

**НОВЫЙ ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ АДЕКВАТНОСТИ ТРЕНАЖЕРНЫХ
МОДЕЛЕЙ СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ****В. М. Дозорцев, Д. В. Агафонов (Москва)**

Компьютерные тренажеры (КТ) для обучения операторов технологических процессов (ТП) широко распространены на непрерывных производствах химико-технологического типа по всему миру. Рынок КТ составил в 2008 году 400 млн. долл. и по прогнозу вырастет к 2013 году до 750 млн. долл. при среднегодовом росте почти в 12% [1]. Бурно развивается и российский сегмент тренажерного рынка, что наглядно видно из ежегодных тематических обзоров по КТ [2].

Сердцевина КТ – тренажерная модель (ТМ) процесса, основанная на имитационном моделировании тепло- и массообменных, кинетических, гидравлических и др. процессов, протекающих в моделируемой технологической установке. При этом жизненно важно обеспечить адекватность ТМ реальному ТП, поскольку использование неточной ТМ в обучении операторов приведет к ложному навыку, тем самым обесценив тренинг или даже сделав его вредным. Но ТМ обладают рядом свойств, крайне затрудняющих решение проблемы адекватности: ТМ строятся исходя из фундаментальных физико-химических принципов функционирования ТП; обладают полнотой по управляющим воздействиям (многие десятки) и измеряемым переменным (многие сотни) и функционируют в широком диапазоне изменения переменных; работают в имитационном режиме, допуская произвольные по времени и по составу вмешательства участников тренинга в ход ТП; воспроизводят широкий набор типовых и специальных тренировочных ситуаций.

Отсюда специфика постановки и решения задачи обеспечения адекватности ТМ: во-первых, адекватность должна быть гарантирована на достаточно полном множестве статических и динамических режимов ТП; во-вторых, огромная размерность и много-связность модели делают неизбежной рекурсивность процедуры настройки ТМ с возвратами на стадию собственно моделирования для уточнения структуры модели; в-третьих, основным источником информации о поведении моделируемого ТП являются оценки экспертов – технологов, опытных производственников и др.; наконец, сами цели компьютерного тренинга определяют акцент на обеспечение адекватности при «произвольном» манипулировании моделью.

Практическое отсутствие работ по адекватности ТМ в рассматриваемой предметной области объясняется видимой «неподъемностью» задачи. Действительно, исследование динамического поведения нелинейной системы дифференциальных и конечных уравнений размерностью несколько тысяч переменных (включая огромное число «внутренних» (фазовых) переменных ТМ) при произвольно изменяющихся входных воздействиях, на первый взгляд, представляется нереальным. Однако основная трудность заключается собственно в понимании «адекватности» модели для рассматриваемого случая.

Ключевой вопрос может быть сформулирован так: *чему должна быть адекватна ТМ?* При оценивании параметров в задачах управления модель должна приближать поведение объекта в эксперименте; но к тренажерам такой подход неприменим, поскольку эксперименты для большинства моделируемых режимов принципиально невозможны, а количество приближаемых переменных и проверяемых режимов чрезвычайно велико. Помимо всех технических трудностей, имеет место проблема *воспроизводимости* динамических (и, конечно, статических) режимов реального ТП, близость к которым и должна обеспечивать ТМ. В практических условиях добиться «одинаковости» поведения ТП при «одинаковых» управлениях и внешних возмущениях невоз-

можно: если об одинаковых управляющих воздействиях еще можно рассуждать хотя бы в теоретическом плане, то об одинаковости неуправляемых (а часто – и не наблюдаемых) возмущений говорить вообще не приходится.

Более того, «лобовой» подход представляется некорректным и с постановочной точки зрения. Качество любой модели определяется существом решаемой с ее помощью задачи. Назначение компьютерного тренажера – формирование и закрепление навыков принятия операторских решений. В соответствии с принципом подобия [3] такая задача может быть успешно решена, если моделируемая в тренажере деятельность оператора будет по своей функционально-информационной структуре соответствовать деятельности оператора по управлению реальным производственным объектом. Общеизвестно, что задача оператора – быстрое и надежное определение момента, когда система управления перестает справляться с поддержанием желаемого режима ТП, перевод управления на себя и грамотная компенсация нежелательных последствий отклонения режима. По представлениям современного когнитивного инжиниринга, при принятии решений оператор, обладая «концептуальной» моделью процесса (т.е. достаточно полным образом управляемого объекта), при разрешении каждой частной ситуации использует соответствующий «срез» концептуальной модели, так называемую оперативную модель процесса (состав и свойства которой зависят от особенностей решаемой задачи) [4].

Эти общие положения в контексте обеспечения адекватности ТМ сводятся к следующим принципиальным особенностям операторской деятельности [3]:

– оператор «видит» ТП через *семейство оперативных моделей*, каждая из которых связана с некоторой относительно локальной частью всего процесса;

– каждая оперативная модель характеризуется относительно небольшим набором *критических* режимных параметров, обычно регулируемых автоматически, так что статические и динамические режимы процесса могут быть воспроизведены с существенной точностью;

– другая часть переменных относится к разряду *некритических* режимных, точность воспроизведения которых может быть значительно ниже, чем у критических параметров;

– остальные параметры оператор рассматривает как сугубо *инструментальные*.

