

УДК 519.714.2
ББК 32.965.5

ПОСТРОЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО АЛГОРИТМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Гусев С.С.¹

(ФГБУН Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

Аннотация. В статье приводится описание процесса модификации алгоритма идентификации динамического объекта с учетом априорной информации о его параметрах. Объектом управления является ядерная энергетическая установка (ЯЭУ). Автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП) играют ключевую роль в управлении ЯЭУ. Наша задача заключается в построении математической модели динамического объекта АСУТП ЯЭУ, а также сопоставления использованного для работы модифицированного алгоритма идентификации с уже существующими для данного класса объектов.

Ключевые слова: алгоритм, идентификация, динамический объект, пространство параметров, математическое моделирование, ядерная энергетическая установка

1. Введение

Качество идентификации объекта управления (ОУ) в большей степени определяет и качество управления сложным объектом. Большую роль при этом играет учет априорной информации о структуре и параметрах объекта. Параметры модели в

¹ Сергей Сергеевич Гусев, соискатель (gs-serg@mail.ru).

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. 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.

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. 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.

Основная цель любой АСУТП, в том числе и 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.

При построении математических моделей динамических ОУ АСУТП по экспериментальным данным 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, наихудшим образом влияющих на точность оценок параметров объекта.

Объект исследования представляет собой модель кассеты (тепловыделяющей сборки – ТВС) АСУТП ЯЭУ: водо-водяного энергетического реактора ВВЭР-440 или ВВЭР-1000 [1].

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 ЯЭУ обеспечивается регистрация требуемых параметров модели (подводимая мощность, температуры теплоносителя и стенок имитаторов, давления, расходы и др.).

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 массовое паросодержание в месте кризиса – X .

2. Цель работы

Рассматриваемая в работе модель строится по экспериментальным данным работы [1]. Результаты этой работы представлены на рис. 1 в виде зависимостей двух параметров, обозначенных X и Q , от третьего параметра, который в данном случае трактуется как некоторый временной масштаб t . Параметр Q в данном случае соотносится с критическим тепловым потоком – КТП, а параметр X – с характеристикой теплоносителя – так называемым балансным паросодержанием.

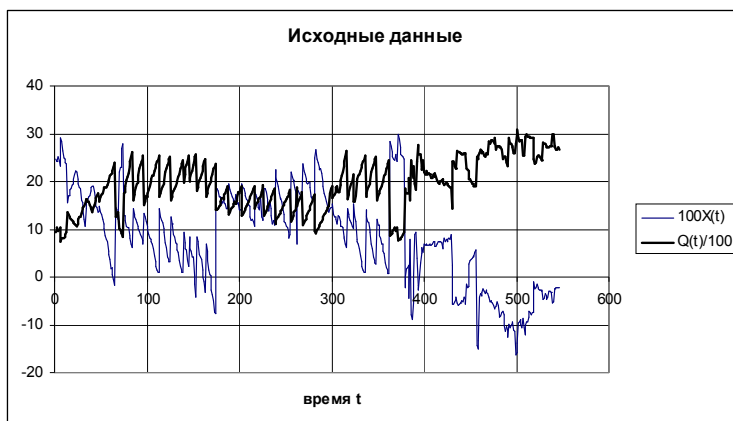


Рис. 1. Исходные данные ($Q(t)$ – тепловой поток, $X(t)$ – баланс паросодержания)

Необходимо сказать несколько слов о представленных на рис. 1 зависимостях. Как следует из рис. 1, тепловые потоки в виде $Q(t)/100$ изменяются от ~ 10 до ~ 30 , а баланс паросодержания $100X(t)$ от ~ -15 до $\sim +30$. Следует отметить, что обе зависимости носят «зубчатый» характер. Причем в пределах

отдельных таких формирований наблюдается противоположный характер поведения: увеличение энтальпии приводит к снижению критического теплового потока. Это отражает закономерное поведение данных: чем «горячее» теплоноситель, тем ниже критический тепловой поток и наоборот.

