

Л. М. ЯКОВИС  
СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург

## АДАПТИВНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ В СИСТЕМАХ С ТИПОВЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ

*Доклад посвящен исследованию задачи параметрической идентификации управляемых динамических систем в режиме их нормальной эксплуатации с помощью модели с настраиваемыми параметрами. Рассмотрена задача определения параметров идентифицирующих воздействий, обеспечивающих заданную точность идентификации. Особенность работы заключается в придании процедуре идентификации адаптивных свойств, что позволяет свести к минимуму негативный эффект «раскачки» управляемого объекта при подаче на него специальных идентифицирующих воздействий.*

**Введение.** Эффективная работа систем промышленной автоматики требует расчета параметров регулирующих устройств. Для такого расчета необходима математическая модель объекта управления (ОУ). Определение параметров математических моделей по данным эксплуатации ОУ является предметом задач параметрической идентификации. Для многих технологических процессов (ТП) (старение катализаторов в химической технологии, износ мелющих тел в измельчительных агрегатах, изменение слоя обмазки во вращающихся печах) параметры моделей неконтролируемым образом изменяются во времени в широких пределах. Данное обстоятельство приводит к необходимости текущей идентификации ОУ с целью перестройки параметров регуляторов. Регулирующие контроллеры ведущих фирм оснащаются функциями идентификации ОУ и самонастройки, однако эти функции не находят широкого применения на практике. Основная причина заключается в сложности для обслуживающего автоматизацию персонала определение рациональных параметров системы идентификации. Перспектива решения проблемы состоит в разработке надежных методов автоматического расчета параметров систем идентификации. С учетом современных тенденций такие методы могут быть ориентированы на применение имитационного компьютерного моделирования и численной оптимизации. В основу данного исследования положен метод идентификации с использованием настраиваемых моделей в варианте, не требующем отключения регулятора [1]. Данный метод был, однако, проверен на работоспособность лишь применительно к следящим системам, в то время как большинство технологических процессов нуждаются в системах стабилизации. В работе рассматривается задача параметрической идентификации в замкнутых системах стабилизации, функционирующих в условиях неконтролируемых случайных возмущений.

**Адаптивная идентификация методом настраиваемой модели.** Суть метода заключается в том, что по каналу управления кроме воздействий от регулятора  $u_{pec}(t)$  на объект подаются также «раскачивающие» воздействия  $\lambda(t)$ . Одновременно эти же воздействия подаются на вход модели замкнутой системы, которая включает ОУ и регулятор. Сравнивая контролируемый выход реального объекта  $y(t)$  с выходом модельного объекта  $\hat{y}(t)$ , модель настраивают так, чтобы минимизировать разницу между двумя указанными сигналами, мерой которой может служить интегральный показатель

$$J_{уд} = M \left\{ \int_0^{T_{во}} |y(t) - \hat{y}(t)| dt \right\},$$

где  $M$  – обозначение математического ожидания.

Задача идентификации осложняется тем, что для определения математической модели объекта необходимо вывести его из номинального режима, а для того, чтобы обеспечить нормальный ход процесса, необходимо, наоборот, с помощью системы управления поддерживать его на заданном уровне  $y^*$  в условиях действия случайных неконтролируемых возмущений. Посвященная этой проблеме теория дуального управления [2], слишком сложна для практического применения. Рассматриваемая более конкретная задача заключается в том, чтобы определить такие параметры алгоритма формирования идентифицирующих и стабилизирующих воздей-

ствий, которые в период проведения идентификации (то есть для  $t \in [0, T_{ид}]$ ) минимизируют «вред» от «раскачивания» объекта управления, обеспечивая вместе с тем приемлемую точность идентификации его модели.

Значения интегрального показателя точности идентификации  $J_{ид}$  и интегрального показателя стабильности

$$J_{см} = M \left\{ \int_0^{T_{ид}} |y(t) - y^*(t)| dt \right\}$$

определяются совокупностью параметров: объекта управления  $\mathbf{a}_{об}$ , настраиваемой модели объекта управления  $\mathbf{a}_{мод}$ , алгоритма управления  $\mathbf{a}_{рег}$ , идентификационных воздействий  $\mathbf{a}_{ид}$ , вероятностных характеристик неконтролируемых возмущающих воздействий  $\mathbf{a}_{возм}$ . Зависимости  $J_{ид} = \varphi_{ид}(\mathbf{a}_{об}, \mathbf{a}_{мод}, \mathbf{a}_{рег}, \mathbf{a}_{ид}, \mathbf{a}_{возм})$  и  $J_{см} = \varphi_{см}(\mathbf{a}_{об}, \mathbf{a}_{мод}, \mathbf{a}_{рег}, \mathbf{a}_{ид}, \mathbf{a}_{возм})$  носят сложный характер и в большинстве случаев не могут быть получены аналитически. С использованием введенных обозначений задача идентификации заключается в определении

$$\mathbf{a}_{мод}^* = \arg \min_{\mathbf{a}_{мод}} \varphi_{ид}(\mathbf{a}_{об}, \mathbf{a}_{мод}, \mathbf{a}_{рег}, \mathbf{a}_{ид}, \mathbf{a}_{возм}).$$

