ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 2 (143)
февраль
2013

Редакционный совет:
БОЛОТНИК Н. Н.
ВАСИЛЬЕВ С. Н.
КАЛЯЕВ И. А.
КРАСНЕВСКИЙ Л. Г.
КУЗНЕЦОВ Н. А.
ЛЕОНОВ Г. А.
МАКАРОВ И. М.
МАТВЕЕНКО А. М.
МИКРИН Е. А.
ПЕШЕХОНОВ В. Г.
РЕЗЧИКОВ А. Ф.
СЕБРЯКОВ Г. Г.
СИГОВ А. С.
СИРОТКИН О. С.
СОЙФЕР В. А.
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М.
ФЕДОРОВ И. Б.
ЧЕНЦОВ А. Г.
ЩЕРБАТЮК А. Ф.
ЮСУПОВ Р. М.

Главный редактор:
ФИЛИМОНОВ Н. Б.

Заместители гл. редактора:
ПОДУРАЕВ Ю. В.
ПУТОВ В. В.
ЮЩЕНКО А. С.

Ответственный секретарь:
БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционная коллегия:
АЛЕКСАНДРОВ В. В.
АНТОНОВ Б. И.
АРШАНСКИЙ М. М.
БУКОВ В. Н.
ВИТТИХ В. А.
ВОСТРИКОВ А. С.
ГОЛУБЯТНИКОВ И. В.
ГРАДЕЦКИЙ В. Г.
ИВЧЕНКО В. Д.
ИЛЬЯСОВ Б. Г.
КОЛОСОВ О. С.
КОРОСТЕЛЕВ В. Ф.
КУЗЬМИН Н. Н.
ЛЕБЕДЕВ Г. Н.
ЛОХИН В. М.
НОРЕНКОВ И. П.
ПАВЛОВСКИЙ В. Е.
ПРОХОРОВ Н. Л.
РАПОПОРТ Э. Я.
СЕРГЕЕВ С. Ф.
ТИМОФЕЕВ А. В.
ФИЛАРЕТОВ В. Ф.
ФРАДКОВ А. Л.
ФУРСОВ В. А.
ШАЛОБАЕВ Е. В.
ЮРЕВИЧ Е. И.

Редакция:
ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕХАТРОНИКИ

Шалобаев Е. В., Толочка Р. Т. О рекомендациях IFToMM по терминологии в области мехатроники . . . 2

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Ким Д. П. Маргинальная устойчивость и синтез систем управления максимальной степени устойчивости . . . 6

Асанов А. З., Демьянов Д. Н. Аналитический синтез многосвязного регулятора квазиадаптивной системы управления . . . 12

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ

Веселов Г. Е., Попов А. Н., Радионов И. А. Энергосберегающее управление асинхронным тяговым двигателем: синергетический подход . . . 18

Новоселов Б. В. Использование критериев оценки плавности работы при проектировании следящих приводов . . . 22

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Джамалбеков М. А. Алгоритм прогнозирования разработки газоконденсатных пластов при различных реологических режимах . . . 29

Гаращенко Ф. Г., Матвиенко В. Т. Адаптивный метод дистанционного обнаружения химических компонентов в растениях на основе градиентного подхода . . . 34

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Инсаров В. В., Тихонова С. В. Задача принятия решений при комплексировании изображений различных спектральных диапазонов . . . 38

Манько С. В., Пименов Д. А. Визуальная ассоциация данных в автономных робототехнических системах на основе метода вероятностной фильтрации . . . 42

Бимаков В. А., Бимаков Е. В., Касимов Т. Р. О применении воксельных вычислителей для решения задач стереозрения и навигации автономного робота . . . 47

Журнал в журнале
"УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА В АВИАКОСМИЧЕСКИХ И МОРСКИХ СИСТЕМАХ"

Алгулиев Р. М., Оруджов Г. Г., Сабзиев Э. Н. Восстановление потерянной полетной информации методом нейронных сетей . . . 56

Алешкин В. В., Плотников П. К., Челноков Ю. Н. Определение конфигурации блока датчиков при асимптотическом оценивании параметров движения . . . 60

Мироненко А. А. Модель программного движения судна в стесненных водах . . . 65

Contents . . . 71

Журнал входит в Перечень периодических изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук; журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу:
http://novtex.ru/mech, e-mail: mech@novtex.ru

© Издательство "Новые технологии", "Мехатроника, автоматизация, управление", 2013

УДК 621.865.8

Е. В. Шалобаев, канд. техн. наук, доц.,
shalobaev47@mail.ru,
Санкт-Петербургский национальный
исследовательский университет
информационных технологий,
механики и оптики, Россия,
Р. Т. Толочка, д-р техн. наук, проф.,
rymantas.tolocka@ktu.lt,
Каунасский технологический университет, Литва

О рекомендациях IFToMM по терминологии в области мехатроники

Рассматриваются актуальные вопросы терминологии в области мехатроники в связи с 25-летием появления в России термина "мехатроника", а также для распространения терминов, рекомендованных постоянным комитетом по стандартизации терминологии Международной организации по теории машин и механизмов.

Ключевые слова: *мехатроника, микро- и наномехатроника, терминология, международный транслятор, микросистемная техника, уровневый подход, триада "сенсоры—контроллер—актюатор", мехатронная система*

В канун 25-летия выхода в свет русского издания монографии "Мехатроника" японских ученых под редакцией Т. Исии [1] необходимо вернуться к проблемам терминологии в области мехатроники. Можно с полной уверенностью констатировать, что становление мехатроники как науки состоялось, что показывают публикации, отражающие как положение дел в науке и технике [2—5], так и в деле подготовки специалистов в рассматриваемой области [6—10]. Однако несмотря на две волны интереса к рассматриваемой проблеме [11—22] общепризнанная терминология до сих пор отсутствует.

В России действует государственный образовательный стандарт (ГОС) для подготовки специалистов в области мехатроники, который является лишь отраслевым нормативным документом. В первой (1995 г.) и второй (2000 г.) редакциях даны определения термина "мехатроника". В последней редакции ФГОС-2009 определен как сам термин "мехатроника", так и термин "мехатронная система" [10].

Мехатроника — область науки и техники, основанная на системном объединении узлов точной механики, датчиков состояния внешней среды и самого объекта, источников энергии, исполнительных механизмов, усилителей, вычислительных устройств.

Мехатронная система — единый комплекс электромеханических, электрогидравлических, электронных элементов и средств вычислительной техники, между которыми осуществляется постоянный динамически меняющийся обмен энергией и информацией, объединенный общей системой автоматического управления, обладающей элементами искусственного интеллекта.

Постоянный комитет по стандартизации терминологии (РС "А") Международной организации по теории машин и механизмов (IFToMM) в 2002 г. разослал проект, в котором предлагались трактовки терминов для использования в области мехатроники. После ознакомления научной общественности с указанным проектом и заключения ряда экспертов [14] РС "А" IFToMM были подготовлены рекомендации по терминологии в области мехатроники, принятые IFToMM [15]. В международном трансляторе по теории механизмов и машин даны термины и их толкование как на английском языке, так и на русском языке.

Несмотря на наличие рекомендаций IFToMM их использование не стало общепринятым фактом. Так, даже в широко известных и используемых книгах проф. Ю. В. Подураева и его коллег [3, 5, 6] есть упоминания о рекомендациях IFToMM, но фактически эти рекомендации не используются. Интерес к проблемам терминологии в области мехатроники периодически проявляется, как это следует из работ так называемых "нулевых" годов [12—20], так и работ следующего десятилетия [21—26].

Данная проблема была обсуждена на 23-й (Беларусь, Гомель, 2010 г.) и 24-й (Германия, Ильменау, 2012 г.) рабочих совещаниях комитета "А" IFToMM [4, 23], и данная публикация, принадлежащая членам РК "А", является реализацией одного из направлений принятых на них решений по ознакомлению широкой научной общественности с рекомендациями международного транслятора в области мехатроники. В качестве иллюстрации приведем ряд следующих терминов на русском языке.

Мехатроника — связующая комбинация механики, электротехники, электроники и информационных технологий для создания технических систем с искусственным интеллектом, в особенности механизмов и машин.

Мехатронная система — система, созданная на основе принципов мехатроники.

Мехатронный подход — интегральный междисциплинарный подход к разработке мехатронной системы.

Микромехатроника — подобласть мехатроники, относящаяся к устройствам и системам с размерами в несколько миллиметров и меньше.

Наномехатроника — подобласть мехатроники, относящаяся к устройствам и их системам, соизмеримым с молекулами.

Адаптивная механика — раздел мехатроники, в котором рассматриваются интеллектуальные устройства и адаптивные структуры, способные к изменению их поведения в соответствии с изменениями в окружающей среде и их внутреннего состояния.

Актуатор — устройство, оказывающее непосредственное воздействие на процесс, другие механические устройства или окружающую среду для выполнения какого-либо полезного действия.

Интеллектуальный актуатор — автономно действующий актуатор, состоящий из сервопривода и вычислительного устройства с соответствующим программным управлением, служащего для управления, восприятия и обмена информацией.

Интеллектуальная машина — машина, обладающая искусственным интеллектом.

Интеллектуальный материал — композиционный материал (структура), обладающий свойствами, соответствующими примитивному интеллекту.

"Умный" материал (система, продукт) — материал (система, продукт), способный к достаточно сложному поведению за счет присущих ему свойств интеллектуаного интеллекта.

Адаптивная машина — интеллектуальная машина, обладающая интеллектуальным свойством адаптивности.

Активный материал (структура) — материал (структура), способный реагировать на возмущения благодаря внутреннему преобразованию энергии или изменению собственных параметров.

Механизм переменной структуры [с переменными параметрами] — регулируемый механизм, структура (параметры) которого могут быть изменяемы.

Регулируемая структура — структура, параметры или компоновка составляющих которой могут изменяться в целях улучшения функционирования.

Интеллектуальный датчик — автономная единица, интегрирующая в себе функции ощущения, восприятия, переработки аналогового и дискретного сигнала, автоматической и самокалибровки и компенсации.

Система датчиков — система, состоящая из нескольких датчиков, используемая в целях дополнения данных одного датчика данными, полученными от других.

Архитектура мехатронной системы — иерархия или устройство компонентов мехатронной системы.

Решающая система — часть мехатронной системы, которая оценивает воспринятую информацию и планирует последующие действия.

Автоматизированная система управления — система для автоматического управления, обычно основанная на использовании компьютеров.

Исполнительная система — часть мехатронной системы, которая управляет работой машины на основе данных, полученных от решающей системы или непосредственно от системы восприятия (от датчиков).

Система восприятия — часть мехатронной системы, которая выполняет сбор, хранение, переработку и распределение информации о состоянии машины и окружающей среды.

Самоорганизующаяся система — система, которая полностью или частично формирует свою структуру путем самоорганизации.

Самоорганизация — способность создавать структуру без каких-либо внешних воздействий — свойство системы, заключающееся в ее способности к возникновению.

Саморегулирование — способность машины достигать и поддерживать желаемое поведение при работе в окружающей среде, которая претерпевает конечные изменения во времени.

Самовосстановление — способность машины к восстановлению работоспособности.

Самодиагностика — способность машины контролировать и оценивать рабочее состояние.

Микропроцессор — миниатюрное электронное устройство (процессор — устройство для обработки или переработки данных согласно инструкциям), которое использует программируемую память для хранения инструкций выполнения логических, арифметических операций и функций отсчета времени.

Микроконтроллер — автоматическое управляющее устройство со встроенным компьютером, предназначенное для выполнения конкретного задания.

Нейросети — сети, состоящие из множества взаимосвязанных единиц, каждая из которых выполняет взвешенное суммирование (более обобщенно — математическое нормирование) ее входных сигналов.

Сенсорное слияние — совместное применение различных датчиков для определения многих различных свойств объекта.

Активация — силовое или другое физическое воздействие на процесс.

Эволюция — процесс изменения, порождающий воспроизводящуюся популяцию, состоящую из различных индивидов, у которых некоторые различия являются наследуемыми и характеризуются различной способностью к успешному воспроизводству.

Эволюционный алгоритм — алгоритм, использующий методы имитации эволюции для исследования технических систем.

Обратная связь — передача информации от датчика на управляющее устройство, снабжающее систе-

му информацией о качестве выполнения поставленной задачи (управление с помощью обратной связи).

Прямая связь — передача информации от управляющего устройства на процесс/систему в целях изменения параметров управления по открытому циклу.

Искусственный интеллект — способность машины, управляемой компьютером, выполнять функции, которые обычно выполняются с использованием человеческого интеллекта, такие как рассуждение, планирование, решение задач, опознавание, восприятие, принятие решений, понимание и обучение.

Признаки искусственного интеллекта — реагирование, избыточность, готовность, обратная связь и подобные другие.

Человекоподобный интеллект — подражание человеческому мышлению и познавательному процессу при автоматическом решении сложных задач.

Машинный интеллект — способность машины или ее систем выполнять функции, относящиеся к искусственному интеллекту.

Обучение — адаптация (приспосабливаемость) к окружающей среде или ситуации, основанная на опыте.

Многофункциональность — способность выполнять одновременно более одной задачи или разные функции при различных условиях.

