знаний о поведении процесса, сформулированных в виде нечетких продукционных правил вида:

$$\begin{aligned} \Pi_1: & \text{ЕСЛИ } r_1 \text{ есть } A_{11} \text{ И } \dots \text{ И } r_f \text{ есть } A_{1f}, \\ & \text{ТО } p_1 \text{ есть } B_{11} \text{ И } \dots \text{ И } p_k \text{ есть } B_{k1}, \\ \Pi_2: & \text{ЕСЛИ } r_1 \text{ есть } A_{12} \text{ И } \dots \text{ И } r_f \text{ есть } A_{2f}, \\ & \text{ТО } p_1 \text{ есть } B_{12} \text{ И } \dots \text{ И } p_k \text{ есть } B_{k2}, \\ & \dots \\ \Pi_n: & \text{ЕСЛИ } r_1 \text{ есть } A_{1n} \text{ И } \dots \text{ И } r_f \text{ есть } A_{fn}, \\ & \text{ТО } p_1 \text{ есть } B_{1n} \text{ И } \dots \text{ И } p_k \text{ есть } B_{kn}. \end{aligned} \quad (3)$$

Следующую ситуацию эксперт может определить либо исходя из текущей ситуации  $\tilde{s}_1$ , либо вновь исходя из базовой ситуации  $\tilde{s}_0$ , также по правилам (3) при изменении управляющих воздействий из множества  $\tilde{R}$  (рис. 1).

Фактически ситуационная модель процесса должна представлять собой сеть ситуаций, которые формируются экспертом для проверки адекватности тренажерной модели. Поэтому общее число  $w$  ситуаций определяется экспертом и должно быть не слишком большим, но достаточным для выполнения этой проверки. При этом число  $k$  признаков, включенных в каждую из ситуаций, может быть различным. Признаками каждой из ситуаций следует выбирать те переменные, которые, по мнению эксперта, наиболее полно характеризуют со-

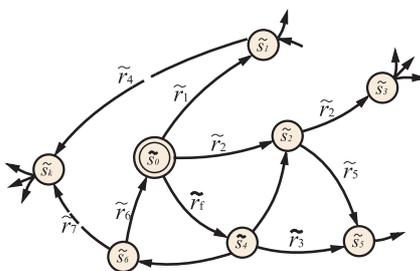


Рис. 1. Ситуационная экспертная модель

стояние процесса при данном управлении. Понятно, что те переменные, которые при этом остаются постоянными или изменяются незначительно, можно не включать во множество признаков.

Если при некотором управляющем воздействии, например  $r_2$ , какая-либо переменная процесса сначала растет, а потом начинает снижаться, то целесообразно строить ситуационную модель в виде последовательной цепочки из двух ситуаций, например  $\tilde{s}_2$  и  $\tilde{s}_3$  (рис. 1). Ситуация  $\tilde{s}_2$  будет характеризовать состояние процесса в наивысшей точке роста этой переменной, ситуация  $\tilde{s}_3$  – состояние установившегося режима.

На этом этапе работа эксперта заканчивается и можно переходить к формальной процедуре проверки адекватности тренажерной модели.

### Проверка адекватности тренажерной модели

Под адекватностью тренажерной модели будем понимать нечеткое равенство эталонных и текущих ситуаций на всем множестве ситуаций сети. Чтобы оценить адекватность тренажерной модели на ее соответствие ситуационной (мысленной) модели эксперта, необходимо сформировать эталонные (прогнозируемые экспертом) и текущие (возникшие в тренажерной модели) нечеткие ситуации и сравнить их на нечеткое равенство. Процесс формирования этих ситуаций, а также критерия адекватности ТМ, проиллюстрирован на рис. 2.

### Формирование эталонной ситуации

Для формирования какой-либо эталонной ситуации, например  $\tilde{s}_1$ , необходимо, чтобы была определена исходная ситуация, например базовая  $\tilde{s}_0$ , и выбраны значения управляющих воздействий  $\{r'_1, r'_2, \dots, r'_j\}$ , переводящих ситуационную модель из ситуации  $\tilde{s}_0$  в ситуацию  $\tilde{s}_1$ .

Выбор значений управляющих воздействий не должен противоречить экспертным правилам, то есть выбранные значения не должны лежать в зонах, находящихся между термами, которые определил эксперт для лингвистических переменных управляющих воздействий. Такие зоны называются плохо определенными и ограничиваются значениями  $\mu$ , лежащими в диапазоне  $[0,4; 0,6]$  (рис. 3).

