А.М. Инков

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ. ЛЕКЦИЯ № 12



Шымкент, 2011

Тема 8 Структурная статистическая идентификация

Лекция 12 Структурная статистическая идентификация

В лекции рассмотрены: структурная статистическая идентификация; статистические критерии тесноты связи; критерии и методы ориентации причинно-следственных отношений координат модели; организация статистической процедуры принятия решений на этапе идентификации структуры модели.

Прежде чем применять методы параметрической идентификации, необходимо определить структуру модели. Это одна из основных проблем теории идентификации. Как правило, в большинстве работ по синтезу математических моделей структура постулируется априори с точностью до некоторого множества неизвестных параметров. В дальнейшем это множество является основным объектом исследования. Это не означает, что методам идентификации структурной идентификации не уделялось внимания. Доминирующим подходом при выборе структуры является статистический подход и решение принимается на заданном классе моделей-претендентов. Но какие-либо формализованные подходы и методы, позволяющие выбрать структуру модели на основе доступного для наблюдения информационного множества объекта, отсутствуют. Это объясняется тем, что некоторые элементы структуры модели не поддаются адекватной математической трактовке. Поэтому структурное множество часто сужают до таких математических категорий и объектов, которые можно описать на существующем математическом языке и, следовательно, задать на классе функций из заданного множества.

Наиболее сложной и наименее изученной является проблема оценки структуры нелинейных систем. Если для класса регрессионных моделей предложен ряд методов, основанных на статистическом подходе, то для динамических систем какие-либо формализованные процедуры отсутствуют.

Структурная идентификация сводится к выбору математической модели, описывающей процессы в исследуемом объекте. Каких-либо формализованных процедур априорного выбора структуры модели до настоящего времени не существует. Объясняется это тем, что:

1) в системах управления используются математические модели, отражающие наиболее существенные стороны протекающих процессов. Поэтому в системах идентификации доминирует концепция черного ящика;

2) попытка использовать физические законы для описания природы процессов может существенно усложнить процедуру получения математического описания. Поэтому выбор структуры математической модели может превратиться в нереализуемую мечту, так как потребуется описывать процессы, которые не нашли отражения в физических законах или имеют очень сложное математическое представление;

3) идентификация новых (недостаточно изученных) объектов базируется только на концепции черного ящика, а это, в свою очередь, приводит к появлению априорной неопределенности, которую необходимо каким-то образом преодолевать;

4) любой реальный объект всегда связан с внешней средой и поэтому на этапе выбора структуры модели необходимо учитывать реальные ограничения. Это существенно влияет на сам подход к получению математического описания. Математическая модель должна быть конкретизирована только до того уровня, какой допускает имеющееся информационное множество системы.

С учетом многообразия методов структурной идентификации, очевидно, наиболее приемлемой основой для такой классификации являются свойства объектов, так как это дает возможность целенаправленно выбирать методы, позволяющие рациональным путем решить поставленные задачи для конкретных объектов.

Следует различать, как уже отмечалось выше, проблему идентификации в широком смысле – структурную идентификацию – и идентификацию в узком смысле (в малом) – параметрическую идентификацию.

Структурная идентификация на основных этапах моделирования.

Первая проблема (структурная идентификация) является, по существу, основной проблемой всего процесса моделирования, состоящего из рассмотренных в гл. I следующих четырех основных этапов:

1. постановка задачи
2. выбор структуры модели и математическое описание ее блоков;
3. исследование модели;
4. экспериментальная проверка модели.

По крайней мере, с этой проблемой смыкаются три первых этапа моделирования. Полная формализация этой проблемы вряд ли возможна из-за большого многообразия и практически неисчерпаемой сложности реальных объектов. Здесь велика роль профессионализма исследователя, знание физического механизма процессов, правильной формулировки цели и постановки задачи.

Параметрическая идентификация. Вторая проблема (параметрическая идентификация) при заданной структуре модели поддается формализации и смыкается с четвертым этапом моделирования, ей посвящено **большинство публикаций** по методам идентификации.

Таким образом, по отношению к многоэтапному процессу моделирования в целом идентификация выступает как инструмент проверки гипотез о соответствии структуры или параметров объекта и модели на основе экспериментальных данных о его функционировании. Характер и степень несоответствия используются при этом для принятия содержательных или формализованных решений по корректировке модели. Остановимся несколько подробнее на вопросах структурной и параметрической идентификации.

