

DOI: 10.15593/2499-9873/2018.1.04

УДК 519.714.2

С.С. Гусев

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА
УПРАВЛЕНИЯ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ
НА ПРИМЕРЕ ВОДО-ВОДЯНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
РЕАКТОРА**

Подробно описывается водо-водяной энергетический реактор, на примере которого демонстрируется возможность идентификации параметров сложного динамического объекта управления с помощью модифицированного алгоритма, хорошо зарекомендовавшего себя при исследовании входных переменных, таких как давление, балансное паросодержание, расстояние до решетки, массовые скорости, и одной выходной переменной – теплового потока. Рассматривается взаимосвязь входной и выходной переменных, а именно: массовой скорости на входе реактора и теплового потока на выходе реактора. Модифицированный алгоритм сравнивается с алгоритмом Чадаева – Илюшина, поскольку разработанный ими алгоритм идентификации динамического объекта управления позволяет с высокой точностью вычислять значения множественного коэффициента корреляции и среднеквадратичного отклонения. В статье показано, что модифицированный алгоритм идентификации динамического объекта управления позволяет отсеивать строки с плохими оценками параметров и вычислять множественный коэффициент корреляции и среднеквадратичного отклонения еще более точно, чем это позволял делать алгоритм Чадаева – Илюшина.

Ключевые слова: алгоритм, идентификация, динамический объект, пространство параметров, математическое моделирование, водо-водяной энергетический реактор.

S.S. Gusev

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences
of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

**IDENTIFICATION OF DYNAMIC OBJECT OF CONTROL
ACCORDING TO THE EXPERIMENTAL DATA ON THE EXAMPLE
OF THE PRESSURIZED WATER REACTOR**

The pressurized water reactor is describes in this article, the example of which demonstrates the possibility of identifying the parameters of a complex dynamic control object using by the modified algorithm, well-proven in the study of input variables such as pressure, steam balance, the distance to the lattice, mass velocities and one output variable, such as heat flux. This paper presents the relationship between the input and output variables such as the mass velocity at the reactor inlet and the heat flux at the reactor outlet. The modified algorithm is compared with the Chadaev-Ilyushin algorithm, since

the algorithm for identification of the dynamic control object developed by them allowed to calculate the values of the multiple correlation coefficient and standard deviation with high accuracy. The article shows that the modified algorithm for identification of a dynamic control object allows to filter out the lines with poor parameter estimates and calculate the multiple correlation coefficient and mean square deviation even more accurately than the Chadaev-Ilyushin algorithm allowed to do.

Keywords: algorithm, identification, dynamic object, the space of parameters, mathematical modeling, pressurized water reactor.

Введение

Качество идентификации объекта управления (ОУ) в большой степени определяет и качество управления сложным объектом. Значительную роль при этом играет учет априорной информации о структуре и параметрах объекта. Параметры модели в процессе идентификации уточняются в соответствии с критерием максимальной близости (подобия) модели и объекта, что и определяет качество идентификации. Основная задача, возникающая при разработке алгоритма идентификации динамического объекта АСУТП, состоит в определении функциональной зависимости выходной переменной, которая представляет собой математическую модель ОУ. Для построения функциональной зависимости выходной переменной АСУТП используется априорная информация об ОУ [1]. Функциональная зависимость выходной переменной АСУТП представляет собой аналитическое выражение, связывающее между собой входные и выходные переменные объекта управления – переход из пространства входов-выходов в пространство параметров по известным величинам, представляющим собой экспериментальные данные динамического объекта управления. Система считается сложной, если для построения ее адекватной модели априорной информации недостаточно [1].

Определение функциональной зависимости выходной переменной АСУТП также требует уточнения для случая сложного ОУ. Следовательно, принимать решение об управляющем воздействии АСУТП на сложные ОУ, зная только его выходные параметры, нецелесообразно. Управление сложными ОУ должно осуществляться не по его параметрам, а по состояниям. Но для этого необходимо уметь идентифицировать эти состояния [1]. Таким образом, в АСУТП сложного ОУ возникает задача идентификации состояния сложного ОУ по его известным параметрам. Данная задача должна решаться на основе входных-выходных переменных математической модели АСУТП сложного ОУ. Для ее построения целесообразно использовать более

общие классы моделей, чем аналитические, например матричные и информационные. Подобные модели не могут быть непосредственно применены для управления и поэтому требуют предварительной привязки путем заполнения их конкретной информацией о фактическом поведении сложного ОУ АСУТП [1].

Основная цель любой АСУТП, в том числе АСУТП сложного ОУ, состоит в том, чтобы эффективно перевести ОУ в целевое состояние. Но АСУТП сложного ОУ должны обеспечивать также формирование конкретной информационной модели сложного ОУ на основе математической модели и фактической информации о поведении сложного ОУ.

В статье исследуется работа модифицированного алгоритма идентификации, учитывающего определенную информацию о параметрах объекта. При этом объект исследования представляет собой динамический объект АСУТП с одной входной и одной выходной переменными [1].

При построении математических моделей динамических ОУ АСУТП по экспериментальным данным [2] возникает задача учета априорной информации о структуре и параметрах реального объекта, которая плохо формализуется. А априорная информация относится к параметрам объекта, которые связаны с этими переменными только косвенно (обычно через метод наименьших квадратов). В статье предлагается оригинальная процедура выявления экспериментов, наилучшим образом влияющих на точность оценок параметров объекта.

Объект исследования представляет собой модель кассеты (тепло-выделяющей сборки – ТВС) АСУТП ВВЭР: водо-водяного энергетического реактора ВВЭР-440 или ВВЭР-1000. Модель ТВС располагалась в корпусе канала, имитирующем корпус натурной установки, приведенной на рис. 1 [2].

Исследуемые модели отличались от натуральных кассет уменьшенным размером поперечного сечения и, соответственно, уменьшенным количеством имитаторов ТВЭЛов. Имитаторы ТВЭЛов представляли собой трубки диаметром 9,1 мм (как и у натуральных ТВЭЛов), а энерговыделение в модели кассеты на уровне 500–1000 кВт обеспечивалось за счет пропуска электрического тока. В нашем анализе использовались результаты исследований на моделях ТВС, состоящих из 7 имитаторов ТВЭЛов.

