

ВВЕДЕНИЕ В ТЕОРИЮ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Лобатый А.А., Степанов В.Ю.

БНТУ, Минск, Беларусь, lobaty@tut.by, yovchik-13a@yandex.ru

Термин «идентификация» стал широко применяться в качестве одного из базовых разделов теории управления около пятидесяти лет назад, хотя проблема моделирования является одной из основополагающих в теоретической сфере деятельности. Любая научная или инженерная деятельность в разной степени использует формальное или содержательное описание процессов, явлений или устройств в той или иной области науки и техники. В различных научных направлениях разрабатываются свои подходы, способы и методы построения и использования модели. Для естественных наук главным направлением является построение математических моделей, соответственно, с использованием математического языка описания.

Во второй половине XX века теория управления вышла на новый уровень, обобщающий основные системные принципы, распространился кибернетический подход о единстве протекающих процессов в естественных (общественных и природных) и искусственных (технических, организационно-технических) системах, в связи с чем и возникла потребность в установлении аналогий описания этих систем для целенаправленного управления различными сферами деятельности. Все это, а также достаточный уровень развития вычислительной техники, обусловили необходимость создания обобщённого подхода к моделированию и выделению отдельного направления теории автоматического управления, занимающегося построением моделей – идентификации.

Активное развитие вычислительной техники в последние десятилетия, появление новых алгоритмических и программных средств, предназначенных для автоматизации профессиональной деятельности, существенно сказалось и на методах решения задач идентификации. Применение в области научных, технических и инженерных расчётов специализированных программных средств предоставляет возможность для более глубокого изучения исследуемой области, перенося основную тяжесть решения задач с разработки, отладки алгоритмов и программ на грамотную постановку задачи, и, зачастую, освобождая исследователя от решения многих сопутствующих вопросов: подтверждения адекватности модели, изучения ошибки идентификации, свойств полученных оценок и других[4].

В настоящее время проблема построения адекватных, эффективных моделей, используемых в дальнейшем, в частности, для синтеза системы управления, находит своё решение во многих областях науки и техники. В настоящее время понятие модели используется во многих (если не во всех) областях науки и техники, занимающихся решением сложных задач технологии, экономики, социологии, живой природы и прочих. Эти задачи возникают при изучении свойств и особенностей объектов с целью последующего управления, при создании адаптивных систем, в которых на основе построенной модели объекта вырабатываются оптимальные управляющие воздействия.

Различные типы моделей рассматриваемых объектов, систем или процессов используются на стадии создания систем управления этими объектами и на стадии их эксплуатации. Это обуславливает актуальность проблемы построения эффективных моделей объектов технических, технологических, экономических или социальных процессов.

Построение математических моделей того или иного типа на основе результатов наблюдений за поведением объектов и исследование их свойств составляет основное содержание науки идентификации.

На содержательном уровне под системой понимается имеющая определённые задачи или цели взаимодействующая совокупность объектов, между которыми существует причинно-следственная связь, отражающаяся в наблюдаемых входных и выходных сигналах.

В широком смысле под моделью понимается описание существенных сторон реальной системы, в удобной форме представляющей информацию о системе.

Модели могут иметь самые разнообразные формы, отражать различные свойства объектов, характеризоваться разной степенью формализации и детализации, при этом их назначением является построение на основе отдельных наблюдений некоторой общей картины протекающих процессов.

В общем случае, модели могут быть концептуальные (феноменологические), физические (эмпирические) и математические (аналитические) в зависимости от того, какая часть явления наиболее существенна. Модель представляет собой упрощённое отображение действительности, при этом сложность модели находится в определённом соотношении со сложностью описываемого объекта. В данном реферате рассматриваются математические модели технических систем или объектов.

В зависимости от типа объекта и цели построения модели формальные описания могут быть различными. В качестве моделей объектов могут быть использованы структурные схемы, операторные уравнения, алгебраические, дифференциальные, интегральные, интегродифференциальные уравнения; Марковские цепи, передаточные функции, частотные характеристики, весовые функции, графы и т.д. Все эти модели функционально связывают входные и выходные сигналы объектов.

