

**ОБЗОР ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ
ДИНАМИЧЕСКИХ УПРАВЛЯЕМЫХ СИСТЕМ
AN OVERVIEW OF THE MAIN METHODS FOR IDENTIFYING
DYNAMIC MANAGED SYSTEMS**

Панкова А.А., магистрант

Лапшина М.Л., д.т.н., профессор

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»

г. Воронеж, Россия

marina_lapshina@mail.ru

Pankova A.A., Master's student

Lapshina M.L., Doctor of Technical Sciences, Professor

FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov»

Voronezh, Russian Federation

Аннотация: Разработка регуляторов систем автоматического управления (САУ) традиционно базируется на моделировании управляемых объектов с использованием математических описаний их динамики. В качестве таких описаний применяются дифференциальные и разностные уравнения, а также передаточные и импульсные переходные функции. Теория управления и идентификации за последние десятилетия сформировала широкий спектр методологических подходов, позволяющих моделировать динамические системы с высокой степенью точности. В настоящей статье рассматриваются основные методы идентификации динамических систем, их классификация и особенности применения в современных инженерных задачах.

Abstract: The development of regulators for automatic control systems (ACS) is traditionally based on modeling controlled objects using mathematical descriptions of their dynamics. Differential and difference equations, as well as transfer and impulse transition functions are used as such descriptions. Over the past decades, the theory of control and identification has formed a wide range of methodological approaches that allow modeling dynamic systems with a high degree of accuracy. This

article discusses the main methods of identification of dynamic systems, their classification and application features in modern engineering tasks.

Ключевые слова: автоматизация, классификация, моделирование, идентификация, метод, задачи, критерий, вектор.

Keywords: automation, classification, modeling, identification, method, tasks, criterion, vector.

Классификация методов идентификации динамических систем

Существует несколько подходов к построению моделей динамических объектов. В литературе принято выделять три основные группы методов:

Методы структурной идентификации. Данные методы направлены на определение базовой структуры модели, что часто зависит от выбранного класса динамических характеристик объекта [1]. Например, если динамика описывается векторным уравнением, то структура модели определяется размерностью вектора состояния (n), а при использовании передаточной функции – порядками полиномов числителя (m) и знаменателя (n).

Методы параметрической идентификации. В этой группе основное внимание уделяется оценке параметров уже выбранной структуры модели. Здесь в качестве математических описаний применяются дифференциальные, разностные уравнения и передаточные функции, параметры которых определяются с учетом неизвестных величин.

Методы непараметрической идентификации. Они ориентированы на построение (оценку) импульсных переходных функций (ИПФ) объекта без предварительного задания структуры модели. В этой группе широко применяются метод свертки и корреляционный метод.

Определение структуры модели управляемого объекта является сложной задачей, и в настоящее время отсутствуют универсальные формализованные методы её решения [2]. Одним из возможных подходов к синтезу структуры модели является применение принципа сложности, при котором разрабатываются соответствующие шкалы сложности для различных типов моделей динамических систем.

Методы параметрической идентификации

Методы параметрической идентификации применяются для моделирования систем, где динамика описывается уравнениями, содержащими неизвестные параметры. К данной группе относятся следующие методы:

Метод наименьших квадратов (МНК). Метод наименьших квадратов, в основном, используется в тех случаях, когда возмущения не измеряются (не контролируются). При этом, критериальная (штрафная) функция $J(p)$ определяется евклидовой нормой, определяемой формулой:

$$J(p) = \int_{t_0}^{t_k} \|e(p, t)\|^2 d\tau,$$

где $e(p) = [e_1(p), e_2(p), \dots, e_n(p)]^T$ – вектор ошибки идентификации:

$$e(p) = y(p, t) - y^*(t).$$

В случае, когда выбранная модель объекта управления описывается линейным дифференциальным или разностным уравнением, штрафная функция $J(p)$ является квадратической функцией от параметров модели $p_1, p_2, \dots, p_\mu$. При этом решение экстремальной задачи приводит к системе линейных алгебраических уравнений относительно компонентов вектора p . Если его размерность μ велика, то решение полученной системы уравнений представляет определенные трудности, так как процедура обращения матрицы системы является сложной задачей [1, 3]. В связи с этим разработаны рекуррентные алгоритмы метода наименьших квадратов, которые дают возможность последовательно определить оценки параметров модели объекта без операции обращения матрицы системы. При этом искомая оценка вектора p является несмещенной и состоятельной, если возмущения $\xi(t)$ представляют собой независимые одинаково распределенные случайные величины.

В случае, когда критерий $J(p)$ является нелинейной функцией от компонентов вектора p , полученная система алгебраических уравнений, определяющих необходимые условия ее экстремума, также является нелинейной функцией. При этом для решения задачи, т.е. для идентификации объекта можно использовать градиентные методы, которые делятся на 2 группы: прямые и косвенные методы. В прямых методах штрафная функция $J(p)$ минимизируется на каждом шаге по итерационной схеме:

$$p^{i+1} = p^i - K^i \frac{\partial J(p^i)}{\partial p^i}, \quad i = 0, 1, 2, \dots,$$

где p^i – значение вектора p на i -ом шаге;

$$\frac{\partial J(p^i)}{\partial p^i} = \left. \frac{\partial J(p)}{\partial p} \right|_{p=p^i} - \text{вектор градиент функции } J(p) \text{ в точке } p^i;$$

$K^i = \text{diag}[k_v^i]_{m \times m}$ – диагональная матрица, элементами которой являются положительные числа k_v^i , выбираемые из условий обеспечения сходимости последовательности и необходимой скорости сходимости.