Организация статистической процедуры принятия решений на этапе идентификации структуры модели.

Этапы структурной идентификации. Задачи вскрытия структуры объекта. Роль структуры модели трудно переоценить, неудачный выбор ее сводит на нет и все результаты параметрической идентификации.

Среди задач вскрытия структуры объекта можно отметить следующие:

1. выделение объекта из среды;
2. ранжирование входов и выходов объекта по степени их влияния на конечный целевой показатель;
3. определение рационального числа входов и выходов объекта, учитываемых в модели;
4. определение характера связи между входом и выходом модели объекта, т. е. вида оператора системы

Рассмотрим коротко каждую из этих задач.

Выделение объекта из среды. Описание процесса Процесс выделения объекта из среды, прежде всего, определяется целями, для которых строится модель. Цель по отношению, например, к управлению имеет внешний характер. Она формулируется на более высоком иерархическом уровне и выражает его требования к объекту управления. В то же время определение целей связано с представлениями об объекте, в котором должны быть реализованы эти цели, т. е. нельзя эффективно сформулировать цель, не имея какой-то модели объекта управления. Следовательно, еще до формулирования цели должна быть некоторая, хотя бы приближенная, модель, которая используется для определения объекта управления. Выделение объекта из среды или разделение на подобъекты (в случае сложного объекта) должно осуществляться таким образом, чтобы он имел минимум связей со средой или с другими подобъектами (звеньями). При этом одновременно удовлетворяется также требование создания наилучших условий для использования присущих большинству объектов свойств саморегулирования. Процесс выделения объекта из среды может осуществляться как последовательный переход от простейших форм объекта к более сложным. В качестве простейшей формы можно рассматривать такую часть среды, которая несет информацию, необходимую для проверки выполнимости поставленной цели. Далее происходит расширение объекта за счет присоединения части среды таким образом, чтобы лучше удовлетворялась цель управления, например, за счет расширения ресурса управления. Этот процесс может повторяться до тех пор, пока не будет эффективно достигаться цель управления или будет показано, что она не достижима.

Пример выделения объекта из среды. Рассмотрим в качестве примера процесс нагрева металла в камерной печи. Допустим, целью управления является получение равномерно прогретой до определенной температуры заготовки (в смысле близости температур поверхности и центра). Если при этом в качестве объекта управления выделить лишь саму заготовку, то можно легко убедиться, что из-за отсутствия соответствующих ресурсов управления заданная цель не достижима. Входным параметром этого объекта является температура поверхности заготовки, теснейшим образом связанная с температурой рабочего пространства, а выходным – температура центра. Здесь в лучшем случае, можно за счет фактора времени добиться выравнивания этих температур при их заранее неопределенном уровне. Проблема существенно не меняется и в том случае, если за счет расширения объекта включить в его состав температуру рабочего пространства, поскольку последняя не является независимым управляющим воздействием. Поставленная задача решается лишь в том случае, когда в качестве объекта управления принимается все рабочее пространство печи вместе с топливосжигающими устройствами и датчиками для измерения расходов топлива и окислителя. При таком выделении объекта в нашем распоряжении имеются необходимые ресурсы управления. Если, наряду с указанной, поставить более широкую цель, например экономии топлива и уменьшения загрязнения окружающей среды, то в состав объекта следует включить устройства утилизации тепла (рекуператоры, регенераторы, котлы-утилизаторы и т. д.), газоочистку и дымовую трубу, а в качестве выходных параметров кроме температуры металла рассматривать химический состав, температуру и запыленность отходящих газов. Таким образом, даже на таком относительно простом примере можно видеть, насколько важно правильно выделить объект управления или исследования. Естественно, что это самым непосредственным образом сказывается на выборе структуры модели, которая строится для решения той или иной задачи.

