

ПРИКЛАДНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ СТРУКТУРНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ: ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ

Гинсберг К.С.

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65
ginsberg@mail.ru*

Аннотация: Обсуждается проблема рационального прикладного применения математических методов структурной идентификации (ММС). Характеризуется общее состояние исследований в области структурной идентификации систем. Приводится содержательная формулировка проблемы рационального прикладного применения ММС на предпроектных стадиях создания системы автоматической стабилизации (САС). Разрабатывается предварительное решение проблемы.

Ключевые слова: математические методы структурной идентификации, проблема рационального прикладного применения, содержательная формулировка проблемы, структурная идентификация, предпроектные стадии, проектирование системы автоматической стабилизации.

Введение

Проблема структурной идентификации с точки зрения ее научного понимания и решения, несомненно, является самой трудной проблемой идентификации систем, имеющей к тому же высокую научную и практическую значимость. Поэтому исследования ее различных аспектов, начатые еще в 60-е годы прошлого века, продолжают до сих пор и также актуальны и значимы, как и в далекие 60-е годы. Как правило, эти исследования нацелены на создание научного знания в форме новых математических методов структурной идентификации (кратко, ММС).

Наличие значительного числа разработанных математических методов и постоянно растущие запросы инженерной практики в адекватных моделях существенно мотивируют специалистов на изучение проблемы прикладного применения ММС. Тем не менее, несмотря на сильную мотивацию, эта проблема слабо изучена. Более того, отсутствует даже общепризнанная методология исследования этой проблемы. Нет общепризнанного научного ответа на главный вопрос: как рационально осуществить прикладное применение математических методов структурной идентификации.

Под рациональным прикладным применением математических методов структурной идентификации понимается итерационный процесс поиска наиболее благоприятных условий для применения этих методов с точки зрения поставленных в решаемой прикладной задаче целей и итерационный процесс использования этих методов для определения наиболее предпочтительных гипотез об адекватной модельной структуре объекта управления.

В чем трудность постановки и решения указанной научной проблемы? На этот вопрос нет общепризнанного ответа. Автор, например, полагает в качестве рабочей гипотезы, что трудность проблемы обусловлена необходимостью учитывать решающую роль человека в процессах рационального прикладного применения математических методов структурной идентификации.

Настоящий доклад рассматривается как пробное исследование, помогающее лучше осознать определенные аспекты названной проблемы в процессе изучения одной из важных ее конкретизаций. Такой конкретизацией является проблема рационального применения ММС на предпроектных стадиях создания системы автоматической стабилизации (САС) в условиях априорной структурной неопределенности. В настоящем докладе полагается, что содержательная формулировка этой проблемы в разделе «Требования» содержит следующие базовые установки:

- Коллектив разработчиков САС с требуемыми свойствами – субъект рационального прикладного применения ММС.
- Мотив деятельности субъекта – стремление создать приемлемый макетный образец проектируемой САС.
- Цель деятельности субъекта – отыскание приемлемой гипотезы об адекватной модельной структуре объекта управления.
- Применение ММС осуществляется на предпроектных стадиях создания конкретной САС в условиях априорной структурной неопределенности.

Процесс решения подобным образом поставленной проблемы интерпретируется как один из

вариантов поиска адекватной модельной структуры объекта управления. Особенность этого варианта состоит в том, что при его изучении предполагается более детально исследовать процесс формирования наборов рабочих гипотез об адекватной модельной структуре объекта управления.

Цель исследования:

- Изложить пробный вариант содержательной формулировки проблемы рационального прикладного применения ММС на предпроектных стадиях создания системы автоматической стабилизации (САС) в условиях априорной структурной неопределенности.
- Разработать функциональную эталонную модель поведения коллектива разработчиков САС в процессе рационального прикладного применения ММС.

Настоящий доклад продолжает исследование, начатое в работе [1].

1 Понятие о математических методах структурной идентификации

Подавляющее большинство специалистов по проблеме структурной идентификации нацелены в своей научной деятельности на создание математических методов выбора наиболее предпочтительной модельной структуры объекта управления. Эту модельную структуру математические методы выбирают, как правило, из заданного набора вложенных друг в друга произвольных модельных структур безынерционного или динамического объекта управления. Автор называет указанные методы выбора математическими методами структурной идентификации.