В узком смысле под математической моделью объекта понимается описание функциональной зависимости между наблюдаемыми сигналами. Построение математических моделей, в основном, осуществляется двумя способами: аналитическим и на основе экспериментальных данных, а также путём их комбинаций. Аналитический метод предусматривает получение математического описания объекта на основе законов физики, механики, химии и т. д. Такой подход даёт положительный результат, если рассматриваемый объект достаточно прост по структуре и хорошо изучен. Если же объект изучен недостаточно или же настолько сложен, что аналитическое описание его математической моделью практически невозможно, прибегают к экспериментальным методам, суть которых сводится к статистической обработке технологических данных. При экспериментально-аналитическом методе априорная модель, полученная аналитическим путём, уточняется в соответствующих экспериментах.

Взаимодействие объекта с окружающей средой поясним с помощью простейшей схемы (рисунок 1.1). Воздействия внешней среды на объект в обобщённом виде изображены стрелками, направленными к объекту и обозначенными через u и f . Объект, в свою очередь, воздействует на окружающую среду. Это воздействие показано стрелкой, направленной от объекта и обозначенной через y . Величину y принято называть выходным воздействием или выходной величиной объекта.

Рассмотрим более подробно воздействие среды на объект. Совокупность таких воздействий окружающего мира на объект можно разделить на две группы в соответствии с характером влияния среды на переменные состояния (фазовые координаты) объекта. В первую группу входят те воздействия, которые в точке приложения изменяют переменные состояния аддитивно. Это означает, что сигналы, пропорциональные этим воздействиям, суммируются с сигналами, пропорциональными соответствующим переменным состояниям.



Рисунок 1.1 – Объект управления

Входные воздействия могут быть полезными (управляющими сигналами u) и помехами (возмущающими воздействиями f).

Вторая группа воздействий внешней среды изменяет переменные состояния объекта косвенно, обычно не аддитивно. Эти воздействия приводят к изменению оператора объекта (системы) A , под которым понимают закон преобразования входных воздействий в выходные переменные объекта. Вторую группу воздействий будем называть операторной, а воздействия – операторными.

Так, например, повышение температуры электродвигателя приводит к падению мощности и даже выходу его из строя.

В общем случае входные и выходные воздействия могут описываться определёнными функциями (обычно функциями времени). Математическое соответствие между входной и выходной функциями можно записать в виде выражения:

$$y(t) = A(f)u(t)$$

где $A(f)$ – оператор, зависящий от возмущений (операторных воздействий); $y(t)$ – вектор выходных координат объекта; $u(t)$ – вектор управления (входа).

Оператор объекта является его математической характеристикой, т. е. математической моделью объекта. Примерами операторов могут быть:

- оператор дифференцирования p :

$$y(t) = pu(t) = \frac{du(t)}{dt} = x'(t)$$

- дифференциальный оператор $D(y)$:

$$D(y) = \frac{d^n y}{dt^n} + \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + \frac{dy}{dt} + y$$

- оператор обыкновенного линейного дифференциального уравнения n -го порядка $L(y)$:

$$L(y) = a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y$$

- линейный интегральный оператор:

$$y(t) = \int_0^t \omega(t - \tau)u(\tau)d\tau$$

где $\omega(t - \tau)$ – весовая функция объекта.

Математически операторы определяются в соответствующих пространствах, т. е. на множествах элементов, над которыми совершаются преобразования. Примерами таких пространств являются пространства:

- непрерывных функций;
- непрерывных функций, имеющих непрерывные производные до n -го порядка ($n > 0$);
- функций с суммируемым квадратом и т. д.

Множества входных и выходных сигналов объектов и систем могут рассматриваться как те или иные метрические пространства.

Формально оператор характеризуется структурой и параметрами. Так, структура дифференциального оператора определяется его порядком n .

Для оператора дифференциального уравнения структура задаётся его порядком n .

Таким образом, задачу идентификации в общем виде можно ставить как задачу определения оператора объекта, преобразующего входные воздействия в выходные.