Ранжирование входов и выходов и определение их рационального числа. Важное значение для определения структуры модели, которая на первых этапах исследования может быть представлена в виде многополюсника, является отбор входов и выходов объекта, которые будут включены в модель. Для этого сначала определяются все входы и выходы, состояние которых в какой-то степени влияет на выполнение цели в объекте (например, цели управления). Затем среди них отбираются наиболее существенные, которые и образуют многополюсник модели с размерностью $П \times Т$ Отбор существенных факторов является непростой процедурой. Для этого используются методы экспертных оценок (непосредственное ранжирование, метод парных сравнений и др.), наблюдение за функционированием реального объекта и деятельностью оператора на нем, специально спланированный и организованный эксперимент на объекте. Для принятия решения о структуре модели (в смысле числа входов и выходов) могут сравниваться несколько конкурирующих моделей. При этом в качестве критерия выбора предпочтительной модели может служить ее точность с одной стороны и сложность или реализуемость с другой.

Если уже имеется некоторая хотя бы приближенная модель или теория, то решение рассмотренной задачи отбора существенных параметров значительно упрощается.

Определение характера связи между входом и выходом. Целенаправленное определение характера связи между входами и выходами модели (вида оператора), т. е. внутренней структуры многополюсника $П \times Т$, возможно лишь на основе некоторых теоретических представлений о механизме процессов, протекающих в объекте. В противном случае остается лишь простой перебор структур, что практически нереально. Имеются попытки формализации синтеза структур, например, путем выделения типовых звеньев, ячеек или, так называемых, условно – элементарных операторов: идеального смешения, вытеснения, диффузии, химической кинетики, теплопередачи и др. Из таких ячеек (звеньев), обменивающихся между собой потоками вещества или энергии, предлагается синтезировать соответствующие структуры моделей сложных объектов. Такой переход, безусловно, облегчает решение рассматриваемой задачи, но полностью исчерпать все многообразие свойств реальных объектов, естественно, не может. Поэтому практически гипотезы о структуре ставятся с учетом физических, физико – химических и других теоретических представлений о конкретных объектах, а для проверки этих гипотез используются экспериментально-статистические методы.

Содержательный анализ остатков как метод проверки гипотез об адекватности структуры. Исследование ошибок и остатков. Под остатками ε_i понимается разность между фактически измеренными y_i и предсказанными с помощью модели (например, регрессионного уравнения) $\hat{y}_i$ n значениями выходного параметра. Это величины, которые не удается объяснить с помощью регрессионного или какого-либо другого уравнения, т. е. остаточные ошибки модели.

Относительно ошибок делаются следующие предположения: ошибки независимы, имеют нулевые средние, постоянную дисперсию и подчиняются нормальному закону распределения. Последнее необходимо в случае использования -критерия.

Если подбираемая модель находится в удовлетворительном соответствии с объектом, остатки должны проявлять тенденцию к подтверждению сделанных нами предположений или, по меньшей мере, не должны противоречить им.

Формулируется следующий вопрос: «Не доказывают ли остатки, что наши предположения ошибочны?»

После исследования остатков можно прийти к одному из следующих выводов:

1. предположения, по-видимому, нарушены (в некотором смысле)
2. предположения, по-видимому, не нарушены.

Последнее не означает, что мы пришли к выводу о правильности предположения, мы не имеем основания для утверждения о неправильности.

Графические процедуры исследования ошибок и остатков. Основные виды графиков остатков. Процедуры исследования остатков с целью проверки модели носят графический характер, что дает возможность осуществлять не только количественный, но и качественный (содержательный) анализ степени идентичности модели и объекта.

Основные виды графиков остатков:

1. общий; например, гистограмма распределения;
2. в зависимости от времени или номера опытов, если известна их последовательность;
3. в зависимости от предсказываемых значений $\hat{y}_i$;
4. в зависимости от входных факторов x_{ji};
5. любой вид графика, который целесообразен для данной конкретной задачи.

Рассмотрим конкретнее некоторые из указанных видов графиков.

Гистограмма распределения. Гистограмма распределения. Она строится следующим образом. Весь диапазон изменения переменной, в нашем случае ошибки модели, разбивается на ряд равных интервалов (обычно на 10 – 15), которые откладываются на оси абсцисс, а на оси ординат отмечается частота попадания ошибки в каждый из этих интервалов (число случаев). Например, гистограмма, изображенная на рисунке 12.1,а, имеет симметричный характер и не дает каких-либо оснований для суждений о неправильности наших предположений.

Несимметричный характер гистограммы или наличие второго “горба” (рисунок. 12.1,б), может свидетельствовать о том, что в модели не учтена какая-то неслучайная составляющая и требуется более глубокий анализ ошибки модели.

График временной последовательности.