Обработка — применение механических, электрических, вычислительных или других процедур изменения данных с одной формы на другую.

Рассуждение — процесс, с помощью которого приходят от известного к чему-либо ранее неизвестному.

Избыточность — существование более чем одного способа выполнить данную функцию.

Активная избыточность — избыточность, проявляющаяся в совместном действии всех видов избыточности.

Избыточность готовности — избыточность, проявляющаяся в том. что некоторые или все виды избыточности не действуют постоянно и активизируются только в случае отказа избыточности, ранее выполнявшей функцию.

Стойкость — способность системы выполнять заданные функции при наличии возмущений или изменений параметров.

Эффект масштаба — влияние изменения размеров объекта на его поведение или свойства.

Планирование (в интеллектуальных машинах) — определение порядка действий при исполнении.

Самосборка — самоорганизация, проявляющаяся в способности сборки структуры из компонентов.

Самонастройка — настройка параметров системы, основанная на их мониторинге.

Ощущение — получение информации об объекте или явлении с помощью прибора, который находится в непосредственном контакте или вблизи изучаемого объекта или явления.

Указанные выше термины в англоязычной литературе используются около 10 лет, их толкование не является догмой и, естественно, должно корректироваться в процессе использования. Так, термин "мехатронный подход" должен быть, по мнению авторов данной публикации, рассматриваться как часть системного подхода.

Опыт применения термина "актуатор" показал, что в русской транскрипции лучше использовать написание — "актюатор".

Синонимом термина "решающая система" может быть использован термин "контроллер", широко применяемый в зарубежной и отечественной литературе.

Термин "система восприятия" логично трактовать как "сенсорную систему".

Отсюда мехатронная система может трактоваться как триада "сенсоры—контроллер—актюатор" [11].

Необходимо зафиксировать и уровневый подход к мехатронике, учитывая масштабный фактор. Иначе говоря, мехатроника относится к макромиру, микромехатроника — к микромиру, наномехатроника — к наномиру [11].

Требуется установить взаимосвязь между микро- и наносистемной техникой и мехатроникой, поскольку имеются отечественные журналы "Мехатроника" (ныне "Мехатроника, автоматизация, управление") и "Микросистемная техника" (ныне "Нано- и микросистемная техника"), в которых взаимосвязь между их предметными областями не оговаривается.

В работах одного их авторов данной публикации [2, 11, 14, 23] и в совместной публикации авторов [25, 26] такой уровневый подход к мехатронике был предложен, что нашло фактическое отражение в рассматриваемом международном трансляторе, но формально зафиксировано не было и требует такого закрепления.

Также необходимо и закрепление тождества терминов "микросистемная техника" и "микромехатроника" [2].

Кстати, нужно зафиксировать различие терминов "сенсор" и "датчик", которое должно отражать физические и конструктивные аспекты [28].

Можно уточнить, что систему, являющуюся частью другой системы, корректнее называть подсистемой.

Есть необходимость ввести такой термин, как "мехатронизированный объект", который был введен в научный оборот одним из авторов данной публикации [13, 17] и успешно применяется в научных трудах и учебниках [3, 6].

В ряде других научно-технических областей подобные международные трансляторы уже не только разработаны с участием постоянного комитета по стандартизации терминологии IFToMM [29], но и

нашли широкое применение, о чем говорят многочисленные переиздания словаря-справочника [30].

Данная публикация, наряду с другими подобными работами, например [31], является предложением для дискуссии, которая и должна учесть разные мнения и создать предпосылки для создания общепризнанной терминологии.

Факт произошедшего 23 августа 2012 г. вступления России во Всемирную торговую организацию ставит в повестку дня вопрос об использовании международных стандартов, норм и рекомендаций для поддержания конкурентоспособности не только в области собственно торговли, но и различных форм продукции, в том числе и научной [32—35], что еще раз подчеркивает актуальность данной публикации.

Список литературы

1. **Мехатроника** / Под ред. Т. Исии. Пер. с яп. М.: Мир, 1988. 318 с.

2. **Шалобаев Е. В.** Фундаментальные и прикладные проблемы развития мехатроники // Сборник: Современные технологии / Под ред. С. А. Козлова. СПб: ГИТМО (ТУ), 2001. С. 46—66.

3. **Подураев Ю. В.** Мехатроника: основы, методы, применение. 2-е изд. М.: Машиностроение, 2007. 256 с.

4. **Toločka R. T.** Adaptive mechanics for mechatronics // The 22th Working Meeting of the IFToMM PC for Standardization of Terminology. Villenrbanne. France. Lyon: IFToMM. 2008. P. 25—29.

5. **Подураев Ю. В.** Основы мехатроники. М.: Изд-во МГТУ СТАНКИН, 2000. 80 с.

6. **Егоров О. Д., Подураев Ю. В.** Конструирование мехатронных модулей: Учебник. М.: Изд-во МГТУ—СТАНКИН, 2004. 360 с.

7. **Toločka R. T.** Engineering, mechatronics and its educational programs // Global Cooperation in Engineering Education: Innovative Technologies, Studies and Professional Development: the 3rd Internal Conf. Proceedings. Kaunas: Technologija, 2009. P. 32—35.

8. **Banscvicius R. P., Toločka R. T**. Adaptive mechanics: concept and course for mechatronics study programme // Mechatronic Systems and Materials: selected papers / Opole University of Technology; editors: E. Macha. R. Pawliczek. Opole: Oficyna wydawnicza Politechniki Opolskiej, 2007. P. 7—14.

9. **Toločka R. T.** Mechanical engineering and mechatronics: development of study programmes // Mechatronic Systems and Materials 2010: selected papers [of the 6th Internal. Conf. Mechatronic System and Materials held under European Structural Integrity Society] / Editors: F. Macha, R. Pawliczek. Opole: Opole University of Technology. 2011. P. 249—254.

10. **ФГОС ВПО** по направлению подготовки 221000 "Мехатроника и робототехника" (Квалификация (степень) "Магистр"). М., 2009. 23 с.

11. **Шалобаев Е. В.** Микросистемная техника и мехатроника: особенности соотношения макро- и микроуровней // Микросистемная техника. 2000. № 4. С. 5—10.

12. **Аршанский М. М., Шалобаев Е. В.** Мехатроника: основы глоссария // Мехатроника, 2001. № 2. С. 47—48.

13. **Шалобаев Е. В.** К вопросу об определении мехатроники и иерархии мехатронных объектов // Датчики и системы. 2001. № 7. С. 62—65.

14. **Шалобаев Е. В.** К вопросу о международном трансляторе по мехатронике // Мехатроника. 2002. № 4. С. 6—11.

15. **Сайт РС** "А" IFToMM — Международный транслятор по механизмам и машинам, редакция 2003 — MMS-terms-2003. URL: http://www.iftomm.3me.tudelft.nl (дата обращения 09.07.2012).

16. **Шалобаев Е. В.** Проблемы и тенденции развития терминологии в современных условиях // Микросистемная техника. 2004. № 4. С. 29—32.

17. **Шалобаев Е. В.** Определение неологизма "мехатроника" и его развитие // Проблемы интеллектуального управления в авионике. СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. С. 12—18.

18. **Филимонов Н. Б.** Эволюция мехатроники // Известия ТулГУ. Сер.: Вычислительная техника. Информационные технологии. Системы управления. Вып. 3. Системы управления. Т. 2. Тула: ТулГУ, 2006. С. 277—281.

19. **Теряев Е. Д., Филимонов Н. Б., Петрин К. В.** Современный этап развития мехатроники и грядущая конвергенция с нанотехнологиями // Мехатроника, автоматизация, управление: матер. 5-й науч.-техн. конф. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2008. С. 9—20.

20. **Теряев Е. Д., Филимонов Н. Б., Петрин К. В.** Мехатроника как компьютерная парадигма развития технической кибернетики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 6. С. 2—10.

21. **Осипов Ю. М.** К вопросу о развитии понятия "мехатроника" // Доклады ТУСУРа, июнь 2010. № 1 (21). Ч. 2. С. 193—198.

22. **Кориков А. М.** О развитии понятия "мехатроника" // Доклады ТУСУРа, июнь 2010. № 1 (21). Ч. 2. С. 199—202.

23. **Shalobaev E. V.** Mechatronics: Today Problems and Development trends of Terminology // Proc. 23rd Working Meeting of the IFToMM Permanent Commission for Standardization of Terminology on MMS Minsk. Gomel, Belarus, 2010. P. 111—118.

24. **Кориков А. М.** Еще раз о мехатронике как о науке // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 1. С. 2—8.

25. **Толочка Р. А., Шалобаев Е. В.** Терминология в области мехатроники // Материалы Междунар. научной школы "Фридлендеровские чтения", BVP-2011. Санкт-Петербург. СПб: ИПМаш РАН, 2011. С. 38—44.

26. **Шалобаев Е. В., Толочка Р. Т.** К вопросу терминологии в области мехатроники // Научно-технический вестник НИУ ИТМО. 2012. № 5. С. 158—160.

27. **Шалобаев Е. В., Старжинский В. Е., Шилько С. В.** Тенденции развития современной трибологии на микро- и наноуровнях // Тр. Междунар. симпозиума: Гидродинамическая теория смазки. В 2-х т. М.: Машиностроение, 2005. Т. 2. С. 289—295.

28. **Шалобаев Е. В.** Сенсорика и 21 век // Датчики и системы. 2001. № 1. С. 63—65.

29. **Starghisky V. E., Shalobaev E. V., Sherbakov S. V.** On compiling a terminological Reference-Dictionary on gearing // Proceedings of Internat. Conf. "Power Transmissions'03" Section 1. Sofia, Varna: БолгАН, 2003. P. 180—186.

30. **Гольдфарб В. И., Старжинский В. Е., Шалобаев Е. В.** и др. Словарь-справочник по зубчатым передачам: русско-англо-немецко-французский / Под ред. В. Е. Старжинского. Изд. 5-е. Гомель: ИММС НАН Б, 2011. 220 с.

31. **Шалобаев Е. В., Толочка Р.-Т. А.** К вопросу о терминологии в области мехатроники // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 5. С. 148—151.

32. **Шалобаев Е. В.** Проблемы гармонизации отечественных стандартов с системой международных и национальных стандартов // Материалы Всеросс. конф. с междунар. участием: Теория и практика зубчатых передач. Ижевск: ИжГТУ, 2004. С. 44—48.

33. **Сайт** Международной организации по сертификации — ИСО: Камень преткновения: вступление России в ВТО и госстандарты. Публикация от 01.11.2011. URL: http://www.worldico.org/articles/441.html (обращение 20.07.2012).

34. **Сайт** Международной организации по сертификации — ИСО: Международная стандартизация в России. Публикация от 21.09.2011. URL: http://www.worldico.org/articles/394.html (обращение 20.07.2012).

35. **Сайт** Международной организации по сертификации — ИСО: Еще один шаг к гармонизации стандартов. Публикация от 24.01.2012. URL: http://www.worldico.org/articles/520.html (обращение 20.07.2012).

УДК 681.5

Д. П. Ким, д-р техн. наук, проф.,
dpkim@yandex.ru,
МГТУ МИРЭА, Москва

Маргинальная устойчивость и синтез систем управления максимальной степени устойчивости

Рассматривается маргинальная (граничная) устойчивость. Получены необходимые условия и критерий маргинальной устойчивости, необходимые и достаточные условия обращения в нуль определителей Гурвица. На основе полученных условий маргинальной устойчивости разработан алгоритм синтеза систем управления максимальной степени устойчивости. Получены формулы для оптимальных параметров физически реализуемого ПИД регулятора, предназначенного для объектов третьего порядка.

Ключевые слова: *маргинальная устойчивость, синтез систем управления, критерий маргинальной устойчивости, максимальная степень устойчивости*

Введение

Данная статья посвящена маргинальной устойчивости и методике синтеза систем управления максимальной степени устойчивости. Синтезу систем управления максимальной степени устойчивости посвящено значительное число работ [1—8]. В них рассматриваются методы синтеза оптимальных по степени устойчивости параметров регулятора при различных ограничениях на алгоритмы и объекты управления. Все эти методы основаны на маргинальной устойчивости. В данной работе получены необходимые и достаточные условия обращения в нуль определителей Гурвица, входящие в критерий маргинальной устойчивости. На их основе разработан алгоритм синтеза систем управления максимальной степени устойчивости для широкого класса объектов и законов управления.

Степень устойчивости

Пусть характеристический полином системы управления имеет вид

$$Q(\lambda) = a_0\lambda^n + a_1\lambda^{n-1} + \ldots + a_n \; (a_0 > 0). \qquad (1)$$

Степень устойчивости η определяется следующим образом:

$$\eta = \min_j (-\mathrm{Re}\lambda_i), \; i = 1, 2, \ldots, n,$$

где λ_i — нули (корни) полинома (1).

Справедливо следующее утверждение [8].

Утверждение 1. *Граничное (т. е. максимально возможное) значение степени устойчивости равно*

$$\eta_\text{г} = \frac{1}{n} \cdot \frac{a_1}{a_0}, \qquad (2)$$

и оно достигается, когда действительные значения всех нулей (корней) полинома (1) равны между собой.