Выбранные значения управляющих воздействий переводятся в нечеткий вид путем нахождения функций принадлежности всех термов, описывающих соответствующую лингвистическую управляющую переменную. Находятся значения следующих функций принадлежности:

$$\begin{aligned} \text{для } \tilde{r}'_1: & \mu_{A_{11}}(r'_1), \mu_{A_{12}}(r'_1), \dots, \mu_{A_{1n}}(r'_1); \\ \dots & \\ \text{для } \tilde{r}'_j: & \mu_{A_{j1}}(r'_j), \mu_{A_{j2}}(r'_j), \dots, \mu_{A_{jn}}(r'_j). \end{aligned} \quad (4)$$

Далее осуществляется агрегирование степеней истинности предпосылок правил (3). Поскольку в левой части правил (до запятой) используется связка "И", выявляется та функция принадлежности в предпосылке каждого из правил, которая имеет наименьшее

*Самое трудное  
в имитационном моделировании -  
проверить свою точку зрения,  
имея о ней нечеткое представление*

Журнал "Автоматизация в промышленности"

значение, то есть агрегирование осуществляется с использованием операции min-конъюнкции [4]. Степени истинности  $(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$  предпосылок каждого из правил находятся по выражениям:

$$\begin{aligned} \text{для } \Pi_1: & \alpha_1 = \min\{\mu_{A_{11}}(r'_1), \mu_{A_{21}}(r'_2), \dots, \mu_{A_{j1}}(r'_j)\}; \\ \dots & \\ \text{для } \Pi_n: & \alpha_n = \min\{\mu_{A_{1n}}(r'_1), \mu_{A_{2n}}(r'_2), \dots, \mu_{A_{jn}}(r'_j)\}. \end{aligned} \quad (5)$$

Затем осуществляется процедура активизации заключений нечетких продукционных правил. Для этого выполняется модифицированная композиционная операция между найденными значениями степени истинности предпосылок каждого правила  $\alpha_q$  и соответствующей функцией принадлежности его заключения  $\mu_{B_{ij}}(p_i)$ . В результате этой операции для каждого признака  $p_i$  формируются новые нечеткие множества его термов с функциями принадлежностей  $\tilde{\mu}_{B_{ij}}(p_i)$ , которые находятся по формулам:

$$\begin{aligned} \text{для } \Pi_1: & \tilde{\mu}_{B_{11}}(p_1) = \min\{\alpha_1, \mu_{B_{11}}(p_1)\}, \dots, \\ & \tilde{\mu}_{B_{k1}}(p_k) = \min\{\alpha_1, \mu_{B_{k1}}(p_k)\}; \\ \dots & \\ \text{для } \Pi_n: & \tilde{\mu}_{B_{1n}}(p_1) = \min\{\alpha_n, \mu_{B_{1n}}(p_1)\}, \dots, \\ & \tilde{\mu}_{B_{km}}(p_k) = \min\{\alpha_n, \mu_{B_{km}}(p_k)\}. \end{aligned} \quad (6)$$

После этого выполняется процедура аккумуляирования активизированных заключений каждого из правил для каждого признака. Результат такого аккумуляирования для признаков находится путем объединения полученных на предыдущем этапе нечетких множеств (с помощью операции дизъюнкции  $\vee$ ) по формулам:

$$\begin{aligned} - \text{ для } \tilde{p}_1: & \tilde{\mu}_{B_1}(p_1) = \bigvee_{B_{1j} \in B_1} (\tilde{\mu}_{B_{1j}}(p_1)) = \\ & = \{\tilde{\mu}_{B_{11}}(p_1), \tilde{\mu}_{B_{12}}(p_1), \dots, \tilde{\mu}_{B_{1m}}(p_1)\}, \\ \dots & \\ - \text{ для } \tilde{p}_k: & \tilde{\mu}_{B_k}(p_k) = \bigvee_{B_{kj} \in B_k} (\tilde{\mu}_{B_{kj}}(p_k)) = \\ & = \{\tilde{\mu}_{B_{k1}}(p_k), \tilde{\mu}_{B_{k2}}(p_k), \dots, \tilde{\mu}_{B_{km}}(p_k)\}. \end{aligned} \quad (7)$$

Полученные нечеткие множества  $\tilde{\mu}_{B_{ij}}(p_i)$  всех признаков  $\tilde{p}_1, \tilde{p}_2, \dots, \tilde{p}_k$  и составляют эталонную ситуацию  $\tilde{s}_1$ .

