

# К ВОПРОСУ О ПРАКТИЧЕСКОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ СТРУКТУРНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ В УСЛОВИЯХ АПРИОРНОЙ СТРУКТУРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Гинсберг К.С.

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

*ginsberg@mail.ru*

*Аннотация: Предлагается прикладной подход к исследованию проблем практического использования математических методов структурной идентификации в условиях априорной структурной неопределенности. Разрабатывается содержательная постановка задачи исследования рисков, возникающих при практическом использовании математических методов структурной идентификации на предпроектных стадиях создания систем автоматического управления с требуемыми свойствами. Приводятся результаты предварительного исследования рисков. Предлагаются основные ключевые понятия и определения для научных исследований по структурной идентификации.*

Ключевые слова: структурная идентификация, априорная структурная неопределенность, проблемы практического использования, математические методы, подход, исследование рисков, понятия и определения.

## **Введение**

Проблема структурной идентификации с точки зрения ее научного понимания, по-видимому, является наиболее трудной проблемой в области идентификации систем. К настоящему моменту в России и за рубежом опубликовано значительное число научных работ по этой проблеме. В частности, автор настоящей работы опубликовал перечень работ по проблеме структурной идентификации, содержащий 178 ссылок. Для первоначального знакомства с проблемой достаточно содержания работ [1-11].

Большинство исследований по проблеме структурной идентификации посвящены вопросам разработки и/или изучению различных математических методов выбора наиболее предпочтительной модельной структуры из заданного набора вложенных друг в друга модельных структур произвольного технического объекта. Кратко указанные методы будем называть математическими методами выбора модельной структуры или математическими методами структурной идентификации. Только небольшое число работ содержит фрагменты, которые можно рассматривать как исследования проблем методологии структурной идентификации или, другими словами, воспринимать как исследования проблем организации структурной идентификации.

Автор настоящей работы рассматривает как знаковое событие образование в семидесятых годах прошлого века направления исследований по проблеме структурной идентификации. Возможно, впервые на стыке науки управления и теории управления возникает междисциплинарное научное направление. Областью исследований этого направления, по его мнению, являются методология и математические методы структурной идентификации, реализуемой на основе человеческих знаний и измерений входных и выходных сигналов идентифицируемых объектов.

Три ключевые идеи сыграли решающую роль в формировании нацеленности нового направления исключительно на разработку математических методов. Во-первых, идея о необходимости широкого применения математических методов структурной идентификации в процессе поиска адекватных математических моделей производственных процессов. Эта идея является верной не только для семидесятых годов прошлого века, но и в настоящее время. Во-вторых, идея о способности разработчиков систем автоматического управления (САУ) самостоятельно и удовлетворительно решать проблему выбора адекватной модельной структуры объекта управления при наличии достаточно представительного набора математических методов структурной идентификации. Эта идея является верной по отношению к уникальным коллективам разработчиков. Однако она существенно преувеличивает интеллектуальные возможности традиционных коллективов. В-третьих, идея о возможности значительно расширить область практического применения математических методов параметрической идентификации при наличии достаточно представительного набора математических методов структурной идентификации. Эта идея является верной не только для семидесятых годов прошлого века, но и в настоящее время.

К началу восьмидесятых годов прошлого века научная элита нового направления сформировала эталоны постановки и решения исследовательских задач, и направление приобрело собственную парадигму. Дальнейшее его теоретическое развитие происходит под влиянием сформировавшихся традиций.

В настоящее время направление содержит большое число математических методов структурной идентификации и значительное число публикаций. Тем не менее, теоретические исследования продолжаются и весьма далеки до своего завершения из-за отсутствия ясного и четкого научного понимания проблемы структурной идентификации. Представляется, что именно по этой причине до сих пор не разработан представительный набор математических методов структурной идентификации для нестационарных производственных объектов. Отсутствие ясного и четкого понимания не позволяет найти ответы на многие ключевые вопросы. Например. По каким показателям необходимо сравнить различные алгоритмы структурной идентификации? В классе каких алгоритмов, и по какому критерию конкретный алгоритм структурной идентификации является наилучшим? Что представляют собой методы статистического синтеза алгоритмов структурной идентификации?

Отсутствие необходимых для инженерной практики математических методов должно по идее активно стимулировать развитие математических и методологических исследований в области структурной идентификации. Аналогичное влияние должны оказывать и прикладные идеи, возникающие в процессе проведения исследований. Например, идея о возможности существенного сокращения времени на создание систем автоматического управления в условиях априорной структурной неопределенности, если в состав предпроектных стадий включить рационально организованную структурную идентификацию. Тем не менее, судя по публикациям, число исследований не возрастает, а уменьшается. Это, несомненно, связано с трудностями научного понимания объекта и предмета исследования, с необходимостью в одном исследовании использовать знания математических, технических и гуманитарных наук.

Если бы исследование математических методов структурной идентификации ограничивалось только анализом формулировок и используемых при их разработке математического аппарата и концептуальных идей, то относительно этих методов можно было бы сделать следующие утверждения. Математические методы структурной идентификации представляются рационально и логично организованными с точки зрения их теоретического восприятия. Алгоритмы, разработанные на их основе, по идее должны рационально осуществлять выбор наиболее предпочтительной модельной структуры технического объекта. В основу разработки каждого метода всегда положена фундаментальная математическая идея.