Следует отметить, что при экспериментальных исследованиях АСУТП ЯЭУ с физическим объектом, регистрировалось большее количество физических параметров (включая, например, давление, массовые скорости, расходы и др.), влияющих на процесс теплопередачи. В данной работе для построения модели АСУТП ЯЭУ использовалась только часть из них. Тем не менее, модель прогноза критического теплового потока на такт вперед показала значение множественного коэффициента корреляции 0,92. Использованием априорной информации АСУТП ЯЭУ удалось повысить значение множественного коэффициента корреляции модели до 0,93, соответственно снизив ошибку прогноза.

Более четкая формулировка цели работы исследования модифицированного алгоритма изложена в постановке задачи.

Некоторые теоретические аспекты этого модифицированного алгоритма идентификации применительно к рассматриваемой математической модели физического объекта представлены в работах [2, 3].

3. Постановка задачи

3.1. СТРУКТУРА ОБЪЕКТА И МОДЕЛИ

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

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

где $Q(t)$ – скалярный выход объекта (тепловой поток) в момент времени t , $X(t)$ – вход объекта (балансное паросодержание) в

момент времени t , h_i – постоянные (не зависящие от времени) параметры динамического объекта, a – глубина памяти по выходу, b – глубина памяти по входу.

(2) $h \in H$.

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

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

где k_i есть оценки параметров объекта h_i , и параметры модели должны удовлетворять тем же ограничениям (2), что и неизвестные параметры объекта. Для конкретной физической модели параметры структуры (3) были равны $a=b=3$. То есть модель для прогноза теплового потока на один такт вперед имела вид

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

Ниже анализируется точность именно этой модели.

3.2. ОЦЕНКИ МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ (МНК)

По экспериментальным данным, содержащим 563 опыта, методом МНК была построена динамическая модель вида (4) с параметрами, представленными в таблице 1. Коэффициент корреляции между прогнозом теплового потока на один такт вперед и его фактическим значением для модели с параметрами из таблицы 1 равен 0,928, что соответствует среднеквадратической ошибке (СКО) прогноза 211.

Таблица 1. Параметры МНК-модели

Коэффициент	Оценка	СКО
K_1	0,7767	0,070
K_2	0,1048	0,095
K_3	0,1100	0,0706
K_4	-600	417
K_5	458	580
K_6	371	420

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 таблицы 1.

3.3. ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью работы является, среди всех проведенных экспериментов найти те, которые в наибольшей степени отвечают за ошибки оценок, и повысить точность модели (и соответственно прогноза), используя условие (2) об априорно известной области существования параметров объекта. В качестве области H будем принимать область около МНК-оценок из таблицы 1. Границу этой области для каждого коэффициента выберем в пределах ± 3 СКО. Модифицированный 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 таблице 2.

Таблица 2. Блок исходных данных

t	$X(t)$	$Q(t)$
Дискретное время	Баланс паросодержания	Тепловой поток
1	0,279	856
2	0,268	876
3	0,256	913
...
567	-0,299	3050

568	-0,317	3020
569	-0,336	2830

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

Для дальнейшей обработки данные из таблицы 2 в соответствии со структурой динамического объекта (1) должны быть преобразованы в вид, показанный в таблице 3. Принципиальное значение такого преобразования [4] 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 таблице 2.