### Формирование текущей ситуации

Для получения текущей нечеткой ситуации  $\tilde{s}_1^M$  тренажерной модели требуется перевести модель в режим работы, соответствующий нормальному состоянию ТП (базовая ситуация), и подать те же управляющие воздействия, что и при формировании эталонной ситуации. После окончания переходных процессов измеряются значения  $p'_1, p'_2, \dots, p'_k$  наблюдаемых переменных (признаков) текущей ситуации

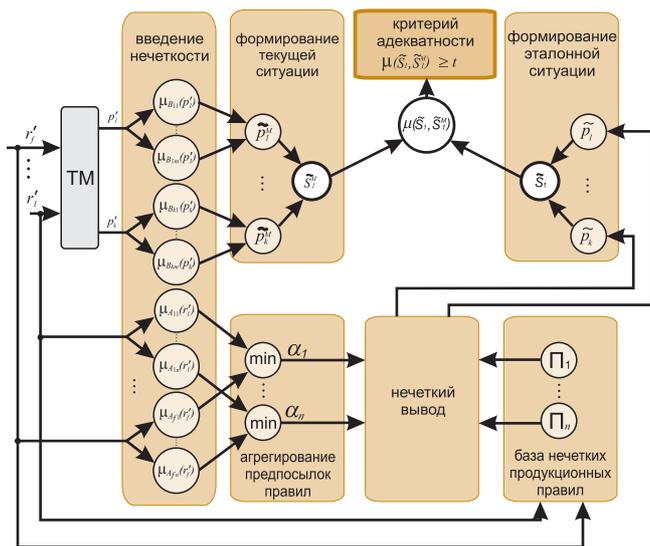


Рис. 2. Процедура формирования критерия адекватности тренажерной модели

тренажерной модели.

Требуется перевести в нечеткий вид значения тех признаков тренажерной модели, которые были включены экспертом в ситуацию  $\tilde{s}_1$ . Для этого находят значения функций принадлежности всех термов, описывающих соответствующую лингвистическую переменную признака. Находятся значения следующих функций принадлежности:

$$\begin{aligned} \text{для } \tilde{p}_1^M: & \mu_{B_{11}}(p'_1), \mu_{B_{12}}(p'_1), \dots, \mu_{B_{1m}}(p'_1); \\ \dots & \\ \text{для } \tilde{p}_k^M: & \mu_{B_{k1}}(p'_k), \mu_{B_{k2}}(p'_k), \dots, \mu_{B_{km}}(p'_k). \end{aligned} \quad (8)$$

Полученные в (8) нечеткие множества всех признаков  $\tilde{p}_1^M, \tilde{p}_2^M, \dots, \tilde{p}_k^M$  составляют текущую ситуацию  $\tilde{s}_1^M$ .

#### Критерий адекватности тренажерной модели

Когда сформированы две нечеткие ситуации: эталонная  $\tilde{s}_1$ , описанная экспертом, и текущая  $\tilde{s}_1^M$ , возникающая на тренажерной модели, необходимо проверить их на нечеткое равенство. Проверка на нечеткое равенство двух ситуаций осуществляется путем вычисления степени нечеткого равенства ситуаций  $\mu(\tilde{s}_1, \tilde{s}_1^M)$ , которая определяется из выражения [3]:

$$\mu(\tilde{s}_1, \tilde{s}_1^M) = \& (\& (\tilde{\mu}_{B_{ij}}(p_i) \leftrightarrow \mu_{B_{ij}}(p'_i))), \quad (9)$$

где  $\&$  и  $\leftrightarrow$  — символы операций конъюнкции и эквивалентности соответственно. Степень истинности высказывания об эквивалентности функций принадлежности в выражении (9) может быть определена по формуле:

$$\begin{aligned} \tilde{\mu}_{B_{ij}}(p_i) \leftrightarrow \mu_{B_{ij}}(p'_i) &= \min((\max(1 - \tilde{\mu}_{B_{ij}}(p_i), \\ & \mu_{B_{ij}}(p'_i)), \max(\tilde{\mu}_{B_{ij}}(p_i), (1 - \mu_{B_{ij}}(p'_i)))). \end{aligned} \quad (10)$$

Смысл выражения (9) состоит в следующем: сначала сравниваются на эквивалентность (по формуле

(10)) функции принадлежности термов одного из признаков эталонной и текущей ситуаций, и находится наименьшее из полученных значений формулы (10). Затем такое же сравнение повторяется для всех других признаков этих ситуаций. После этого определяется наименьшее значение степени истинности высказывания об эквивалентности функций принадлежности (10) на множестве всех признаков двух ситуаций.