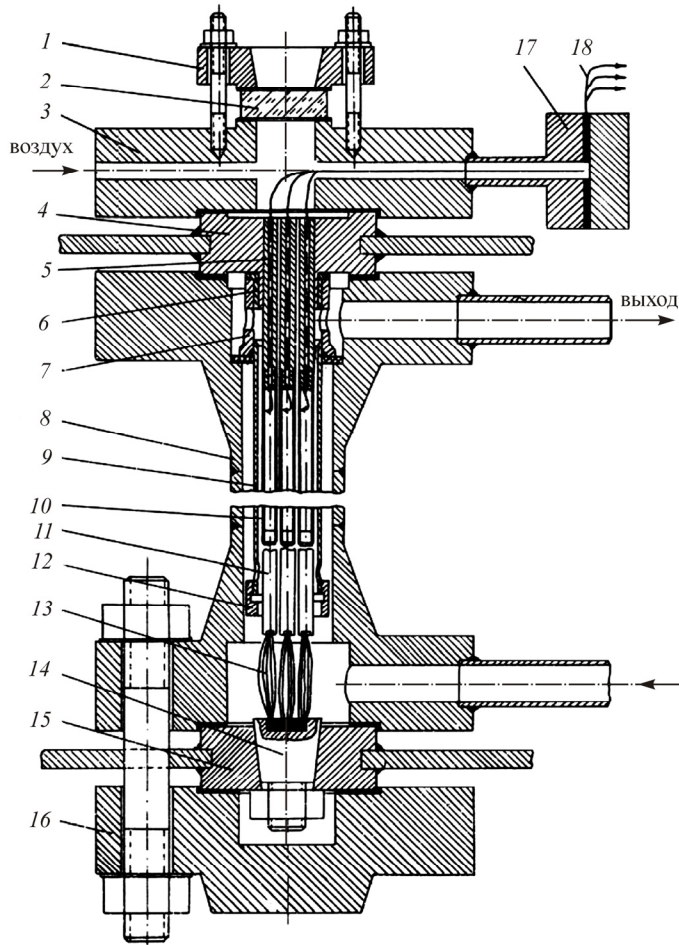


Рис. 1. Корпус канала ТВС, имитирующей корпус натурной установки: 1 – фланец для уплотнения смотрового стекла; 2 – смотровое стекло; 3 – верхняя крышка корпуса; 4 – верхний токоподводный фланец; 5 – верхние полые токовводы; 6 – установочное кольцо; 7 – центрирующий стакан; 8 – корпус высокого давления; 9 – шестигранный канал; 10 – трубки пучка; 11 – нижние сплошные токовводы; 12 – фиксирующее кольцо; 13 – гибкие пластины; 14 – контактный конус; 15 – нижний токоподводный фланец; 16 – нижняя крышка корпуса; 17 – фланец без вывода термодпар; 18 – термодпары для фиксации кризиса

Исследования проводились на экспериментальном стенде высокого давления (до 20 МПа). При этом циркуляционными насосами и оборудованием стенда обеспечивался требуемый расход теплоносителя с заданными температурами. В составе экспериментального стенда имеются подогреватели (обеспечивающие требуемую температуру

теплоносителя на входе в модель), компенсаторы давления (поддерживающие давление на требуемом уровне), холодильники для отвода тепла от контура циркуляции. Измерительной техникой АСУТП ВВЭР обеспечивается регистрация требуемых параметров модели (подводимая мощность, температуры теплоносителя и стенок имитаторов, давления, расходы и др.).

Главным критерием таких исследований является обоснование надежного отвода тепла из АЗ или, соответственно, предельно допустимые тепловые потоки, при которых нарушается процесс теплосъема. Его принято характеризовать как наступление кризиса теплосъема. Известно, что при повышении тепловых потоков наступает момент, когда за счет интенсивного кипения жидкость оттесняется от стенки и наблюдается резкий рост температуры стенки вплоть до разрушения имитатора.

С использованием полученных данных по подводимой мощности, расходу теплоносителя, температуре теплоносителя на входе, обогреваемой поверхности и площади проходного сечения модели ТВС авторами работы [2] определялись основные параметры в исследованных режимах: тепловые потоки $Q_{кр}$ (при наступлении кризиса теплообмена), массовые скорости W , массовое паросодержание в месте кризиса Z , балансное паросодержание X и давление P . Эти параметры и были использованы нами при обобщении результатов и использовании предложенного подхода.

Следует отметить, что в работе [2], проведенной ее авторами в 1970-х гг., также выполнено обобщение результатов исследований в виде некоторой весьма простой степенной функции с оптимизацией 5 коэффициентов. По данному массиву (560 значений критического теплового потока – КТП) среднеквадратичная погрешность составила около 13 %. Таким образом, полученные в данной работе результаты привели к весьма существенному снижению погрешности описания данных. Этот факт имеет принципиально важное значение с точки зрения обоснования возможного повышения рабочих параметров установки. Это связано с тем, что использование вероятностных подходов (2σ , 3σ) накладывает ограничение на максимально допустимую мощность установки. Снижение погрешности позволяет обосновать безопасность установки при ее работе на более высокой мощности.

С использованием полученных данных по подводимой мощности, расходу теплоносителя, температуре теплоносителя на входе, обогреваемой поверхности и площади проходного сечения модели ТВС определялись основные параметры в исследованных режимах: тепловые потоки Q (при наступлении кризиса теплообмена) и массовая скорость в месте кризиса W .

1. Описание объекта управления технологического процесса теплоотвода для АЭС (ВВЭР-1000)

Объектом исследования является физическая модель реакторов системы управления – моделей ВВЭР-1000, для которых было произведено построение динамической модели по экспериментальным данным.

Технологическая схема энергоблоков с реактором ВВЭР-1000, представленная на рис. 2, имеет два контура.