Задача идентификации сводится, в общем случае, к определению оператора модели, преобразующего входные воздействия объекта в выходные величины. Оператор объекта является его математической формализацией, т.е. математической моделью объекта, и может быть определён в соответствующих пространствах функций. Операторы могут характеризоваться разными структурами и характеристиками, и соответственно, задача идентификации объекта может иметь различные постановки[3].

Представим модель объекта в виде следующей структурной схемы (рисунок 1.2):

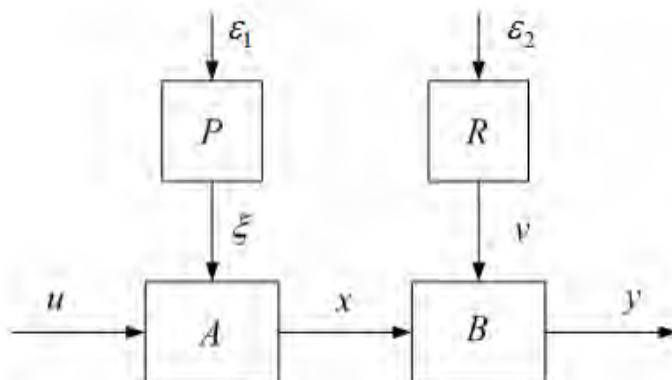


Рисунок 1.2 – Структурная схема модели объекта

На схеме приняты следующие обозначения:

- u и y – наблюдаемые входные и выходные сигналы. Они могут быть детерминированными или случайными, могут быть смесью (обычно аддитивной) детерминированной и случайной составляющей. Входные сигналы могут специально подаваться в систему для идентификации (активный эксперимент), а могут существовать в системе как управляющие или возмущающие воздействия (пассивный эксперимент);

- x – ненаблюдаемый сигнал, который оценивается косвенно по сигналу y , полученному в результате преобразования в объекте оператором B ;

- ε_1 и ε_2 – ненаблюдаемые помехи, являющиеся, как правило, случайными процессами типа белого шума, в некоторых случаях содержащие детерминированные совпадающие;

- ξ и v – чаще ненаблюдаемые, обычно коррелированные во времени случайные сигналы, в некоторых случаях содержащие детерминированные составляющие;

- A , B , P , R – операторы, в некоторых случаях, их вид неизвестен, в других известен, но неизвестны параметры.

Согласно приведённой структурной схеме модели объекта (рисунок 1.2), основными задачами идентификации являются :

- 1) задача нахождения характеристик (параметров) объекта. По известным наблюдаемым переменным u и y требуется определить операторы (или параметры операторов) A и B . Часто одновременно с определением параметров A и B требуется определить параметры операторов P и R , преобразующих ненаблюдаемые белые шумы ε_1 и ε_2 в ненаблюдаемые сигналы ξ и v .

- 2) задача оценивания переменных состояния. Состояние объекта характеризуется многомерной переменной состояния, вектором, однозначно определяющим все его характеристики. По известным наблюдаемым случайным сигналам u и y при известных операторах A , B , P , R с известными параметрами требуется определить (оценить) ненаблюдаемый случайный сигнал x . При этом возможны следующие постановки задачи:

- а) оценивание x в текущий момент времени – задача фильтрации, или, собственно, оценивание;

- б) оценивание x в будущий момент времени, сдвинутый на Δt относительно текущего момента – задача прогнозирования или экстраполяции;

- в) оценивание x в прошлый момент времени – задача сглаживания или интерпо-

ляции.

3) задача генерации случайных сигналов с заданными характеристиками или определения характеристик случайных сигналов. По наблюдаемым переменным ξ или ν требуется определить оператор (или параметры оператора) P (или R).

В некоторых случаях возникает задача, при которой одновременно проводится параметрическая идентификация A , B , P , R и оценивание x (одновременная идентификация и оценивание), а также возможен ряд других частных постановок задач идентификации и оценивания.