Две ситуации считаются нечетко равными, если выполняется условие [3]:

$$\mu(\tilde{s}_1, \tilde{s}_1^M) \geq t, \quad (11)$$

где  $t$  — порог нечеткого равенства ситуаций,  $t \in [0.6; 1]$ . Выбор конкретного значения порога зависит от жесткости требований к точности тренажерной модели. Верхняя граница интервала ( $t = 1$ ) означает точное совпадение всех значений выходных переменных тренажерной модели с соответствующими значениями признаков нечеткой экспертной ситуации, полученных путем приведения к четкости (дефаззификации) выражений (7). Но эксперт не может знать точные значения переменных ТП во всех моделируемых ситуациях, поэтому высокие значения порога являются неприемлемыми. Авторы предлагают устанавливать следующие значения порога  $t \in [0.6; 0.8]$ .

Поскольку выполнение условия (11) должно проверяться на всем множестве нечетких ситуаций, включенных в ситуационную сеть, критерий адекватности ТМ сформулируем в виде:

$$\& (\mu(\tilde{s}_g, \tilde{s}_g^M) \geq t, g \in \{1, 2, \dots, w\}) \quad (12)$$

где  $w$  — общее число ситуаций в сети. При выполнении условия (12) тренажерная модель адекватно имитирует описанные экспертами реальные ситуации, которые могут возникать при управлении ТП.

#### Процедура проверки адекватности тренажерной модели

1. Строится ситуационная сеть в соответствии с заранее намеченной программой проверки тренажерной модели.

2. Определяются управляющие воздействия, на которых будет тестироваться модель и составляются их лингвистические переменные.

3. Определяется множество признаков, входящих в нечеткое множество каждой из ситуаций сети и составляются их лингвистические переменные.

4. Строятся функции принадлежности всех управляющих воздействий и признаков на их базовых множествах.

5. Экспертом на основе знаний о поведении процесса формулируются нечеткие продукционные правила вида (3).

6. Выбираются значения управляющих воздействий, на которых будет тестироваться ТМ так, чтобы они были хорошо определены относительно своих лингвистических термов.

7. Выбранные значения управляющих воздействий переводятся в нечеткий вид в соответствии с выражением (4).

8. По выражению (5) осуществляется агрегирование степеней истинности предпосылок правил (3).

9. По выражению (6) осуществляется активизация заключений нечетких продукционных правил (3).

10. По выражению (7) осуществляется аккумулярование активизированных заключений каждого из правил для каждого признака. В результате оказываются сформированными нечеткие эталонные ситуации сети.

11. На тренажерную модель подаются управляющие воздействия, определенные в пунктах 2 и 6 настоящей процедуры. После окончания переходных процессов измеряются значения признаков текущей ситуации ТМ.

12. Значения признаков текущей ситуации ТМ переводятся в нечеткий вид в соответствии с выражением (8). В результате оказываются сформированными нечеткие текущие ситуации тренажерной модели.

13. По выражению (9) определяются степени нечеткого равенства соответствующих друг другу эталонных и текущих ситуаций по всей ситуационной сети.

14. Проверяется условие критерия адекватности (12) при заданном пороге нечеткого равенства ситуаций. В случае его выполнения тренажерная модель адекватно имитирует описанные экспертами реальные ситуации. В противном случае требуется настройка тренажерной модели.

Авторами разработан прототип ПО, реализующий изложенную выше процедуру проверки адекватности ТМ на ЭВМ. Это ПО использовано при разработке тренажера узла разделения этан-этиленовой фракции производства ЭП-300, внедренного на ОАО "Ангарский завод полимеров".

Применение описанной выше процедуры рассмотрим на простом примере.

**Пример**

1. Построим фрагмент ситуационной модели процесса ректификации в виде графа, содержащего две ситуации (вершины)  $\tilde{s}_0$  и  $\tilde{s}_1$ , и одну ветвь  $\tilde{r}_1$  между этими вершинами (рис. 1).

2. Пусть проверка адекватности тренажерной модели проводится при изменении расхода греющего пара в кубовый кипятильник ректификационной колонны. Определим эту лингвистическую переменную аналогично (2):

$\langle "Fnara", \{ "OH", "H", "HP", "B", "OB" \}, [0 \text{ т/ч}, 16 \text{ т/ч}] \rangle$ .

3. Обе ситуации будем характеризовать двумя признаками (для простоты): лингвистической переменной вида (2) и скоростью изменения температуры куба, определяемой лингвистической переменной вида:

$\langle "vTкуба", \{ "снижается быстро (СБ)", "снижается медленно (СМ)", "растет медленно (РМ)", "растет быстро (РБ)" \}, [-1 \text{ }^\circ\text{C/мин}, 1 \text{ }^\circ\text{C/мин}] \rangle$ .