Только небольшое количество работ содержит исследования проблем организации поведения субъекта структурной идентификации, включающие различные концептуальные модели человеческого поведения. Опубликованные исследования (смотри, например, работы [2–17]) по указанной проблеме являются важными составляющими научного направления «структурная идентификация систем». Основной целью этого направления, по мнению автора, является разработка и исследование методологии (концептуальных блок-схем поведения), математических методов и программных средств структурной идентификации безынерционных или динамических объектов управления.

На постановку целей этого направления существенно повлияли две установки исследователей. Эти установки, по-видимому, нигде не публиковались, но гипотеза об их наличии всегда возникает у автора под влиянием содержания опубликованных работ по структурной идентификации. Согласно первой установке, изложенной в современной интерпретации, математические методы структурной идентификации являются необходимыми компонентами поиска адекватных математических моделей в условиях априорной структурной неопределенности. Согласно второй установке, разработчики САУ могут самостоятельно и удовлетворительно конструировать адекватную модельную структуру конкретного объекта управления при наличии представительного набора математических методов структурной идентификации. На основе приведенных установок, по-видимому, возникла идея о создании в первую очередь математических методов структурной идентификации. Эту идею в настоящее время реализуют подавляющее большинство исследователей в области структурной идентификации систем. В публикациях этих авторов на теоретический уровень исследования отображается только хорошо формализуемый аспект структурной идентификации, представляющий собой последний этап выбора наиболее предпочтительной модельной структуры объекта управления. Вне рамок этих публикаций остается плохо формализуемый аспект структурной идентификации, представляющий собой человеческое поведение субъекта структурной идентификации. Например, вне рамок традиционного научного исследования оказывается поведение коллектива разработчиков конкретной САУ, который традиционно является субъектом структурной идентификации в условиях априорной структурной неопределенности. Автор полагает, что без объяснения и концептуального моделирования этого человеческого поведения с использованием системной, кибернетической и психологической интерпретаций невозможно понять существенные свойства структурной идентификации как определенного процесса инженерной практики создания конкретной САУ с требуемыми свойствами. Автор считает, что поведение субъекта в основном определяет промежуточные и конечные результаты структурной идентификации. Математические методы структурной идентификации имеют другое предназначение. Эти методы помогают субъекту реализовать спланированный им поиск адекватной модельной структуры объекта управления.

2 Формулировка проблемы: раздел «Условия»

2.1 Введение

Разделы 2, 3 содержат пробный вариант содержательной формулировки проблемы рационального прикладного применения ММС на предпроектных стадиях создания системы автоматической стабилизации (САС) в условиях априорной структурной неопределенности. Разрабатываемая САС в промышленной эксплуатации должна стремиться поддерживать значение выходного сигнала безынерционного объекта управления на заданном постоянном уровне за счет компенсации контролируемого внешнего скалярного возмущения.

Формулировка проблемы состоит из разделов «Требования» и «Условия». Раздел «Требования» содержит центральный вопрос, ответ на который является решением поставленной проблемы. Под центральным вопросом понимается вопрос, с помощью которого формулируется цель исследования проблемы.

Содержание раздела «Условия» должно в идеале представлять собой полное описание производственной среды, в которой коллектив разработчиков САС осуществляет рациональное прикладное применение методов структурной идентификации (МСИ). Ключевым содержанием этого раздела являются те аспекты этой среды, которые существенно влияют на поведение разработчиков при рациональном применении МСИ. Исходя из этой идеи, автор включил в данный раздел не только знание о среде, которым обладают разработчики, но и их интерпретацию этого знания.

2.2 Априорные математические модели объекта управления и процесса измерений выходной переменной объекта

На основе имеющихся эмпирических знаний и данных разработчики САС задают априорную математическую модель объекта управления в виде:

$$y(t) = ku(t) + f(x(t)), t \in T. \quad (1)$$

$y \in Y$ – ненаблюдаемая выходная переменная объекта управления; $u \in U$ – точно известная управляемая входная переменная объекта управления; $x \in X$ – точно известная входная переменная объекта управления; $t \in T$ – независимая переменная, значениями которой являются моменты времени; k – заданный неслучайный параметр, множество допустимых значений которого есть множество R^1 ; $f(\cdot)$ – неизвестный неслучайный функциональный параметр, множество допустимых значений которого есть класс всех функций вида $g: R^1 \rightarrow R^1$; $y(t), u(t), x(t)$ – значения переменных y, u, x в произвольный момент времени t .