В большинстве работ, посвящённых идентификации, выделяются следующие основные составляющие, которые нужно выполнить на этапе идентификации [3]:

Сформулировать требования к данным наблюдений: как выполнить сбор экспериментальных данных, как использовать эти данные, собранные в реальных условиях проведения эксперимента:

- определить класс объектов – совокупность моделей-кандидатов, из которой, впоследствии, будет отобрана наилучшая модель;

- сформировать так называемую функцию потерь или риска, характеризующую адекватность объекта и настраиваемой модели, и на её основе сформулировать критерий качества идентификации;

- выбрать способ оценки степени соответствия исследуемой модели экспериментальным данным;

- определить процедуру верификации модели: провести проверку и подтверждение адекватности модели, т.е. выяснить, в какой степени модель действительно «объясняет» поведение изучаемой системы.

При построении математических моделей существенную роль играют следующие факторы:

1) до начала проведения эксперимента необходимо определить условия, в которых будет проводиться сбор данных, решить вопросы дальнейшего конкретного использования этих данных. Эти задачи решаются на этапе планирования эксперимента путём выбора числа опытов эксперимента и условий его проведения, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью.

Этот этап непосредственно не относится к идентификации, а предваряет её.

2) в конструктивном смысле идентификация – это определение по входным и выходным воздействиям такой модели из определённого класса моделей, которой реальная исследуемая система эквивалентна. В соответствии с этим, нужно определить класс моделей, среди которых будет выбрана наиболее подходящая. На этом этапе необходимо выбрать общую структуру модели и класс уравнений, которыми предполагается описывать наблюдаемый процесс. Этот этап иногда называется идентификацией в широком смысле или структурной идентификацией и зачастую оказывается решающим фактором.

3) близость полученной модели реальной исследуемой системе достаточно относительна, т.к. операторы объекта и модели могут быть описаны на разных языках, иметь разную структуру или количество входов, и потому понятие адекватности может быть сформулировано разными способами. Т.к. непосредственно оценить близость операторов объекта и модели сложно или зачастую невозможно, наиболее часто оценивается близость выходных величин объекта и модели или математического ожидания оценок параметров. Для этого вводится понятие функции потерь или риска, в дальнейшем подлежащей минимизации. Далее для выбора «наилучшей» модели из определённого класса на основании этой функции потерь формируется некоторый критерий, и в дальнейшем, задача идентификации становится задачей оптимизации выбранного критерия [1].

4) после определения структуры модели и класса уравнений необходимо определить численные значения параметров – коэффициенты дифференциальных, разностных, интегральных уравнений или других математических конструкций линейной или нелинейной модели объекта и (или) состояний, вошедших в уравнения математической

модели. Таким образом, решению подлежит задача оценивания параметров и (или) состояний по имеющимся экспериментальным данным, т.е. по значениям измеряемых переменных. Данная задача называется задачей параметрической идентификации или идентификацией в узком смысле. При оценивании параметров приходится решать задачу минимизации некоторых функциональных зависимостей от измеряемых величин (обычно от разности выходных сигналов модели и объекта) и от не измеряемых величин – параметров и состояний. Для решения этой задачи необходимо разработать алгоритм идентификации, который на основе доступных для наблюдения входных и выходных величин определял бы параметры настраиваемой модели, минимизирующие погрешность модельного описания в соответствии с выбранным функционалом качества.

5) переход от этапа построения модели к последующему её использованию требует оценку качества полученной модели, т.е. проверку адекватности модели объекту. Вследствие того, что абсолютная эквивалентность модели объекту принципиально недостижима, то основным условием подтверждения адекватности модели является возможность использования полученной модели для решения той задачи, ради которой эта модель строилась. Поэтому адекватность предполагает воспроизведение моделью с необходимой полнотой всех свойств объекта, существенных для целей данного исследования. Степень адекватности модели и объекта обычно оценивают путем сравнения их выходных сигналов при подаче одинаковых входных воздействий на объект и его модель. Это сравнение предпочтительно производить на основе новой информации, отличной от данных, которые использовались в процессе идентификации объекта.

Существуют разные способы оценивания параметров, различающиеся между собой по используемому критерию оптимальности и имеющейся априорной информации. В определённой степени выбор критерия оптимальности субъективен, а процедура оценивания существенно зависит от принятого критерия. В подавляющем большинстве случаев, такой критерий качества идентификации выбирается квадратичным: в виде интегрального значения квадрата невязки.