Указанные свойства и оценки позволяют интерпретировать математические методы и разработанные на их основе алгоритмы как средства теоретического познания. Чтобы эти средства стали эффективными инструментами практического познания, они должны обладать высоким уровнем научной готовности к практическому использованию в различных современных инженерных практиках.

Под высоким уровнем научной готовности математического метода к практическому использованию понимается наличие научных исследований, содержание которых позволяет разработать необходимую методологическую поддержку субъекта практического использования математического метода. В состав этих исследований, в первую очередь, входят научные работы с теоретическим анализом рисков, возникающих в инженерной практике из-за применения алгоритмов математического метода. Данные исследования также должны включать работы с формулировкой методологических рекомендаций по рациональной организации процесса практического использования математического метода. В-третьих, эти исследования должны включать работы с теоретической оценкой информационных возможностей алгоритмов математического метода в различных условиях их практического применения. Указанным научным целям до сих пор не уделялось серьезного внимания, так как основные усилия были направлены на создание математических методов структурной идентификации.

Настоящая работа рассматривается как поисковое исследование. Ее цель:

- разработка прикладного подхода к исследованию актуальных проблем практического использования математических методов структурной идентификации;
- предварительная теоретическая оценка рисков практического использования математических методов на основе анализа рисков алгоритма Маллоуса и алгоритмов маллоусовского типа;
- разработка предварительных методологических рекомендаций по практическому использованию математических методов;
- представление основных ключевых понятий и определений, разработанных и используемых автором настоящей работы в научных исследованиях по структурной идентификации.

## 1 Основные ключевые понятия и определения

В этом параграфе приведены основные ключевые понятия и определения, разработанные и используемые автором настоящей работы в научных исследованиях по структурной идентификации.

*Понятие о прикладном подходе к проблеме структурной идентификации.* Под прикладным подходом к проблеме структурной идентификации понимается система представлений, содержащая три ключевых установки:

- проводимые исследования следует нацелить на изучение и проектирование конкретных видов структурной идентификации;
- структурную идентификацию следует рассматривать как процесс практического познания технического объекта, системный объект и обязательную компоненту инженерной практики в условиях априорной структурной неопределенности;
- методологию конкретного вида структурной идентификации следует разрабатывать на основе учета особенностей порождающей этот вид инженерной практики и применения общих положений системного, функционального и когнитивного подходов.

*Понятие о практическом познании технического объекта.* Под практическим познанием технического объекта понимается познание этого объекта в процессе инженерной практики. Практическое познание всегда осуществляется не ради отыскания адекватной математической модели технического объекта, а для оперативного и рационального решения поставленной прикладной задачи.

*Понятие о базисных свойствах структурной идентификации.* Под базисными свойствами структурной идентификации понимаются следующие ее особенности:

- субъектом структурной идентификации является коллектив специалистов, который осуществляет практическое познание технического объекта, нацелен на построение его адекватной модельной структуры и мотивирован на решение поставленной прикладной задачи;
- структурная идентификация является обязательной компонентой инженерной практики в условиях априорной структурной неопределенности;
- структурную идентификацию нельзя вычлнить из инженерной практики и рассматривать независимо и автономно от других процессов этой практики, не потеряв при этом существенных для ее функционирования связей.

*Понятие об априорной структурной неопределенности.* Под априорной структурной неопределенностью понимается такое состояние знания субъекта решения поставленной прикладной задачи в момент начала ее решения, когда

- у специалистов отсутствует достоверное знание об адекватной модельной структуре технического объекта;
- в среде специалистов преобладает убеждение, что это достоверное знание нельзя получить только на основе открытых фундаментальных законов естествознания и известных в науке и инженерной практике эмпирических законов и закономерностей.

*Понятие об априорной структурной неопределенности* (для инженерной практики создания САУ с требуемыми свойствами). Под априорной структурной неопределенностью (для инженерной практики создания САУ с требуемыми свойствами) понимается такое состояние знания разработчиков САУ в момент принятия решения о начале процесса автоматизации, когда

- у разработчиков отсутствует достоверное знание об адекватной модельной структуре технического объекта;
- в среде разработчиков преобладает убеждение, что это достоверное знание нельзя получить только на основе открытых фундаментальных законов естествознания и известных в науке и инженерной практике эмпирических законов и закономерностей.

*Понятие о модельной структуре технического объекта.* Под модельной структурой технического объекта понимается семейство его математических моделей, параметризованное скалярным или векторным параметром с заданным множеством допустимых значений в евклидовом пространстве. Все параметры этого семейства выбираются таким образом, чтобы их эмпирические значения можно было определить на основе традиционных методов параметрической идентификации.

*Понятие об адекватной модельной структуре объекта управления.* Под адекватной модельной структурой объекта управления понимается модельная структура технического объекта, которая:

- содержит адекватную математическую модель объекта управления;

- позволяет разработчикам САУ на основе имеющихся эмпирических данных об объекте управления выдвинуть приемлемую гипотезу об его адекватной математической модели.

*Понятие об адекватной математической модели технического объекта.* Под адекватной математической моделью технического объекта понимается математическая модель, имеющая такой уровень функционального подобия моделируемому объекту, при котором на основе этой модели субъект решения поставленной прикладной задачи может найти ее решение, обладающее требуемыми свойствами.