Таблица 3. Блок преобразованных исходных данных

t	$X(t-3)$	$X(t-2)$	$X(t-1)$	$Q(t-3)$	$Q(t-2)$	$Q(t-1)$	$Q(t)$
4	0,279	0,268	0,256	856	876	913	947
5	0,268	0,256	0,248	876	913	947	996
6	0,256	0,248	0,243	913	947	996	1030
...
561	-0,051	-0,053	-0,052	3120	3030	3030	3050
562	-0,053	-0,052	-0,299	3030	3030	3050	3020
563	-0,052	-0,299	-0,317	3030	3050	3020	2830

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

4.2. ПЕРЕХОД В ПРОСТРАНСТВО ПАРАМЕТРОВ

Выбирая случайным образом из таблицы 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 563 по m ($m > 6$), то есть 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 (таблица 3) выбирается текущий блок, содержащий m строк. Текущий блок обрабатывается с помощью метода наименьших квадратов, а результаты обработки заносятся в таблицу 4. Кроме оценок параметров, которые помещаются в столбцы 7-10, в столбцы 2-6 таблицы 4 заносятся и номера строк блока исходных данных (таблица 3), которые были использованы для их вычисления. В столбец 11 вносится ошибка оценки параметра $k1$, которая вычисляется следующим образом

$$(5) \Delta(i) = |k1(i) - k1_{mnk}|,$$

где $k1(i)$ – оценка $k1$ параметра модели (4) с помощью i -го текущего блока; $k1_{mnk}$ – оценка $k1$ параметра модели (4) из таблицы 1 (средняя по всем данным). Если ошибка (5) превышает заранее заданный предел (как правило, 3 СКО для данного параметра), то в 12 столбце таблицы 4 ставится 1, что свидетельствует о том, что строки из i -го текущего блока участвовали в формировании большой ошибки оценки [4]. В противном случае в 12 индикаторном столбце ставиться 0.

Такая процедура вычислений выполняется для всех (563- m) текущих блоков. В результате формируется таблица 4.

Таблица 4. Полный блок промежуточных оценок

Но- мера теку- ку-	Номера строк исходного блока данных	Текущие оценки параметров	Оши бка оцен ки	Инди- катор боль- шой
-----------------------------	--	------------------------------	--------------------------	--------------------------------

щего бло- ка										k1	ошиб- ки
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>i</i>	<i>n1(i)</i>	<i>n2(i)</i>	<i>n3(i)</i>	...	<i>n20(i)</i>	<i>k1(i)</i>	<i>k2(i)</i>	...	<i>k6(i)</i>		
...
539	542	543	544	...	561						
540	543	544	545	...	562						

Для примера на рис. 2 приведена эмпирическая функция распределения коэффициента k_1 (столбец 7 таблицы 4). МНК-оценка этого коэффициента из таблицы 1 равна 0,7767.

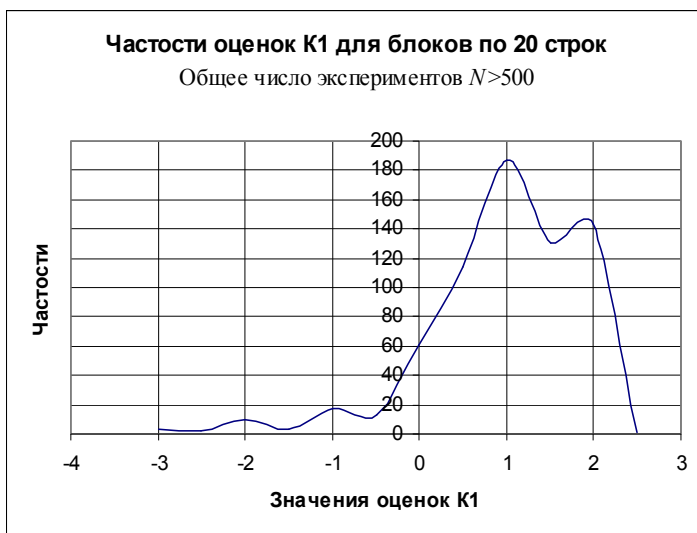


Рис. 2. Экспериментальная функция распределения текущих оценок k_1 .

Как видно из рис. 2, для разных текущих блоков существуют весьма сильные отклонения от среднего.