Принципиальная суть предлагаемого подхода к обеспечению адекватности ТМ такова (детали приведены в работах [3, 5]).

1. Основы адекватности следует закладывать еще на стадии **фундаментального моделирования**. Вначале строится так называемое семейство тренажерных моделей (СТМ) процесса, представляющее собой два отображения:

а) отображение P пространства управлений, области допустимых значений фазовых переменных и подмножества допустимых параметров СТМ в пространство функций времени достаточно общего вида: $P: (U, X, \Psi^p) \rightarrow C(X)$, и

б) отображение N области допустимых значений фазовых переменных в область допустимых значений наблюдаемых переменных: $N: X \rightarrow Y$.

Здесь: U – пространство управлений на интервале времени T со значениями в некотором подпространстве пространства R^m размерности, вообще говоря, меньшей m (поскольку не все управления моделируются);

X – область допустимых значений фазовых переменных (в СТМ она имеет конечную размерность q , даже если моделируются процессы с распределенными параметрами);

Y – область допустимых значений наблюдаемых переменных конечной размерности n , вообще говоря, меньшей, чем размерность вектора наблюдаемых параметров

моделируемого объекта, и, что особенно важно в контексте изложения, существенно меньшей размерности q фазового пространства;

Ψ^p – подмножество допустимых параметров СТМ размерности p , объединяющее в себе статические ξ и динамические ζ параметры модели;

$S(X)$ – пространство функций времени со значениями в области X .

При заданных начальных условиях x^0 и управлении $u(\cdot)$ СТМ превращается в семейство модельных процессов (СМП), представляющее собой множество отображений $\{P_\lambda \mid x(\cdot) = P(u(\cdot), x^0, \psi), \psi \in \Psi^p\}$. При этом по определению имеем:

$$x(t) = P(u(\cdot), x^0, \psi)(t) \text{ для любого момента } t \in T; \quad (1)$$

$$P(u(\cdot), x^0, \psi)(0) = x^0; \quad (2)$$

$$y(t) = N(x(t)). \quad (3)$$

Выбор конкретного значения p размерности множества параметров Ψ^p должен быть сделан до составления уравнений СТМ, а выбор конкретного значения вектора параметров $\psi_0 \in \Psi^p$ – после составления уравнений. Именно выбор ψ_0 выделяет ТМ из СТМ. И именно этот выбор представляет основную трудность на этапе «подгонки» поведения модели.

Если пренебречь запаздываниями, то отображение (1) есть решение системы дифференциальных уравнений:

$$\frac{dx}{dt} = F(x, u, \psi), \quad t \in T; \quad (4)$$

$$x(0) = x^0; \quad (5)$$

$$y(t) = N(x(t)). \quad (6)$$

Как правило, наблюдаемыми переменными y_i являются некоторые из фазовых переменных x_i : $y_i(t) = x_i(t)$. Для простоты можно считать, что $i = 1 \dots n$.

К этим уравнениям нужно добавить уравнения обратной связи для управлений, находящихся в автоматическом режиме, и зависимость от времени для управлений в ручном режиме. Как это обычно делается в теории наблюдаемости, систему (4)–(6) можно расширить, дифференцируя уравнения (6) в силу уравнений (4) и добавляя полученные уравнения к основной системе:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{\partial N}{\partial x} F(x, u, \psi), \quad \frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial N}{\partial x} F(x, u, \psi) \right) F(x, u, \psi), \quad (7)$$

где вместо первых x_1, \dots, x_n в правые части (7) должны подставляться y_1, \dots, y_n .

Из теории наблюдаемости известно, что подобная последовательность дифференцирований может привести к тому, что на каком-то шаге k правые части (7) уже не будут содержать фазовых переменных. Тогда систему (4)–(6) можно заменить уравнениями

$$\frac{d^k y}{dt^k} = \Theta_k(y, y^{(1)}, \dots, y^{(k-1)} \psi), \quad t \in T; \quad (8)$$

$$y(0) = y^0, \quad \frac{d^1 y}{dt^1}(0) = y^{(1)0}, \dots, \frac{d^{k-1} y}{dt^{k-1}}(0) = y^{(k-1)0}. \quad (9)$$

Если же никакими комбинациями дифференцирований не удастся исключить фазовые переменные из системы (4)–(6), то это означает, что фазовое пространство модели избыточно и его, вообще говоря, можно уменьшить.

СМП в форме (8)–(9), «очищенное» от фазовых переменных, позволяет анализировать проблему адекватности ТМ в терминах «управления – наблюдаемые переменные», а от того, насколько глубоко построенное СМП, зависит возможность добиться желаемого статического и динамического поведения ТМ.