*Понятие об адекватной математической модели объекта управления.* Под адекватной математической моделью объекта управления понимается математическая модель, имеющая такой уровень функционального подобия моделируемому объекту, при котором на основе этой модели коллектив разработчиков может создать САУ с требуемыми свойствами, т.е. САУ, удовлетворяющую требованиям заказчика в отношении ее статических и динамических свойств.

Поиск адекватной математической модели объекта управления в условиях априорной структурной неопределенности осуществляется на предпроектных стадиях создания САУ с требуемыми свойствами. Этот поиск по содержанию конечных результатов является прикладной научно-исследовательской работой (прикладной НИР), которая представляет собой существенную часть аванпроекта по созданию САУ с требуемыми свойствами. Главная цель аванпроекта – научно-техническое и экономическое обоснование возможности и целесообразности разработка САУ с требуемыми свойствами в условиях априорной структурной неопределенности. Вторая по важности его цель – создание проекта технического задания на разработку САУ с требуемыми свойствами.

*Понятие о математическом моделировании в условиях априорной структурной неопределенности.* Под математическим моделированием в условиях априорной структурной неопределенности понимается поиск адекватной математической модели технического объекта в условиях априорной структурной неопределенности, включающий построение и исследование математических моделей технического объекта.

*Понятие о приемлемой гипотезе об адекватной модельной структуре объекта управления.* Под приемлемой гипотезой об адекватной модельной структуре объекта управления понимается гипотеза об адекватной модельной структуре, которая способна выдержать в системном окружении структурной идентификации заданную разработчиками всестороннюю проверку на соответствие требованиям заказчика в отношении статических и динамических свойств разрабатываемой САУ.

*Понятие об адекватной задаче синтеза закона управления.* Под адекватной задачей синтеза закона управления понимается математическая задача, точное решение которой или приемлемое приближение к точному решению является законом управления, который должен реализовывать регулятор реальной САУ для того, чтобы эта САУ обладала требуемыми свойствами.

*Понятие о приемлемой гипотезе об адекватной математической модели объекта управления.* Под приемлемой гипотезой об адекватной математической модели объекта управления понимается математическая модель, которая обладает следующими характеристиками:

- на основе этой математической модели коллектив разработчиков в состоянии создать приемлемый макетный образец разрабатываемой САУ, который в опытной эксплуатации обладает требуемыми статическими и динамическими свойствами;
- коллектив разработчиков полагает допустимым использование этой математической модели в составе исходных данных для окончательного синтеза закона управления объектом управления;
- коллектив разработчиков воспринимает с достаточной степенью уверенности эту математическую модель как адекватную модель объекта или как приемлемое приближение к адекватной математической модели объекта управления.

*Понятие о макетном образце САУ.* Под макетным образцом САУ понимается система автоматического управления, которая состоит из автоматизируемого объекта управления, системы измерения входных и выходных сигналов объекта и макетного образца регулятора САУ.

*Понятие о приемлемом макетном образце САУ.* Под приемлемым макетным образцом САУ понимается макетный образец САУ, который имеет следующие характеристики:

- в опытной эксплуатации этот образец обладает требуемыми статическими и динамическими свойствами;
- относительно этого образца в среде разработчиков доминирует убеждение, что и в процессе эксплуатации данный макетный образец САУ обладал бы требуемыми статическими и динамическими свойствами.

*Понятие об опытной эксплуатации макетного образца САУ.* Под опытной эксплуатацией макетного образца САУ понимаются производственные испытания макетного образца САУ, которые осуществляются во всех существенных для производства режимах функционирования объекта управления макетного образца САУ.

*Понятие о рациональной структурной идентификацией в широком смысле.* Под рациональной структурной идентификацией в широком смысле понимается структурная идентификация, которая организуется субъектом структурной идентификации с рациональным поведением в условиях априорной структурной неопределенности. Понятие «рациональная структурная идентификация» создается не автономно и независимо, а одновременно и совместно с формированием всех понятий концептуальной модели инженерной практики создания САУ в условиях априорной структурной неопределенности.

*Понятие о рациональном поведении субъекта структурной идентификации объекта управления.* Под рациональным поведением субъекта структурной идентификации объекта управления понимается система взаимосвязанных и непосредственно наблюдаемых действий, осуществляемых субъектом структурной идентификации на основе применения гипотетико-дедуктивного метода познания и системного подхода с целью выдвижения приемлемой гипотезы об адекватной модельной структуре объекта управления. Указанное поведение называется рациональным, так как оно реализует основные идеи гипотетико-дедуктивного метода познания и системного подхода.

*Понятие о рациональной структурной идентификации в узком смысле.* Под рациональной структурной идентификацией в узком смысле понимается итерационный процесс порождения и первичной проверки гипотез об адекватной модельной структуре объекта управления в условиях априорной структурной неопределенности (на основе анализа и синтеза знаний и эмпирических данных об этом объекте), целью которого является выдвижение приемлемой гипотезы об адекватной модельной структуре.