Наша следующая задача будет состоять в том, чтобы разработать алгоритм, позволяющий найти, каким именно экспериментам в блоке данных (таблица 3) соответствуют большие ошибки оценок, показанные на рис. 2. В частности, для k_1 меньше нуля и больше двух. Эта задача не имеет однозначного решения, поскольку в вычислении каждой оценки участвуют данные не одного, а нескольких экспериментов. Рассмотрим эту проблему подробнее.

4.4. ОБНАРУЖЕНИЕ «ПЛОХИХ» ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Плохим экспериментом будем называть эксперимент, при использовании которого в текущем блоке оценки сильно отличаются от номинальных (из таблицы 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 не известно. Рассмотрим модифицированный алгоритм, позволяющий решить эту задачу [4].

В таблице 4 последний, двенадцатый 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 таблицы 4) отличается от номинального значения $k_{1_{mnk}}$ (из таблицы 1) больше чем на 3 СКО, то есть вычислена с большой ошибкой. При этом под подозрение попадают все входящие в этот блок строки, перечисленные в столбцах 2-6 таблицы 4.

Выберем из таблицы 4 только строки, соответствующие большим ошибкам, и по номерам строк, попавших в столбцы 2-6, построим функцию частоты w номеров строк, участвовавших в вычислении плохих ошибок. График этой функции показан на рис. 3.

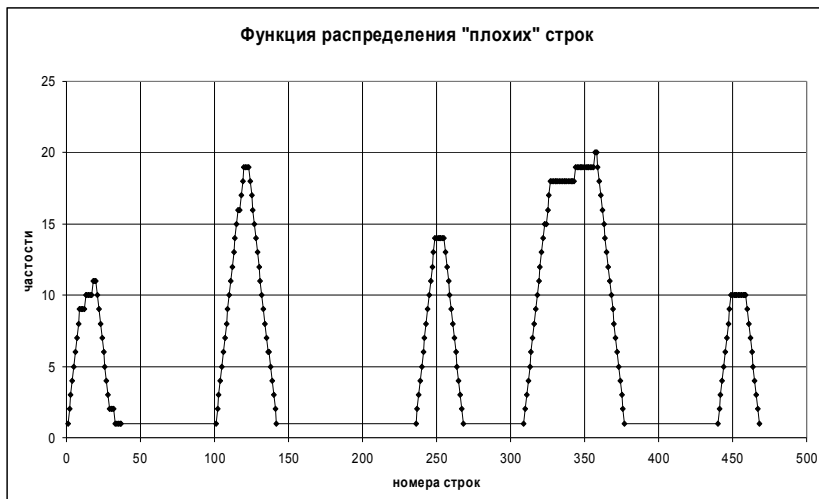


Рис. 3. Функция распределения «плохих» строк.

Как видно из рис. 3, есть несколько областей, в которых резкие отклонения оценок появляются особенно часто. Одна область 115-125, вторая – 330-360. 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 (5), позволяет построить модель, дающую меньшую ошибку прогноза.

3.5. БЛОК-СХЕМА МОДИФИЦИРОВАННОГО АЛГОРИТМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

Ниже, на рис. 4 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. 4. Блок-схема модифицированного алгоритма идентификации динамического объекта.

5. Алгоритмы идентификации класса объектов АСУТП ЯЭУ

5.1. ПРИМЕР АЛГОРИТМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЛЯ КЛАССА ОБЪЕКТОВ АСУТП ЯЭУ

Примером исследуемого алгоритма идентификации для класса объектов АСУТП ЯЭУ будет служить алгоритм идентификации динамического объекта работы Чадеева В.М., Илюшина В.Б., приведенный в работе [3].