Таблица. Нечеткие продукционные правила

		Расход пара				
		OH	H	HP	B	OB
Температура куба	OH					
	H	СБ	СБ			
	HP			X		
	B				PM	
	OB					PM

4. Совместно с экспертом построим функции принадлежности управления и признаков (рис. 3 – 5). Так, при построении функций принадлежности управляющего воздействия – расхода пара было учтено следующее:

- шкала прибора: [0, 16], т/ч;
- оптимальные значения расхода пара: [7, 9], т/ч;
- предельно допустимые значения расхода: [5, 11], т/ч;
- низким считается расход, примерно равный [3, 5], т/ч;
- высоким считается расход, примерно равный [11, 12], т/ч.

Подобные данные использовались и при построении функций принадлежностей признаков.

5. Пусть экспертом сформулированы следующие правила о поведении процесса:

- П<sub>1</sub>: ЕСЛИ  $F_{nara}$  есть "OH",  
ТО  $T_{куба}$  есть "H" И  $vT_{куба}$  есть "СБ",
- П<sub>2</sub>: ЕСЛИ  $F_{nara}$  есть "H",  
ТО  $T_{куба}$  есть "H" И  $vT_{куба}$  есть "СБ",
- П<sub>3</sub>: ЕСЛИ  $F_{nara}$  есть "HP",  
ТО  $T_{куба}$  есть "HP",
- П<sub>4</sub>: ЕСЛИ  $F_{nara}$  есть "B",  
ТО  $T_{куба}$  есть "B" И  $vT_{куба}$  есть "PM",
- П<sub>5</sub>: ЕСЛИ  $F_{nara}$  есть "OB",  
ТО  $T_{куба}$  есть "OB" И  $vT_{куба}$  есть "PM".

Если при формировании ситуации используется только одно управляющее воздействие (в правилах одна предпосылка), правила удобнее формулировать в табличной форме (табл.). В столбцы таблицы заносят управляющие переменные и их термы, а в строки – наблюдаемые переменные и их термы. Заполненные клетки означают работу соответствующих правил, а значения заполненных клеток – значения термов средних скоростей изменения переменных (темпов) в правилах. Знак X в таблице означает отсутствие темпа переменной. Пустые клетки таблицы означают отсутствие в заключениях экспертных правил информации о соответствующих этим клеткам термах.

6. Выберем для тестирования ТМ значение расхода пара  $F_{nara} = 12 \text{ т/ч}$ . На рис. 3 видно, что это значение находится на границе плохо определенной зоны.

7. На этом же рисунке проиллюстрирован перевод выбранного значения расхода пара в нечеткий вид. Значения функций принадлежности термов этой пе-

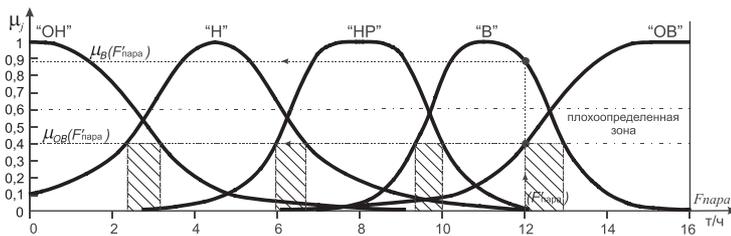


Рис. 3. Функции принадлежности управляющей лингвистической переменной "Расход пара"

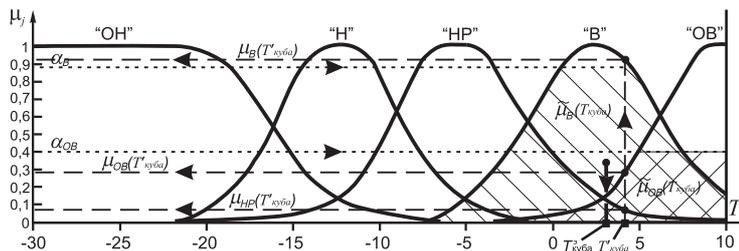


Рис. 4. Функции принадлежности лингвистической переменной признака "Температура куба"

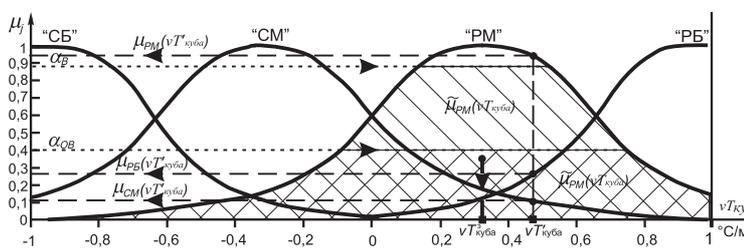


Рис. 5. Функции принадлежности лингвистической переменной признака "Темп температуры куба"

