



УДК 519.71

ИДЕНТИФИКАЦИЯ СИСТЕМ НА ПУТИ СОЗДАНИЯ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ¹

С 26 по 29 января 2015 г. в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН успешно прошла очередная, десятая, международная конференция «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO'15. В ее организации участвовали Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Российский национальный комитет по автоматическому управлению, Российский фонд фундаментальных исследований (проект РФФИ 15-01-20004), Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления Российской академии наук.

В программу конференции вошли 5 пленарных и 98 секционных докладов. Представительство стран по числу докладов: Беларусь — 2, Болгария — 1, Великобритания — 1, Грузия — 1, Ирак — 1, Россия — 91, Украина — 6, Франция — 2. Состоялись два пленарных и девять секционных заседаний.

Содержание конференции отличалось от предыдущих конференций SICPRO особым акцентом на постановку и решение проблем развития математических основ параметрической и непараметрической идентификации, интеллектуальных методов идентификации, методологии и алгоритмов идентификации на предпроектных стадиях создания систем автоматического управления (САУ), информационных технологий и кибербезопасности, оптимальных, адаптивных и робастных систем, стохастических систем, инженерных приложений методов идентификации систем.

В настоящем сообщении рассмотрены только некоторые аспекты конференции, отражающие доминирующую в настоящее время тенденцию превращения научного знания об идентификации

в общую теорию идентификации объектов управления. Термин «общая теория идентификации объектов управления» понимается в широком смысле, т. е. данная теория, как минимум, должна содержать методы и средства, которые необходимы для экспериментального построения математической модели объекта управления любой природы и начального уровня изученности для целей проектирования системы управления или управления этой системой.

Представляется, что в будущем актуальные потребности инженерной практики, теоретических и прикладных направлений науки об управлении будут также активно стимулировать развитие научного знания об идентификации. В этом аспекте X международная конференция «Идентификация систем и задачи управления» явилась очередным, очень важным шагом в развитии научного знания об идентификации объектов управления.

Пленарные доклады SICPRO'15 отразили различные аспекты решения задач идентификации и управления. При реализации традиционных подходов к дифференцированию сигналов в системах автоматического регулирования основная проблема заключается в негативном влиянии коэффициента усиления на точность дифференцирования и устойчивость к высокочастотным шумам. В докладе академика РАН *С.В. Емельянова* и д-ра физ.-мат. наук *А.П. Афанасьева* «Вычисление производных в системах автоматического управления» предлагается подход, основанный на представлении исследуемого сигнала в виде степенной функции, коэффициенты которой вычисляются на основе повторного интегрирования и аппроксимируют производные исходного сигнала. При этом повысить точность дифференцирования и уровень помехозащищенности удастся путем увеличения

¹ По материалам X международной конференции «Идентификация систем и задачи управления».

числа интеграторов, а не увеличения коэффициентов усиления.

В докладе профессора *И.В. Никифорова* (Франция) «Последовательное небайесовское обнаружение/изоляция внезапных изменений с некоторыми приложениями» рассматривается проблема последовательного небайесовского обнаружения и изоляции внезапных изменений. Содержание доклада составляет сравнительный анализ некоторых типичных критериев оптимальности, различных алгоритмов и исследование их статистических свойств. Обсуждается также, что делать с мешающими параметрами и как интегрировать их в процесс принятия решений. Для иллюстрации теоретических результатов рассматриваются задачи контроля целостности навигационной системы и задача контроля аномального объема трафика потока в сетях.

Российская промышленность в настоящее время столкнулась с серьезными вызовами, связанными с усложнением производственных объектов и средств управления ими, с одной стороны, и недостаточной готовностью технологического персонала к работе в новых условиях — с другой стороны. В результате производственные риски возрастают, а попытки их преодоления приводят к дальнейшему усложнению систем управления. Выйти за пределы этого «замкнутого круга» можно только благодаря качественному прорыву в подготовке человека-оператора. Инструменты математического моделирования и информационные технологии предоставляют продвинутое средство решения этой проблемы — компьютерные тренажеры для обучения операторов, автоматизированные системы обучения (в частности, выявления причинно-следственных связей) и др. Однако ключевой вопрос — как разнообразные методы обучения влияют на возможности оператора безопасно и эффективно управлять объектом — до сих пор не получил обоснованного ответа. В докладе д-ра техн. наук *В.М. Дозорцева* и д-ра психол. наук *А.А. Обознова* «Человеческий фактор в промышленности: на стыке современной автоматизации и инженерной психологии» представлены результаты ряда исследований, соединяющих усовершенствованные технологии компьютерного обучения, математического моделирования и экспериментальной психологии для получения качественно новых систем подготовки операторов.