Таким образом, для степени устойчивости *допустимыми* являются значения, которые удовлетворяют условию

$$0 < \eta \leqslant \eta_\text{г}.$$

Маргинальная устойчивость

Полином называется маргинально устойчивым, если он имеет нейтральные (т. е. расположенные на мнимой оси) нули и не имеет правых нулей. Система управления называется маргинально устойчивой, если ее характеристический полином является маргинально устойчивым.

Утверждение 2. *Если полином (1) маргинально устойчив, то все его коэффициенты неотрицательны* [6, 8]:

$$a_i \geqslant 0, \; i = 1, 2, \ldots, n. \qquad (3)$$

Это условие будем называть *алгебраическим необходимым условием маргинальной устойчивости.*

Нуль λ' полинома (1) называют особым, если $-\lambda'$ также является нулем этого полинома. Все нули, расположенные на мнимой оси, являются особыми, так как если $j\omega$ — нуль полинома (1), то и $(-j\omega)$ также является его нулем. Если имеются особые нули, расположенные не на мнимой оси, то, как следует из их определения, среди них обязательно будет правый нуль.

Утверждение 3. *Если полином маргинально устойчив, то особый нуль не может быть вещественным числом, и если имеются особые нули, не являющиеся нейтральными, то их число равно числу, кратному четырем* [6, 8].

Утверждение 4. *Полином (1) имеет l особых нулей в том и только в том случае, когда l старших определителей Гурвица равны нулю, а $(n - l)$-й определитель отличен от нуля* [9, с. 476—477]:

$$\Delta_n = \Delta_{n-1} = \ldots \Delta_{n-l+1} = 0, \; \Delta_{n-l} \neq 0.$$

Частотное необходимое условие маргинальной устойчивости. *Для того чтобы полином $Q(\lambda)$ был маргинально устойчив и имел l нейтральных нулей, необходимо, чтобы частотный (характеристический) полином $Q(j\omega)$ имел l действительных корней.*

Критерий маргинальной устойчивости. *Полином (1) маргинально устойчив и l нулей располагаются на мнимой оси в том и только в том случае, если выполняются следующие два условия:*

1^0. *l старших определителей Гурвица полинома (1) равны нулю, а остальные $n - l$ определителей положительны:*

$$\Delta_n = \Delta_{n-1} = \ldots = \Delta_{n-l+1};\ \Delta_{n-l} > 0,\ \ldots,\ \Delta_1 > 0.$$

2^0. *Уравнение*

$$Q(j\omega) = 0$$

имеет l действительных корней.

Доказательство. Согласно утверждению 4, если полином $Q(\lambda)$ имеет l особых нулей, то l старших определителей Гурвица равны нулю. Число правых неособых нулей равно [9, с. 476—477]

$$k = V(1, \Delta_1, \Delta_3, \ldots) + V(1, \Delta_2, \Delta_4, \ldots),$$

где $V(\ldots)$ — число перемен знаков в ряду из определителей Гурвица $\Delta_1, \Delta_2, \ldots, \Delta_{n-l}$ внутри скобок. И это число будет равно нулю, если указанные определители положительны. Таким образом, при выполнении условия 1^0 $Q(\lambda)$ будет маргинально устойчив, если все l особых нулей будут нейтральными. Если частотный полином $Q(j\omega)$ имеет l действительных нулей, то полином $Q(\lambda)$ имеет l нейтральных нулей, т. е. все l особых нулей полинома $Q(\lambda)$ будут нейтральными.

Замечание 1. *В силу утверждения 3 при $l \leqslant 3$ условие 2^0 в критерии маргинальной устойчивости можно не проверять, а при $l \geqslant 4$ достаточно показать, что частотный полином $Q(j\omega)$ имеет к $(l - k = 3)$ действительных корней.*

В дальнейшем при рассмотрении задачи синтеза систем управления максимальной степени устойчивости важную роль играет следующее утверждение.

Утверждение 5. *Для того чтобы все определители Гурвица полинома (1) до k-го порядка были равны нулю, необходимо и достаточно, чтобы все коэффициенты с нечетными индексами до a_k при нечетном k и до a_{k+1} при четном k включительно были равны нулю.*

Доказательство. Достаточность следует из того, что все определители Гурвица до k-го порядка содержат строку из коэффициентов с нечетными индексами, которые меньше или равны k при нечетном k и меньше или равны $k + 1$ при четном k.

Необходимость докажем методом математической индукции. При $k = 1, 2$ утверждение верно, так как

$$\Delta_1 = a_1 = 0,\ \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = -a_0 a_3 = 0 \Rightarrow a_3 = 0.$$

Покажем, что оно верно и при произвольном k. Сначала рассмотрим случай, когда k — четное число. Пусть утверждение справедливо при $k = 2m - 1$, т. е. все определители Гурвица до $(2m - 1)$-го порядка равны нулю и имеет место равенство

$$a_1 = a_3 = \ldots = a_{2m-1} = 0. \qquad (4)$$

Нужно показать, что оно справедливо и при $k = 2m$, т. е. $\Delta_{2m} = 0$ тогда и только тогда, когда $a_{2m+1} = 0$.

Определитель Гурвица $2m$-го порядка имеет вид

$$\Delta_{2m+1} = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \ldots & a_{4(m-1)+1} & a_{4m-1} \\ a_0 & a_2 & a_4 & \ldots & a_{4(m-1)} & a_{4m-2} \\ 0 & a_1 & a_3 & \ldots & a_{4(m-1)-1} & a_{4m-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \ldots & a_{2m} & a_{2(m+1)} \\ 0 & 0 & 0 & \ldots & a_{2m-1} & a_{2m+1} \\ 0 & 0 & 0 & \ldots & a_{2(m-1)} & a_{2m} \end{vmatrix}.$$

Коэффициенты, у которых индексы больше n, естественно равны нулю. Перепишем этот определитель с учетом (4), переместив все строки, у которых коэффициенты имеют четный индекс, в верхнюю часть. Тогда получим

$$\tilde{\Delta}_{2m} = \begin{vmatrix} a_0 & a_2 & a_4 & \ldots & a_{2(m-1)} & a_{2m} & \ldots & \ldots \\ 0 & a_0 & a_2 & \ldots & a_{2(m-2)} & a_{2(m-1)} & \ldots & \ldots \\ 0 & 0 & a_0 & \ldots & a_{2(m-3)} & a_{2(m-2)} & \ldots & \ldots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \ldots & a_0 & a_2 & \ldots & \ldots \\ 0 & 0 & 0 & \ldots & 0 & a_{2m+1} & \ldots & \ldots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \ldots & 0 & 0 & \ldots & a_{2m+1} \end{vmatrix}.$$

Исходный и, соответственно, преобразованный определитель имеют m строк с нечетными индексами и m строк с четными индексами, и они в зависимости от m могут отличаться только знаком. На главной диагонали последнего определителя находятся только a_0 и a_{2m+1}, а слева от них — нули. Поэтому определитель $\tilde{\Delta}_{2m}$ будет равен с точностью до знака выражению $a_{2m+1}^m a_0^m$. Следовательно, $\tilde{\Delta}_{2m} = 0$ и, соответственно, $\Delta_{2m} = 0$ в том и только в том случае, когда $a_{2m+1} = 0$, так как $a_0 \neq 0$.

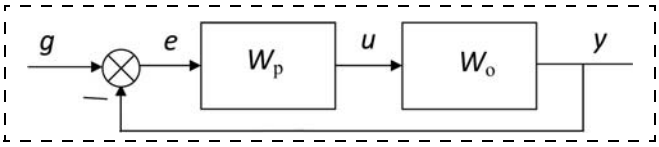
Теперь перейдем к случаю, когда k — нечетное число. Пусть $k = 2m + 1$. Так как при $k = 2m$ утверждение справедливо, то все коэффициенты с нечетными индексами, включая a_{2m+1}, равны нулю. И так как все определители Гурвица до $2m$-го порядка содержат строки с нечетными индексами, не превышающими $2m + 1$, то они все равны нулю. Что и требовалось доказать.

Из утверждения 5 вытекает следующее следствие.

Следствие. *Для того чтобы все определители Гурвица полинома $Q(\lambda)$ были равны нулю, необходимо и достаточно, чтобы все его коэффициенты с нечетными индексами были равны нулю.*

Постановка задачи синтеза систем управления максимальной степени устойчивости

Дано: передаточная функция объекта управления и передаточная функция регулятора (закон управления) с варьируемыми параметрами (см. рисунок). Требуется определить значения параметров регулятора, доставляющие максимум степени устойчивости синтезируемой системе.



Пусть характеристический полином системы управления имеет вид (1)

$$Q(\lambda) = a_0\lambda^n + a_1\lambda^{n-1} + \ldots + a_n.$$

Его коэффициенты и, соответственно, степень устойчивости η будут функциями от указанных параметров. Рассматриваемую задачу синтеза можно сформулировать как следующую задачу на экстремум: определить α (α — вектор параметров регулятора) из условия

$$\eta^* = \eta(\alpha^*) = \max_{\alpha} \eta(\alpha). \qquad (5)$$

η^* называется *оптимальной степенью устойчивости* и α^* — *оптимальным* (*векторным*) *параметром*. Число параметров регулятора (размерность вектора α) m не должно превышать $n - 1$: $m \leqslant n - 1$. Если $m \geqslant n$, и с помощью его параметров можно произвольно изменять n коэффициентов a_i ($i = 1, 2, \ldots, n$), то в этом случае корни характеристического полинома и, соответственно, степень устойчивости можно сделать равным произвольно заданному числу, и постановка задачи синтеза становится бессмысленной.

Широко известны типовые законы управления, наиболее общим среди которых является пропорционально-интегро-дифференциальный (ПИД) закон

$$u = \left(k_п + k_д p + k_и \frac{1}{p}\right) e. \qquad (6)$$

Здесь p обозначает оператор дифференцирования. ПИД закон (ПИД регулятор) можно реализовать точно только в том случае, если производную pe можно измерить, так как "идеальный" дифференциатор физически не реализуем. В противном случае при использовании реального дифференциатора, имеющего передаточную функцию

$$W_д = \frac{T_1 p}{Tp + 1},$$

передаточная функция ПИД регулятора принимает вид

$$W_р = \frac{k_1 p^2 + k_2 p + k_3}{(Tp + 1)p},$$

где

$$k_1 = k_п T + k_д T_1,\ k_2 = k_п + k_и T,\ k_3 = k_и. \qquad (7)$$

Отсюда видно, что коэффициенты k_i ($i = 1, 2, 3$) можно произвольно менять путем изменения исходных коэффициентов регулятора.

Дальше будем предполагать, что передаточная функция объекта в изображениях Лапласа имеет вид

$$W_о(s) = \frac{P(s)}{Q_0(s)},$$

где полином числителя $P(s)$ имеет только левые нули, а передаточная функция регулятора — вид

$$W_р(s) = \frac{k_1 s^m + k_2 s^{m-1} + \ldots + k_m}{Q_р(s)}. \qquad (8)$$

При этом нули передаточной функции объекта полностью компенсируются полюсами передаточной функции регулятора. Тогда последние m коэффициентов a_{n-m+r} ($r = 1, 2, \ldots, m$) характеристического полинома $Q(\lambda)$ будут зависеть от параметров регулятора, и их при решении задачи синтеза можно будет произвольным образом изменять.

Метод синтеза систем управления максимальной степени устойчивости

Метод решения задачи синтеза систем управления максимальной степени устойчивости основан на преобразовании характеристического полинома

$$Q(\lambda) = a_0\lambda^n + a_1\lambda^{n-1} + \ldots + a_n$$

в маргинально устойчивый полином путем подстановки

$$\lambda = q - \eta,$$

где η — искомая степень устойчивости. При такой постановке получим полином

$$Q_n(q) = Q(q - \eta) = c_0 q^n + c_1 q^{n-1} + \ldots + c_n, \qquad (9)$$

где

$$c_k = \frac{1}{(n-k)!} \left.\frac{\partial^{n-k} Q(\lambda)}{\partial \lambda^{n-k}}\right|_{\lambda = -\eta},\ k = 0, 1, \ldots, n. \qquad (10)$$

В соответствии с (10) для коэффициентов преобразованного полинома имеем

$$c_n = a_0(-\eta)^n + a_1(-\eta)^{n-1} + \ldots - a_{n-1}\eta + a_n; \qquad (11а)$$

$$c_{n-1} = na_0(-\eta)^{n-1} + (n-1)a_1(-\eta)^{n-2} + \ldots + a_{n-1}; \qquad (11б)$$

.....

$$c_2 = \frac{n(n-1)}{2} a_0\eta^2 - (n-1)a_1\eta + a_2; \qquad (11в)$$

$$c_1 = -na_0\eta + a_1, \qquad (11г)$$

$$c_0 = a_0. \qquad (11д)$$

Из (11) следует, что коэффициент преобразованного характеристического полинома c_k ($k = 0, 1, 2, ..., n$) зависит от коэффициентов a_i ($i = 0, 1, 2, ..., k$) исходного характеристического полинома

$$c_k = c_k(a_0, a_1, ..., a_k).$$

Следовательно, последние m коэффициентов a_{n-m+r} ($r = 1, 2, ..., m$) исходного характеристического полинома и, соответственно, последние m коэффициентов c_{n-m+r} ($r = 1, 2, ..., m$) преобразованного характеристического полинома зависят от параметров регулятора, и их можно произвольно изменять. Коэффициенты a_i и c_i ($i \leqslant n - m$), предшествующие им, от параметров регулятора не зависят.