График временной последовательности. Возможно, несколько характерных случаев зависимости остаточной ошибки от времени или других перечисленных выше факторов. Рассмотрим их сначала для временной зависимости, пример которой приведен на Рисунок 12.2, а.

В случае (б) эффект времени не влияет на ошибку и не дает каких-либо оснований для принятия решения о целесообразности дальнейшего совершенствования модели.

В случае (в) **дисперсия** не постоянна, а растет со временем, что вызывает необходимость использования взвешенного **метод наименьших квадратов.**

В случае (г) целесообразно включить в **модель** линейный член от времени.

В случае (д) в **модель** должны быть включены линейный и квадратичный члены от времени.

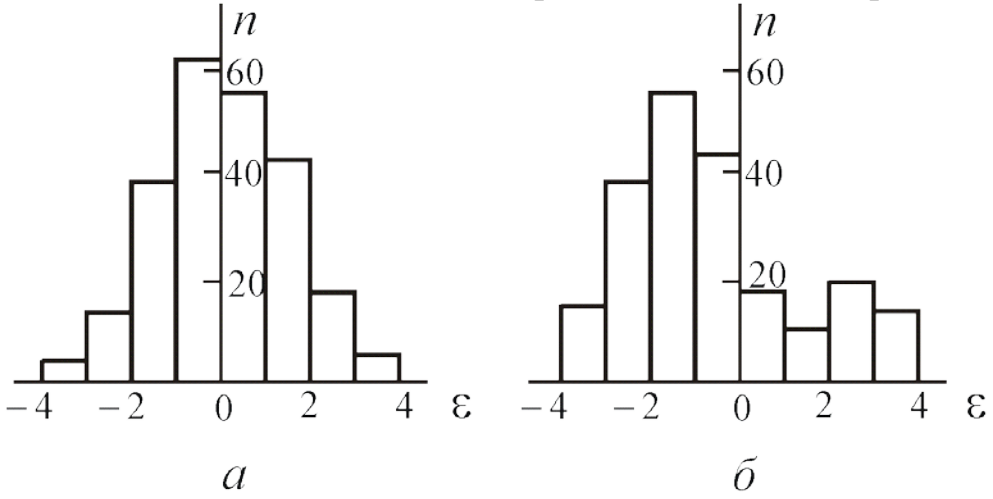


Рисунок 12.1 - Гистограммы распределения

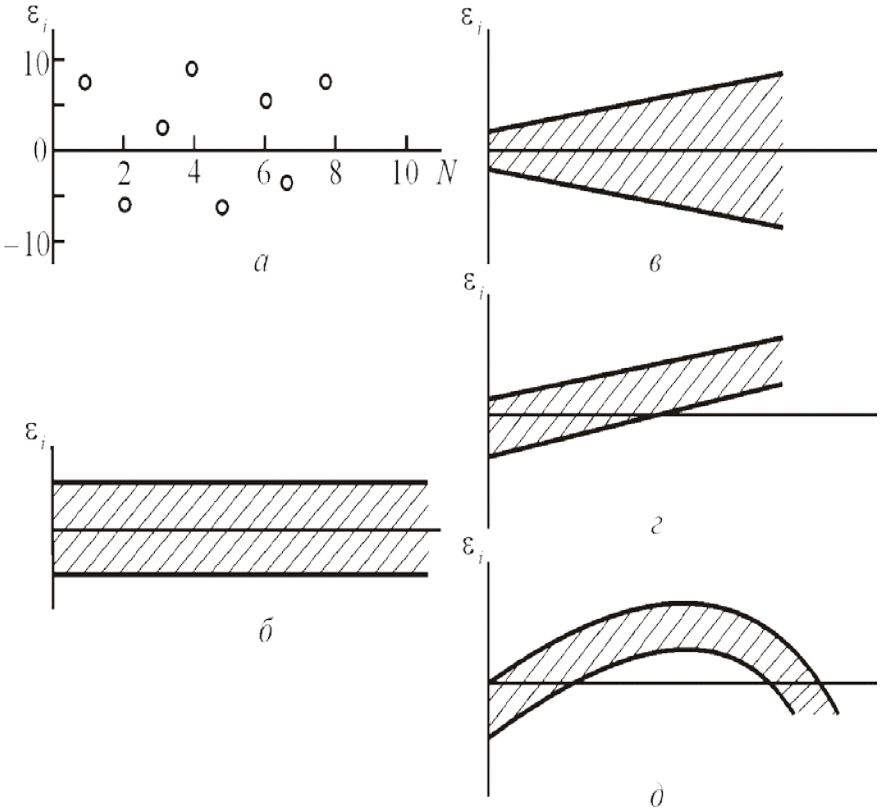


Рисунок 10.2 - Характерные случаи распределения остаточной ошибки

Возможны также различные сочетания рассмотренных случаев.

