УДК 681.5.015

# Идентификация параметров имитационной модели по данным с реального технологического процесса

*И.В. Сластенов*

Московский физико-технический институт (государственный университет), ЗАО «Хоневелл»

**Введение**

Современные средства имитационного моделирования [1, 2] позволяют решать важные прикладные задачи без нежелательного (по соображениям безопасности и возможных экономических потерь) вмешательства в работу технологического объекта. Идентификацию параметров таких моделей можно рассматривать в рамках подхода верификации и валидации имитационных моделей [3]. Хотя некоторые из соответствующих методов используются для идентификации промышленных объектов, методы, основанные на использовании исторических данных и анализе чувствительностей [4], пока не нашли применения из-за огромного числа переменных, сложной динамики модели и сильной зашумленности сигналов.

В настоящей работе предлагается идентификационный подход, основанный на методике [4] и использующий специального вида целевую функцию. Приведены результаты экспериментального исследования, для проведения которого реализована итеративная процедура поиска оптимальных значений параметров модели на MATLAB, позволяющая выбирать конкретный алгоритм идентификации в зависимости от размерности вектора параметров, типа моделируемого объекта, имеющейся информации и т.д.

**Постановка задачи**

Рассмотрим имитационную модель вида

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{f}_i\left(\mathbf{x}_i, \mathbf{u}_i; \boldsymbol{\beta}\right), \\ \mathbf{y}_i = \mathbf{g}_i\left(\mathbf{x}_i, \mathbf{u}_i\right) \end{cases}, \tag{1}$$

где $\mathbf{x}_i = \left(x_i^{(1)}, ..., x_i^{(r)}\right)$ - вектор состояния системы, $\mathbf{y}_i = \left(y_i^{(1)}, ..., y_i^{(s)}\right)$ - векор выходных переменных, $\mathbf{u}_i$ - вектор управления, $\boldsymbol{\beta}$ - вектор параметров.

Назовем $\mathbf{U} = \{\mathbf{u}_i\}_{i=0}^n$ *управляющей последовательностью*, а последовательность $\mathbf{Y}(\mathbf{U};\boldsymbol{\beta}) = \{\mathbf{y}_i(\mathbf{U};\boldsymbol{\beta})\}_{i=0}^n$ - *откликом модели* (1) на управляющую последовательность $\mathbf{U}$. Здесь предполагается, что начальное состояние $\mathbf{x}_0$ определено, поэтому значение $\mathbf{y}_i$ зависит только от последовательности $\mathbf{U}$ и вектора параметров $\boldsymbol{\beta}$.

Пусть измеряемые значения выходов реального объекта, который описывает модель (1), задают вектор $\mathbf{z}_i(\mathbf{U}) = \left(z_i^{(1)}(\mathbf{U}), ..., z_i^{(s)}(\mathbf{U})\right)$. Назовем последовательность $\mathbf{Z}(\mathbf{U}) = \{\mathbf{z}_i(\mathbf{U})\}_{i=0}^n$ *откликом объекта*.

Задача *идентификации* (1) заключается в определении значения вектора параметров $\boldsymbol{\beta}$, которое обеспечивает наилучшее совпадение выходов модели с соответствующими выходами объекта:

$$\hat{\boldsymbol{\beta}}(\mathbf{U}, \mathbf{W}) = \arg\min_{\boldsymbol{\beta}} C(\mathbf{U}, \boldsymbol{\beta}, \mathbf{W}), \tag{2}$$

где $C(\mathbf{U}, \boldsymbol{\beta}, \mathbf{W})$ - функция потерь. В данной работе использован квадратичный критерий с весовой матрицей $\mathbf{W} \in \mathrm{R}^{s \times n}$, задаваемой элементами $w_i^{(j)}$:

$$C(\mathbf{U},\boldsymbol{\beta},\mathbf{W}) = E_{eq}(\mathbf{Z}(\mathbf{U}),\mathbf{Y}(\mathbf{U};\boldsymbol{\beta}),\mathbf{W}) = \sum_{i=0}^{n}\sum_{j=1}^{s} w_i^{(j)} \cdot \left(z_i^{(j)}(\mathbf{U}) - y_i^{(j)}(\mathbf{U};\boldsymbol{\beta})\right)^2 \qquad (3)$$

В работе рассмотрена модель колонны дебутанизатора с настраиваемым параметром эффективности ректификационных тарелок. Другая модель использовалась в эксперименте как «черный ящик», т.е., только как источник откликов объекта.