ременной получились следующими:  $\mu_{ОН}(F_{пара}) = 0$ ;  $\mu_{Н}(F_{пара}) = 0$ ;  $\mu_{НР}(F_{пара}) = 0$ ;  $\mu_{В}(F_{пара}) = 0,88$ ;  $\mu_{ОВ}(F_{пара}) = 0,4$ .

8. Поскольку предпосылки правил примера (13) содержат только одну управляющую переменную, операция агрегирования степеней истинности предпосылок правил оказывается формальной. Из выражения (5) имеем:  $\alpha_1 = \alpha_{ОН} = 0$ ;  $\alpha_2 = \alpha_{Н} = 0$ ;  $\alpha_3 = \alpha_{НР} = 0$ ;  $\alpha_4 = \alpha_{В} = 0,88$ ;  $\alpha_5 = \alpha_{ОВ} = 0,4$ .

9. Активизация заключений нечетких продукционных правил примера (13) проиллюстрирована на рис. 4 и 5. В результате выполнения этой операции получаем следующие значения функций принадлежности новых нечетких множеств признаков  $T_{куба}$  и  $vT_{куба}$ :

- для  $P_1$ :  $\tilde{\mu}_{Н}(T_{куба}) = 0$ ,  $\tilde{\mu}_{СБ}(T_{куба}) = 0$ ;
- для  $P_2$ :  $\tilde{\mu}_{Н}(T_{куба}) = 0$ ,  $\tilde{\mu}_{СБ}(T_{куба}) = 0$ ;
- для  $P_3$ :  $\tilde{\mu}_{НР}(T_{куба}) = 0$ ;
- для  $P_4$ :  $\tilde{\mu}_{В}(T_{куба}) = 0,88$ ,  $\tilde{\mu}_{РМ}(T_{куба}) = 0,88$  (правая штриховка на рис. 4 и 5);
- для  $P_5$ :  $\tilde{\mu}_{ОВ}(T_{куба}) = 0,4$ ,  $\tilde{\mu}_{РМ}(T_{куба}) = 0,4$  (левая штриховка на рис. 4 и 5).

10. Нечеткая эталонная ситуация  $\tilde{s}_1$  характеризуется следующими значениями функций принадлежности ее признаков:

- для  $T_{куба}$ :  $\tilde{\mu}(T_{куба}) = \{\tilde{\mu}_{ОН}, \tilde{\mu}_{Н}, \tilde{\mu}_{НР}, \tilde{\mu}_{В}, \tilde{\mu}_{ОВ}\} = \{0, 0, 0, 0,88, 0,4\}$ ;

- для  $vT_{куба}$ :  $\tilde{\mu}(vT_{куба}) = \{\tilde{\mu}_{СБ}, \tilde{\mu}_{СМ}, \tilde{\mu}_{РМ}, \tilde{\mu}_{РВ}\} = \{0, 0, 0,88, 0\}$ .

При необходимости можно привести к четкости нечеткие множества  $T_{куба}$  и  $vT_{куба}$ , и вычислить значения  $T^э_{куба}$  и  $vT^э_{куба}$ . На рис. 4 и 5 это сделано с использованием центроидного метода дефаззификации (определения центра тяжести заштрихованных областей) [4].

11. Предположим, что в ТМ изменение расхода греющего пара от 8 т/ч до 12 т/ч вызвало изменение температуры куба от  $-5^\circ\text{C}$  до  $4^\circ\text{C}$ . При этом средняя скорость роста температуры оказалась равной  $0,47^\circ\text{C}/\text{мин}$ . Тогда значения признаков текущей ситуации тренажерной модели:  $T_{куба} = 4^\circ\text{C}$ ;  $vT_{куба} = 0,47^\circ\text{C}/\text{мин}$ . Следует отметить, что базировать критерий адекватности ТМ на сравнении четких значений признаков, полученных на этом и предыдущем этапах, является принципиально неверным подходом.