Согласно утверждению 1 степень устойчивости принимает максимально возможное (граничное) значение, когда действительные части всех нулей характеристического полинома равны между собой. Для этого все нули преобразованного полинома должны быть нейтральными. А это согласно критерию маргинальной устойчивости возможно в том и только в том случае, когда все определители Гурвица равны нулю и частотный полином $Q(j\omega)$ имеет n действительных нулей. В соответствии со следствием утверждения 5 все определители Гурвица равны нулю тогда и только тогда, когда все коэффициенты этого полинома с нечетными индексами равны нулю. Поэтому условие маргинальной устойчивости полинома (9), когда все его корни являются нейтральными, можно записать следующим образом:

$$c_1 = 0,\ c_2 \geqslant 0,\ c_3 = 0,\ c_4 \geqslant 0,\ ..., \qquad (12а)$$

$$\mathrm{Re}\,Q_n(j\omega) = c_n - c_{n-2}\omega^2 + c_{n-4}\omega^4 - ... = 0, \qquad (12б)$$

$$\mathrm{Im}\,Q_n(j\omega) = c_{n-1}\omega - c_{n-3}\omega^3 + c_{n-5} - ... = 0. \qquad (12в)$$

Алгоритм синтеза систем управления максимальной степени устойчивости

Когда передаточная функция регулятора содержит максимально допустимое число параметров $m = n - 1$, коэффициенты c_i ($i = 2, 3, ..., n$) зависят от параметров регулятора. Первое уравнение (12а) от параметра регулятора не зависит и имеет вид (см. (11г))

$$c_1 = -na_0\eta + a_1 = 0.$$

Отсюда находим степень устойчивости, равную граничному значению:

$$\eta = \eta_г = \frac{a_1}{na_0}.$$

Подставив ее в остальные соотношения (12) и решив их совместно, получим искомые значения параметров регулятора.

В общем случае ($m \leqslant n - 1$) алгоритм определения оптимальных значений параметров регулятора можно представить следующим образом.

Шаг 1. Из первого уравнения (12а) находим степень устойчивости, равную граничному значению.

Шаг 2. Подставляем полученное на первом шаге значение степени устойчивости в первое неравенство (12а) и находим новое значение степени устойчивости следующим образом: если это неравенство выполняется, то в качестве нового значения принимаем степень устойчивости, найденную на предыдущем шаге; если не выполняется, т. е. c_2 принимает отрицательное значение, то, приравняв его нулю, находим новое допустимое (т. е. не большее $\eta_г$) значение степени устойчивости.

Шаг 3. Далее переходим к следующему соотношению (12а) и проделываем то же самое, что и на предыдущем шаге...

Этот процесс продолжаем до тех пор, пока не дойдем до соотношения, которое содержит параметр регулятора. По достижении указанного соотношения в него и во все остальные соотношения подставляем найденное на последнем шаге значение степени устойчивости. Затем, решая их совместно, находим искомые значения параметров регулятора.

Проиллюстрируем изложенное на примере синтеза оптимальных по степени устойчивости параметров физически реализуемого ПИД регулятора.

Синтез оптимальных по степени устойчивости параметров физически реализуемого ПИД регулятора

Пусть передаточная функция объекта имеет вид

$$W_о(s) = \frac{b_0}{s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3}.$$

Требуется синтезировать оптимальный по степени устойчивости физически реализуемый ПИД регулятор.

Как отмечалось выше, передаточная функция физически реализуемого ПИД регулятора может быть представлена в виде

$$W_р = \frac{k_1 p^2 + k_2 p + k_3}{(Tp + 1)p}. \qquad (13)$$

Утверждение 5. *Оптимальная степень устойчивости и оптимальные параметры физически реализуемого ПИД регулятора определяются следующим образом:*

а) при $Ta_2 + a_1 - \frac{2}{5T}(Ta_1 + 1)^2 \geqslant 0$

$$\eta^* = \eta_г = \frac{Ta_1 + 1}{5T}, \qquad (14а)$$

$$k_1^* = \frac{1}{b_0}\{10T\eta_г^3 - 6(Ta_1 + 1)\eta_г^2 + 3(Ta_2 + a_1)\eta_г - Ta_3 - a_2\}, \qquad (14б)$$

$$k_2^* = \frac{1}{b_0}\{-5T\eta_г^4 + 4(Ta_1 + 1)\eta_г^3 - 3(Ta_2 + a_1)\eta_г^2 + 2(Ta_3 + a_2 + b_0 k_1^*)\eta_г - a_3 + \omega^2\beta^2\}, \qquad (14в)$$

$$k_3^* = \frac{1}{b_0}\{\mathrm{T}\eta_г^5 - (Ta_1 + 1)\eta_г^4 + (Ta_2 + a_1)\eta_г^3 -$$

$$- (Ta_3 + a_2 + b_0 k_1^*)\eta_г^2 + (a_3 + b_0 k_2^*)\eta_г\}; \quad (14г)$$

б) при $Ta_2 + a_1 - \frac{2}{5T}(Ta_1 + 1)^2 < 0$

$$\eta^* = \eta_1 =$$

$$= \frac{(Ta_1 + 1) - \sqrt{\left\{2(Ta_1 + 1)^2 - 5T(Ta_2 + a_1)^2\right\}/2}}{5T}, \quad (15а)$$

$$k_1^* = \frac{1}{b_0}\{10T\eta_1^3 - 6(Ta_1 + 1)\eta_1^2 +$$

$$+ 3(Ta_2 + a_1)\eta_1 - Ta_3 - a_2\}, \quad (15б)$$

$$k_2^* = \frac{1}{b_0}\{-5T\eta_1^4 + 4(Ta_1 + 1)\eta_1^3 - 3(Ta_2 + a_1)\eta_1^2 +$$

$$+ 2(Ta_3 + a_2 + b_0 k_1^*)\eta_1 - a_3\}, \quad (15в)$$

$$k_3^* = \frac{1}{b_0}\{T\eta_1^5 - (Ta_1 + 1)\eta_1^4 + (Ta_2 + a_1)\eta_1^3 -$$

$$- (Ta_3 + a_2 + b_0 k_1^*)\eta_1^2 + (a_3 + b_0 k_2^*)\eta_1\}. \quad (15г)$$

В (14в) ω и β — свободные параметры (мнимые части корней характеристического уравнения), и их можно использовать для обеспечения дополнительных требований к качеству системы.

З а м е ч а н и е. *Оптимальные параметры ПИД регулятора остаются такими же и в случае, когда передаточная функция объекта имеет вид*

$$W_о(s) = \frac{b_0 M(s)}{s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3},$$

где $M(s)$ — полином не выше 3-й степени с левыми нулями, если для компенсации нулей передаточной функции объекта включить его в знаменатель передаточной функции регулятора:

$$W_р(s) = \frac{k_1 s^2 + k_2 s + k_3}{M(s)(Ts + 1)s}.$$

Доказательство. Характеристический полином замкнутой системы имеет вид

$$Q(\lambda) = T\lambda^5 + (Ta_1 + 1)\lambda^4 + (Ta_2 + a_1)\lambda^3 +$$

$$+ (Ta_3 + a_2 + b_0 k_1)\lambda^2 + (a_3 + b_0 k_2)\lambda + b_0 k_3.$$

Отсюда для коэффициентов преобразованного полинома

$$Q_n(q) = c_0 q^5 + c_1 q^4 + c_2 q^3 + c_3 q^2 + c_4 q + c_5$$

в соответствии с (10) получаем

$$c_5 = Q(\lambda)|_{\lambda=-\eta} = -T\eta^5 + (Ta_1 + 1)\eta^4 - (Ta_2 + a_1)\eta^3 +$$

$$+ (Ta_3 + a_2 + b_0 k_1)\eta^2 - (a_3 + b_0 k_2)\eta + b_0 k_3,$$

$$c_4 = \left.\frac{\partial Q(\lambda)}{\partial \lambda}\right|_{\lambda=-\eta} = 5T\eta^4 - 4(Ta_1 + 1)\eta^3 +$$

$$+ 3(Ta_2 + a_1)\eta^2 - 2(Ta_3 + a_2 + b_0 k_1)\eta + a_3 + b_0 k_2,$$

$$c_3 = \frac{1}{2}\left.\frac{\partial^2 Q(\lambda)}{\partial \lambda^2}\right|_{\lambda=-\eta} = -10T\eta^3 + 6(Ta_1 + 1)\eta^2 -$$

$$- 3(Ta_2 + a_1)\eta + Ta_3 + a_2 + b_0 k_1,$$

$$c_2 = \frac{1}{3!}\left.\frac{\partial^3 Q(\lambda)}{\partial \lambda^3}\right|_{\lambda=-\eta} = 10T\eta^2 - 4(Ta_1 + 1)\eta + Ta_2 + a_1,$$

$$c_1 = \frac{1}{4!}\left.\frac{\partial^4 Q(\lambda)}{\partial \lambda^4}\right|_{\lambda=-\eta} = -5T\eta + Ta_1 + 1,$$

$$c_0 = \frac{1}{5!}\left.\frac{\partial^5 Q(\lambda)}{\partial \lambda^5}\right|_{\lambda=-\eta} = T.$$

Запишем условие маргинальной устойчивости (12):

$$c_1 = 0,\ c_2 \geqslant 0,\ c_3 = 0,\ c_4 \geqslant 0,\ c_5 = 0, \quad (16а)$$

$$\mathrm{Re}\,Q_п(j\omega) = c_5 - c_3\omega^2 + c_1\omega^4 = 0, \quad (16б)$$

$$\mathrm{Im}\,Q_п(j\omega) = c_4\omega - c_2\omega^3 + c_0\omega^5 = 0. \quad (16в)$$

а) $Ta_2 + a_1 - \frac{2}{5T}(Ta_1 + 1)^2 \geqslant 0.$

Из первого равенства

$$c_1 = -5T\eta + Ta_1 + 1 = 0$$

находим степень устойчивости

$$\eta = \eta_г = \frac{Ta_1 + 1}{5T},$$

совпадающее с (14а). Подставив это выражение в первое неравенство (16а), получим

$$Ta_2 + a_1 - \frac{2}{5T}(Ta_1 + 1)^2 > 0.$$

Если это неравенство (т. е. условие а)) выполняется, то найденная степень устойчивости будет оптимальной. Второе равенство (16а) при подстановке найденного значения степени устойчивости принимает вид

$$c_3 = -10\mathrm{T}\eta_г^3 + 6(Ta_1 + 1)\eta_г^2 -$$

$$- 3(Ta_2 + a_1)\eta_г + Ta_3 + a_2 + b_0 k_1 = 0.$$

Отсюда для первого оптимального параметра находим выражение (14б).

Из равенства (16в) имеем

$$c_4 = \omega^2(c_2 - c_0\omega^2).$$

Отсюда следует, что оба неравенства в условии маргинальной устойчивости (16а) будут выполнены, если

$$c_2 - c_0\omega^2 \geqslant 0.$$

Введя дополнительный параметр β, преобразуем это неравенство в равенство

$$c_2 - c_0\omega^2 = \beta^2.$$

С учетом этого выражения приведенное выше соотношение для c_4 можем записать в виде

$$c_4 = 5T\eta^4 - 4(Ta_1 + 1)\eta^3 + 3(Ta_2 + a_1)\eta^2 - \\ - 2(Ta_3 + a_2 + b_0k_1)\eta + a_3 + b_0k_2 = \omega^2\beta^2.$$

Отсюда для второго оптимального параметра получаем выражение (14в).

И, наконец, из последнего равенства условия маргинальной устойчивости (16а)

$$c_5 = Q(\lambda)|_{\lambda = -\eta} = -T\eta^5 + (Ta_1 + 1)\eta^4 - \\ - (Ta_2 + a_1)\eta^3 + (Ta_3 + a_2 + b_0k_1)\eta^2 - \\ - (a_3 + b_0k_2)\eta + b_0k_3 = 0$$

находим выражение для третьего оптимального параметра (14г).

$$\text{б)}\ Ta_2 + a_1 - \frac{2}{5T}(Ta_1 + 1)^2 < 0.$$

В этом случае степень устойчивости не может принять граничное значение, так как первое неравенство в условии маргинальной устойчивости (16а) не выполняется: c_2 принимает отрицательное значение. В соответствии с изложенным алгоритмом найдем новое значение степени устойчивости, приравняв c_2 нулю:

$$c_2 = 10T\eta^2 - 4(Ta_1 + 1)\eta + Ta_2 + a_1 = 0.$$

Это уравнение имеет два действительных корня:

$$\eta_1 = \frac{(Ta_1 + 1) - \sqrt{\left\{2(Ta_1 + 1)^2 - 5T(Ta_2 + a_1)\right\}/2}}{5T},$$

$$\eta_2 = \frac{(Ta_1 + 1) + \sqrt{\left\{2(Ta_1 + 1)^2 - 5T(Ta_2 + a_1)\right\}/2}}{5T}.$$

Коэффициент c_2 как функция от η представляет собой квадратный трехчлен и на интервале между корнями принимает отрицательные значения, а вне этого интервала — положительные значения. Корень η_2 не может быть степенью устойчивости, так как он больше граничного значения (т. е. не является допустимым). Степень устойчивости не может быть больше η_1. Следовательно, η_1 является оптимальной степенью устойчивости, так как в остальные соотношения условия маргинальной устойчивости входят параметры, и они могут быть удовлетворены.