2. На стадии **восстановления параметров модели** из СТМ выделяется конкретная ТМ путем задания значения ее параметров. Условия, позволяющие параметризовать ТМ, вытекают из информации о статических и динамических режимах моделируемого ТП. Эту информацию можно получить из разнообразных источников: *технической документации, регламентных данных* о штатных режимах ТП, *оцифрованных показаний датчиков, исторических трендов* технологических переменных, *лабораторных анализов* и, наконец, *оценок экспертов* (последние являются определяющими при создании ТМ, поскольку исходят непосредственно от будущих пользователей тренажеров).

Любая такая информация формализуется в виде неравенства, связывающего с заданной точностью ε_j наблюдаемые переменные для некоторого режима $y(\cdot)$ и параметры ТМ:

$$|y_j^0 - y_j(t)| < \varepsilon_j, \quad (10)$$

где y_j^0 – оценка эксперта. (Точность ε_j , конечно, различна для критических, некритических и инструментальных параметров.)

Возвращаясь к системе (4)–(6), приравняем правую часть уравнения (4) нулю и получим систему размерности q с параметрами ψ , содержащую $q-n+p$ неизвестных ненаблюдаемых фазовых переменных:

$$F(x, u, \psi) = 0, \quad t \in T; \quad (11)$$

$$y(t) = N(x(t)). \quad (12)$$

Каждая новая информация о процессах ($u(\cdot)$, $y(\cdot)$, $\eta(\cdot)$) добавляет новые уравнения типа (11), (12). На определенном этапе уравнений становится достаточно, чтобы исключить из системы неизвестные фазовые переменные и получить, используя (10), неравенства относительно ψ :

$$\Omega(\psi, \varepsilon) \geq 0. \quad (13)$$

Неравенства (13) задают принадлежность ψ некоторому множеству D , границы которого зависят от процесса ($u(\cdot)$, $y(\cdot)$, $\eta(\cdot)$) и оценок ε . На некоторые из параметров эти неравенства вообще не накладывают никаких ограничений. Чтобы получить оценки для таких параметров, необходимо использовать нестационарные режимы, привлекая информацию о динамике объекта: скоростях изменения уровней, температур и т.п. При этом скорости изменения фазовых переменных обычно считают постоянными; именно эти скорости и подставляют в правые части уравнений (4).

3. Однако система неравенств (13) для всего ТП имеет слишком общий вид, не позволяющий технически реализовать параметризацию модели. К счастью, как упоминалось, и с точки зрения устройства ТП, и с учетом специфики задачи операторского управления реальные технологические установки допускают **разделение на относительно самостоятельные функциональные блоки** (аппараты и группы аппаратов). Как правило, система регулирования на установке устроена так, что большинство па-

раметров входящих в аппараты потоков (расходы, температуры и т.д.), а также давления в аппаратах поддерживаются автоматически или вручную. В этих условиях неизвестными параметрами взаимовлияния аппаратов остаются только составы, а после идентификации последних (с помощью материальных балансов и прочей информации) система (13) распадается на ряд подсистем с непересекающимися группами неизвестных параметров, что существенно облегчает дальнейшее определение параметров.

4. Расширение и уточнение предъявляемых к модели требований приводит к последовательности вложенных множеств $D_1 \supseteq D_2 \supseteq \dots \supseteq D_n$. На n -м этапе этой процедуры произвольный вектор параметров, принадлежащих множеству D_n , подходит для индивидуализации ТМ. Любое дополнительное требование сужает допустимое множество, и надежда на то, что бесконечная последовательность $D_1 \supseteq D_2 \supseteq \dots \supseteq D_n \supseteq \dots$ имеет непустое пересечение, базируется именно на качестве конструирования СТМ на начальной стадии фундаментального моделирования. Если же на некотором i -м этапе множество D_i окажется пустым, то это может означать, что либо требования эксперта противоречивы, либо при построении модели не были учтены принципиальные зависимости, описывающие развитие ТП в определенных ситуациях. То есть процесс определения параметров ТМ **рекурсивен**.

Все этапы предлагаемой методики могут быть проиллюстрированы содержательным практическим примером построения тренажерной модели печи на двойном топливе [3].

Настоящая работа представляет собой, возможно, одну из первых попыток подступиться к проблеме обеспечения адекватности ТМ в рассматриваемой предметной области. Несомненно, в том или ином виде, элементы предлагаемого подхода используются практиками – разработчиками тренажеров. Однако формальная постановка задачи и анализ возможных путей ее решения представляются актуальными в свете все более ужесточающихся требований к точности тренажерных моделей.

Литература

1. Автоматизация в промышленности. 2003–2009. № 7.
2. Real-time Process Optimization and Training Outlook. Five Year Market Analysis and Technology Forecast through 2013 – ARC Advisory Group, 2009.
3. **Дозорцев В. М.** Компьютерные тренажеры для обучения операторов технологических процессов. М.: Синтег, 2009.
4. **Ошанин Д. А.** Предметное действие и оперативный образ. Избранные психологические труды. М.–Воронеж, 1999.
5. **Дозорцев В. М., Кнеллер Д. В., Левит М. Ю.** О проблеме адекватности тренажерных моделей технологических процессов // Труды Международной Конференции «Идентификация систем и задачи управления (SICPRO'2000)», 2000, М. С. 51–61.