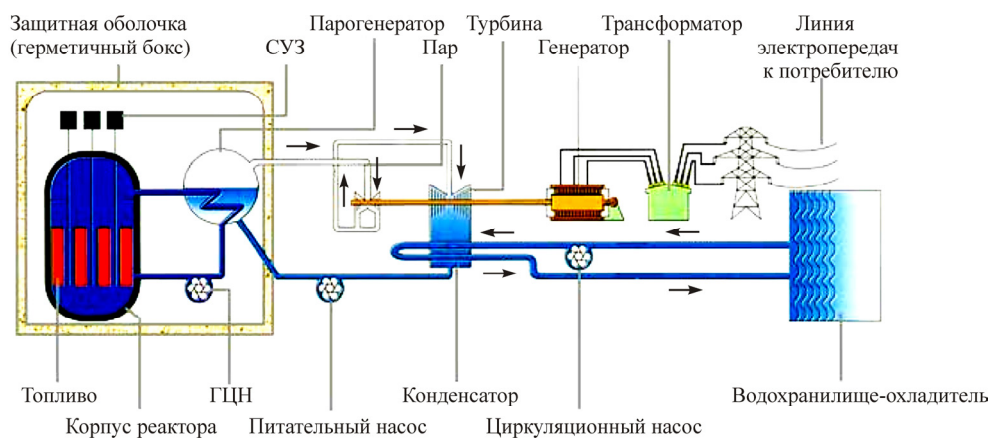


Рис. 2. Технологическая схема энергоблоков с реактором ВВЭР-1000

Первый контур – радиоактивный. Он включает в себя реактор типа ВВЭР и циркуляционные петли охлаждения. Каждая петля содержит главный циркуляционный насос (ГЦН), парогенератор и две главные запорные задвижки (ГЗЗ). К одной из циркуляционных петель первого контура подсоединен компенсатор давления, с помощью которого в контуре поддерживается заданное давление воды, являющейся в реакторе одновременно и теплоносителем и замедлителем нейтронов. На энергоблоках с реактором ВВЭР-1000 – 4 циркуляционные петли.

Второй контур – нерадиоактивный. Он включает в себя парогенераторы, паропроводы, паровые турбины, сепараторы-пароперегреватели, питательные насосы и трубопроводы, деаэраторы и регенеративные подогреватели. Парогенератор является общим оборудованием для первого и второго контуров. В нем тепловая энергия, выработанная в реакторе, от первого контура через теплообменные трубки передается второму контуру. Насыщенный пар, вырабатываемый в парогенераторе, по паропроводу поступает на турбину, которая приводит во вращение генератор, вырабатывающий электрический ток.

В системе охлаждения конденсаторов турбин на ВВЭР используются башенные градирни и водохранилище-охладитель.

Реактор ВВЭР является реактором корпусного типа с водой под давлением, которая выполняет функцию теплоносителя и замедлителя.

Корпус реактора представляет собой вертикальный цилиндрический сосуд высокого давления с крышкой, имеющей разъем с уплотнением и патрубки для входа и выхода теплоносителя. Внутри корпуса закрепляется шахта, являющаяся опорой для активной зоны (АЗ) и части внутрикорпусных устройств и служащая для организации внутренних потоков теплоносителя.

Активная зона реакторов собрана из шестигранных ТВС, содержащих ТВЭЛы стержневого типа с сердечником из диоксида урана в виде таблеток, находящихся в оболочке из циркониевого сплава. В тепловыделяющих сборках ТВЭЛы размещены по треугольной решетке и заключены в чехол из циркониевого сплава. В свою очередь, ТВС также собраны в треугольную решетку с шагом 241 мм (ВВЭР-1000). Нижние цилиндрические части ТВС входят в отверстия опорной плиты, верхние – в дистанционирующую прижимную. Сверху на АЗ устанавливается блок зашитых труб, дистанционирующий кассеты в плане и предотвращающий всплытие и вибрацию. На фланец корпуса устанавливается верхний блок с приводами системы управления и защиты (СУЗ), обеспечивающий уплотнение главного разъема. Регулирование реактора осуществляется перемещаемыми регулирующими органами и, как правило, жидким поглотителем.

Теплоноситель поступает в реактор через входные патрубки корпуса, проходит вниз по кольцевому зазору между шахтой и корпусом, затем через отверстия в опорной конструкции шахты поднимается вверх по ТВС. Нагретый теплоноситель выходит из головок ТВС

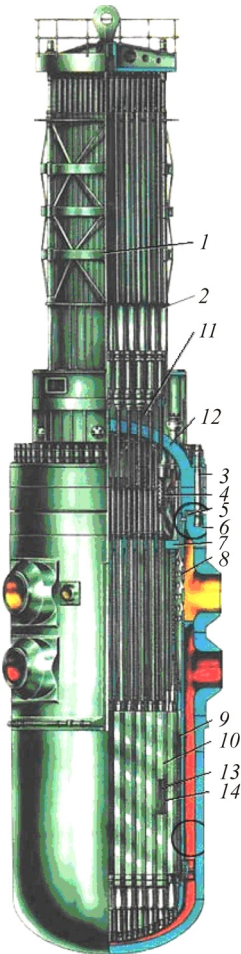


Рис. 3. Реактор ВВЭР-1000:
1 – верхний блок; 2 – привод СУЗ; 3 – шпилька; 4 – труба для загрузки образцов-свидетелей; 5 – уплотнение; 6 – корпус реактора; 7 – блок защитных труб; 8 – шахта; 9 – выгородка активной зоны; 10 – топливные сборки; 11 – теплоизоляция реактора; 12 – крышка реактора; 13 – регулирующие стержни; 14 – топливные стержни; 15 – фиксирующие шпонки

в межтрубное пространство блока защитных труб и через перфорированную обечайку блока и шахты отводится выходными патрубками из реактора.

В качестве ядерного топлива используется спеченный диоксид урана с начальным обогащением ураном-235 в стационарном режиме в диапазоне от 2,4 до 4,4 мас. %.