Из второго равенства условия маргинальной устойчивости (16а)

$$c_3 = -10T\eta^3 + 6(Ta_1 + 1)\eta^2 - \\ - 3(Ta_2 + a_1)\eta + Ta_3 + a_2 + b_0k_1 = 0,$$

подставив полученное выражение для оптимальной степени устойчивости, для первого оптимального параметра получим формулу (15б).

Так как $c_2 = 0$, то условие маргинальной устойчивости (16в) можно представить в виде

$$c_4 + c_0\omega^4 = 0.$$

Это равенство возможно только при $\omega = 0$ и $c_4 = 0$. Поэтому имеем

$$c_4 = 5T\eta^4 - 4(Ta_1 + 1)\eta^3 + 3(Ta_2 + a_1)\eta^2 - \\ - 2(Ta_3 + a_2 + b_0k_1)\eta + a_3 + b_0k_2 = 0.$$

Подставив в это уравнение найденные значения степени устойчивости и первого параметра и разрешив его относительно неизвестного параметра, получим выражение для второго оптимального параметра — формулу (15в).

Последнее равенство из условия маргинальной устойчивости (16а) принимает вид

$$c_5 = -T\eta^5 + (Ta_1 + 1)\eta^4 - (Ta_2 + a_1)\eta^3 + \\ + (Ta_3 + a_2 + b_0k_1)\eta^2 - (a_3 + b_0k_2)\eta + b_0k_3 = 0.$$

Отсюда находим выражение для третьего оптимального параметра — формулу (15г).

Рассмотрим численный пример синтеза оптимального по степени устойчивости физически реализуемого ПИД регулятора.

Пример. Передаточная функция объекта имеет вид

$$W_{\text{о}}(s) = \frac{b_0}{s^3 + a_1s^2 + a_2s + a_3},$$

где $b_0 = 1$, $a_1 = 3$, $a_2 = 2$, $a_3 = 0$. Параметр $T = 0{,}1$. Требуется определить оптимальные параметры регулятора с передаточной функцией

$$W_{\text{р}} = \frac{k_1p^2 + k_2p + k_3}{(Tp + 1)p}.$$

Сначала проверим, какое из условий (а) или б)) выполняется.

$$Ta_2 + a_1 - \frac{2}{5T}(Ta_1 + 1)^2 = \\ = 0{,}1 \cdot 2 + 3 - 4 \cdot 1{,}69 = -3{,}56 < 0.$$

Выполняется условие б). Поэтому воспользуемся формулами (15). Сначала найдем оптимальную степень устойчивости по формуле (15а):

$$\eta^* = \eta_1 = \\ = \frac{(Ta_1 + 1) - \sqrt{\left\{2(Ta_1 + 1)^2 - 5T(Ta_2 + a_1)\right\}/2}}{5T} = \\ = 2(1{,}3 - \sqrt{(3{,}38 - 0{,}5 \cdot 3{,}2)/2}) = 0{,}7132.$$

Подставим найденное значение степени устойчивости в формулы для оптимальных коэффициентов (15). Тогда получим

$$k_1^* = \frac{1}{b_0}\{10T\eta_1^3 - 6(Ta_1 + 1)\eta_1^2 + $$
$$+ 3(Ta_2 + a_1)\eta_1 - Ta_3 - a_2\} = 1{,}242,$$

$$k_2^* = \frac{1}{b_0}\{-5T\eta_1^4 + 4(Ta_1 + 1)\eta_1^3 - 3(Ta_2 + a_1)\eta_1^2 + $$
$$+ 2(Ta_3 + a_2 + b_0k_1^*)\eta_1 - a_3\} = 1{,}4983,$$

$$k_3^* = \frac{1}{b_0}\{T\eta_1^5 - (Ta_1 + 1)\eta_1^4 + (Ta_2 + a_1)\eta_1^3 - $$
$$- (Ta_3 + a_2 + b_0k_1^*)\eta_1^2 + (a_3 + b_0k_2^*)\eta_1\} = 0{,}2625.$$

Таким образом, передаточная функция регулятора имеет вид

$$W_{\text{р}} = \frac{1{,}248p^2 + 1{,}4983p + 0{,}2625}{(0{,}1p + 1)p}.$$

Степень устойчивости синтезированной системы управления при выбранном типе регулятора принимает максимальное значение и равна $\eta^* = 0{,}71$.

Список литературы

1. **Шубладзе А. А.** Синтез оптимальных линейных регуляторов // Автоматика и телемеханика. 1984. № 12. С. 22—33.
2. **Шубладзе А. А.** Достаточные условия экстремума в системах максимальной степени устойчивости. I, I // Автоматика и телемеханика. 1997. № 3. С. 93—105. № 8. С. 67—79.
3. **Шубладзе А. А.** Достаточные условия оптимальности структур в системах максимальной степени устойчивости произвольного вида // Автоматика и телемеханика. 1999. № 8. С. 43—57.
4. **Шубладзе А. А.** Оптимальные по степени устойчивости одномерные системы управления. I, II //Автоматика и телемеханика. 2001. № 4. С. 56—66. № 5. С. 65—76.
5. **Кузнецов С. И., Шубладзе А. А.** О возможностях ПИД-управления типовыми инерционными и колебательными объектами // Автоматика и телемеханика. 2007. № 7. С. 18—30.
6. **Ким Д. П.** Условие граничной устойчивости и синтез систем управления максимальной степени устойчивости // Известия Академии наук. Теория и системы управления. 2003. № 4. С. 5—8.
7. **Ким Д. П.** Синтез регулятора максимальной степени устойчивости // Приводная техника. Технико-аналитический информационный журнал. 2003. № 1 (41). С. 21—26.
8. **Ким Д. П.** Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы. М.: Физматлит, 1-е изд. 2003. 288 с. 2-е изд. 2007. 312 с.
9. **Гантмахер Ф. Р.** Теория матриц. М.: Наука, 1988. 552 с.

УДК 681.5

А. З. Асанов, д-р техн. наук, проф.,
askhat-asanov@yandex.ru,
Д. Н. Демьянов, ст. препод.,
Казанский (Приволжский)
федеральный университет

Аналитический синтез многосвязного регулятора квазиадаптивной системы управления[1]

Приводится решение задачи аналитического синтеза многосвязного регулятора автоматической системы с эталонной моделью. Формулируются условия, выполнение которых гарантирует ее устойчивость и физическую реализуемость. Решение задачи основывается на применении технологии вложения.

Ключевые слова: *многосвязный динамический объект, синтез, адаптивная система, технология вложения систем, условия физической реализуемости*

Введение

Для большинства современных мехатронных объектов характерны высокая интенсивность процессов управления, широкий диапазон изменения внешних условий и режимов работы, наличие нескольких взаимосвязанных друг с другом управляемых рабочих параметров, действие сильных возмущений на входе объекта. Это позволяет отнести такие объекты к классу многосвязных объектов управления, подверженных действию значительных сигнальных и параметрических возмущений. Одним из основных направлений повышения эффективности управления с учетом вышеуказанных особенностей объекта является придание системе управления свойства адаптивности.

Применение классических методов адаптации, особенно для случая многосвязной системы, оказывается весьма затруднительным из-за условий применимости классических методов синтеза адаптивной системы, для чего требуются: точное знание уравнений математической модели объекта, линейность по неизвестным параметрам, устойчивость по Ляпунову целевых движений (известность функции Ляпунова для целевых движений), физическая реализуемость корректирующих устройств в контуре адаптации. Эти требования существенно ограничивают решение даже типовых задач управления техническими объектами. Разработка новых ("неоклассических") методов адаптивного управления, в частности, нелинейными динамическими объектами, не требующих точного знания математических моделей, устойчивости по Ляпунову, использующих только общесистемные, фундаментальные

[1] Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 11-08-00311).

свойства объекта для адаптации к неконтролируемым, неизмеряемым возмущениям и неопределенностям среды и объекта [1], находится на начальной стадии. Прикладные методы синтеза адаптивного управления на основе этих принципов еще только предстоит создать.

Вместе с тем, как в теории, так и в практике автоматического управления нашли применение системы, приближающиеся по своим свойствам к адаптивным (для краткости называемые квазиадаптивными). Их основным достоинством является простота технической реализации, обусловленная во многом отсутствием цепей настройки коэффициентов регуляторов [2, 3]. К таким системам относятся системы с косвенным замером возмущений, параметрически инвариантные компенсационные системы, системы с введением дополнительной рабочей информации в контур управления, системы с большим коэффициентом усиления, различные схемы малочувствительных САУ.

К такого рода квазиадаптивным системам могут быть отнесены и автоматические системы с эталонной моделью (АСЭМ), эквивалентные по своим свойствам в определенных условиях функционирования адаптивным системам. В АСЭМ постоянство показателей качества при изменении параметров объекта достигается за счет организации в САУ многотемповых движений, где все изменения переменных параметров переводятся в изменение "быстрых" парциальных движений, которые не проявляются в регулируемой координате [2]. При этом формируется заданное (желаемое) распределение полюсов передаточной функции системы, обеспечивая тем самым требуемую динамику и качество управления.

В данной работе рассматривается задача аналитического синтеза многосвязного регулятора квазиадаптивной системы управления, обсуждаются условия физической реализуемости такого регулятора.

Постановка задачи

Пусть рассматривается динамический объект, описываемый в пространстве состояний системой уравнений

$$\dot{x} = A_{\text{о}}x + B_{\text{о}}u;\ y = C_{\text{о}}x. \qquad (1)$$

Здесь $x \in R^n$, $u \in R^s$, $y \in R^m$ — векторы состояния, управления и выхода, $A_{\text{о}}$, $B_{\text{о}}$, $C_{\text{о}}$ — числовые матрицы соответствующих размеров.

Для динамического объекта (1) строится квазиадаптивная система управления с эталонной моделью [3], структурная схема которой представлена на рис. 1.

Представленная система управления включает в себя регулятор в цепи обратной связи с передаточной матрицей $K(p)$ и эталонную модель, которая формализует желаемое поведение системы и описывается следующими уравнениями в пространстве состояний:

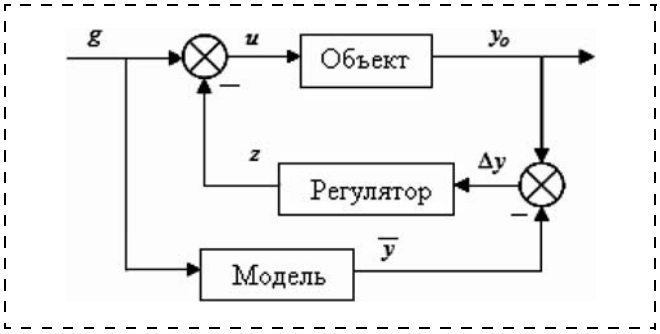


Рис. 1. Структурная схема квазиадаптивной системы управления с эталонной моделью

$$\dot{\bar{x}} = A_{\text{м}}\bar{x} + B_{\text{м}}g;\ \bar{y} = C_{\text{м}}\bar{x}. \qquad (2)$$

Здесь $\bar{x} \in R^n$, $g \in R^s$, $\bar{y} \in R^m$ — векторы состояния, управления и выхода, $A_{\text{м}}$, $B_{\text{м}}$, $C_{\text{м}}$ — числовые матрицы соответствующих размеров.

Качество управления определяется по вектору рассогласования Δy и задается передаточной матрицей от вектора внешних управляющих воздействий к рассогласованию выходных векторов объекта и модели $E^g_{\Delta y}(p)$.

В общем виде решение рассматриваемой задачи было получено ранее в работе [4]. Однако при этом остался невыясненным вопрос — каким образом выбирать из получившегося множества допустимых решений те, которые будут являться устойчивыми и физически реализуемыми?

В данной работе будет показано, что при некоторых допущениях (которые, как правило, выполняются для реальных объектов) расчетные формулы могут быть существенно упрощены. Кроме того, формулируются условия устойчивости и физической реализуемости проектируемой системы управления.

Предположим, что объект управления (1) полностью управляем и наблюдаем, число входных и выходных сигналов одинаково ($m = s < n$), а его передаточная матрица обратима ($\text{rank}B = \text{rank}C = m$).

Требуется: для заданного объекта управления (1) и эталонной модели (2) найти передаточную матрицу $K(p)$, при которой передаточная матрица $E^g_{\Delta y}(p)$ имеет требуемый вид. Построенная система управления должна быть устойчивой и физически реализуемой.

Синтез законов управления

При решении поставленной задачи будем использовать технологию вложения систем [5].