Задача минимизации «вреда» от идентификации при условии достижения требуемой точности определения  $\mathbf{a}_{об}$  при любых  $\mathbf{a}_{об} \in \mathbf{G}_{об}$  и любых  $\mathbf{a}_{возм} \in \mathbf{G}_{возм}$  (где  $\mathbf{G}_{об}$  и  $\mathbf{G}_{возм}$  области возможных значений параметров ОУ и возмущений) формулируется как определение параметров  $\mathbf{a}_{рег}^*, \mathbf{a}_{ид}^*$  путем решения задачи нахождения

$$J_{см}^* = \min_{\mathbf{a}_{ид}, \mathbf{a}_{рег}, \mathbf{a}_{об} \in \mathbf{G}_{об}, \mathbf{a}_{возм} \in \mathbf{G}_{возм}} \max_{\mathbf{a}_{об}, \mathbf{a}_{мод}^*} \{ \varphi_{см}(\mathbf{a}_{об}, \mathbf{a}_{мод}^*, \mathbf{a}_{рег}, \mathbf{a}_{ид}, \mathbf{a}_{возм}) | P(\bar{\delta}_{ид} \leq \delta_{ид}) \geq \gamma_{ид}, P(|y(t) - y^*| \leq \Delta) \geq \gamma_{см} \}.$$

Векторные вероятностные ограничения на максимальную величину относительных погрешностей идентификации представляют собой совокупность скалярных ограничений вида  $P(\delta_{ид,j} \leq \bar{\delta}_{ид,j}) \geq \gamma_{ид,j}$  для всех компонентов вектора  $\mathbf{a}_{об}$ , причем  $\delta_{ид,j} = (a_{мод,j}^* - a_{об,j}) / a_{об,j}$ , а близкие к 1 параметры  $\gamma_{ид,j}$  определяют допустимые риски нарушения ограничений. Скалярное ограничение требует, чтобы с достаточно высокой вероятностью  $\gamma_{см}$  выходная переменная  $y(t)$  отклонялась от заданного значения  $y^*$  не более, чем на  $\Delta$ .

Рассматривались два подхода к решению сформулированной задачи. В первом варианте  $\mathbf{a}_{ид}^* = const(t)$ , и параметры идентифицирующих воздействий  $\lambda(t)$  рассчитываются заранее до начала процесса идентификации ОУ на основе имеющейся априорной информации об ОУ и возмущениях. Поскольку данное решение должно обеспечить требуемую точность идентификации при любых  $\mathbf{a}_{об} \in \mathbf{G}_{об}$  и  $\mathbf{a}_{возм} \in \mathbf{G}_{возм}$ , то такой способ уместно назвать *робастной идентификацией*. Во втором варианте  $\mathbf{a}_{ид}^* \neq const(t)$ , и параметры идентификационных воздействий  $\lambda(t)$  формируются не заранее, а в процессе самой идентификации, то есть с использованием принципа обратной связи. Этот способ уместно назвать *адаптивной идентификацией*.

Учитывая, что многие ТП представляют собой инерционные процессы с запаздыванием и самовыравниванием, сформулированная задача была рассмотрена на примере ОУ, модель которого соответствует инерционному звену первого порядка с запаздыванием. В ходе работы ТП система должна поддерживать выходную переменную  $y(t)$  на заданном уровне  $y^*$  в условиях неконтролируемых приведенных к выходу ОУ возмущений  $n(t)$ .

В этом случае передаточные функции модели ОУ и типового пропорционально-интегрального регулятора задаются выражениями  $H(p) = ke^{-p\tau} / (Tp + 1)$  и  $W(p) = k_p + k_i / p$ , а соответствующие вектора параметров имеют вид  $\mathbf{a}_{об} = [k, T, \tau]^T$   $\mathbf{a}_{рег} = [k_p, k_i]^T$ .