Реактор ВВЭР, представленный на рис. 3, обладает важным свойством саморегулирования: при повышении температуры теплоносителя или мощности реактора происходит самопроизвольное снижение интенсивности цепной реакции в АЗ и, в конечном итоге, снижение мощности реактора.

Первый контур установки предназначен для отвода тепла, выделяющегося в реакторе, и передачи его во второй контур в парогенератор.

Технический контроль параметров состояния оборудования и трубопроводов, управления и защиты оборудования от повреждений при нарушении в работе первого контура, а также других контуров и систем установки осуществляется системой контроля, управления и защиты.

Система компенсации давления теплоносителя – автономная система ядерного реактора, подключаемая к контуру теплоносителя с целью выравнивания колебаний давления в контуре во время работы реактора, возникающих за счет теплового расширения.

Система компенсации давления в установках с реакторами ВВЭР включает:

- паровой компенсатор давления;
- барботер;
- импульсно-предохранительные устройства;
- трубопроводы и арматуру.

Давление в компенсаторе создается паровой «подушкой» за счет кипения теплоносителя, нагреваемого электронагревателями, размещенными под свободным уровнем. В переходных режимах при колебаниях средней температуры теплоносителя, связанных с изменением нагрузки или нарушениями в работе оборудования реакторной установки, в первом контуре меняется давление. При этом часть теплоносителя перетекает в контур или из контура в компенсатор давления по соединительным трубопроводам.

Ограничение отклонения давления от номинального значения достигается сжатием или расширением паровой «подушки» в верхней части компенсатора. При значительном росте давления открывают регулирующий клапан и подают воду по трубопроводу из «холодной» части контура в сопла, расположенные в верхней части компенсатора. В зависимости от параметров переходного процесса (величины и скорости изменения давления) регулирующий клапан увеличивает подачу «холодной» воды, прекращая или замедляя рост давления в первом контуре. При дальнейшем росте давления (из-за отказа системы или ее недостаточной эффективности) защита реактора от превышения давления обеспечивается срабатыванием импульсно-предохранительных устройств, из которых пар отводится в бак-барботер и конденсируется.

Система очистки теплоносителя – совокупность устройств ядерного реактора, предназначенная для поддержания водного режима, дегазации и очистки теплоносителя в целях ограничения наращивания активности долгоживущих изотопов, примесей, исключения возможности образования пробок от окислов и других химических соединений, возникающих и переносимых в теплоносителе, и предотвращения ухудшения теплосъема и теплопередачи. Несмотря на применение в первом контуре коррозионно-стойких аустенитных сталей и циркониевых сплавов, в теплоноситель переходят продукты коррозии, которые удается регулировать соответствующим подбором водно-химического режима. Применение борного регулирования интенсифицирует процесс коррозии. Источником примесей в первом контуре является также вода первичного заполнения и подпиточная вода, содер-

жащие определенное количество солей, а также случайные загрязнения, попадающие в контур в процессе монтажа и ремонта.

2. Цель работы

2.1. Объект исследования

При построении моделей динамических объектов управления по экспериментальным данным возникает задача учета априорной информации о структуре и параметрах реального объекта, которая плохо формализуется. При проведении экспериментов фиксируются входные и выходные переменные, а априорная информация относится к параметрам объекта, которые связаны с этими переменными только косвенно (обычно через метод наименьших квадратов). Предлагается оригинальная процедура выявления экспериментов, наилучшим образом влияющих на точность оценок параметров объекта.

В работе строится математическая модель физического объекта отвода тепла от стержней экспериментальной установки – модели кассеты ядерного реактора [2]. Как было отмечено ранее, превышение некоторого уровня мощности кассеты или теплового потока с поверхности ТВЭЛов может привести к их разрушению (плавлению оболочек ТВЭЛ, последующему радиоактивному загрязнению контура циркуляции и установки в целом).

Тепловой поток, при котором возникает перегрев ТВЭЛов, принято называть критическим тепловым потоком (КТП). Экспериментальные исследования по определению КТП проводятся на специальных теплофизических установках.

В данной работе для построения модели использовались только массовая скорость в качестве входной переменной и тепловой поток в качестве выходной переменной. Модель прогноза теплового потока на такт вперед показала меру определенности 0,928. Использование априорной информации удалось повысить множественный коэффициент корреляции модели до 0,932, соответственно снизив ошибку прогноза.

Рассматриваемая модель строится по экспериментальным данным работы [2]. Результаты этой работы представлены на рис. 4 в виде зависимостей двух параметров, обозначенных W и Q , от третьего параметра, который в данном случае трактуется как некоторый времен-

ной масштаб t . Параметр Q в данном случае соотносится с критическим тепловым потоком – КТП, а параметр W – с характеристикой теплоносителя – так называемой массовой скоростью.

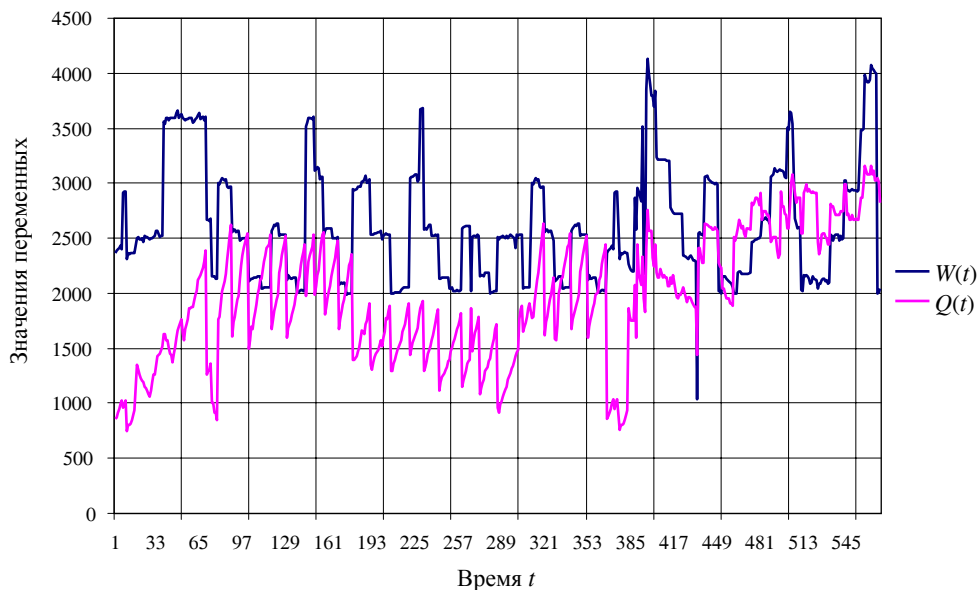


Рис. 4. Исходные данные ($Q(t)$ – тепловой поток, $W(t)$ – массовая скорость)