*Понятие о структурной идентификации.* Под структурной идентификацией понимается процесс построения модельной структуры технического объекта в условиях априорной структурной неопределенности, целью которого является построение адекватной модельной структуры. Слово «адекватной» в словосочетании «построение адекватной модельной структуры» указывает на наличия необходимого соответствия указанной модельной структуры содержанию (условиям и требованиям) поставленной прикладной задачи, для решения которой в качестве вспомогательного средства организуется структурная идентификация.

*Понятие о методологии структурной идентификации в условиях априорной структурной неопределенности.* Под методологией структурной идентификации в условиях априорной структурной неопределенности понимается детализированная и конкретизированная системно-функциональная эталонная модель поведения субъекта структурной идентификации в условиях априорной структурной неопределенности, содержание которой адекватно отражает базисные свойства структурной идентификации.

*Понятие об системно-функциональной модели поведения субъекта структурной идентификации.* Под системно-функциональной моделью поведения субъекта структурной идентификации понимается концептуальная модель, которая включает не только функциональную модель поведения субъекта структурной идентификации, но и функциональную модель поведения субъекта системного окружения структурной идентификации.

*Понятие об эталонной модели.* Под эталонной моделью понимается модель, которая предназначена для информационной поддержки коллектива разработчиков САУ в качестве эталона для «подражания».

## **2 Прикладной подход к исследованию**

Несмотря на почти пятидесятилетний период разработки математических методов структурной идентификации, в настоящее время фактически полностью отсутствуют детальные численные исследования алгоритмов, созданных на основе этих методов. Данный факт можно достаточно хорошо объяснить наличием существенных трудностей в создании задач исследования алгоритмов структурной идентификации и в нахождении прикладных интерпретаций результатов проведенных исследований. По мнению автора настоящей работы, указанные трудности возникают из-за практически полного отсутствия в публикациях концептуальных моделей структурной идентификации и ее системного окружения. Иными словами, в традиционных научных исследованиях фактически полностью отсутствуют конкретные представления о реальных и возможных условиях практического использования математических методов (кратко методов)

структурной идентификации. Считается, что включение этих представлений в содержание работ по численному исследованию позволит существенно уменьшить трудности организации теоретических исследований алгоритмов структурной идентификации.

Аналогичная идея лежит в основе предлагаемого прикладного подхода к исследованию проблемы практического использования методов структурной идентификации в условиях априорной структурной неопределенности. Фундаментальными основаниями для развития этого подхода являются высокий уровень риска, присущий алгоритмам структурной идентификации, и невозможность их эффективного использования без научно разработанной методологии структурной идентификации. Данный подход называется прикладным, так как он нацеливает исследователя на теоретическое изучение возможных последствий практического использования математических методов структурной идентификации в определенном виде инженерной практики. Выражение «практическое использование методов структурной идентификации» нельзя понимать буквально, то есть считать, что математический метод непосредственно применяется для обработки реальных данных. Непосредственную обработку реальных данных осуществляет алгоритм структурной идентификации, а математический метод в силу своей конструкции является теоретической основой, с помощью которой создается этот алгоритм. Математический метод лучше всего интерпретировать как параметрический алгоритм. Заменяя его параметры определенными значениями, получим соответствующий этим значениям алгоритм структурной идентификации.

Четыре принципа определяют основное содержание предлагаемого подхода: принцип конкретизации, принцип концептуального моделирования, принцип доминирования проблемы риска, принцип максимизации информационных возможностей. Согласно принципу конкретизации, исследователь должен начинать теоретическое исследование с выбора определенного вида инженерной практики. Этот вид инженерной практики интерпретируется как объекта исследования. Именно для этой практики исследователь будет проводить теоретический анализ возможных последствий практического использования методов структурной идентификации. Считается, что конкретизация условий практического применения позволит исследователю лучше понять содержание проблемных ситуаций, в которых пользователь применяет математические методы.

Согласно принципу концептуального моделирования, исследователь должен начинать теоретическое описание условий практического использования методов структурной идентификации с создания определенного набора концептуальных моделей. Этот набор обязательно должен содержать системно-функциональную эталонную модель поведения субъекта структурной идентификации и функциональную эталонную модель поведения субъекта поиска адекватной математической модели технического объекта в условиях априорной структурной неопределенности. Указанные модели интерпретируются как различные системные описания той части инженерной практики, в которой пользователь применяет методы структурной идентификации и/или оценивает возможные последствия от их практического использования. Предполагается, что наличие указанных моделей позволит исследователю осуществить системный анализ рисков и подготовить необходимые содержательные основы для начала исследований по теоретической оценке рисков.

Согласно принципу доминирования проблемы риска, исследователь в первую очередь должен выявить и теоретически оценить риски, возникающие в инженерной практике из-за практического использования метода структурной идентификации. Под риском практического применения алгоритма структурной идентификации, созданного на основе определенного математического метода, понимается возможность непредвиденного наступления благоприятных и неблагоприятных последствий от применения этого алгоритма в процессе решения конкретной прикладной задачи инженерной практики. Согласно прикладному подходу, научная деятельность исследователя должна быть в основном нацелена на исследование проблемы риска. В частности, из-за возможности при высоком уровне риска получить существенные экономические потери. Например, имеются веские основания предполагать, что применение методов структурной идентификации в процессе построения математической модели технического объекта автоматически создает возможность в заранее непредвиденных ситуациях существенно ухудшить качество оценивания выходной переменной объекта. Поэтому использование математической модели, построенной на основе неверно выбранной модельной структуры, может привести к возникновению существенных экономических потерь.