Совокупность уравнений, описывающая рассматриваемую систему управления, может быть представлена следующем виде:

$$\Omega[x^{\text{т}}\ \bar{x}^{\text{т}}\ y^{\text{т}}\ \bar{y}^{\text{т}}\ z^{\text{т}}\ g^{\text{т}}]^{\text{т}} = [x_0^{\text{т}}\ \bar{x}_0^{\text{т}}\ 0\ 0\ 0\ g^{\text{т}}]^{\text{т}}.$$

Здесь x_0 и $\bar{x}_0$ — векторы начальных условий для объекта управления и эталонной модели, а Ω — так называемая проматрица рассматриваемой системы, имеющая вид

$$\Omega = \begin{bmatrix} pI - A_{\text{о}} & 0 & 0 & 0 & B_{\text{о}} & -B_{\text{о}} \\ 0 & pI - A_{\text{м}} & 0 & 0 & 0 & -B_{\text{м}} \\ -C_{\text{о}} & 0 & I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -C_{\text{м}} & 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K & K & I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix}.$$

В результате поэтапного применения технологии вложения систем [4] нахождение искомой матрицы регулятора может быть сведено к решению следующей системы линейных матричных уравнений:

$$\begin{cases} \pi_x B_{\text{о}} + \pi_{\bar{x}} B_{\text{м}} = E^g_{\Delta y}; \\ \pi_x(pI - A_{\text{о}}) + \pi_x B_{\text{о}} K C_{\text{о}} = C_{\text{о}}; \\ \pi_{\bar{x}}(pI - A_{\text{м}}) - \pi_x B_{\text{о}} K C_{\text{м}} = -C_{\text{м}}. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь символами π_x и $\pi_{\bar{x}}$ обозначены вспомогательные полиномиальные матрицы соответствующих размерностей.

Выразим из третьего уравнения системы (3) матрицу $\pi_{\bar{x}}$ и подставим в первое. Обозначим $E = \pi_x B_{\text{о}}$, $W_{\text{м}} = C_{\text{м}}(pI - A_{\text{м}})^{-1} B_{\text{м}}$. Тогда после преобразований получим

$$\begin{cases} E + EKW_{\text{м}} - W_{\text{м}} = E^g_{\Delta y}; \\ \pi_x(pI - A_{\text{о}}) + EKC_{\text{о}} = C_{\text{о}}. \end{cases} \quad (4)$$

Рассмотрим второе уравнение системы (4). Его решение относительно неизвестной матрицы регулятора существует, только если выполняются следующие условия разрешимости:

$$\begin{cases} \bar{E}^L [C_{\text{о}} - \pi_x(pI - A_{\text{о}})] = 0; \\ [C_{\text{о}} - \pi_x(pI - A_{\text{о}})]\, \bar{C}^R_{\text{о}} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Преобразовав второе уравнение системы (5) с использованием свойств матричных делителей нуля и канонизаторов, получим.

$$\pi_x = \psi C_{\text{о}}(pI - A_{\text{о}})^{-1}, \quad (6)$$

где $\psi(p)$ — произвольная матрица подходящего размера.

Учитывая соотношение (6) и обратимость передаточной матрицы объекта управления, преобразуем первое уравнение системы (5) к следующему виду:

$$\bar{\psi}^L C_{\text{о}} = 0. \quad (7)$$

Согласно принятым допущениям матрица $C_{\text{о}}$ имеет полный ранг, а число ее строк меньше числа столбцов. Следовательно, у нее нет левых матричных делителей нуля, и соотношение (7) может выполняться лишь при отсутствии у матрицы $\psi(p)$ левого матричного делителя нуля. С учетом размерности матрицы $\psi(p)$ это означает, что она является квадратной обратимой матрицей.

Преобразуем систему (4), используя полученные результаты:

$$\begin{cases} \psi W_{\text{о}} + \psi W_{\text{о}} K W_{\text{м}} = E^g_{\Delta y} + W_{\text{м}}; \\ \psi C_{\text{о}} + \psi W_{\text{о}} K C_{\text{о}} = C_{\text{о}}. \end{cases} \quad (8)$$

Здесь $W_{\text{о}} = C_{\text{о}}(pI - A_{\text{о}})^{-1} B_{\text{о}}$ — передаточная матрица объекта управления.

Так как матрица $C_{\text{о}}$ не имеет левых делителей нуля, то второе уравнение системы (8) эквивалентно уравнению

$$\psi + \psi W_{\text{о}} K = I. \quad (9)$$

Выразим из уравнения (9) матрицу $\psi W_{\text{о}} K$ и подставим в первое уравнение системы (8). Получим

$$\psi W_{\text{о}} + W_{\text{м}} - \psi W_{\text{м}} = E^g_{\Delta y} + W_{\text{м}}. \quad (10)$$

Решив матричное уравнение (10) относительно неизвестной матрицы ψ, получим

$$\psi = E^g_{\Delta y} \tilde{W}_{\Delta} + \varphi \bar{W}^L_{\Delta}. \quad (11)$$

Здесь $W_{\Delta} = W_{\text{о}} - W_{\text{м}}$, а φ — некоторая матрица, выбираемая из условия полноты ранга матрицы ψ. Условием существования решения (11) будет выполнение соотношения

$$E^g_{\Delta y} \bar{W}^L_{\Delta} = 0. \quad (12)$$

С учетом полученных соотношений искомая матрица регулятора будет иметь вид

$$K = W_{\text{о}}^{-1} \psi^{-1} - W_{\text{о}}^{-1}. \quad (13)$$

В частном случае, когда матрица W_{Δ} является обратимой, для существования решения требуется, чтобы матрица $E^g_{\Delta y}$ также была обратимой, условие (12) будет выполняться всегда, а формула (11) будет иметь вид

$$\psi = E^g_{\Delta y}(W_{\text{о}} - W_{\text{м}})^{-1}. \quad (14)$$

Подставляя соотношение (14) в (13), получим окончательную формулу для расчета передаточной матрицы регулятора:

$$K = (E^g_{\Delta y})^{-1} - W_{\text{о}}^{-1} W_{\text{м}} (E^g_{\Delta y})^{-1} - W_{\text{о}}^{-1}. \quad (15)$$

Следует отметить, что в данном случае при заданных матрицах $W_{\text{м}}$, $E^g_{\Delta y}$ существует лишь единственное решение задачи синтеза.

Анализ класса решений

В общем случае анализ класса решений, определяемого формулами (11) и (13), является достаточно сложным, так как затруднительно учесть все возможные значения матрицы $\varphi(p)$.

Однако в случае, когда матрицы W_Δ и $E^g_{\Delta y}$ являются обратимыми (а именно такая ситуация, как правило, имеет место на практике — характеристики по каждому каналу задаются отдельно, не допуская возникновения линейной зависимости), решение существенно упрощается.

Проанализируем, как именно следует выбирать матрицы $W_м$, $E^g_{\Delta y}$, чтобы полученная система управления являлась устойчивой и физически реализуемой.

Так как рассматриваемая система является многосвязной, то для оценки ее устойчивости проанализируем различные комбинации передаточных матриц от внешних входов к внутренним сигналам [6]:

$$W_1 = (I + W_о K)^{-1}(W_о - W_м) = E^g_{\Delta y};$$

$$W_2 = (I + W_о K)^{-1}(I + KW_м) =$$

$$= E^g_{\Delta y}(W_о - W_м)^{-1}W_о^{-1}(W_о - W_м)(E^g_{\Delta y})^{-1}(E^g_{\Delta y} + W_м);$$

$$W_3 = (I + W_о K)^{-1}W_о = E^g_{\Delta y}(W_о - W_м)^{-1}W_о;$$

$$W_4 = (I + W_о K)^{-1} = E^g_{\Delta y}(W_о - W_м)^{-1};$$

$$W_5 = (I + KW_о)^{-1}K = W_о^{-1} - W_о^{-1}E^g_{\Delta y}(W_о - W_м)^{-1};$$

$$W_6 = (I + KW_о)^{-1} = W_о^{-1}E^g_{\Delta y}(W_о - W_м)^{-1}W_о.$$

Для устойчивости многосвязной системы требуется, чтобы все полиномиальные матрицы W_i, $i = \overline{1, 6}$, не имели полюсов с положительной действительной частью.

Таким образом, устойчивость синтезированной системы управления с точно известными значениями коэффициентов будет обеспечиваться при выполнении следующих ограничений:

1) полюса передаточных матриц $W_о$, $W_м$, $E^g_{\Delta y}$ не должны иметь положительной действительной части;

2) передаточные нули матриц $W_о$, $E^g_{\Delta y}$ W_Δ не должны иметь положительной действительной части.

Для того чтобы проектируемый регулятор являлся физически реализуемым, требуется, чтобы порядок полинома числителя каждого его элемента не превосходил порядок полинома соответствующего знаменателя.

Очевидно, что не для любой из возможных комбинаций $W_м$, $E^g_{\Delta y}$ указанное требование выполняется.

Рассмотрим один из возможных приемов определения матриц $W_м$, $E^g_{\Delta y}$, при которых проектируемый регулятор будет являться физически реализуемым.

Пусть обратная передаточная матрица динамического объекта может быть представлена в следующем виде:

$$W_о^{-1} = pR_о(p) + Q_о(p). \qquad (16)$$

Здесь $R_о(p)$ — матрица полиномов, степени которых не превосходят число r; $Q_о(p)$ — дробно-рациональная матрица, у каждого из элементов которой степень полинома числителя не превосходит степени полинома соответствующего знаменателя.

Будем искать матрицу $(E^g_{\Delta y})^{-1}$ в виде

$$(E^g_{\Delta y})^{-1} = pR_о(p) + Q_e(p). \qquad (17)$$

Здесь $Q_e(p)$ — дробно-рациональная матрица, у каждого элемента которой степень полинома числителя не превосходит степени полинома соответствующего знаменателя.

Коэффициенты полиномов числителей элементов матрицы $Q_e(p)$ подбираются так, чтобы обеспечить заданную динамику рассогласования выходных векторов объекта управления и эталонной модели, а коэффициенты полиномов знаменателей — так, чтобы обеспечить устойчивость регулятора (и полюса, и передаточные нули матрицы $E^g_{\Delta y}$ не должны иметь положительной действительной части).

Передаточную матрицу эталонной модели выберем такой, чтобы степень полинома знаменателя каждого из ненулевых элементов превосходила степень полинома соответствующего числителя не менее, чем на $2r$.

С учетом принятых допущений уравнение (15) будет иметь вид

$$K = Q_e(p) - W_о^{-1}W_м(E^g_{\Delta y})^{-1} - Q_о(p). \qquad (18)$$

При этом в уравнении (18) каждое из слагаемых будет являться физически реализуемым (степень полинома числителя не будет превосходить степени полинома знаменателя), а значит, и сам регулятор будет являться физически реализуемым.

Алгоритм аналитического синтеза

Обобщая полученные выше результаты, можно сформулировать общий алгоритм аналитического синтеза устойчивой физически реализуемой квазиадаптивной системы управления с эталонной моделью.

На предварительном этапе следует задать модель динамической системы в виде передаточной матрицы $W_о$ или уравнений в пространстве состояний.

Последующие действия:

1. Вычислить полюса и передаточные нули объекта управления. Если они имеют положительную действительную часть, то решение задачи синтеза невозможно.

2. Определить обратную матрицу объекта управления и представить ее в виде (16), определить матрицу $R_o(p)$ и число r.

3. Построить матрицу $(E^g_{\Delta y})^{-1}$ вида (17) такую, чтобы ее нули обеспечивали желаемую динамику рассогласования выходных векторов объекта и эталонной модели, а никакой из полюсов не имел положительной действительной части.

4. Выбрать передаточную матрицу эталонной модели такую, чтобы она обеспечивала желаемые характеристики переходного процесса. Для каждого из ненулевых элементов данной матрицы степень полинома числителя должна быть меньше степени полинома знаменателя как минимум на $2r$, а матрица W_Δ не должна иметь передаточных нулей с положительной действительной частью.

5. Вычислить передаточную матрицу многосвязного регулятора, используя формулу (18).

Конец алгоритма.

Пример

Рассмотрим динамический объект, описываемый системой уравнений вида (1), причем матрицы коэффициентов принимают следующие значения:

$$A_o = \begin{pmatrix} -3 & 0 & -1 \\ 2 & -1 & 4 \\ 3 & 0 & -5 \end{pmatrix};\ B_o = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -5 & 1 \end{pmatrix};\ C_o = \begin{pmatrix} 3 & 1 & -2 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Легко видеть, что в объекте имеются сильные перекрестные связи (первый вход влияет на второй выход, второй вход влияет на первый выход).

Потребуем построить регулятор, обеспечивающий развязку каналов управления, а также обеспечивающий уменьшение времени переходного процесса.

1. Предварительный анализ показал, что объект управления не имеет полюсов и передаточных нулей с положительной действительной частью. Следовательно, решение задачи синтеза возможно.