Следует отметить, что при экспериментальных исследованиях АСУТП ВВЭР с физическим объектом регистрировалось большее количество физических параметров (включая, например, давление, балансное паросодержание, расходы и др.), влияющих на процесс теплопередачи. В данной работе для построения модели АСУТП ВВЭР использовалась только часть из них. Тем не менее модель прогноза критического теплового потока на такт вперед показала значение множественного коэффициента корреляции 0,928. Данный коэффициент используется для исследования тесноты взаимосвязи между одним показателем и некоторым набором других показателей [3, 4]. В нашем случае исследуется теснота взаимосвязи между одним показателем $Q(t)$ и некоторым набором таких показателей, как $Q(t - \tau)$ и $W(t - \tau)$. Введем еще одно понятие, которое будем использовать в дальнейшем. Это метод наименьших квадратов (МНК) – математический метод, применяемый для решения задач, основанный на минимизации суммы квадратов некоторых функций от искомых переменных [5].

2.2. Цель исследования

Цель практического исследования работы: среди всех проведенных экспериментов найти те, которые в наибольшей степени отвечают за ошибки оценок, и повысить точность модели (и, соответственно, прогноза). К проведенным экспериментам относятся, как было сказано выше, значения двух величин – критического теплового потока (выходной величины) и массовой скорости (входной величины).

Модифицированный алгоритм идентификации, основанный на использовании данной информации, описан ниже. Некоторые теоретические аспекты этого модифицированного алгоритма идентификации применительно к рассматриваемой математической модели физического объекта представлены в работах [6, 7].

3. Постановка задачи

3.1. Структура объекта и модели

Рассмотрим алгоритм идентификации динамического стационарного объекта, учитывающего априорную информацию о параметрах объекта. Будем рассматривать динамический стационарный объект вида

$$Q(t) = \sum_{i=1}^a h_i Q(t-i) + \sum_{i=1}^b h_{a+i} W(t-i), \quad (1)$$

где $Q(t)$ – скалярный выход объекта (тепловой поток) в момент времени t ; $W(t)$ – вход объекта (массовая скорость) в момент времени t ; h_i – постоянные (не зависящие от времени) параметры динамического объекта; a – глубина памяти по выходу; b – глубина памяти по входу.

Дополнительно об объекте (1) известно, что параметры h принадлежат априорно известной области H , т.е.

$$h \in H. \quad (2)$$

Будем предполагать, что модель, соответствующая объекту (1), имеет ту же структуру:

$$Q^*(t) = \sum_{i=1}^a k_i Q(t-i) + \sum_{i=1}^b k_{a+i} W(t-i), \quad (3)$$

где k_i есть оценки параметров объекта h_i , и параметры модели должны удовлетворять тем же ограничениям (2), что и неизвестные пара-

метры объекта. Для конкретной физической модели параметры структуры (3) были равны: $a = b = 3$, т.е. модель для прогноза теплового потока на один такт вперед имела вид

$$Q^*(t) = \sum_{i=1}^3 k_i Q(t-i) + \sum_{i=4}^6 k_i W(t-i). \quad (4)$$

Ниже анализируется точность именно этой модели.

По экспериментальным данным, содержащим 565 опытов (замеров), методом МНК была построена динамическая модель вида (4) с параметрами, представленными в табл. 1. Коэффициент корреляции между прогнозом теплового потока на один такт вперед и его фактическим значением для модели с параметрами из табл. 1 равен 0,932, что соответствует среднеквадратической ошибке (СКО) прогноза 213.

Таблица 1

Параметры МНК-модели

Коэффициент	Оценка	СКО
K_1	0,8589	0,0422
K_2	0,0379	0,0569
K_3	0,0579	0,0441
K_4	0,0081	0,0383
K_5	-0,0004	0,0519
K_6	0,0265	0,0392

Достаточно представительная выборка (563 опыта) и высокий множественный коэффициент корреляции ($R = 0,928$) с высокой степенью вероятности предопределяют, что истинные параметры объекта лежат в области ± 3 СКО около средних МНК-оценок параметров из табл. 1.

3.2. Задачи исследования

Целью работы является поиск среди всех проведенных экспериментов тех, которые в наибольшей степени отвечают за ошибки оценок, и повышение точности модели (и соответственно, прогноза) с использованием условия (2) об априорно известной области существования параметров объекта. В качестве области H будем прини-

мать область около МНК-оценок из табл. 1. Границу этой области для каждого коэффициента выберем в пределах ± 3 СКО. Алгоритм идентификации, основанный на использовании этой информации, описан ниже.

4. Алгоритм идентификации

4.1. Преобразование исходных данных

Первоначальные исходные данные, полученные с экспериментальной установки, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Блок исходных данных

t	$W(t)$	$Q(t)$
Дискретное время	Массовая скорость	Тепловой поток
1	2370	856
2	2390	876
3	2400	913
...
567	2000	3050
568	2010	3020
569	2040	2830

Из табл. 2 видно, что в соответствии с моделью (4) $Q(5)$ зависит от 6 переменных, находящихся в трех строках выше $Q(5)$.

Для дальнейшей обработки эти данные в соответствии со структурой динамического объекта (1) должны быть преобразованы в вид, показанный в табл. 3. Принципиальное значение такого преобразования состоит в том, что выход объекта $Q(t)$ в произвольной строке блока данных зависит только от переменных в этой же строке. Таким свойством не обладает блок данных в табл. 2.