Доклад д-ра техн. наук *А.И. Орлова* «Новая парадигма анализа статистических и экспертных данных в задачах управления» посвящен проблемам и методам анализа статистических и экспертных данных в задачах управления, рассматриваемых в рамках научной специальности «Математические методы экономики». Данная специальность

охватывает организационно-экономическое и экономико-математическое моделирование, эконометрику и статистику, а также экономические аспекты теории принятия решений, системного анализа, кибернетики, исследования операций. В докладе представлены основные положения разработанной автором парадигмы этой научно-практической области знания.

В докладе канд. техн. наук *К.С. Гинсберга* «Проблема структурной идентификации для цели проектирования системы автоматического управления» предложен статистический системно-функциональный подход к проблеме структурной идентификации для целей проектирования САУ. Основные положения подхода: рассмотрение структурной идентификации как подсистемы системы поиска адекватной математической модели для целей проектирования САУ; организация поиска адекватной математической модели как процесса реализации требований *гипотетико-дедуктивного метода* научного познания; признание решающей роли человеческого фактора в процессах структурной идентификации для целей проектирования САУ; представление концептуальной модели деятельности коллектива разработчиков САУ в виде функциональной модели; разработка методов статистического синтеза алгоритмов выбора модельной структуры технического объекта. В докладе представлена система базисных понятий о структурной идентификации для целей проектирования САУ, предложен новый подход к решению проблемы численного исследования алгоритмов структурной идентификации; выполнено численное исследование алгоритмов выбора порядка и описан подход к проблеме статистического синтеза оптимального алгоритма выбора порядка.

Кратко рассмотрим **секционные доклады**.

Параметрическая идентификация. В последнее время все большее распространение получают постановки задач робастного оценивания и управления, для решения которых могут быть применены методы оптимизации при наличии ограничений в виде линейных матричных неравенств. Эти методы приспособлены для решения задач полуопределенного программирования. Особенность задачи оценивания, рассматриваемой в докладе *Е.Н. Платонова* и *К.В. Семенихина* «Минимаксная оценка случайного вектора при наличии поэлементных ограничений на ковариационную матрицу», состоит в том, что множество неопределенности задается поэлементными ограничениями на ковариационную матрицу вектора случайных параметров. Непосредственное преобразование указанной задачи минимаксного оценивания приводит к задаче полуопределенного программирования. Основным результатом состоит в синтезе ите-



рациональной процедуры для совместного решения исходной минимаксной и двойственной задач. Разработанный алгоритм основан на методе условного градиента, принципе множителей Лагранжа и процедуре регуляризации.

В докладе *В.Б. Горяинова и Е.Р. Горяиновой* «Сравнение оценок максимального правдоподобия и наименьших модулей процесса авторегрессии со случайными коэффициентами» рассматриваются оценки наименьших модулей и максимального правдоподобия параметров процесса авторегрессии со случайными коэффициентами. Предложен метод вычисления асимптотической относительной эффективности этих оценок. Показано, что при отклонении распределения вероятности обновляющего процесса авторегрессионной модели от нормального оценка наименьших модулей становится предпочтительнее оценки максимального правдоподобия.

В докладе *В.Б. Горяинова и Е.Р. Горяиновой* «Оценки наименьших модулей в RC -моделях» доказана асимптотическая нормальность оценки наименьших модулей для процесса авторегрессии первого порядка со случайным коэффициентом. Найдено аналитическое выражение для асимптотической относительной эффективности оценки наименьших модулей по отношению к оценке наименьших квадратов. Исследование зависимости асимптотической относительной эффективности от значений параметров «загрязнения» наблюдений позволило авторам доклада сделать вывод, что метод наименьших модулей позволяет получать все более точные по сравнению с методом наименьших квадратов оценки по мере увеличения отклонения распределения вероятностей обновляющего процесса авторегрессионной модели от нормального.