2. Вычислим обратную передаточную матрицу динамического объекта и представим ее в виде (16):

$$W_o^{-1} = \begin{pmatrix} 0{,}0952p & 0{,}0476p \\ 0{,}2381p & 0{,}6190p \end{pmatrix} +$$

$$+ \begin{pmatrix} \dfrac{0{,}3675p + 1{,}4762}{p + 4{,}1429} & \dfrac{-0{,}2448p + 0{,}9048}{p + 4{,}1429} \\ \dfrac{0{,}6803p + 1{,}9048}{p + 4{,}1429} & \dfrac{-0{,}2312p + 1{,}2381}{p + 4{,}1429} \end{pmatrix};$$

$$R_o(p) = \begin{pmatrix} 0{,}0952p & 0{,}0476p \\ 0{,}2381p & 0{,}6190p \end{pmatrix}.$$

При этом число r (максимальная степень полиномов, составляющих матрицу R_o) равно 1.

3. Построим матрицу $(E^g_{\Delta y})^{-1}$ вида (17) исходя из следующих требований: динамика рассогласования выходных векторов объекта и эталонной модели должна задаваться биномиальным распределением с $\omega = 5$ [7], а установившееся значение рассогласования должно быть равно нулю (т. е. матрица $E^g_{\Delta y}$ должна иметь передаточный нуль в начале координат).

Таким образом, в простейшем случае матрица $(E^g_{\Delta y})^{-1}$ будет иметь вид

$$(E^g_{\Delta y})^{-1} = \begin{pmatrix} 0{,}0952p & 0{,}0476p \\ 0{,}2381p & 0{,}6190p \end{pmatrix} +$$

$$+ \begin{pmatrix} \dfrac{a_{11}p + b_{11}}{p} & \dfrac{a_{12}p + b_{12}}{p} \\ \dfrac{a_{21}p + b_{21}}{p} & \dfrac{a_{22}p + b_{22}}{p} \end{pmatrix}.$$

Вычислим определитель матрицы $(E^g_{\Delta y})^{-1}$, задающий полюса матрицы $E^g_{\Delta y}$, приведем подобные и приравняем соответствующие коэффициенты к коэффициентам стандартного биномиального распределения. Получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} 13a_{11} - 5a_{12} - a_{21} + 2a_{22} = 20; \\ 21a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} + 13b_{11} - 5b_{12} - \\ - b_{21} + 2b_{22} = 150; \\ 21a_{11}b_{22} - 21a_{12}b_{21} - 21a_{21}b_{12} + 21a_{22}b_{11} = 500; \\ 21b_{11}b_{22} - 21b_{12}b_{21} = 625. \end{cases}$$

Так как число переменных превосходит число уравнений, зададим часть из них произвольно. Например, $a_{11} = 1$; $a_{12} = 1$; $b_{11} = 4$; $b_{12} = 6$. Тогда оставшиеся коэффициенты примут следующие значения: $a_{22} = 7{,}6039$; $a_{21} = 3{,}2078$; $b_{22} = 23{,}0411$; $b_{21} = 10{,}4004$.

4. Выберем допустимую передаточную матрицу эталонной модели исходя из следующих соображений:

- она должна иметь диагональный вид (каналы управления должны быть развязаны);
- она должна обеспечивать большее быстродействие;
- она не должна иметь передаточных нулей с положительной действительной частью;
- для каждого из ее ненулевых элементов порядок полинома числителя должен быть меньше порядка полинома соответствующего знаменателя как минимум на $2r$ (т. е. в нашем случае на 2);
- матрица W_Δ не должна иметь передаточных нулей с положительной действительной частью.

Всем этим требованиям удовлетворяет эталонная модель с передаточной матрицей

$$W_м = \begin{pmatrix} \dfrac{9}{(p+3)^2} & 0 \\ 0 & \dfrac{9}{(p+3)^2} \end{pmatrix}.$$

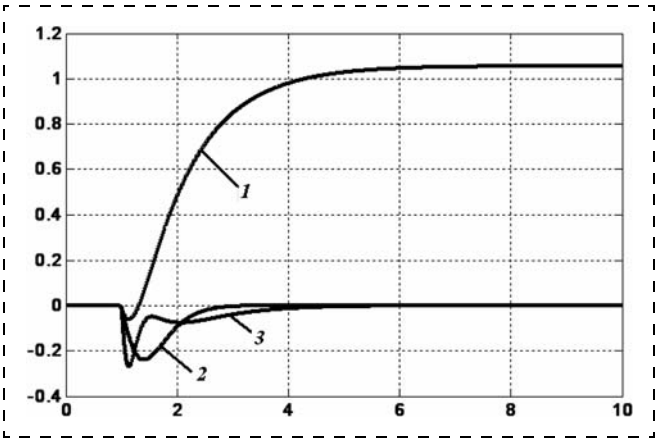


Рис. 2. Переходная характеристика по каналу "первый вход — второй выход":
1 — для исходного объекта управления; *2* — для системы управления с регулятором полного порядка; *3* — для системы управления с редуцированным регулятором

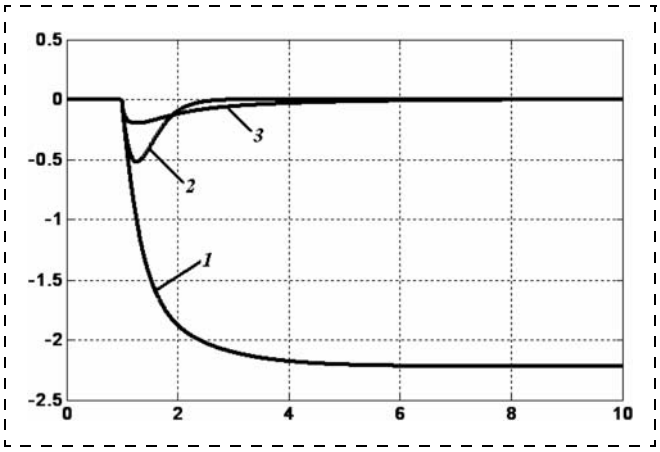


Рис. 3. Переходная характеристика по каналу "второй вход — первый выход":
1 — для исходного объекта управления; *2* — для системы управления с регулятором полного порядка; *3* — для системы управления с редуцированным регулятором

5. Подставим полученные значения обратной передаточной матрицы объекта, передаточной матрицы эталонной модели и матрицы $(E^g_{\Delta y})^{-1}$ в формулу (18). Получим искомую передаточную матрицу динамического регулятора *K*, элементы которой принимают следующие значения:

$$K_{11} = \frac{0{,}449p^6 + 11{,}4p^5 + 120{,}9p^4 + 691{,}8p^3 + 2268p^2 + 4059p + 3101}{p^6 + 18{,}43p^5 + 135{,}1p^4 + 491{,}9p^3 + 890p^2 + 639{,}9p};$$

$$K_{12} = \frac{0{,}9388p^6 + 22{,}12p^5 + 223{,}1p^4 + 1242p^3 + 4048p^2 + 7312p + 5692}{p^6 + 18{,}43p^5 + 135{,}1p^4 + 491{,}9p^3 + 890p^2 + 639{,}9p};$$

$$K_{21} = \frac{0{,}9969p^4 + 10{,}51p^3 + 43{,}38p^2 + 123{,}3p + 203{,}3}{p^4 + 10{,}14p^3 + 33{,}86p^2 + 37{,}29p};$$

$$K_{22} = \frac{4{,}284p^4 + 42{,}09p^3 + 162{,}2p^2 + 376{,}7p + 499{,}5}{p^4 + 10{,}14p^3 + 33{,}86p^2 + 37{,}29p}.$$

В том случае, когда по физическим или технико-экономическим причинам реализовать в системе динамический регулятор полного порядка невозможно, допустимо использовать редуцированный регулятор, составленный из элементарных динамических звеньев. В рассматриваемом случае он будет иметь вид

$$K = \begin{pmatrix} 6{,}34 & 11{,}43 \\ 3{,}31 & 10{,}10 \end{pmatrix} + \frac{1}{p}\begin{pmatrix} 4{,}85 & 8{,}90 \\ 5{,}45 & 13{,}40 \end{pmatrix}.$$

На рис. 2 и 3 показаны переходные процессы в перекрестных каналах (первый вход—второй выход, второй вход—первый выход) для исходного объекта, для квазиадаптивной системы с регулятором полного порядка и для квазиадаптивной системы с редуцированным регулятором.

Как видно, после редукции регулятора качество парирования перекрестных связей ухудшилось незначительно.

Заключение

В работе предложен способ аналитического синтеза многосвязного регулятора автоматической системы управления с эталонной моделью, приближающейся по своим свойствам к адаптивной. Сформулированы условия, при выполнении которых синтезированная система управления будет являться устойчивой и физически реализуемой. Разработан пошаговый алгоритм синтеза системы управления, который может быть достаточно легко реализован в виде программы для цифровой ЭВМ. Полученные результаты могут быть использованы для проектирования качественных систем управления сложными техническими объектами, в том числе для аналитического решения задачи динамической развязки каналов управления.

Список литературы

1. **Терехов В. А., Тюкин И. Ю.** Адаптация в нелинейных динамических системах. М.: ЛКИ, 2008. 384 с.
2. **Соколов Н. И., Рутковский В. Ю., Судзиловский Н. Б.** Адаптивные системы автоматического управления летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 1988. 208 с.
3. **Рутковский В. Ю., Ильясов Б. Г., Кабальнов Ю. С.** и др. Адаптивные системы управления газотурбинными двигателями летательных аппаратов. М.: Изд. МАИ, 1994. 224 с.
4. **Асанов А. З.** Синтез многотемповой системы управления, эквивалентной адаптивной, по технологии вложения // Мехатроника, автоматизация, управление. 2003. № 8. С. 2—8.
5. **Буков В. Н.** Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем. Калуга: Изд. научной лит. Н. Ф. Бочкаревой. 2006. 720 с.
6. **Поляк Б. Т., Щербаков П. С.** Робастная устойчивость и управление. М.: Наука, 2002. 303 с.
7. **Кузовков Н. Т.** Модальное управление и наблюдающие устройства. М.: Машиностроение, 1976. 184 с.

УДК 681.51

Г. Е. Веселов, д-р техн. наук, проф.,
deantib@tti.sfedu.ru,
А. Н. Попов, канд. техн. наук, доц.,
andvpriest@mail.ru,
И. А. Радионов, аспирант,
radionov87@gmail.com,
Технологический институт ЮФУ в г. Таганроге

Энергосберегающее управление асинхронным тяговым двигателем: синергетический подход

Рассмотрена проблема энергосберегающего управления асинхронным тяговым двигателем. Регулятор синтезируется в системе, включающей тяговый привод, колесную пару и поверхность рельса. Формирование управляющего воздействия осуществляется с учетом момента сцепления колесной пары с поверхностью рельса. В связи с тем, что измерить указанную величину не представляется возможным, для ее оценки предлагается использовать асимптотический наблюдатель. Для решения перечисленных задач применяются методы и принципы синергетической теории управления.

Ключевые слова: *синергетический подход, асинхронный тяговый двигатель, энергосбережение, момент сцепления*

Введение

Опыт, накопленный в процессе производства и эксплуатации электровозов с коллекторным тяговым приводом, а также совершенствование полупроводниковой электроники подвели к необходимости использования в качестве тяговых электроприводов асинхронные. Современные микропроцессорные устройства позволяют строить сложные иерархические системы, на каждом уровне которых задаются управляющие воздействия и выполняется оценка неизмеряемых переменных. При построении регулятора в данном случае нужно рассматривать систему, включающую не только тяговый привод, но и колесную пару (КП) в контакте с поверхностью рельса. Сложность управления заключается в невозможности измерения момента сцепления КП с поверхностью рельса, что приводит к возникновению боксования при изменении качества сцепления.

Проблема синтеза алгоритмов управления в системах подобного типа может быть успешно решена при использовании синергетического подхода и разработанного в его рамках метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), базирующегося па принципах направленной самоорганизации и управляемой декомпозиции нелинейных систем [1—3].

Математическое описание объекта регулирования

Рассмотрим (рис. 1) схематичное представление системы "тяговый привод — колесная пара — путь" [4]. Обозначим: $M_т$ — тяговый момент электропривода; $M_{сц}$ — момент сцепления колеса с поверхностью рельса; J_r, $J_к$ — момент инерции ротора асинхронного тягового двигателя (АТД) и КП соответственно; φ_r, $\varphi_к$ — угол поворота ротора и КП относительно оси вращения соответственно; ω_r, $\omega_к$ — угловая скорость ротора и КП соответственно; $X_к$, $V_к$ — перемещение КП и скорость этого перемещения вдоль направления движения локомотива; c_x — жесткость продольной связи КП с тележкой; c_m — жесткость связи КП с АТД; b_x —коэффициент демпфирования продольной связи КП с тележкой; b_m — коэффициент демпфирования связи КП с АТД; $m_к$ — масса колесной пары; $\Pi(t)$ — нагрузка от КП на путь.