Структура блока преобразованных исходных данных позволяет использовать для получения оценок параметров модели (4) произвольный набор строк из табл. 3. Это свойство будет использовано для перехода в пространство оценок параметров.

Таблица 3

Блок преобразованных исходных данных

t	$W(t-3)$	$W(t-2)$	$W(t-1)$	$Q(t-3)$	$Q(t-2)$	$Q(t-1)$	$Q(t)$
4	2370	2390	2400	856	876	913	947
5	2390	2400	2410	876	913	947	996
6	2400	2410	2430	913	947	996	1030
...
563	4040	4030	4010	3120	3030	3030	3050
564	4030	4010	4000	3030	3030	3050	3020
565	4010	4000	2000	3030	3050	3020	2830

4.2. Переход в пространство параметров

Выбирая случайным образом из табл. 3 некоторый блок в m ($m > 6$) строк, можем вычислить соответствующий ему набор оценок параметров модели (4). Количество таких наборов – число сочетаний из количества экспериментов 560 по m ($m > 6$), т.е. астрономическое число, создающее проблемы и для современных вычислительных машин. Важно отметить, что точность оценок параметров модели в каждом блоке зависит от конкретного набора экспериментов, а не от всех экспериментов вместе, как в МНК. Это позволяет оценить вклад каждого отдельного эксперимента в ошибку оценки.

4.3. Текущие оценки параметров

Для перехода в пространство оценок параметров используется следующая процедура. Из общего блока исходных данных (см. табл. 3) выбирается текущий блок, содержащий m строк. Текущий блок обрабатывается с помощью метода наименьших квадратов, а результаты обработки заносятся в табл. 4. Кроме оценок параметров, которые помещаются в столбцы 7–10, в столбцы 2–6 табл. 4 заносятся и номера строк блока исходных данных (см. табл. 3), которые были использованы для их вычисления. В столбец 11 вносится ошибка оценки параметра k_1 , которая вычисляется следующим образом:

$$\Delta(i) = |k_1(i) - k_{1_{mnk}}|, \quad (5)$$

где $k1(i)$ – оценка $k1$ параметра модели (4) с помощью i -го текущего блока; $k1_{mnk}$ – оценка $k1$ параметра модели (4) из табл. 1 (средняя по всем данным). Если ошибка (5) превышает заранее заданный предел (как правило, 3 СКО для данного параметра), то в столбце 12 табл. 4 ставится 1, что свидетельствует о том, что строки из i -го текущего блока участвовали в формировании большой ошибки оценки.

Такая процедура вычислений выполняется для всех 565- m текущих блоков. В результате формируется табл. 4.

Таблица 4

Полный блок промежуточных оценок

Номер текущего блока	Номера строк исходного блока данных					Текущие оценки параметров				Ошибки оценок $k1$	Индикатор большой ошибки
	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
N	$n1$	$n2$	$n3$	...	$n20$	$k1$	$k2$	...	$k6$	Δ	Ind
1	4	5	6	...	23						
2	5	6	7	...	24						
3	6	7	8	...	25						
...
i	$n1(i)$	$n2(i)$	$n3(i)$	...	$n20(i)$	$k1(i)$	$k2(i)$		$k6(i)$		
...
539	542	543	544	...	561						
540	543	544	545	...	562						

Следующая задача будет состоять в том, чтобы разработать алгоритм, позволяющий найти, каким конкретно экспериментам в блоке данных (см. табл. 3) соответствуют большие ошибки оценок. В частности, для $k1$ – меньше нуля и больше двух. Эта задача не имеет однозначного решения, поскольку в вычислении каждой оценки участвуют данные не одного, а нескольких экспериментов.

4.4. Обнаружение «плохих» экспериментов

«Плохим» будем называть эксперимент, при использовании которого в текущем блоке оценки сильно отличаются от номинальных

(см. табл. 1). Проблема состоит в том, что в каждый текущий блок входит много строк исходных данных (экспериментов). А какой конкретно эксперимент приводит к большим ошибкам – заранее неизвестно. Рассмотрим алгоритм, позволяющий решить эту задачу.

В табл. 4 последний, 12-й столбец Ind – индикаторный. В нем стоят только нули или единицы. Если в какой-либо строке в этом столбце стоит 1, то это означает, что оценка параметра k_1 (из столбца 7 табл. 4) отличается от номинального значения k_{1mnk} (из табл. 1) больше, чем на 3 СКО, т.е. вычислена с большой ошибкой. При этом под подозрение попадают все входящие в этот блок строки, перечисленные в столбцах 2–6 табл. 4.

Выберем из табл. 4 только строки, соответствующие большим ошибкам, и по номерам строк, попавших в столбцы 2–6, построим функцию частоты номеров строк, участвовавших в вычислении плохих ошибок. График этой функции показан на рис. 5.