Согласно принципу максимизации информационных возможностей, исследователь должен разработать эффективную прикладную систему рекомендаций по практическому использованию методов структурной идентификации в выбранном виде инженерной практики. Используя ее рекомендации, профессионально подготовленный пользователь должен быть в состоянии

организовать процесс многократного применения конкретного метода структурной идентификации и постепенного увеличения информационных возможностей алгоритмов, созданных на его основе. Под информационными возможностями алгоритма структурной идентификации понимается:

- способность алгоритма структурной идентификации при каждом практическом применении создавать определенный информационный объект в форме наиболее предпочтительной модельной структуры технического объекта;
- информация об адекватной модельной структуре технического объекта, содержащаяся в выбранной алгоритмом наиболее предпочтительной модельной структуре.

Информационные возможности алгоритма структурной идентификации зависят не только от его собственных свойств, но и от используемой разработчиками прикладной системы рекомендаций. Именно система рекомендаций задает состав и структуру процессов подготовки исходных данных, которые затем обрабатываются алгоритмом структурной идентификации. Исходными данными для этого алгоритма является определенный набор модельных структур технического объекта. В зависимости от содержания этого набора меняется степень возможности выбора адекватной модельной структуры. Например, если в наборе нет адекватной модельной структуры, то естественно отсутствует возможность ее выбора. Если в наборе все модельные структуры являются разными адекватными модельными структурами, то из этого набора всегда можно выбрать адекватную модельную структуру. В настоящее время в научной литературе отсутствуют исследования по проблеме максимизации информационных возможностей алгоритмов структурной идентификации.

Автор настоящей работы убежден, что алгоритмы структурной идентификации нельзя применять автономно в рамках конкретной инженерной практики без соответствующей методологической поддержки. Для того, чтобы конкретный алгоритм был полезен для разработчиков САУ и служил для них эффективной информационной поддержкой, необходимо, чтобы этот алгоритм являлся компонентой специально организованного процесса поиска адекватной математической модели технического объекта в условиях априорной структурной неопределенности.

Согласно прикладному подходу, теоретическое исследование проблемы практического использования алгоритмов структурной идентификации состоит из трех стадий. На первой стадии исследователь осуществляет содержательную постановку проблемы исследования риска. Исследованием риска мы называем изучение благоприятных и неблагоприятных последствий от практического применения алгоритмов структурной идентификации в процессе решения определенного семейства практических задач. Содержательную постановку проблемы здесь и далее будем интерпретировать как процесс осознания проблемы. Исследователь начинает процесс осознания проблемы с фиксации определенной проблемной ситуации, а заканчивает наличием содержательной формулировки проблемы исследования риска.

Содержательная формулировка проблемы состоит из условий и требований. Требования содержат описание цели исследования. Условия представляют собой описание процесса решения проблемы в условиях априорной структурной неопределенности. Процесс решения обязательно включает процедуру использования исследуемых алгоритмов структурной идентификации. Описание процесса решения состоит из определенного набора концептуальных моделей структурной идентификации и ее системного окружения. Этот набор обязательно должен содержать системно-функциональную эталонную модель поведения субъекта структурной идентификации в условиях априорной структурной неопределенности и функциональную эталонную модель поведения субъекта поиска адекватной математической модели технического объекта в условиях априорной структурной неопределенности. На первой стадии теоретического исследования исследователь также формулирует цель практического использования алгоритма структурной идентификации и задает процедуру эмпирического тестирования результатов моделирования.

В работе [11] приведена блок-схема системно-функциональной эталонной модели для инженерной практики создания САУ с требуемыми свойствами в условиях априорной структурной неопределенности. Блок-схема функциональной эталонной модели представлена на рисунке 1. Каждый прямоугольник (блок) этой модели представляет определенную функцию поведения, содержание которой отражено в названии блока. Например, блок 1.1 представляет функцию эталонного поведения коллектива разработчиков САУ, целью которого является разработка содержательной постановки проблемы поиска.

На второй стадии исследователь осуществляет математическую постановку проблемы исследования риска. Математическую постановку проблемы будем интерпретировать как процесс формализации имеющегося содержательного знания о проблеме. Исследователь начинает этот процесс с наличия содержательной формулировки проблемы, а заканчивает наличием

математической формулировки этой проблемы. Другими словами, в результате реализации указанного процесса он получает определенную математическую задачу исследования риска.