Таким образом, в градиентных методах процедура идентификации объекта сводится к формированию последовательности, которая завершается, если выполняется условие

$$\left\| \frac{\partial J(p^i)}{\partial p^i} \right\| \leq \varepsilon,$$

где ε – малое положительное число.

Найденный при этом вектор-параметр $p^* = [p_1^*, p_2^*, \dots, p_\mu^*]$, обеспечивает локальный минимум критерия $J(p)$. В общем случае штрафная функция $J(p)$ может иметь несколько экстремумов, что усложняет процедуру идентификации объекта управления [2].

Градиентные алгоритмы. Данный класс методов основывается на минимизации штрафной функции посредством итерационного процесса. Для того чтобы обеспечить быструю сходимость итерационного процесса используется метод наискорейшего спуска или градиентный метод второго порядка, известный как метод Ньютона. Для этой цели более эффективным может оказаться метод сопряженного градиента, сочетающий преимущества методов первого и второго порядков [4]. Недостатком этих алгоритмов является то, что при высоких порядках моделей объектов реализация их вычислительных процедур представляет определенные трудности. При наличии нелинейных зависимостей критерий J может иметь несколько экстремумов, что усложняет задачу поиска глобального минимума.

Стохастическая аппроксимация. Данный метод представляет собой развитие градиентных алгоритмов с учетом неопределенности в измерениях и внешних воздействиях. Первоначально используемый для задач регрессии, метод стохастической аппроксимации адаптируется для идентификации динамических систем. Одной из ключевых проблем является выбор аналога матрицы, способного обеспечить сходимость итерационного процесса. При этом часто возникает необходимость применения принципов теории оптимального управления, таких как принцип максимума [5]. Спектральные и частотные методы, метод максимального правдоподобия и апостериорной вероятности. Эти подходы используются в случаях, когда требуется оценка параметров модели на основе анализа спектра сигналов или статистических свойств измерительных

данных. Они позволяют учесть влияние шума и возмущений, обеспечивая более точную идентификацию динамических характеристик системы.

Методы непараметрической идентификации

Методы непараметрической идентификации ориентированы на построение импульсных переходных функций (ИПФ) объекта управления. Ключевые подходы в данной группе включают:

Метод свертки. Основан на разложении входного сигнала в базис, с последующей оценкой функции свертки, характеризующей динамику объекта. Данный метод широко применяется в системах, где входной сигнал и выходная реакция связаны через свёрточную операцию.

Корреляционный метод. Используется для определения взаимосвязи между входными и выходными сигналами системы. На основе анализа корреляционных функций можно оценить импульсную характеристику объекта управления, что позволяет построить модель без предварительного задания параметрической структуры. Методы непараметрической идентификации зачастую применяются в тех случаях, когда недостаточно информации для выбора конкретного параметрического описания или когда динамика объекта имеет сложную нелинейную природу.

Косвенные методы параметрической идентификации

Помимо прямых методов, в задачах параметрической идентификации активно применяются косвенные подходы, среди которых выделяются следующие:

Метод квазилинеаризации. При реализации данного алгоритма нелинейные функции, входящие в уравнение динамики объекта, линеаризуются на каждом шаге итерационного процесса с использованием, например, разложения по Тейлору [2]. Этот подход позволяет проводить оценку параметров нелинейных моделей как стационарных, так и нестационарных объектов. Преимуществом метода является возможность решения двухточечных краевых задач, возникающих при идентификации систем.

К основным недостаткам метода квазилинеаризации относятся:

- высокая вычислительная сложность, связанная с применением методов оптимального управления;
- зависимость сходимости итерационного процесса от выбора начального приближения;

Методы дифференциальной и разностной аппроксимации

Данные методы позволяют оценивать производные и разности, необходимые для построения моделей динамических систем, на основе экспериментальных данных. Применение аппроксимационных схем позволяет снизить вычислительную нагрузку и повысить устойчивость алгоритмов идентификации.

Методы стохастической аппроксимации: детали реализации

Методы стохастической аппроксимации являются эволюцией градиентных алгоритмов в условиях неопределенности измерений и внешних возмущений. Исторически данные методы были разработаны для решения задач регрессии и поиска экстремумов функций, однако их адаптация для идентификации динамических систем требует учета следующих особенностей:

Выбор шага и матричного аналога. Одной из главных проблем является подбор коэффициентов итерационного процесса, которые гарантируют сходимость метода. Здесь часто используется идея адаптивного выбора шага k и применение методов, заимствованных из теории оптимального управления.