Переменные y, u, x представляют в модели (1) соответственно выходной и два входных сигнала объекта управления. Переменная u представляет сигнал управления, а переменная x – сигнал возмущения, действующий на объект управления. Переменная t представляет в модели (1) собственное время реального мира. Параметр k представляет коэффициент передачи объекта управления по каналу управления, а функциональный параметр $f(\cdot)$ – коэффициент передачи объекта управления по каналу возмущения.

Разработчики интерпретируют математическую модель (1) как достоверную модель объекта управления.

Разработчикам известно, как оценить с необходимой точностью коэффициент передачи объекта по каналу управления на основе известных фундаментальных и эмпирических законов, априорных данных. Они могут определить оценку коэффициента передачи на основе априорных знаний или априорных и апостериорных знаний и данных. Поэтому разработчики считают, что в числовых расчетах они могут этой оценкой заменить параметр k в модели (1).

Иная ситуация имеет место с коэффициентом передачи по каналу возмущения. Разработчики полагают, что они обладают небольшим объемом априорных знаний о канале возмущения. Поэтому на основе имеющихся знаний и данных не могут разработать приемлемую точечную оценку коэффициента передачи. Они также полагают, что не могут отыскать приемлемую оценку коэффициента передачи в виде параметрического множества допустимых значений функционального параметра $f(\cdot)$.

Разработчики полагают, что они не могут непосредственно использовать модель (1) для создания САС из-за ее слабого информационного содержания. Они считают, что более информативную модель

можно получить с помощью расширенного поиска адекватной математической модели объекта управления, который включает структурную идентификацию. Разработчики обосновывают использование структурной идентификации необходимостью перехода от структурной неопределенности к параметрической неопределенности при задании множества допустимых значений функционального параметра $f(\cdot)$.

В отношении структурной идентификации разработчики придерживаются системной точкой зрения. Они полагают, что не могут организовать и реализовать структурную идентификацию без точного знания желательных количественных характеристик конечной цели, для достижения которой используются результаты структурной идентификации. Эта конечная цель выступает для них в качестве ведущего мотива деятельности в процессе структурной идентификации и в расширенном поиске адекватной математической модели объекта управления. Для исследуемой проблемы ведущим мотивом деятельности разработчиков в процессе структурной идентификации является стремление создать приемлемый макетный образец проектируемой САС. Поэтому разработка требований к макетному образцу является ключевым процессом предпроектных стадий в условиях априорной структурной неопределенности. Важность этого процесса состоит в том, что разработчики сначала задают требования к приемлемому макетному образцу проектируемой САС и только после этого приступают к организации структурной идентификации.

Коллектив разработчиков САС задает априорную математическую модель процесса измерения выходной переменной объекта управления в виде:

$$v_n = y_n + \varepsilon_n, n = 1, 2, \dots \quad (2)$$

$y_n = y(t_n)$ – значение выходной переменной y объекта управления в момент времени t_n ($n = 1, 2, \dots$); v_n ($n = 1, 2, \dots$) – измерение значения y_n выходной переменной y ; ε_n ($n = 1, 2, \dots$) – погрешность измерения v_n ; $\varepsilon_n, n = 1, 2, \dots$ – последовательность статистически независимых случайных величин, имеющих математическое ожидание $M[\varepsilon_n] = 0$ и дисперсию $M[\varepsilon_n^2] = \sigma^2$; σ^2 – заданный неслучайный параметр; $M[\cdot]$ – символ для обозначения операции нахождения математического ожидания.

Разработчики интерпретируют априорную математическую модель (2) как достоверную модель процесса измерений выходной переменной объекта управления.

2.3 Подход к построению математической модели приемлемого макетного образца проектируемой САС

Создание макетного образца проектируемой САС с приемлемыми свойствами является важным аргументом в пользу идеи о возможности создания проектируемой САС. Желание получить этот аргумент мотивирует разработчиков на существенное упрощение и снижение требований к статическим и динамическим свойствам макетного образца.