График зависимости остатков от $\hat{y}_i$ (рисунок. 12.3).

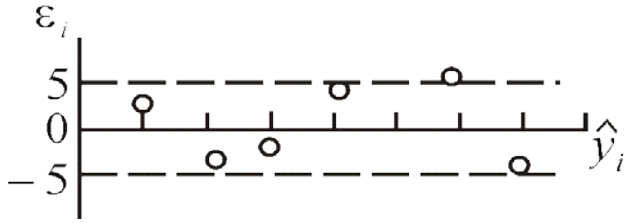


Рисунок 12.3 - Зависимость остатков от предсказанного значения выхода

Попадание большинства данных в горизонтальную полосу свидетельствует, что наши предположения, по-видимому, оправданы. Графики для случаев, когда предположения оказываются неоправданными, могут иметь вид аналогичный рассмотренным выше (рисунок. 12.2, в, г, д).

В случае (в) дисперсия вопреки предположению непостоянна и зависит от $\hat{y}_i$, что приводит к необходимости использования взвешенного метода наименьших квадратов и преобразования наблюдений $\hat{y}_i$. В случае (г) отклонения от полученного уравнения (модели) носят систематический характер, что может свидетельствовать о том, что в модели ошибочно пропущен свободный член. Случай (д) – модель неадекватна, необходимо ввести в модель квадратичные члены и взаимодействия.

Графики остатков по каждой из независимых переменных x_j строятся и анализируются аналогичным образом. Здесь случай (г) может быть следствием либо ошибок в вычислениях, либо необоснованного исключения линейного члена от x_j, а случай (д) – свидетельствовать о необходимости введения в модель квадратичного члена от x_j.

Прочие методы, эффективность, выбросы.

Среди других видов графиков можно отметить группировку остатков для разных агрегатов, печей, смен, бригад, времен года, на серии положительных и отрицательных остатков и т. д.

Эффективным при последовательном совершенствовании моделей может оказаться введение в рассмотрение новой переменной. Строится график зависимости ε_i от новой переменной, не включенной в рассматриваемую **модель**. Если такая зависимость обнаруживается, целесообразно ввести в **модель** соответствующие члены для учета этой переменной.

Большой интерес при исследовании остатков могут представить выбросы – значительные отклонения параметров от установленного **закона распределения**. С точки зрения получения устойчивых средних значений по большому ансамблю данных выбросы за зону шириной $\pm 3\sigma$, где σ – среднее квадратическое отклонение, рекомендуется не учитывать, делая предположения, что они являются результатами каких-либо промахов в постановке и проведении экспериментов.

Если ставится задача выяснения причин, вскрытия внутреннего механизма явлений, то выбросы должны подвергаться особенно тщательному анализу. При этом можно получить такую информацию, которую другие данные дать не могут, поскольку выброс (если он не является результатом промаха) связан с необычной комбинацией условий, являющейся жизненно важной и интересной с точки зрения постановки гипотез о направлениях дальнейших исследований.

Выше рассмотрены лишь основы исследования остатков, что, однако, достаточно для понимания важности этого метода при содержательном анализе моделей и определении направлений их структурного совершенствования.

В настоящее время интенсивно развивается еще целый ряд методов структурной идентификации, имеются примеры их применения в химии и других отраслях.

Основная литература

1. Гроп Д. Методы идентификации систем. - М.: Мир, 1979
2. Эйкхоф П. Основы идентификации систем управления. М.: Мир, 1975. 683 с.

Дополнительная литература

3. Карабутов Н. Н. Структурная идентификация систем: Анализ динамических структур М.: МГИУ, 2008. – 160 с.
4. Карабутов Н. Н. Структурная идентификация систем: Анализ информационных структур. МГИУ,2009. 176 с.
5. Материалы с сайта http://www.matematicheskoe-modelirovanie.ru/kniga