Учёт случайных возмущений. Реальные измерения всегда сопровождаются шумом, и алгоритмы стохастической аппроксимации должны корректно обрабатывать такие данные. Это достигается за счёт статистической обработки ошибок и применения методов фильтрации, что позволяет повысить точность оценки параметров модели.

Принцип максимума. В ряде случаев оптимизация итерационного процесса требует применения принципа максимума, что делает процедуру идентификации более сложной, но одновременно позволяет добиться более точного соответствия модели объекту управления.

Применение методов идентификации в реальных системах

Практическая значимость методов идентификации проявляется при их применении в различных отраслях техники и промышленности.

Например: в системах автоматического регулирования технологических процессов используются как параметрические, так и непараметрические методы для построения моделей, позволяющих оптимизировать работу регуляторов;

В аэрокосмической технике идентификация динамики летательных аппаратов требует учета нелинейных эффектов, что способствует применению методов квазилинеаризации и стохастической аппроксимации;

В робототехнике и системах управления движением используются градиентные алгоритмы и методы корреляционного анализа для адаптивного управления в условиях изменяющейся динамики;

Эффективность выбранного метода идентификации напрямую влияет на качество разработанных регуляторов и, как следствие, на стабильность и надёжность функционирования системы;

Сравнительный анализ и обсуждение

При выборе метода идентификации необходимо учитывать следующие аспекты:

Точность модели. Параметрические методы, как правило, обеспечивают высокую точность при наличии достаточного объёма информации о системе, однако требуют предварительного задания структуры модели. В свою очередь, непараметрические методы более гибки, но могут уступать в точности при оценке сложных нелинейных систем.

Вычислительная сложность. Методы, предполагающие решение систем линейных или нелинейных уравнений, могут оказаться вычислительно затратными, особенно при высокой размерности модели [5]. В таких случаях использование рекуррентных алгоритмов и методов стохастической аппроксимации позволяет снизить нагрузку на вычислительные ресурсы.

Сходимость алгоритмов. Градиентные методы, как прямые, так и косвенные, зависят от выбора шага итерационного процесса и начальных приближений. Неправильно подобранные параметры могут привести к медленной сходимости или даже расходимости алгоритма, что требует дополнительной настройки и адаптации.

Устойчивость к шуму. Методы стохастической аппроксимации демонстрируют высокую устойчивость при наличии измерительного шума, что является существенным преимуществом в реальных приложениях. Однако, данное преимущество достигается за счёт повышения сложности алгоритма и необходимости адаптивного управления параметрами.

В совокупности, выбор метода идентификации должен базироваться на анализе конкретных условий задачи, доступности экспериментальных данных и вычислительных ресурсов.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

В данной статье был рассмотрен широкий спектр методов идентификации динамических управляемых систем, включающих как параметрические, так и непараметрические подходы. Ключевыми аспектами являются:

Сложность определения структуры модели, которая зависит от выбранного класса динамических характеристик;

Преимущества и недостатки каждого из методов, в частности, необходимость балансировки между вычислительной сложностью и точностью модели;

Значимость адаптации методов идентификации для реальных инженерных приложений, где устойчивость к внешним возмущениям и шуму является критически важной.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой гибридных методов, объединяющих преимущества параметрических и непараметрических подходов, а также с совершенствованием алгоритмов адаптивной настройки, что позволит повысить качество идентификации сложных динамических систем в условиях неопределенности.

Список литературы

1. Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования / под ред. В.В. Солодовникова. – М.: Машиностроение, 2020. – Кн.1: Математическое описание, анализ устойчивости и качества автоматического регулирования. – 768 с.
2. Солодовников, В.В. Статистическая динамика линейных систем автоматического управления / В.В. Солодовников. – М.: Физматгиз, 2019. – 656 с.
3. Андреев, Ю.Н. Управление конечномерными линейными объектами / Ю.Н. Андреев. – М.: Наука, 2021 – 424 с.
4. Квакуернак, Х. Линейные оптимальные системы управления / Х. Квакуернак, Р. Сиван. – М.: Мир, 2022. – 650 с.
5. Спиди, К. Теория управления (идентификация и оптимальное управление) / К. Спиди, Р. Браун, Дж. Гудвин. – М.: Мир, 2022. – 248 с.

References

1. Technical cybernetics. Theory of automatic regulation / edited by V.V. Solodovnikov. – Moscow: Mashinostroenie, 2020. – Book 1: Mathematical description, analysis of stability and quality of automatic regulation. - 768 p.
2. Solodovnikov, V.V. Statistical dynamics of linear automatic control systems / V.V. Solodovnikov. – Moscow: Fizmatgiz, 2019– 656 p.
3. Andreev, Yu.N. Control of finite-dimensional linear objects / Yu.N. Andreev. – M.: Nauka, 2021 - 424 p.
4. Kvakernaak, H. Linear optimal control systems / H. Kvakernaak, R. Sivan. Moscow: Mir Publ., 2022, 650 p.
5. Speedy, K. Theory of management (identification and optimal management) / K. Speedy, R. Brown, J. Goodwin. – M.: Mir, 2022. – 248 p.