Результаты структурной идентификации, которые разработчики используют для создания приемлемого макетного образца, должны быть полезны и для процесса проектирования САС. В противном случае необходимо создавать новый макетный образец для процесса проектирования, что связано с существенными финансовыми затратами. Необходимость переноса результатов структурной идентификации с предпроектных стадий на стадию проектирования мотивирует разработчиков на существенное повышение и усложнение требований к статическим и динамическим свойствам макетного образца проектируемой САС. В результате создание приемлемого макетного образца может стать очень трудной проблемой для разработчиков.

При задании набора требований к приемлемому макетному образцу разработчики стремятся найти приемлемый компромисс. С одной стороны, они должны так выбрать набор требований к приемлемому макетному образцу, чтобы необходимость в структурной идентификации не возникала в процессе проектирования САС. С другой стороны, они должны стараться как можно больше упростить и снизить требования, чтобы уменьшить трудность создания приемлемого макетного образца проектируемой САС.

Подход разработчиков к построению математической модели приемлемого макетного образца проектируемой САС:

- Приемлемый макетный образец должен в опытной эксплуатации поддерживать значение выходного сигнала объекта управления на постоянном уровне y_g ; регулятор приемлемого

макетного образца реализует принцип компенсации возмущений.

- Апостериорная модель объекта управления создается на основе априорной математической модели (1) путем замены неизвестного функционального параметра $f(\cdot)$ оценкой $\tilde{f}: R^1 \rightarrow R^1$; оценка \tilde{f} – результат расширенного поиска адекватной модели объекта управления на основе имеющихся эмпирических знаний и данных и активной познавательной деятельности коллектива разработчиков.
- Закон управления, который реализует регулятор приемлемого макетного образца, создается на основе апостериорной модели объекта управления.
- Показателем качества стабилизации является интегральная среднеквадратическая ошибка.

Реализуя указанный подход, можно получить апостериорную модель объекта управления, математическую модель макетного образца САС и показатель качества стабилизации.

Апостериорная модель объекта управления имеет вид:

$$\tilde{y}(t) = ku(t) + \tilde{f}(x(t)), \quad t \in T. \quad (3)$$

$\tilde{y}(t)$ – оценка значения выходной переменной y в произвольный момент времени $t \in T$.

Математическая модель макетного образца имеет вид:

$$y(t) = ku(t) + f(x(t)), \quad u(t) = (y_g - \tilde{f}(x(t))) / k, \quad t \in T. \quad (4)$$

Показатель качества стабилизации J имеет вид:

$$J = \frac{1}{t_b - t_e} \int_{t_b}^{t_e} (y_g - y(t))^2 dt. \quad (5)$$

t_b, t_e – есть моменты начала и конца опытной эксплуатации макетного образца проектируемой САС.

3 Формулировка проблемы: постановка раздела «Требования»

Основное противоречие, которое, по мнению автора, должен ясно осознавать субъект рационального применения ММС, возникает по следующим причинам. Во-первых, алгоритмы структурной идентификации, которые создаются на основе конкретного математического метода, выбирают предпочтительную модельную структуру объекта управления, исходя из значений собственных показателей качества сравниваемых модельных структур. По сути дела, каждый математический метод структурной идентификации отличается от другого метода тем, какие показатели качества он постулирует и какую предлагает процедуру выбора предпочтительной модельной структуры. Во-вторых, показатели качества, задаваемые каждым методом, только косвенно отражают определенные аспекты показателей качества, характеризующих свойства проектируемой САУ. Поэтому модельная структура, наилучшая с точки зрения значений показателей качества, задаваемых конкретным методом, может оказаться не наилучшей с точки зрения значений показателей качества проектируемой САУ.

Все это означает, что нет достаточных оснований считать, что выбранная предпочтительная модельная структура является адекватной модельной структурой или приемлемой гипотезой об адекватной модельной структуре, позволяющей найти адекватную математическую модель объекта управления. Эта модельная структура может быть адекватной, а может ею и не являться. Субъект не может знать сразу после окончания процедуры выбора, какой вариант в действительности имеет место. При желании он может это узнать, организовав экспериментальные, экспертные и производственные проверки выбранной модельной структуры объекта управления. Изложенные мысли можно выразить в виде формулировки базисного свойства ММС: математические методы структурной идентификации не нацелены на выбор адекватной модельной структуры объекта управления или приемлемой гипотезы об адекватной модельной структуре.