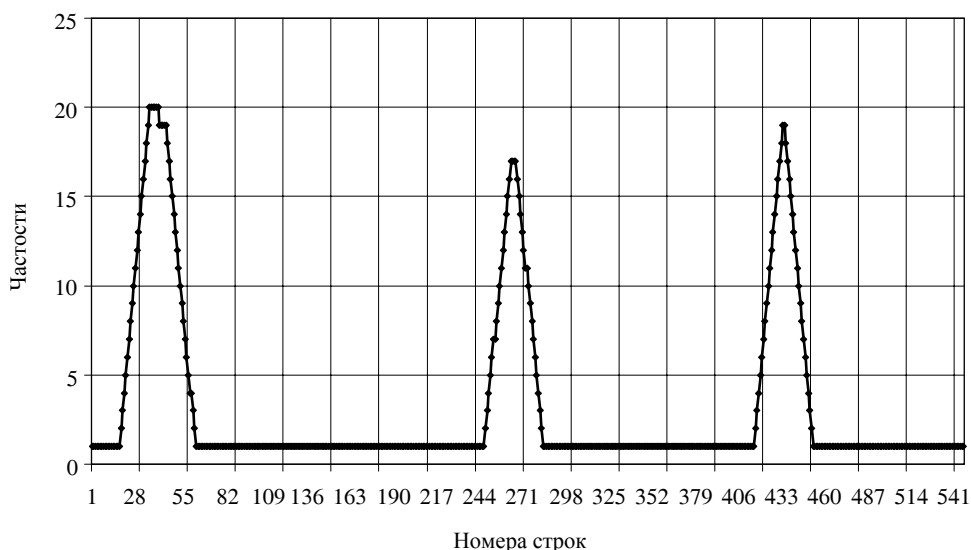


Рис. 5. Функция распределения «плохих» строк

Как видно из рис. 5, есть несколько областей, в которых резкие отклонения оценок появляются особенно часто. Первая область – 32–51, вторая область – 261–268, третья область – 429–438. Именно эксперименты с этими номерами привели к грубым оценкам параметров модели. Исключение из обработки этих строк должно привести к повышению точности модели. Исключение из блока данных «плохих» строк,

приводящих к локальному нарушению условия (4), позволяет построить модель, дающую меньшую ошибку прогноза.

4.5. Блок-схема модифицированного алгоритма идентификации динамического объекта

На рис. 6 приведена блок-схема описанного выше модифицированного алгоритма идентификации динамического объекта управления. В блок-схеме модифицированного алгоритма отображена математическая последовательность итераций – действий, которые позволяют построить математическую модель физического объекта по экспериментальным данным.



Рис. 6. Блок-схема модифицированного алгоритма идентификации динамического объекта

5. Алгоритмы идентификации класса объектов АСУТП ВВЭР

5.1. Пример алгоритма идентификации для класса объектов АСУТП ВВЭР

Примером исследуемого алгоритма идентификации для класса объектов АСУТП ВВЭР будет служить алгоритм идентификации динамического объекта Чадеева – Илюшина, приведенный в работе [7].

В работе [7] рассматривается алгоритм идентификации, учитывающий априорную информацию о параметрах. Исходные экспериментальные данные из пространства входов-выходов преобразуются в пространство оценок параметров. В пространстве параметров выделяется множество оценок, удовлетворяющих априорным ограничениям. На этом множестве по вероятностному критерию строятся оценки параметров. Приводится пример, иллюстрирующий эффективность предлагаемой процедуры.

5.2. Сравнение модифицированного алгоритма идентификации с приведенным алгоритмом для данного класса объектов

Отличительной особенностью выбранного для сравнения алгоритма Чадеева – Илюшина с модифицированным алгоритмом идентификации динамических объектов является то, что алгоритмы схожи по своей структуре и математическому описанию, за исключением отсутствия вектора частоты w (частоте упоминания строк) в алгоритме Чадеева – Илюшина по сравнению с модифицированным алгоритмом. Вектор-столбец частоты w в модифицированном алгоритме идентификации позволяет структурировать матрицу с исходными данными по частоте упоминания строк, что позволяет отсеивать нижние строки матрицы, которые являются малоинформативными, тем самым сокращая число строк в матрице, количество всевозможных переборов из оставшихся строк в усеченной матрице и, соответственно, время перебора «хороших» строк. Этой положительной особенностью не обладают другие алгоритмы идентификации динамических объектов. Можно сказать, что модифицированный алгоритм идентификации динамических объектов управления является своего рода продолжением развития алгоритма Чадеева – Илюшина. Поэтому излагать математические итерации алгоритма Чадеева – Илюшина, подобные тем, которые приведены в статье для модифицированного алгоритма, нет смысла, так

как результаты расчетов будут отличаться незначительно для обоих алгоритмов, представленных в [7, 8]. Использование модифицированного алгоритма на практике показывает, что автор настоящей статьи, разработавший модифицированный алгоритм идентификации динамического объекта, действительно внес существенные изменения, в том числе частоту w – частоту упоминания строк в блоке преобразованных исходных данных, которая позволяет существенно увеличить точность расчета оценки параметров объекта управления. Эти небольшие изменения в модифицированном алгоритме идентификации, во-первых, отличают его от других алгоритмов, а во-вторых, позволяют получать более точные оценки параметров объекта управления. Это дает возможность обеспечить получение более точного значения множественного коэффициента корреляции для объекта управления и существенно повысить его быстродействие.

Научную новизну и практическую ценность настоящей работы, обусловленные сравнительным результатом обоих алгоритмов, определяют:

- введение вектора частоты w , позволяющего отсеивать малоинформативные строки, тем самым сокращая время перебора строк блока преобразованных исходных данных;

- расчет оценок параметров для таких сложных объектов управления АСУТП ВВЭР, как реакторные установки, линейные ускорители, циклотроны и др.;

- практическое применение модифицированного алгоритма идентификации на объектах управления АСУТП ВВЭР – ВВЭР-440 и ВВЭР-1000;

- математическая простота использования математического аппарата на практике применительно к сложным объектам управления.

Результаты исследований уже существующих алгоритмов идентификации для класса объектов технологического процесса теплоотвода (ТПТ) с разработанным алгоритмом идентификации динамического объекта показывают, что последний для класса объектов ТПТ обеспечивает лучшие результаты при проведении экспериментов. Это отражено в определении среднеквадратичного отклонения, множественного коэффициента корреляции, точности оценок параметров динамических объектов и других характерных показателей для данного класса объектов.

Так, для такой модели множественный коэффициент корреляции $R = 0,932$ по сравнению с начальным значением $R = 0,928$. СКО прогноза критического потока значений с вырезанными «плохими» строками составляет 211 по сравнению с начальным значением 213, т.е. уменьшается на 1 %. Сравнивая эти результаты с идентификацией методом наименьших квадратов по 566 экспериментам, видим, что точность оценок увеличилась.