В докладе *И.В. Семушина и Ю.В. Цыгановой* «Вычислительные аспекты параметрической идентификации методом вспомогательного функционала качества» рассмотрены вычислительные аспекты рабочей схемы параметрической идентификации LQG систем методом вспомогательного функционала качества; LQG системами названы стохастические дискретные системы с линейными моделями, квадратическим критерием качества и гауссовыми помехами. Для вычисления вспомогательного функционала качества и его градиента впервые применен новый устойчивый к ошибкам машинного округления адаптивный расширенный ортогонализированный UD -фильтр. Приведен пример параметрической идентификации суточной термометрии теплового гомеостаза человека. Результаты численных экспериментов демонстрируют работоспособность предложенных алгоритмов.

Задача параметрической идентификации линейной динамической системы значительно усложня-

ется при наличии неопределенных аддитивных составляющих в наблюдениях. Примером могут служить синусоидальные наводки с неизвестными заранее значениями частоты, фазы и амплитуды, а также постоянные смещения, линейные и другие функции времени, описываемые дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами. Предварительная фильтрация таких паразитных составляющих без учета уравнения, которому они подчиняются, приводит к искажению полезного сигнала. В указанных условиях традиционно формулируется задача совместного оценивания параметров уравнений как динамической системы, так и уравнения помех, что гарантирует последующее состоятельное оценивание сигналов системы и помех и их успешное разделение. В докладе *А.А. Ломова* «Совместная идентифицируемость параметров линейных динамических уравнений объекта и помехи» рассмотрена задача параметрической идентификации линейного динамического объекта при наличии аддитивных детерминированных помех, описываемых динамическими уравнениями с неопределенными начальными условиями и коэффициентами. Получены необходимые и достаточные условия локальной идентифицируемости параметров уравнений объекта и помех.

В докладе *А.В. Климова* «Модификация операторного метода идентификации линейных динамических систем при ограничениях на параметры» рассмотрена задача оценивания параметров линейного дифференциального уравнения с линейными ограничениями на параметры и аддитивными возмущениями в наблюдениях. Предложено применять операторно-алгебраический метод идентификации, модифицированный на случай ограничений в виде равенств. Проведено численное сравнение операторно-алгебраического метода с вариационным методом идентификации, асимптотически оптимальным при большом числе наблюдений. По результатам численных экспериментов сделан индуктивный вывод, что оценки параметров, полученные с помощью операторно-алгебраического метода, более точные, чем оценки вариационного метода.

Системы дифференциальных уравнений с малым параметром при части старших производных относятся к классу сингулярно возмущенных систем и возникают при исследовании и моделировании объектов, которые совершают одновременно медленные и быстрые движения. Если значение этого параметра неизвестно, то наряду с задачей оценивания состояния при известном малом параметре возникает задача оценивания неизвестного малого параметра. В докладе *О.Б. Цехан* «О восстановлении вместе с параметром состояния линейной стационарной сингулярно возмущенной

системы второго порядка» совместно решаются две указанные задачи для линейной стационарной сингулярно возмущенной системы, описываемой двумя дифференциальными уравнениями с неизвестным малым параметром при одной из старших производных. Разработаны процедуры оценивания состояния, зависящие от малого параметра. Получены условия, при которых возможно оценивание состояния независимо от значения малого параметра. Предложены процедуры оценивания неизвестного малого параметра. Выявлены условия, при которых такое оценивание принципиально возможно.

В основе методов упрочнения рабочих поверхностей силовых машин лежат сложные физико-химические процессы. Поэтому по-прежнему актуальны проблемы, связанные с разработкой математических моделей этих процессов. В частности, востребованы матричные регрессионные модели, важный класс которых образуют регрессионно-тензорные системы. Эти системы, с одной стороны, весьма близки по своим свойствам к полиномиальным, допуская достаточно детальное аналитическое описание на базе тензорного исчисления, а с другой, приобретают важную роль в нелинейном моделировании многофакторных трибологических свойств синтезируемых металлопокрытий. В докладе *В.А. Русанова, С.А. Агафонова, А.В. Данеева и С.В. Лямина* «Апостериорное моделирование оптимального многофакторного режима упрочнения металлопокрытий» разработана апостериорная многомерная регрессионно-тензорная модель оптимального многофакторного физико-химического процесса упрочнения металлопокрытий. Предложена робастно-адаптивная стратегия формирования целевого функционала физико-механического качества металлообработки.