Данное базисное свойство является главной причиной возникновения основного противоречия (в форме несоответствия) процесса рационального прикладного применения ММС. Суть его в следующем: для создания САУ необходима адекватная модельная структура объекта управления, которую нельзя гарантированно получить в каждом выборе модельной структуры с помощью ММС.

Несоответствие между желаемым состоянием выбранной модельной структуры и ее неизвестным фактическим состоянием порождают основную проблему процесса рационального прикладного применения ММС. Ключевое содержание этой проблемы, по мнению автора, выражается с помощью

центрального вопроса проблемы. Приведем его формулировку. Каким должно быть поведение коллектива разработчиков на предпроектных стадиях создания САУ, чтобы у этого коллектива появилась возможность отыскать адекватную модельную структуру в условиях, когда выбор предпочтительной модельной структуры осуществляется математическим методом структурной идентификации?

Из приведенной формулировки центрального вопроса следует, что предварительный ответ на этот вопрос можно получить, если правильно сконструировать функциональную эталонную модель поведения коллектива разработчиков. Вопрос состоит в том, каких принципов должен придерживаться исследователь, чтобы сконструировать необходимую для разрешения проблемы функциональную эталонную модель поведения коллектива разработчиков САУ на предпроектных стадиях создания САУ? Предварительный ответ на этот вопрос содержит основная гипотеза научных исследований по проблеме рационального прикладного применения ММС.

Основная гипотеза исследований в рассматриваемом случае имеет следующую формулировку. Предполагается, что у коллектива разработчиков САУ появится возможность отыскать адекватную модельную структуру объекта управления, если он будет придерживаться следующих принципов:

- Коллектив разработчиков должен быть субъектом рационального прикладного применения ММС.
- Мотивом деятельности коллектива разработчиков должно быть стремление создать приемлемый макетный образец проектируемой САУ.
- Целью деятельности коллектива разработчиков должно быть отыскание приемлемой гипотезы об адекватной модельной структуре объекта управления.
- Применение ММС осуществляется на предпроектных стадиях создания конкретной САУ в условиях априорной структурной неопределенности.
- Каждая выбранная ММС модельная структура, которую коллектив разработчиков желает назвать приемлемой гипотезой об адекватной модельной структуре объекта управления, не может быть названа приемлемой гипотезой без прохождения производственной проверки (испытания).
- Каждое формирование коллективом разработчиков набора рабочих гипотез об адекватной модельной структуре объекта управления не может быть выполнено без анализа и осмысления этим коллективом проведенных экспериментальных, экспертных и производственных проверок выбранных ММС модельных структур.

Соответственно исследователь должен так конструировать требуемую функциональную эталонную модель поведения, чтобы, организовав свое поведение на основе этой модели, коллектив разработчиков был вынужден придерживаться принципов основной гипотезы исследования.

Под производственной проверкой модельной структуры понимается создание на основе этой модельной структуры макетного образца проектируемой САУ и сопоставление значений его показателей качества, полученных в опытной эксплуатации, с требуемыми значениями, соответствующими приемлемому макетному образцу. При согласии, с точки зрения коллектива разработчиков, фактических значений с требуемыми значениями считается, что модельная структура прошла производственную проверку.

Содержательная формулировка проблемы в разделе «Требования» включает:

- Центральный вопрос проблемы.
- Ключевые установки коллектива разработчиков. В частности, принципы основной гипотезы исследования, которые в разделе «Требования» интерпретируются как установки.
- Процедуру остановки процесса рационального прикладного применения ММС.

4 Предварительное решение проблемы: блок-схема модели поведения

На рисунке 1 изображена блок-схема функциональной эталонной модели поведения коллектива разработчиков САУ в процессе рационального прикладного применения ММС в условиях априорной структурной неопределенности. Каждый блок этой графической модели представляет определенную функцию поведения коллектива разработчиков на предпроектных стадиях создания САУ.

Изображенная на рисунке 1 функциональная эталонная модель конструировалась с учетом содержания принципов основной гипотезы исследований и результатов работы [1]. Тем не менее, эта модель рассматривается только как предварительный вариант эталонной модели поведения коллектива разработчиков. Представляется, что в окончательном варианте модель должна более полно отражать базисное содержание принципов основной гипотезы исследований.