**Результаты экспериментальных исследований**

В серии экспериментов используются две управляющие последовательности $\mathbf{U}_1$ и $\mathbf{U}_2$ и два соответствующих отклика объекта $\mathbf{Z}(\mathbf{U}_1)$ и $\mathbf{Z}(\mathbf{U}_2)$. В первой фазе каждого эксперимента последовательность $\mathbf{U}_1$ использовалась для обучения, т.е., для определения оптимального значения параметра $\boldsymbol{\beta}$, а последовательность $\mathbf{U}_2$ для проверки адекватности модели (экзамена). Во второй фазе эксперимента последовательности менялись местами: $\mathbf{U}_2$ применялась для обучения, а $\mathbf{U}_1$ - для экзамена. Окончательное значение параметра $\boldsymbol{\beta}$ определялось по формуле

$$\boldsymbol{\beta} = \hat{\boldsymbol{\beta}}_m,\, m = \arg\min_{j=1,2} \max_{i=1,2} C\left(\mathbf{U}_i, \hat{\boldsymbol{\beta}}_j, \mathbf{W}\right), \qquad (4)$$

где $\hat{\boldsymbol{\beta}}_j$ - значение параметра, полученное в обучении при управляющей последовательности $\mathbf{U}_j$.

Проведены следующие имитационные эксперименты:

1. проверка корректности программной реализации метода (в качестве источника данных и настраиваемой модели использовалась одинаковая модель),
2. разное количество выходных переменных в объекте и в модели,
3. зашумленность выходов объекта,
4. структурные различия объекта и модели,
5. разные типы управляющих последовательностей в обучении и экзамене.

В первом столбце табл. 1 – номер экспериментальной серии по списку выше. В последнем столбце – отношение значений функции потерь (3) в экзамене и в обучении, которое характеризует состоятельность оценки: если он значительно выше 1, глубина моделирования недостаточна (точность модели может быть низкой в режимах, сильно отличающихся от условий обучения).

Несмотря на ухудшение результатов при ужесточении условий эксперимента, предлагаемый метод настройки повышает точность модели, что видно из сравнения значений функции потерь на экзамене с соответствующими значениями до настройки. Это показывает принципиальную возможность идентификации моделей технологических объектов подобного типа. Дальнейшие исследования связаны с тестированием метода для объектов разных типов и с его применением для идентификации моделей по реальным историческим данным.

Табл. 1. Средние значения функции потерь (3) в разных сериях экспериментов

| # | До настройки | Обучение | Экзамен | Экзамен / Обучение |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 1.27E+03 | 6.06E-03 | 6.08E-03 | 1.00 |
| 2 | 1.57E+03 | 5.91E-03 | 5.99E-03 | 1.01 |
| 3 | 1.71E+02 | 3.75E-01 | 3.89E-01 | 1.04 |
| 4 | 1.43E+03 | 1.72E-01 | 2.51E-01 | 1.46 |
| 5 | 1.45E+03 | 2.06E-01 | 2.89E-01 | 1.40 |

## Литература


1. *Дозорцев В.М., Крейдлин Е.Ю.* Современные автоматизированные системы моделирования ТП//Автоматизация в промышленности. 2009. № 6. С. 11-16.
2. *Аносов А.А., Бородин П.Е., Дозорцев В.М. и др.* Высокотехнологичные решения корпорации Honeywell на базе платформы Experion PKS // Автоматизация в промышленности. 2011. № 8. С. 29-37.
3. *Sargent R.G.* Verification and Validation of Simulation Models // Proceedings of 2011 Winter Simulation Conference. 2011. Pp. 183-198.
4. *Iooss B, Lemaitre P.* A Review on Global Sensitivity Analysis Methods // Uncertainty Management in Simulation-Optimization of Complex Systems: Algorithms and Applications (C. Meloni and G. Dellino, eds.), Springer. 2015.