Непараметрическая идентификация. По этой тематике заслуживают внимания доклады: *Н.М. Маркович* «Непараметрическое оценивание экстремального индекса с использованием метода разделения»; *В.О. Васильев, А.В. Добровидов* «Об оценивании дискретных состояний ненаблюдаемой марковской цепи»; *В.Э. Тевосян, А.В. Добровидов* «Непараметрическая оценка экономической волатильности»; *А.А. Корнеева, А.В. Медведев, Е.Д. Михова* «Об управлении H -процессами»; *С.В. Павленко, В.Д. Павленко* «Регуляризация процедуры идентификации нелинейных систем в виде моделей Вольтерра»; *В.М. Трояновский, О.А. Сердюк* «Оценка погрешности идентификации вследствие игнорирования эффекта «запасенной энергии»»; *А.Н. Агаджанов* «Идентификация аппроксимативно-фрактальных функций управления распределенными системами методом Фурье — Рисса».

Оптимальные, адаптивные и робастные системы. По данной тематике представлены доклады:

А.Л. Бунич «Цена управления линейно-квадратичной системой с неполной информацией о спектральном составе возмущений»; *М.Н. Гончарова* «О некоторых характеристиках линейной задачи оптимального быстрогодействия с линейным фазовым ограничением»; *В.Н. Афанасьев* «Алгоритмическое конструирование в задачах идентификации неопределенных объектов»; *В.А. Кубышкин, С.С. Постнов* «Оптимальное управление линейными системами нецелого порядка»; *В.А. Воронов, А.В. Лакеев, Ю.З. Линке, В.А. Русанов* «К реализации динамических систем: оценка достоверности в процессе юстировки матрицы реализации»; *С.П. Круглов* «Адаптивная стабилизация неминимально-фазового объекта на основе идентификационного алгоритма»; *Е.Л. Еремин, Е.А. Шеленок* «Адаптивно-периодическая система управления нелинейным объектом с изменяющимися режимами функционирования»; *В.Н. Азарсков, Л.С. Житецкий, К.Ю. Соловчук* «Идентификационный подход к задаче робастного управления многосвязными статическими объектами с нестатистическими неопределенностями»; *А.А. Кабанов* «Композиционный синтез нелинейных сингулярно возмущенных систем на основе метода линеаризации обратной связью»; *В.Д. Юркевич* «Синтез регуляторов для многомерных систем на основе метода разделения движений»; *С.А. Краснова, А.В. Уткин* «Синтез инвариантной системы слежения для объектов с одним входом и одним выходом без ввода автономных динамических моделей внешних воздействий»; *Е.И. Атамась, А.В. Ильин, В.В. Фомичев* «Обращение векторных линейных систем с запаздыванием нулевого относительного порядка»; *Н.Н. Карабутов, В.М. Лохин, С.В. Манько, М.П. Романов* «Структурная идентификация динамических объектов на основе анализа характеристических показателей Ляпунова».

Интеллектуальные методы идентификации. Научные методы построения математических моделей на основе использования технологических знаний и данных начали разрабатываться сравнительно недавно. Потребность в указанных методах вызвана не только современными требованиями к качеству математических моделей, но и значительным расширением сферы практических приложений алгоритмов идентификации. В первую очередь, это относится к системам управления с прогнозирующей моделью, разработка которых становится все более актуальной.