Технологический процесс проектирования математической модели для получения оценок параметров прогноза состоит в следующем. Предлагается случай опроса датчиков и записи исходных данных, полученных с объекта исследования – моделей водо-водяных энергетических реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000, в режиме реального времени с прогнозом на один такт вперед. С использованием части массива архивных исходных данных по накопленным экспериментальным данным – массовой скорости и критического теплового потока – строится идентификационная математическая модель, по которой вычисляются оценки параметров прогноза. Полученные оценки позволяют определить, насколько точно близка построенная математическая модель к объекту исследования. Глубина памяти на три шага выбрана неслучайно. Теоретические и практические расчеты показывают, что при меньшей глубине памяти – на два или один шаг – значения множественного коэффициента корреляции и среднеквадратичного отклонения варьируются относительно времени, а с большей глубиной памяти показательные значения множественного коэффициента корреляции уже отличаются на десятитысячные доли, а среднеквадратичного отклонения – на десятые после запятой. Другими словами, фактически при глубине памяти больше трех функционально множественный коэффициент корреляции и среднеквадратичное отклонение практически не изменяются. Для наглядности приведем табл. 5 со значениями множественного коэффициента корреляции (МКК) и среднеквадратичного отклонения с глубиной памяти от единицы до пяти.

Таблица 5

Показатели значений СКО и МКК

t	$(t - 1)$	$(t - 2)$	$(t - 3)$	$(t - 4)$	$(t - 5)$
СКО	213,54	211,88	211,36	211,19	210,93
МКК	0,927263	0,928340	0,928673	0,928788	0,928969

Заключение

Рассмотрен алгоритм идентификации динамического объекта, учитывающий априорную информацию о его параметрах.

Алгоритм преобразовывал блок исходных данных в множество блоков меньшей размерности. Для каждого из этих блоков вычислялись оценки параметров объекта и запоминались номера строк, использованных для вычисления этих оценок.

Оператор, реализующий описанный алгоритм, преобразовывал матрицу исходных данных в специальную матрицу, учитывающую частоту попадания оценок в область h_i , тем самым отсекая малоинформативные строки.

Для такой модели множественный коэффициент корреляции $R = 0,932$ по сравнению с начальным значением $R = 0,928$. СКО прогноза от истинных значений с вырезанными «плохими» строками критического потока составляет 211. МНК оценки по 565 экспериментам дали СКО прогноза 213, т.е. точность прогноза уменьшилась на 1 %.

Список литературы

1. Гусев С.С. Построение модифицированного алгоритма идентификации динамического объекта управления по экспериментальным данным ЯЭУ // Управление большими системами. – 2014. – № 47. – С. 167–186.
2. Экспериментальные исследования и статистический анализ данных по кризису теплообмена в пучках стержней для реакторов ВВЭР / Ю.А. Безруков, В.И. Астахов, В.Г. Брантов [и др.] // Теплоэнергетика. – 1976. – № 2. – С. 80–82.
3. Крамер Г. Математические методы статистики. – 2-е изд. стер. – М., 1975. – 648 с.
4. Кендалл М.Дж., Стьюард А. Статистические выводы и связи. – М.: Наука, 1973. – 896 с.
5. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. – М.: Физматгиз, 1962. – 349 с.
6. Гусев С.С., Чадеев В.М. Алгоритм идентификации с переходом в пространство параметров // Проблемы управления. – 2009. – № 1. – С. 18–21.

7. Чадеев В.М., Илюшин В.Б. Алгоритм идентификации динамических объектов с учетом априорной информации о параметрах // Автоматика и телемеханика. – 2006. – № 7. – С. 133–143.

8. Чадеев В.М., Гусев С.С. Построение динамической модели для прогноза критического теплового потока по экспериментальным данным // Автоматизация в промышленности. – 2010. – № 8. – С. 3–6.

References

1. Gusev S.S. Postroenie modifitsirovannogo algoritma identifikatsii dinamicheskogo ob'ekta upravleniia po eksperimental'nyh dannym NPP [Building a modified algorithm of identification of dynamic object of control according to the experimental data of the nuclear power plant]. Large-Scale System Control. 2014, iss. 47. 167-186 pp.

2. Bezrukov Ju.A., Astahov V.I., Brantov V.G. i dr. Jeksperimental'nye issledovanija i statisticheskij analiz dannyh po krizisu teploobmena v puchkah sterzhnej dlja reaktorov VVER [Experimental study and statistical analysis of data for heat-transfer crisis in bundles of rods for PWR]. Heat power engineering. 1976, iss. 2, 80-82 pp.

3. Kramer G. Matematicheskie metody statistiki [Mathematical methods of statistics]. Moscow. Izd-vo 2, stereo, 1975, 648 p.

4. Kendall M.Dzh., St'iuard A. Statisticheskie vyvody i sviazi [Statistical inference and communication]. Moscow. Nauka, 1973, 896 p.

5. Linnik Iu.V. Metod naimen'shikh kvadratov i osnovy matematiko-statisticheskoi teorii obrabotki nabliudenii [The least-squares method and foundations of mathematical-statistical theory of processing observations]. Moscow. FIZMATGIZ, 1962, 349 p.

6. Gusev S.S., Chadeev V.M. Algoritm identifikatsii s perehodom v prostranstvo parametrov [The identification algorithm with the transition in the parameter space]. Control problem. 2009, iss. 1, 18–21 pp.

7. Chadeev V.M., Iljushin V.B. Algoritm identifikatsii dinamicheskikh ob'ektov s uchetom apriornoj informatsii o parametroh [The algorithm of identification of dynamic objects taking into account a priori information about the parameters]. Automation & Remote Control. 2006, iss. 7. 133–143 pp.

8. Chadeev V.M., Gusev S.S. Postroenie dinamicheskoi modeli dlja prognoza kriticheskogo teplovogo potoka po jeksperimental'nyh dannym

[Building a dynamic model for prediction of the critical heat flux experimental data]. Automation in industry. 2010, iss. 8. 3–6 pp.

Получено 27.02.2018

Об авторе

Гусев Сергей Сергеевич (Москва, Россия) – соискатель, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65, e-mail: gs-serg@mail.ru).

About the author

Sergei S. Gusev (Moscow, Russian Federation) – Ph.D. Student, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences (65, Profsouznaya st., Moscow, 117997, Russian Federation, e-mail: gs-serg@mail.ru).