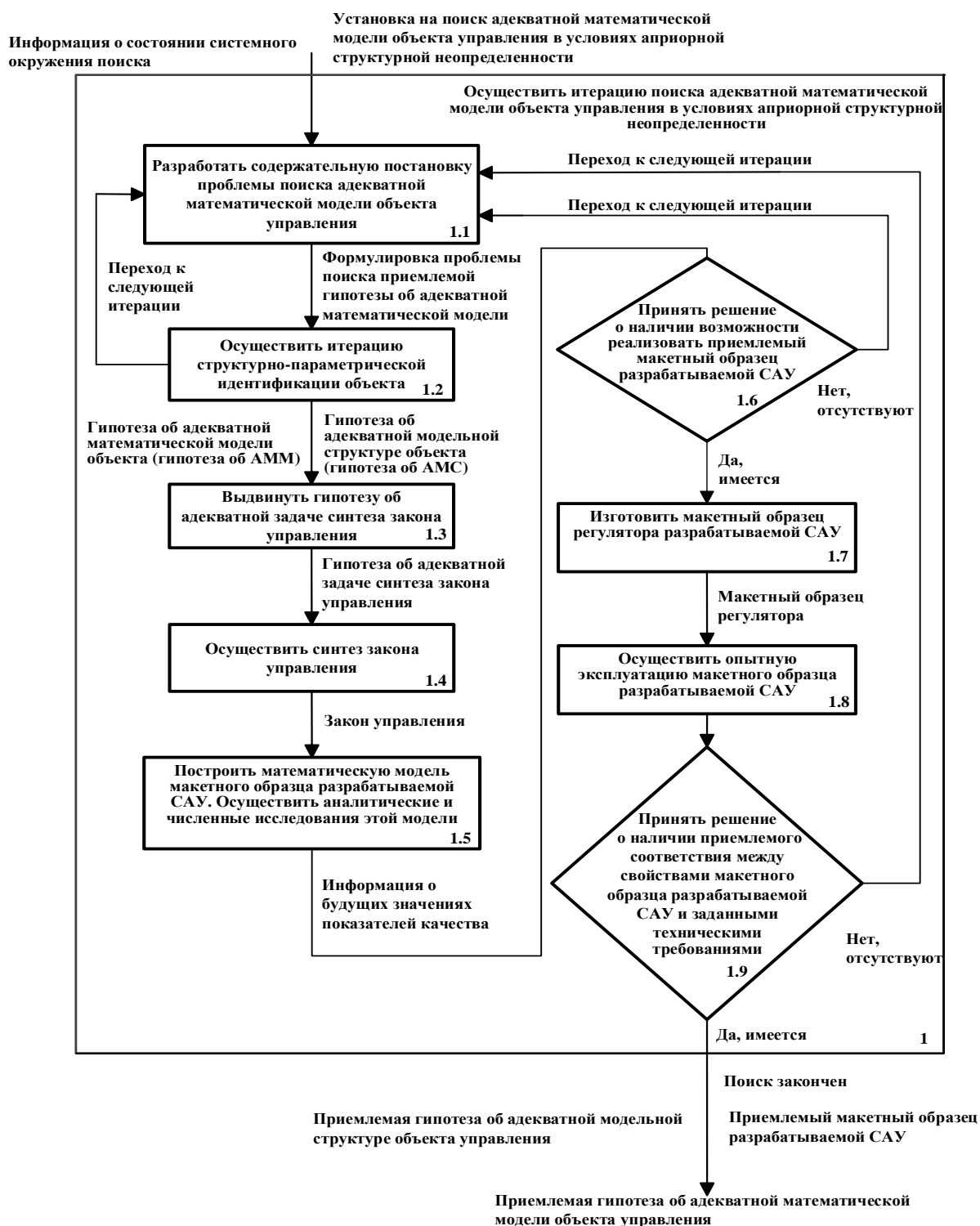


Рис. 1. Блок-схема функциональной эталонной модели поведения коллектива разработчиков САУ с требуемыми свойствами в процессе поиска адекватной математической модели объекта управления в условиях априорной структурной неопределенности

На третьей стадии исследователь осуществляет выбор численного метода решения математической задачи, разрабатывает программное обеспечение и проводит численное исследование. Считается, что прикладная интерпретация результатов исследования и рекомендации по применению алгоритмов являются центральными задачами третьей стадии.



### 3 Предварительное исследование рисков

Проиллюстрируем некоторые возможности прикладного подхода на модельной задаче исследования рисков, вызванных применением алгоритма Маллоуса [12] на предпроектных стадиях создания автоматической системы с требуемыми свойствами. В дальнейших исследованиях эту задачу после соответствующего математического уточнения назовем эталонной или контрольной задачей в области исследования рисков алгоритмов структурной идентификации. Предполагается, что на основе этой задачи или задач аналогичного типа можно осуществить первичный анализ свойств разработанных алгоритмов структурной идентификации и выявить их базисные свойства.

Содержательную формулировку модельной задачи исследования рисков зададим в виде системы определенных вербальных и математических утверждений, приведенных в следующих четырех абзацах.

На текущей итерации структурной идентификации разработчики формулируют набор рабочих гипотез  $H_{p+1}$ ,  $p = 0, 1, 2, 3, 4, 5$  об адекватной модельной структуре технического объекта:

$$H_{p+1} : \psi \in Q_{p+1}, Q_{p+1} = S,$$

$$Q_{p+1} = \left\{ y = \sum_{i=0}^p \mu_i \psi_i(z), x \in [a, b] \mid \mu = [\mu_0, \dots, \mu_p]^T \in R^{p+1} \right\}$$

где  $H_{p+1}$  – рабочая гипотеза;  $Q_{p+1}$  – модельная структура;  $S$  – адекватная модельная структура;  $p + 1$  – номер гипотезы и модельной структуры;  $\psi : R^1 \rightarrow R^1$  – адекватная математическая модель технического объекта, заданная функцией  $\Psi$ ;  $y$  – ненаблюдаемая выходная переменная;  $z = s(x - a)/(b - a)$ ;  $x \in [a, b]$  – наблюдаемая входная независимая переменная;  $s$  ( $s \geq 5$ ) – заданное натуральное число;  $a, b$  – заданные конкретные числа;  $\mu = [\mu_0, \dots, \mu_p]^T$  – вектор-столбец неслучайных параметров;  $\psi_i(z)$  – заданный многочлен  $i$ -й степени;  $\psi_0(z) = 1$ .