В настоящее время наиболее полно разработан и математически обоснован метод построения прогнозирующих моделей объекта управления на основе процедуры ассоциативного поиска. Согласно этому методу, прогнозирующая модель формируется каждый раз заново в текущий момент времени на основе технологической базы знаний,



которая с течением времени обновляется и уточняется. Ассоциативный поиск представляет собой процедуру, основанную на интеллектуальном анализе данных. Содержание этого метода хорошо иллюстрирует новую тенденцию, когда метод идентификации конструируется как автоматизированная процедура, использующая при построении математической модели технологические знания. В докладе *Н.Н. Бахтадзе, В.А. Лотоцкого, Е.А. Сакрутиной* «Идентификационный анализ нелинейных нестационарных объектов» рассмотрены возможности прогнозирующих ассоциативных моделей для предупреждения неустойчивости объекта. Рассмотрен как случай стационарных динамических объектов, так и некоторые классы нестационарных объектов. Сформулированы условия устойчивости ассоциативной модели в аспекте анализа спектра кратного-масштабного вейвлет-разложения, а также условия устойчивости ассоциативной модели для мультимодальных объектов.

В докладе *А.И. Дивеева* «Вариационные методы символьной регрессии для задач управления и идентификации» рассмотрено применение методов символьной регрессии для решения задач идентификации и синтеза системы управления. Представлено описание трех методов символьной регрессии: метода сетевого оператора, метода вариационного генетического программирования и метода вариационного аналитического программирования. Определены малые вариации методов генетического и аналитического программирования. Показано, что введенные вариации обладают свойством полноты. Приведен пример построения математической модели мобильного робота методом сетевого оператора по экспериментальным данным.

В докладе *Ю.Р. Владова, А.Ю. Владовой* «Аналитическая технология интеллектуального управления состоянием техногенных объектов» изложены различные аспекты построения и использования разработанной технологии интеллектуального управления состоянием техногенных объектов определенного типа. Разработанная технология позволяет формировать по результатам идентификации полноценную управленческую информацию о состоянии техногенного объекта, позволяющую существенно сократить объемы обследования и ремонтных работ благодаря мониторингу изменения состояния до и после ремонтов.

В докладе *А.Н. Грачева, В.М. Понятского, Аль-Сабула Али Хуссейн Хасана, А.А. Мартьянова* «Корреляционная идентификация линейных динамических объектов с использованием генетического алгоритма» представлена инженерная методика параметрической идентификации линейных динамических объектов. Данная методика основана на идеях типовой табличной идентифи-

кации *Н.С. Райбмана* и применении для минимизации функции потерь специального генетического алгоритма с резервной элитной популяцией. Представлены результаты имитационного моделирования процесса идентификации с помощью указанного алгоритма. Приведено краткое описание программного комплекса «Идентификация», реализующего предложенную методику.

К сожалению, объективные ограничения на объем данной публикации не позволяют сделать полноценный обзор и тем более раскрыть содержание представленных на конференции разнообразных по тематике и, безусловно, интересных докладов. Более подробно ознакомиться с представленными работами можно в опубликованных материалах конференции¹.

Заключение. Развитие методологии, понятийных и математических средств идентификации сегодня так же актуально и практически значимо, как и в 1950-е гг., когда она зародилась под влиянием насущных проблем инженерной практики. Более того, в настоящее время в условиях интенсивного роста и совершенствования информационных технологий развитие идентификации систем переживает новый подъем и возрождение. Постоянная необходимость в оптимизации и ускорении процесса решения инженерных задач путем рациональной идентификации стимулирует развитие понятийного, математического и методологического аппарата идентификации систем.

Идентификация систем как научная дисциплина, в которой порождается и концентрируется рациональное знание о механизмах идентификации, прежде всего, технологических процессов, может в силу своей уникальной проблематики рассматриваться в качестве одного из базисных направлений науки об управлении.

*Председатель Оргкомитета Н.Н. Бахтадзе
Заместитель председателя
Программного комитета К.С. Гинсберг
Л.П. Боровских*

Бахтадзе Наталья Николаевна — д-р техн. наук, зав. лабораторией, ☎ (495) 334-92-01, ✉ bahfone@ipu.ru,

Гинсберг Константин Симонович — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, ☎ (495) 334-87-59, ✉ ginsberg@mail.ru,

Боровских Леонид Петрович — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, ☎ (495) 334-92-00, ✉ borovski@ipu.ru,

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

¹ *Труды X международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO'15 [Электронный ресурс] / Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. — М.: ИПУ РАН, 2015. — 1484 с. — 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). — ISBN 978-5-91450-162-1.*