12. Сформируем нечеткую текущую ситуацию путем перевода в нечеткий вид значений  $T_{куба}$  и  $vT_{куба}$  (рис. 4 и 5). Получим:

- для  $T_{куба}$ :  $\mu(T_{куба}) = \{\mu_{ОН}, \mu_{Н}, \mu_{НР}, \mu_{В}, \mu_{ОВ}\} = \{0, 0, 0,07, 0,92, 0,29\}$ ;

- для  $vT_{куба}$ :  $\tilde{\mu}(vT_{куба}) = \{\mu_{СБ}, \mu_{СМ}, \mu_{РМ}, \mu_{РВ}\} = \{0, 0,11, 0,95, 0,27\}$ .

13. Для вычисления степени нечеткого равенства ситуаций  $\tilde{s}_1$  и  $\tilde{s}_1^M$  сначала сравним на эквивалентность (по формуле (10)) попарно значения всех функций принадлежности термов каждого признака этих ситуаций, а затем найдем наименьшее из полученных значений:

- для  $T_{куба}$ :  $\tilde{\mu}_{ОН} \leftrightarrow \mu_{ОН} = 1$ ;  $\tilde{\mu}_{Н} \leftrightarrow \mu_{Н} = 1$ ;  $\tilde{\mu}_{НР} \leftrightarrow \mu_{НР} = 0,93$ ;  $\tilde{\mu}_{В} \leftrightarrow \mu_{В} = 0,88$ ;  $\tilde{\mu}_{ОВ} \leftrightarrow \mu_{ОВ} = 0,6$ ;  $\mu(T_{куба}, T_{куба}) = \min(1, 1, 0,93, 0,88, 0,6) = 0,6$ ;

- для  $vT_{куба}$ :  $\tilde{\mu}_{СБ} \leftrightarrow \mu_{СБ} = 1$ ;  $\tilde{\mu}_{СМ} \leftrightarrow \mu_{СМ} = 0,89$ ;  $\tilde{\mu}_{РМ} \leftrightarrow \mu_{РМ} = 0,88$ ;  $\tilde{\mu}_{РВ} \leftrightarrow \mu_{РВ} = 0,73$ ;  $\mu(T_{куба}, vT_{куба}) = \min(1, 0,89, 0,88, 0,73) = 0,73$ ;

Степень нечеткого равенства ситуаций в соответствии с выражением (9) равна

$$\mu(\tilde{s}_1, \tilde{s}_1^M) = \min(\mu(T_{куба}, T_{куба}), \mu(vT_{куба}, vT_{куба})) = \min(0,6, 0,73) = 0,6.$$

14. Если порог нечеткого равенства ситуаций  $t$  был установлен равным 0,6, то условие критерия (12) выполняется, и тренажерная модель адекватно имитирует описанную экспертом ситуацию.

### Заключение

Описанный в статье подход к решению задачи проверки адекватности тренажерной модели достаточно просто реализуется на ЭВМ и может быть использован при разработке и практическом внедрении компьютерных тренажеров. При практическом использовании этого подхода рациональным является выбор не слишком большого числа ситуаций для проверки адекватности ТМ. Авторы рекомендуют осуществлять проверку при двух-четырех различных положениях каждого из регулирующих клапанов, а также при имитации трена-

жером пуска, остановка процесса и аварийных ситуаций, описанных в технологическом регламенте. Общее число этих ситуаций для технологического узла, состоящего из трех ректификационных колонн, равно 70...100 ед. При этом эксперту требуется составить функции принадлежности и описать правила поведения 25...30 технологических переменных процесса.

Сделаем несколько замечаний о перспективах использования изложенных идей в других областях тренажеростроения.

1. Разработанный критерий адекватности может служить основой методов идентификации тренажерной модели, то есть автоматического подбора значений варьируемых параметров модели с целью выполнения условия  $\mu(\tilde{s}_i, \tilde{s}_i^M) \rightarrow \max$  на всем множестве ситуаций  $\tilde{s}_i$ .

2. Ситуационная модель и предложенный критерий (12) могут быть использованы для оценки правильности действий оператора при обучении его на тренажере.

#### Список литературы

1. Дозорцев В.М. Компьютерные тренажеры для обучения операторов технологических процессов. М.: СИНТЕГ. 2009.
2. Дилигенский Н.В., Дымова Л.Г., Севастьянов П.В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология. М.: Машиностроение-1, 2004.
3. Мелихов А.Н., Берштейн Л.С., Корвин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. М.: Наука, 1990.
4. Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. Нечеткие модели и сети. М.: Горячая линия-Телеком. 2007.