Установка на рациональное применение ММС на предпроектных стадиях создания САУ в условиях априорной структурной неопределенности

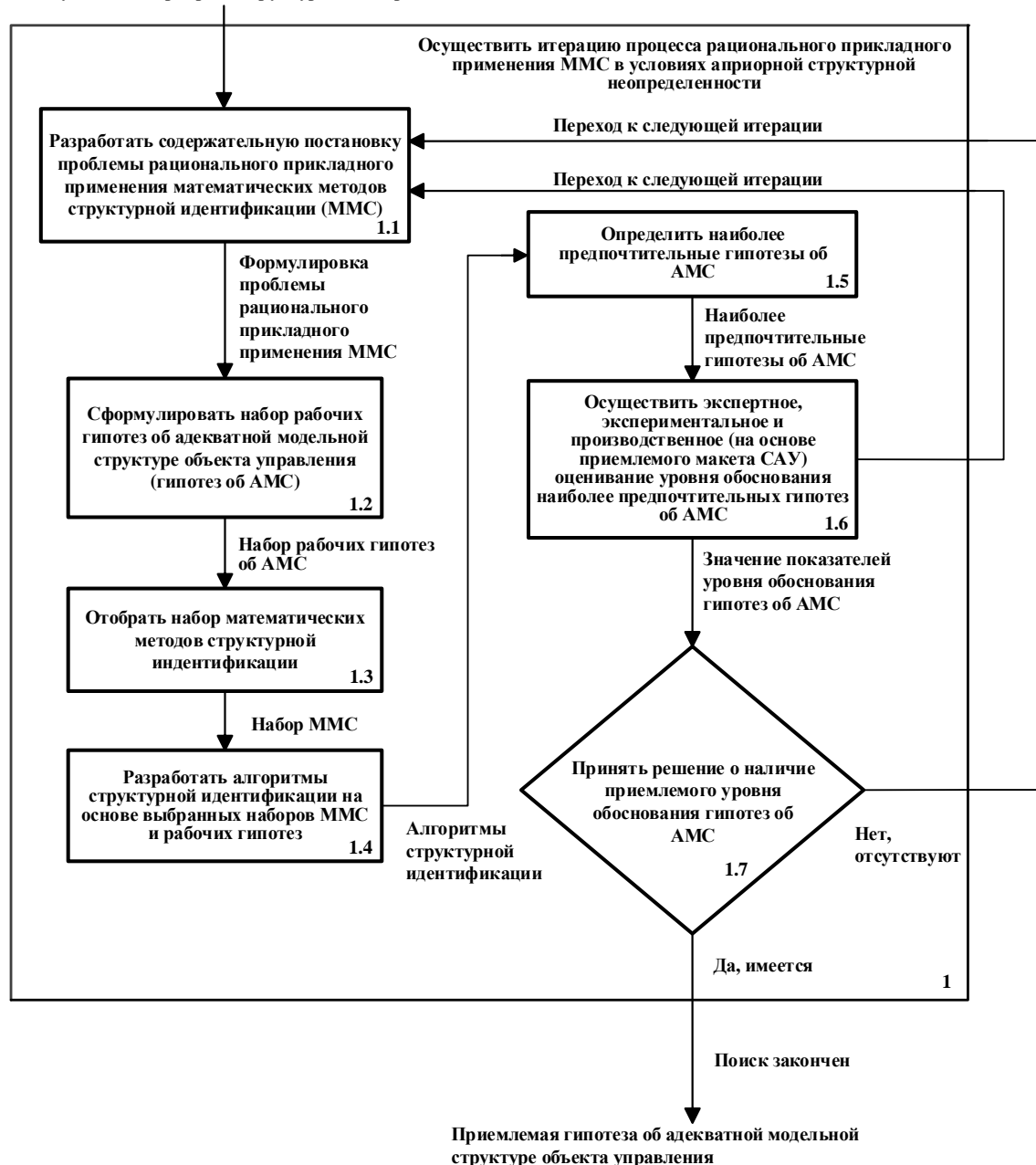


Рис. 1. Блок-схема функциональной эталонной модели поведения коллектива разработчиков САУ в процессе рационального прикладного применения ММС в условиях априорной структурной неопределенности

Согласно графической модели, изображенной на рисунке 1, процесс рационального прикладного применения математических методов структурной идентификации – итерационный процесс.