В работе [3] 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 В.М., Илюшина В.Б. 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 В.М., Илюшина В.Б. 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 нижние строки матрицы, которые являются малоинформативными, отсеивать, тем самым сокращая число строк в матрице, количество всевозможных переборов из оставшихся строк в усеченной матрице и соответственно, сокращает 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 В.М., Илюшина В.Б. Поэтому излагать математические итерации алгоритма Чадеева В.М., Илюшина В.Б., подобные тем, которые приведены в статье для модифицированного алгоритма, нет смысла, так как результаты расчетов будут отличаться незначительно для обоих алгоритмов, представленных в [3] и [4]. Использование модифицированного алгоритма на практике показывает, что автор настоящей статьи, разработавший модифицированный алгоритм идентификации динамического объекта, действительно внес существенные изменения, в том числе и 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 позволяет увеличить получение более точного значения множественного коэффициента корреляции для объекта управления и существенно повысить его быстродействие.

Сравнительным результатом обоих алгоритмов окажется:

- авторская новизна модифицированного алгоритма идентификации динамических объектов в сравнении с алгоритмом Чадеева В.М., Илюшина В.Б.,
- интерес к модифицированному алгоритму со стороны расчетов оценок параметров для таких сложных объектов как АСУТП ЯЭУ,
- применение на практике модифицированного алгоритма идентификации,
- математической простоте изложения, то есть простоте использования математического аппарата на практике применительно к сложным объектам управления.

5.3 ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты исследований уже существующих алгоритмов идентификации для класса объектов АСУТП ЯЭУ с модифицированным алгоритмом идентификации динамического объекта исследования показывают, что разработанный модифицированный алгоритм идентификации для класса объектов АСУТП ЯЭУ показывает лучшие результаты в проведении экспериментов. Это отражено в точности определения оценок параметров динамических объектов, определении среднеквадратичного отклонения, множественного коэффициента корреляции и других характерных показателей для данного класса объектов. Можно утверждать, что усовершенствованный модифицированный алгоритм идентификации динамических объектов исследования подходит для решения задач, связанных с классом объектов ЯЭУ. Результат очевиден.

6. Заключение

Рассмотрен модифицированный алгоритм идентификации динамического объекта, учитывающий априорную информацию о его параметрах. Модифицированный 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 [4].

Множественный коэффициент корреляции для такой модели будет равен $R=0,934$. СКО прогноза от истинных значений с вырезанными «плохими» строками критического потока составляет 200, то есть уменьшается на 5%. Сравнивая эти результаты с идентификацией по 566 экспериментам, видим, что точность оценок увеличилась.

Литература

1. БЕЗРУКОВ Ю.А., АСТАХОВ В.И., БРАНТОВ В.Г., АБРАМОВ В.И., ТЕСТОВ И.Н., ЛОГВИНОВ С.А., РАССОХИН Н.Г. *Экспериментальные исследования и статистический анализ данных по кризису теплообмена в пучках стержней для реакторов ВВЭР* // Теплоэнергетика – 1976. – № 2. – С. 80-82.
2. ГУСЕВ С.С., ЧАДЕЕВ В.М. *Алгоритм идентификации с переходом в пространство параметров* // Проблемы управления. – 2009. – № 1. – С. 18-21.
3. ЧАДЕЕВ В.М., ИЛЮШИН В.Б. *Алгоритм идентификации динамических объектов с учетом априорной информации о параметрах* // Автоматика и телемеханика. – 2006. – № 7. – С. 133-143.
4. 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.

ARTICLE TITLE, CREATION OF THE MODIFIED ALGORITHM OF IDENTIFICATION OF DYNAMIC CONTROL OBJECT ON EXPERIMENTAL DATA

Sergey Gusev, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, per-
graduated (gs-serg@mail.ru).

Abstract: The article provides a description of the process of modification of the algorithm of identification of dynamic object based on a priori information about its options. The control object is nuclear power plant (NPP). The automated control systems of technological processes (ACSTP) play a key role in the control of the NPP. Our task is to build a mathematical model of dynamic object NPP ACSTP, as well as mapping used for the operation of the modified algorithm of identification with the already existing for this class of objects.

Keywords: algorithm, identification, dynamic object, the space of parameters, mathematical modeling, nuclear power plant.

Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии ...заполняется редактором...

Поступила в редакцию ...заполняется редактором...
Опубликована ...заполняется редактором...