Различные методы идентификации существенно зависят от разных форм представления математических моделей – обыкновенных дифференциальных, разностных уравнений, уравнений свёртки и т.д. При этом ни один из методов идентификации не является универсальным для идентификации всех видов математических моделей, а используется в отдельных областях применения.

Методы идентификации можно классифицировать по различным признакам:

1) по способу тестирования различают активные и пассивные методы идентификации. В активных методах на вход объекта подаются специально сформированные воздействия – тестовые сигналы – детерминированного или случайного характера. Достоинствами этого подхода являются минимальные требования к априорным сведениям об объекте, целенаправленный характер идентификации, и, как следствие, уменьшение временных и материальных затрат на проведение эксперимента. При использовании пассивных методов объект находится в условиях нормального функционирования, и параметры модели отыскиваются по результатам статистической обработки наблюдений. Преимуществами этого подхода является отсутствие необходимости проводить специальные исследования объекта, достаточно лишь измерение наблюдаемых сигналов в режиме рабочего функционирования объекта с последующим расчётом параметров модели. Недостатками такого подхода являются значительные временные затраты на сбор и необходимую статистическую обработку данных и жёсткие требования к частотному спектру входного воздействия – он не должен быть меньше полосы частот динамической характеристики идентифицируемого объекта;

2) по характеру используемых сигналов различают детерминированные и статистические методы. При проведении активной идентификации на основе детерминированных сигналов возможно применение детерминированных методов идентификации. В реальных условиях сигналы всегда подвержены действию помех и сильно

зашумлены, и детерминированные алгоритмы необходимо дополнять статистическим усреднением (сглаживанием) получаемых результатов [2];

3) по признаку временных затрат методы делятся на оперативные и ретроспективные. При оперативной идентификации обеспечивается текущее отслеживание меняющихся характеристик объекта. На основе рекуррентных алгоритмов, реализуемых в темпе, близком к скорости протекания процесса, оценки параметров моделей уточняются в реальном времени на каждом шаге поступления новых измерений. При ретроспективной идентификации вначале собирается весь массив данных, и оценки характеристик или параметров получаются после обработки этого массива;

4) также следует отметить, что модели объектов можно классифицировать по способу управления и другим критериям, однако ни одна модель не даёт полную картину и не отражает всех свойств реального объекта, т.к. характеризует только отдельные его признаки.

Среди моделей можно выделить следующие (основные) типы:

- физические (натурные) и математические (символьные);
- одномерные и многомерные;
- статические и динамические;
- детерминированные и стохастические;
- линейные и нелинейные;
- дискретные и непрерывные;
- стационарные и нестационарные;
- сосредоточенные и распределённые;
- характеристики типа «вход - выход» и описание в пространстве состояний;
- структурированные и агрегированные;
- параметрические и непараметрические.

Особый интерес среди прочих представляют собой параметрические модели.

Параметрические модели описываются заданными в явной форме аналитическими зависимостями, содержащими параметры, подлежащие идентификации. Эти зависимости представляют собой параметрические модели конечной размерности, например дифференциальные уравнения определённого порядка, модели в пространстве состояний. Параметрами являются численные значения величин, определяющих выход модели (например, значения коэффициентов обыкновенных дифференциальных уравнений, начальных условий, коэффициентов передаточных функций). Методами параметрической идентификации определяются неизвестные коэффициенты уравнения объекта или передаточной функции [4]. Следует отметить, что с появлением цифровых вычислительных устройств стало удобнее реализовывать используемые функции (вычисление критерия, автоматическая настройка, др.) любых видов моделей, поэтому ниже будет представлено описание средства, позволяющего производить моделирование систем практически любой сложности всех перечисленных видов моделей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Исследование зависимостей. - М.: Финансы и статистика, 1985. - 487 с.
2. Бреммер К., Зиферлинг Г. Фильтр Калмана-Бьюси. - М.:Наука, 1982. - 199 с.
3. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. - СПб.: Наука, 2000. - 549 с.
4. Фомин В.Н. Рекуррентное оценивание и адаптивная фильтрация. - М.: Наука, 1984. - 288 с.