На каждой итерации этого процесса коллектив разработчиков выдвигает определенный набор рабочих гипотез об адекватной модельной структуре объекта управления. Из заданного набора рабочих гипотез разработчики выбирают наиболее предпочтительные гипотезы об адекватной модельной структуре объекта управления с помощью специально отобранных математических методов структурной идентификации. Эти гипотезы подвергаются экспертным, экспериментальным и производственным проверкам (испытаниям) и по результатам испытаний выбирается наилучшая гипотеза. В случае ее интерпретации как приемлемой гипотезы об адекватной модельной структуре объекта управления разработчики используют эту гипотезу в процедуре оценки неизвестного функционального параметра $f(\cdot)$ модели (1). Заключительный этап оценки неизвестного функционального параметра будет детально изложен в следующих работах автора.

Заключение

Представляется, что наиболее важным продолжением проведенных научных исследований является построение детализированных эталонных моделей поведения коллектива разработчиков, позволяющих более полно отражать базисное содержание принципов основной гипотезы исследований в области рационального прикладного применения ММС. Вторым важным направлением исследований является теоретическое изучение проблемы риска, вызванного прикладным использованием различных ММС на предпроектных стадиях создания САУ в условиях априорной структурной неопределенности.

Литература

1. *Гинсберг К.С.* К вопросу о практическом использовании математических методов структурной идентификации в условиях априорной структурной неопределенности / под ред. С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна // Труды четырнадцатой Международной конференции "Управление развитием крупномасштабных систем" MLSLSD-2021. / Москва (сентябрь 2021 г.). – М.: ИПУ РАН, 2021. – С. 423–433.
2. *Hocking R.R.* The analysis and selection of variables in linear regression // *Biometrics*. Vol. 32. 1976. № 1. – P. 1–49.
3. *Райбман Н.С.* Идентификация объектов управления (обзор) // *Автомат. и телемех.* 1979. № 6. – С. 80–93.
4. *Fasol K.H., Jörgl H.P.* Principles of Model Building and Identification // *IFAC Proceedings Volumes*. Vol. 12. 1979. Issue 8. – P. 505–518.
5. *Isermann R.* Practical Aspects of Process Identification // *Automatica*. Vol. 16, 1980. № 5. – P. 575–587.
6. *Astrom K.J.* Maximum Likelihood and Prediction Error Methods / In: Eykhoff P. (ed) // *Trends and Progress in System Identification*. IFAC Series for Graduates, Research Workers and Practising Engineers. – Pergamon: Elsevier, 1981 – P. 145–168.
7. *Перельман И.И.* Методология выбора структуры модели при идентификации объектов управления // *Автомат. и телемех.* 1983. № 11. – С. 5–29.
8. *Hocking R.R.* Developments in linear regression methodology: 1959–1982 // *Technometrics*. Vol. 25. 1983. № 3. – P.219–230.
9. *Eykhoff P.* Identification theory: practical implications and limitations // *Measurement*. Vol. 2. 1984. № 2. – P.75–85.
10. *Ljung L.* System Identification: Theory for the User. – New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1987. – 519 p.
11. *Эйкгофф П.* Оценка параметров и структурная идентификация // *Автоматика*. 1987. № 6. – С. 21–38.
12. *Haber R., Unbehaven H.* Structure Identification of Nonlinear Dynamic System – A Survey on Input/Output Approaches // *Automatica*. Vol. 26. 1990. № 4. – P. 651–677.
13. *Лотоцкий В.А.* Идентификация структур и параметров систем управления // *Измерение, контроль, автоматизация*. 1991. № 3–4. – С. 30–39.
14. *Ginsberg K.S.* System Laws and Identification Theory // *Automation and Remote Control*. Vol. 63. 2002. № 5. – P. 838–849.
15. *Прангишвили И.В., Лотоцкий В.А., Гинсберг К.С., Смолянинов В.В.* Идентификация систем и задачи управления: на пути к современным методологиям // *Проблемы управления*. 2004. № 4. – С. 2–15.
16. *Ljung L.* Perspectives on System Identification // *Annual Reviews in Control*. Vol. 34. 2010. Issue 1. – P. 1–12.
17. *Карabutov Н.Н.* Структурная идентификация статических объектов: Поля, структуры, методы. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011. – 152 с.