Пусть область  $G_{об}$  задана неравенствами  $\underline{k} \leq k \leq \bar{k}$ ,  $\underline{T} \leq T \leq \bar{T}$ ,  $\underline{\tau} \leq \tau \leq \bar{\tau}$ . Для неконтролируемых возмущений была принята распространенная модель случайного процесса, формируемого пропусканием непрерывного белого шума единичной интенсивности  $\xi(t)$  через инерционное звено, так что  $n = \frac{c}{(Rp+1)}\xi$  и  $a_{возм} = [c, R]^T$ . Параметры  $c$  и  $R$ , определяющие амплитуду и плавность возмущений, считались известными с точностью до интервалов  $\underline{c} \leq c \leq \bar{c}$ ,  $\underline{R} \leq R \leq \bar{R}$ . Эти неравенства определяют область  $G_{возм}$ . С целью приближения к известному методу разгонных характеристик [3] рассматривалась последовательность чередующихся по знаку «ступенчатых» идентификационных воздействий  $\lambda(t) = \lambda \operatorname{sgn}[\sin(\pi t / T_\lambda)]$  с амплитудой  $\lambda$  и длительностью  $T_\lambda$ . Таким образом,  $a_{ид} = [\lambda, T_\lambda, N]^T$ , где  $N$  – число «ступенек».

Предложенный в качестве субоптимального и исследованный путем компьютерного моделирования в среде Matlab-Simulink алгоритм робастной идентификации предусматривает:

1) построение модели наиболее сильных «остаточных» возмущений  $n_{ост}(t)$ , то есть отклонений выходной переменной от задания в системе с наиболее сложным для идентификации ОУ  $a_{об} = [\underline{k}, \bar{T}, \bar{\tau}]^T$ , который управляется робастным ПИ-регулятором  $a_{рег}^{(роб)} = [k_p = k_i \underline{T}, k_i = 0,589 / \bar{k} \bar{\tau}]^T$ , (настраиваемым в соответствии с [4, 5]) и функционирует в условиях случайных возмущений с параметрами  $a_{возм} = [\bar{c}, \bar{R}]^T$ ;

2) определение амплитуды «ступенек» по правилу  $\lambda = \Delta - l\sigma_{ост}$ , где параметр  $l$  зависит от допустимого риска нарушения ограничений по отклонениям  $y(t)$  от задания  $y^*$  и обычно находится в диапазоне от 2 до 3;

3) расчет длительности «ступенек» по формуле  $T_\lambda = \bar{\tau} + 3\bar{T}$ ; 4) нахождение поисковым путем с использованием статистического имитационного моделирования количества «ступенек»  $N$ , необходимого для достижения требуемой точности идентификации  $\bar{\delta}_{ид}$ .

Альтернативный алгоритм адаптивной идентификации отличается тем, что перед началом идентификации в течение некоторого времени наблюдается поведение ОУ в системе управления с робастным регулятором  $a_{рег}^{(роб)}$  и статистическим путем определяются не экстремальные, а реальные вероятностные характеристики остаточных возмущений. Это позволяет увеличить амплитуду «раскачивающих» воздействий  $\lambda$ , не выводя выходную переменную  $y(t)$  за допустимые границы. Процесс идентификации делится на две стадии. На первой начальной стадии производится грубая идентификация, когда параметры  $a_{ид}^{(нач)}$  определяются по рассмотренной выше схеме при менее жестких требованиях к точности оценки параметров модели ОУ  $\bar{\delta}_{ид}^{(нач)} \geq \bar{\delta}_{ид}$ . Получение грубых оценок  $a_{ид}^{(нач)}$  позволяет уменьшить размеры исходной области неопределенности  $G_{об}$  до меньшей величины  $G_{об}^{(нач)} \subset G_{об}$ . Благодаря этому на втором этапе идентификации удастся рассчитать параметры заключительной серии  $a_{ид}^{(закл)}$ , как правило, обеспечивающие значительное уменьшение показателя  $J_{ст}$ .

**Заключение.** Предложенные методы формализованного определения параметров идентификационных воздействий при их развитии могут позволить расширить область применения функций самонастройки типовых промышленных регуляторов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Репин А.И., Смирнов Н.И., Сабанин В.Р. Идентификация и адаптация САР с использованием эволюционных алгоритмов оптимизации. *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2008, №3, с. 31–35.
2. Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем: М., Физматгиз., 1963. 552 с.
3. Эйхкофф П. Основы идентификации систем управления. М.: Мир, 1975. 683 с.

4. **Яковис Л.М.** Простые способы расчета типовых регуляторов для сложных объектов промышленной автоматизации. *Автоматизация в промышленности*. 2007. № 6, с. 51–56.
5. **Яковис Л.М., Доронина Н.А.** Учет характера параметрической неопределенности динамической модели при расчете робастных регуляторов для объектов с самовыравниванием. Материалы конференции «*Информационные технологии в управлении*» (ИТУ-2018). СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. С. 373–383.

L.M. Yakovis (Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg)

### **Adaptive Identification of Control Objects in Systems with Standard Controllers**

The report is devoted to the study of the problem of parametric identification of controlled dynamic systems in their normal operation mode using a model with adjustable parameters. The task of determining parameters of test signals providing the specified accuracy of identification is considered. The peculiarity of the work consists in imparting adaptive properties to the identification procedure, which makes it possible to minimize the negative effect of “swinging” of the controlled object on its output when special test signals applied.