Разработчики организуют структурную идентификацию в соответствии с требованиями системно-функциональной эталонной модели, приведенной в работе [11]. В рамках этой структурной идентификации, используя алгоритм Маллоуса или алгоритм маллоусовского типа, они выбирают наиболее предпочтительную рабочую гипотезу из числа заданных рабочих гипотез.

Структурная идентификация в модельной задаче является частью поиска адекватной математической модели идентифицируемого статического объекта, то есть частью специально организованного математического моделирования статического объекта. Разработчики организуют это математическое моделирование в соответствии с требованиями функциональной эталонной модели, изображенной на рис. 1 настоящей работы. Они применяют алгоритм Маллоуса или алгоритм маллоусовского типа в процедуре построения математической модели статического объекта. Построенная модель затем используется для оценки значений выходной переменной этого объекта.

Содержательную формулировку модельной задачи завершим следующим вопросом. Насколько сильно рискуют разработчики в ситуациях, в которых общая гипотеза  $H_6$  является истинной? Численные данные для предварительного ответа на этот вопрос представлены на рисунках 2, 3, 4.

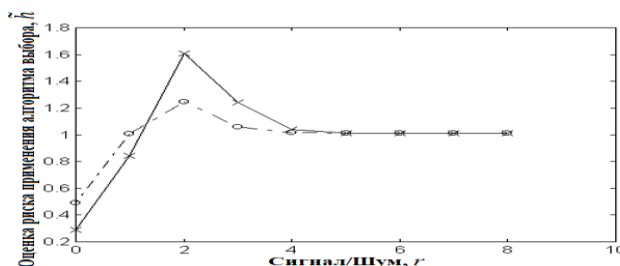


Рис. 2. Графики зависимости оценки риска алгоритма выбора модельной структуры от отношения сигнал/шум в оценке  $\tilde{\beta}$  коэффициентов  $\beta = [\beta_0, \dots, \beta_5]$  канонического представления истинной модели статического объекта

На рисунках 2, 3, 4 изображены графики оценки риска, вызванного использованием алгоритма Маллоуса или алгоритма маллоусовского типа для оценки выходной переменной идентифицируемого статического объекта. Эти графики построены для случая, когда истинная модель статического объекта принадлежит  $Q_6$ . Аналогичные графики получены и в других численных экспериментах.

График со знаком  $\circ$  на рисунке 2 представляет собой оценку риска алгоритма Маллоуса при  $N=10, D=1$ . График со знаком  $\times$  представляет оценку риска алгоритма маллоусовского типа при  $\delta=0.75, N=10, D=1$ ;  $\delta$  – уровень отклонения алгоритма маллоусовского типа от алгоритма Маллоуса.

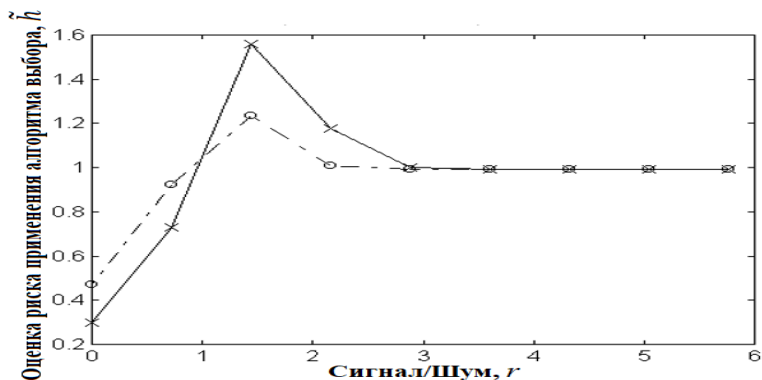


Рис. 3. Графики зависимости оценки риска алгоритма выбора модельной структуры от отношения сигнал/шум в оценке  $\tilde{\beta}$  коэффициентов  $\beta = [\beta_0, \dots, \beta_5]$  канонического представления истинной модели статического объекта

График со знаком  $\circ$  на рисунке 3 представляет собой оценку риска алгоритма Маллоуса при  $N=20, D=25$ . График со знаком  $\times$  представляет оценку риска алгоритма маллоусовского типа при  $\delta=0.675, N=20, D=25$ .