*Благодарный Николай Семенович — канд. техн. наук, проф.,*

*Колмогоров Алексей Геннадьевич — доцент,*

*Кобозев Владимир Юрьевич — ст. преподаватель кафедры "Автоматизация технологических процессов",*

*Кривов Максим Викторович — канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой*

*"Вычислительные машины и комплексы" Ангарской государственной технической академии.*

*Контактные телефоны: (3955) 67-83-35, (3955) 67-43-96, 67-89-15.*

*E mail: nick@agta.irmail.ru; krivov\_mv@agta.ru; alexey-kol@narod.ru*

#### Новая "умная теплица" на базе LinPAC-8141 и ISaGRAF 5 введена в эксплуатацию специалистами НПО "Автоматика"

Компания "ФИОРД" (мастер-дистрибьютор ISaGRAF в России) информирует о том, что специалисты ООО НПО "Автоматика" (г. Малоярославец) ввели в эксплуатацию в г. Саратове "умную теплицу" — АСУ микроклиматом теплиц (АСУ МТ). Результатом внедрения "умной теплицы" явилось обеспечение оптимального микроклимата для выращиваемых растений, резкое повышение урожайности и качества овощей. АСУ МТ построена на базе контроллеров LinPAC компании ICP DAS, программирование которых осуществлялось с помощью ISaGRAF — ведущей мировой системы программирования контроллеров в стандартах IEC 61131-3 и IEC 61499. В качестве целевой задачи ISaGRAF для LinPAC использована инновационная разработка компании ФИОРД — ISaGRAF 5++ ACE Target и встроенные в исполнительную систему ISaGRAF 5 средства графического интерфейса ISaGUI.

Объектом управления и контроля является теплица площадью 5066 м<sup>2</sup>. Теплица представляет собой блок из четырех отделений. Каждое отделение оборудовано полным комплектом инженерных систем (обогрев, форточная вентиляция, зашторивание, система испарительного охлаждения, электродосвечивание). Таким образом, АСУ МК фактически управляет четырьмя самостоятельными теплицами. Особенность теплицы как объекта регулирования заключается в том, что, с одной стороны, теплица — достаточно инерционный объект (транспортное запаздывание, постоянная времени), а с другой — к ней предъявляются весьма высокие требования по точности поддержания заданных параметров микроклимата. АСУ МТ состоит из измерительно-управляющей части (модули I-87\*\*\*, I-7\*\*\*) и АРМ оператора (контролер LinPAC, монитор, клавиатура, мышь). Общее число входов/выходов в проекте — 110 ед. АСУ МТ в автоматическом режиме выполняет следующие задачи: управляет системами обогрева и форточками с целью поддержания параметров микроклимата в теплице (температура воздуха, температура теплоносителя системы подпочвенного обогрева) и представляет в графической форме значения температур воздуха, теплоносителя

подпочвенного обогрева и теплоносителя надпочвенного обогрева за последние 24 ч.

Особенность реализованного решения заключается в том, что, во-первых, благодаря использованию программного модуля ISaGUI (разработка ЗАО "ФИОРД"), удалось реализовать систему управления с полноценным интерфейсом оператора (монитор, клавиатура, мышь) без использования дополнительного ПК, и, во-вторых, данное решение позволяет строить довольно большие системы управления с использованием лицензии ISaGRAF на относительно небольшое число точек ввода/вывода (в данном проекте использована лицензия на 128 точек ввода/вывода). Сам программный модуль ISaGUI требует всего два канала ввода/вывода вне зависимости от числа переменных, используемых в интерфейсе. Таким образом, использование ISaGUI дает возможность относительно недорого решать достаточно крупные задачи автоматизации.

*Преимущества, определившие выбор оборудования:* весь необходимый набор оборудования и ПО — от единого поставщика. Поддержка для контроллеров среды разработки на языках МЭК 61131-3. Невысокая (в сравнении с аналогами) стоимость. Возможность организовать полноценный интерфейс оператора без использования дополнительного ПК.

*Оборудование ICP DAS*

Контроллер LinPAC-8141 на основе ОС Linux с поддержкой программирования в среде ISaGRAF 5. Модули аналогового ввода/вывода I-87053, I-87057, I-87017, I-7015 Конвертер интерфейса I-8112 Повторитель интерфейса I-7520.

Система ISaGUI предназначена для обеспечения интерактивного графического отображения данных РВ непосредственно в исполнительной системе ISaGRAF 5++ ACE Target. Система реализована в виде виртуального устройства GUI и пакета специальных функций, встроенных в Workbench. Исполнительная система может работать в контроллерах с ОС Linux/Solaris/ FreeBSD/Windows XP. Для проектирования графического интерфейса используется редактор графического интерфейса GLADE (<http://glade.gnome.org/>) на основе GTK+.

[Http://www.fiord.ru](http://www.fiord.ru)