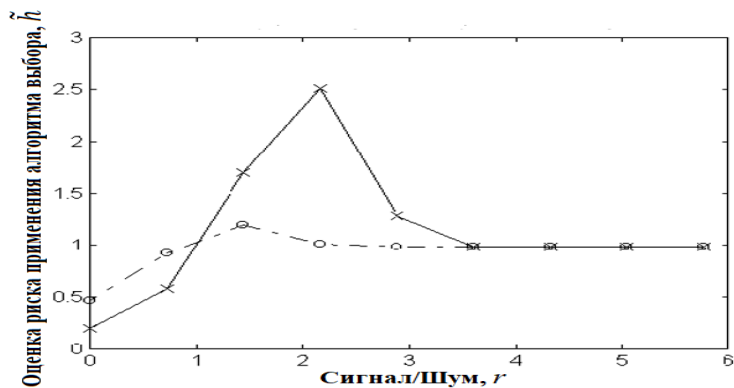


Рис. 4. Графики зависимости оценки риска алгоритма выбора модельной структуры от отношения сигнал/шум в оценке  $\tilde{\beta}$  коэффициентов  $\beta = [\beta_0, \dots, \beta_5]$  канонического представления истинной модели статического объекта

График со знаком  $\circ$  на рисунке 4 представляет собой оценку риска алгоритма Маллоуса при  $N=20, D=25$ . График со знаком  $\times$  представляет оценку риска алгоритма маллоусовского типа при  $\delta=2.25, N=20, D=25$ .

В работе используются знаки  $\tilde{h}, h, r, N, D$ , которые имеют следующий смысл.  $\tilde{h}$  – численная оценка показателя риска, полученная с помощью метода Монте-Карло.  $h = J(\beta, f_a) / J(\beta, f_0)$  – показатель риска, где  $f_a$  – процедура оценивания выходной переменной объекта на основе  $N$  измерений и применения алгоритма структурной идентификации в процедуре оценивания.  $f_0$  – процедура оценивания выходной переменной объекта на основе  $N$  измерений и без использования

алгоритма структурной идентификации.  $J(\beta, f) = M \int_a^b (\tilde{y} - \psi_u(x))^2 dx / (b-a)$ , где  $M$  – символ математического ожидания,  $\tilde{y} = f(x, I)$ ,  $I$  – измерения входных и выходных сигналов;  $\psi_u(x)$  – каноническое представление истинная модель объекта.  $r = \sqrt{\rho^2}$ ,  $\rho^2 = \frac{1}{6} \sum_{i=0}^5 \beta_i^2 / M (\tilde{\beta}_i - \beta_i)^2$ .

$D$  – дисперсия погрешности измерений.

Основываясь на полученных численных данных, можно выдвинуть следующую рабочую гипотезу. В условиях априорной структурной неопределенности пользователь никогда не будет знать без привлечения дополнительной информации, в какой ситуации он находится: выиграл он или проиграл в точности оценивания от применения алгоритма структурной идентификации. Более того, в этих условиях пользователь без привлечения дополнительной информации не будет знать, какой точностью обладает построенная им эмпирическая модель.

## Заключение

Основными результатами работы являются: разработка прикладного подхода, предварительная теоретическая оценка рисков, разработка предварительных методологических рекомендаций, представление основных ключевых понятий и определений. Представляется, что наиболее важным продолжением данной работы является разработка процедуры оценивания точности математической модели, построенной на основе выбранной модельной структуры.

Работа выполнена в рамках комплексного проекта Минобрнауки России № 13.331–2 «Моделирование и интеллектуальное управление производственными процессами в промышленности и электроэнергетике».

## Литература

1. Hocking R.R. The analysis and selection of variables in linear regression // *Biometrics*. 1976. Vol. 32. No. 1. – P.1-49.
2. Astrom K.J. Maximum Likelihood and Prediction Error Methods // *Automatica*. 1980. Vol. 16. No. 5. – P. – 551-574.
3. Fasel K.H., Jörgl H.P. Principles of Model Building and Identification // *Automatica*. 1980. Vol. 16. No. 5. – P.505-518.
4. Isermann R. Practical Aspects of Process Identification // *Automatica*. 1980. Vol. 16. No. 5. P. – 575-587.
5. Hocking R.R. Developments in linear regression methodology: 1959-1982 // *Technometrics*. 1983. Vol. 25. No. 3. – P.219-230.
6. Eykhoff P. Identification theory: practical implications and limitations // *Measurement*. 1984. Vol. 2. No. 2. – P.75–85.
7. Ljung L. System Identification – Theory for User. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1987. – 519pp.
8. Haber R., Unbehaven H. Structure Identification of Nonlinear Dynamic System – A Survey on Input/Output Approaches // *Automatica*. 1990. Vol. 26. No. 4. – P.651-677.
9. Ljung L. Perspectives on System Identification // Plenary Papers, Milestone Reports & Selected Survey Papers of 17th IFAC World Congress. Seoul, Korea. July 2008. – P.47-59.
10. Карабутов Н.Н. Структурная идентификация статических объектов: Поля, структуры, методы. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011. – 152с.
11. Гинсберг К.С. К вопросу об оценивании информационных возможностей алгоритмов структурной идентификации для проектирования систем автоматического управления с требуемыми свойствами [Электронный ресурс] // Материалы 13-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2019), Россия, Москва, , под общей редакцией С.Н.Васильева, А.Д.Цвиркуна, ИПУ РАН, 28-30 сент. 2020. – С. 510-520. <https://mlsd2020.ipu.ru/proceedings/510-520.pdf>.
12. Mallows C.L. Some comments of  $C_p$  // *Technometrics*. 1973. Vol. 15. № 4. – P.661-675.