Для данной структуры системы "тяговый привод — колесная пара — путь" математическая модель с учетом динамики асинхронного двигателя (АД) с короткозамкнутым ротором может быть представлена следующей системой дифференциальных уравнений [4—7]:

$$
\begin{aligned}
&\frac{d\varphi_к}{dt} = \omega_к;\\
&\frac{d\varphi_r}{dt} = \omega_r;\\
&\frac{dX_к}{dt} = V_к;\\
&\frac{d\omega_к}{dt} J_к = -M_{сц} - b_m(\omega_к K - \omega_r) - c_m(\varphi_к K - \varphi_r);\\
&\frac{dV_к}{dt} m_к = M_{сц} - b_x V_к - c_x X_к;\\
&\frac{d\psi_r}{dt} = \frac{r_r L_m}{L_r} i_{sx} - \frac{r_r}{L_r}\psi_r;\\
&\frac{d\omega_r}{dt} J_r = \frac{pmL_m}{2L_r}\psi_r i_{sy} - b_m(\omega_r - \omega_к K) - c_m(\varphi_r - \varphi_к K);\\
&\frac{di_{sx}}{dt} = -L^* i_{sx} + \omega_r p i_{sy} + \frac{r_r L_m}{L_r}\frac{i_{sy}^2}{\psi_r} + \frac{L_m r_r}{L_r L}\psi_r + \frac{L_r}{L}u_{sx};\\
&\frac{di_{sy}}{dt} = -L^* i_{sy} - \omega_r p i_{sx} - \frac{r_r L_m}{L_r}\frac{i_{sx} i_{sy}}{\psi_r} - \frac{L_m}{L}\omega_r p\psi_r + \frac{L_r}{L}u_{sy},
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

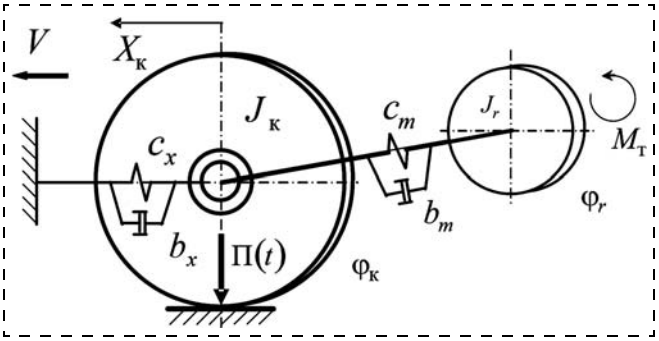


Рис. 1. Схема системы "тяговый привод — колесная пара — путь"

где u_{sx}, u_{sy} и i_{sx}, i_{sy} — проекции напряжения и тока статора на оси вращающейся системы координат; ψ_r — модуль результирующего вектора потокосцепления ротора; L_s, L_r, L_m — собственные и взаимная индуктивности обмоток, а r_s, r_r — их активные сопротивления; p — число пар полюсов; m — число фаз обмотки статора; K — коэффициент редуктора; $L = L_sL_r - L_m^2$; $L^* = (r_rL_m^2 + r_sL_r^2)/(L_rL)$. Математическая модель АД записана в системе координат, ориентированной по направлению вектора потокосцепления ротора при общепринятых физических допущениях:

- параметры обмоток фаз статора и ротора соответственно одинаковы, а система напряжений фаз симметрична;
- магнитопроводы ненасыщенны;
- воздушный зазор между взаимно перемещающимися частями равномерен;
- магнитодвижущая сила в воздушном зазоре синусоидальна;
- влияние потерь в стали и эффекта вытеснения тока и потока на характеристике АД не учитывается;
- обе части АД имеют однотипные распределенные обмотки.

Синтез регулятора

Совокупность критериев управления или набор желаний проектировщика системы в методе АКАР, основанном на синергетической теории управления, принято выражать в виде соответствующей системы инвариантов — аттракторов, которые выступают как цель управления [1—3]. На них обеспечивается выполнение заданной технологической задачи и (или) поддерживаются желаемые физические (энергетические, механические и др.) инварианты. При этом процедура синтеза сводится к поиску *базовых законов управления*, при которых указанные инварианты выполняются. Применительно к рассматриваемой системе "тяговый привод — колесная пара — путь" требования определяются совокупностью инвариантов, состоящей из *технологического* и *электромагнитного инвариантов* [5—10]. При этом технологический инвариант представляет собой требование по поддержанию заданной угловой скорости вращения КП $\omega_к = \omega_{к0}$, а в качестве электромагнитного инварианта определим поддержание оптимального соотношения, обеспечивающего минимизацию потерь энергии в обмотках электропривода [5—10].

В соответствии с процедурой синтеза введем первую пару макропеременных:

$$\psi_1 = i_{sx} - \phi_1;\ \psi_1 = i_{sy} - \phi_2, \qquad (2)$$

удовлетворяющую системе функциональных дифференциальных уравнений

$$\frac{d\psi_1}{dt} + \lambda_1\psi_1 = 0;\ \frac{d\psi_2}{dt} + \lambda_2\psi_3 = 0,\ \lambda_1, \lambda_2 > 0. \qquad (3)$$

Тогда из совместного решения системы уравнений (2), (3) с учетом математической модели (1) получим выражения для базового закона управления:

$$u_{sx} = \frac{L}{L_r}\left[L^*i_{sx} - \omega_r p i_{sy} - \frac{r_rL_m}{L_r}\left(\frac{i_{sy}^2}{\psi_r} - \frac{\psi_r}{L}\right) + \frac{d\phi_1}{dt} - \lambda_1(i_{sx} - \phi_1)\right];$$
$$u_{sy} = \frac{L}{L_r}\left[L^*i_{sy} + \omega_r p i_{sx} + \frac{r_rL_m i_{sx}i_{sy}}{L_r\psi_r} + \frac{\psi_r\omega_r pLm}{L} + \frac{d\phi_2}{dt} - \lambda_2(i_{sy} - \phi_2)\right]. \qquad (4)$$

При попадании изображающей точки (ИТ) системы в окрестность многообразия $\psi_1 = 0$, $\psi_2 = 0$ в замкнутой системе (1), (4) происходит динамическая декомпозиция, вследствие чего ее поведение будет описываться редуцированной системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{d\varphi_к}{dt} = \omega_к;$$
$$\frac{d\varphi_r}{dt} = \omega_r;$$
$$\frac{dX_к}{dt} = V_к;$$
$$\frac{d\omega_к}{dt}J_к = -M_{сц} - b_m(\omega_к K - \omega_r) - c_m(\varphi_к K - \varphi_r); \qquad (5)$$
$$\frac{dV_к}{dt}m_к = M_{сц} - b_xV_к - c_xX_к;$$
$$\frac{d\psi_r}{dt} = \frac{r_rL_m}{L_r}\phi_1 - \frac{r_r}{L_r}\psi_r;$$
$$\frac{d\omega_r}{dt}J_r = \frac{pmL_m}{2L_r}\psi_r\phi_2 - b_m(\omega_r - \omega_к K) - c_m(\varphi_r - \varphi_к K).$$

В декомпозированной системе (5) ϕ_1 и ϕ_2 являются внутренними каналами управления. На втором этапе синтеза введем вторую совокупность макропеременных

$$\psi_3 = \psi_r - M_{сц}^{0,5}\left(\frac{k_1}{k_2 + k_3\omega^\beta}\right)^{0,25};\ \psi_4 = \omega_r - \phi_3,$$

где $k_1 = \dfrac{2(r_s L_r^2 + r_r L_m^2)}{p^2 m L_m^2}$; $k_2 = \dfrac{m r_s}{2 L_m^2}$; $k_3 = \dfrac{\Delta P_{\text{ст.н}} p^{\beta}}{314^{\beta} \psi_{r0}^2}$;

$\Delta P_{\text{ст.н}}$, ψ_{r0} — значения потерь в стали и потокосцепления ротора в номинальном режиме работы двигателя; β — коэффициент, зависящий от марки стали.

Выполнение условия $\psi_3 = 0$ предполагает автоматическую подстройку оптимального значения потокосцепления ротора в зависимости от текущего значения момента сцепления КП с поверхностью рельса и угловой скорости вращения ротора [9, 10]. Однако для выполнения данного соотношения требуется определять значение момента сцепления $M_{\text{сц}}$. Так как момент сцепления $M_{\text{сц}}$ не представляется возможным измерить, то необходимо выполнить процедуру синтеза системы оценки данной переменной с использованием метода синергетического синтеза адаптивных систем управления [1].

Опуская саму процедуру синтеза наблюдателя, приведем конечные уравнения, полученные для оценки момента сцепления:

$$\begin{aligned} \frac{dz}{dt} &= l_1 z + l_1^2 m_{\text{к}} R_{\text{к}} V_{\text{к}} + l_{\text{к}} R_{\text{к}} (b_x V_{\text{к}} + c_{\text{к}} X_{\text{к}}); \\ \hat{M}_{\text{сц}} &= -l_1 m_{\text{к}} R_{\text{к}} V_{\text{к}} - z. \end{aligned} \tag{6}$$

Уравнение (6) при $l_1 < 0$ обеспечивает асимптотическое отслеживание момента сцепления $M_{\text{сц}}$. Тогда вторая совокупность макропеременных будет представлена в следующем виде:

$$\psi_3 = \psi_r - \hat{M}_{\text{сц}}^{0,5} \left(\frac{k_1}{k_2 + k_3 \omega^{\beta}} \right)^{0,25}; \ \psi_4 = \omega_r - \phi_3. \tag{7}$$

Выражения для "внутренних" управлений ϕ_1 и ϕ_2 определяются из совместного решения системы функциональных уравнений

$$\frac{d\psi_3}{dt} + \lambda_3 \psi_3 = 0; \ \frac{d\psi_4}{dt} + \lambda_4 \psi_4 = 0, \ \lambda_3, \lambda_4 > 0, \tag{8}$$

выражений для макропеременных (7) и декомпозированной модели (5):

$$\phi_1 = \frac{1}{r_r k_r} \left[\frac{\psi_r}{Tr} + \frac{\sqrt{\hat{M}_{\text{сц}}} k_1 k_3 \beta \omega^{\beta} \begin{pmatrix} 0,5 p m L_m \psi_r \phi_2 / L_r - \\ - b_m(\omega_r - \omega_{\text{к}} K) - c_m(\varphi_r - \varphi_{\text{к}} K) \end{pmatrix}}{4\omega \left(\dfrac{k_1}{k_2 + k_3 \omega^{\beta}} \right)^{0,75} (k_2 + k_3 \omega^{\beta})^2} - \lambda_3 \left(\psi_r - \sqrt{\hat{M}_{\text{сц}}} \left(\frac{k_1}{k_2 + k_3 \omega^{\beta}} \right)^{0,25} \right) \right]; \tag{9}$$

$$\phi_2 = \frac{2 L_r}{m p L_m \psi_r} \left[J_r \left(\frac{d\phi_3}{dt} - \lambda_4 (\omega_r - \phi_3) \right) + b_m(\omega_r - \omega_{\text{к}} K) + c_m(\varphi_r - \varphi_{\text{к}} K) \right].$$

Согласно методу АКАР в системе произойдет вторая динамическая декомпозиция при попадании ИТ системы в окрестность пересечения многообразий $\psi_3 = 0$ и $\psi_4 = 0$, и поведение системы будет описываться следующей редуцированной системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi_{\text{к}}}{dt} &= \omega_{\text{к}}; \\ \frac{d\varphi_r}{dt} &= \phi_3; \\ \frac{dX_{\text{к}}}{dt} &= V_{\text{к}}; \\ \frac{d\omega_{\text{к}}}{dt} J_{\text{к}} &= -\hat{M}_{\text{сц}} - b_m(\omega_{\text{к}} K - \phi_3) - c_m(\varphi_{\text{к}} K - \varphi_r); \\ \frac{dV_{\text{к}}}{dt} m_{\text{к}} &= \hat{M}_{\text{сц}} - b_x V_{\text{к}} - c_x X_{\text{к}}. \end{aligned} \tag{10}$$

На последнем этапе синтеза в качестве инвариантного многообразия определим целевую функцию $\psi_5 = \omega_{\text{к}} - \omega_{\text{к}0} = 0$, отражающую технологическое требование к синтезируемой системе, и найдем уравнение для "внутреннего" управления ϕ_3:

$$\phi_3 = \frac{1}{b_m} [\hat{M}_{\text{сц}} + b_m \omega_{\text{к}} K + c_m(\varphi_{\text{к}} K - \varphi_r) - \lambda_5 J_{\text{к}} (\omega_{\text{к}} - \omega_{\text{к}0})]. \tag{11}$$

Выражения (4), (6), (9), (11) представляют собой искомый закон управления в системе "тяговый привод — колесная пара — путь".

Результаты моделирования

Проведем исследование синтезированной системы управления "тяговый привод — колесная пара — путь" (1), (4), (6), (9), (11). Моделирование проводили с использованием параметров асинхронного привода НТА-1200 и модели двустороннего опорно-рамного тягового привода электровоза [4], а также параметров регулятора $\omega_{\text{к}0} = 32$ рад/с; $l_1 = -20$; $\lambda_1 = \lambda_2 = 500$; $\lambda_3 = 1,4$; $\lambda_4 = 220$; $\lambda_5 = 0,9$. Момент сцепления изменялся через каждые 20 с следующим образом: $M_{\text{сц}} = M_{\text{ном}}$, $M_{\text{сц}} = 0,8 M_{\text{ном}}$, $M_{\text{сц}} = 0,6 M_{\text{ном}}$, $M_{\text{сц}} = 0,4 M_{\text{ном}}$ и $M_{\text{сц}} = 0,2 M_{\text{ном}}$.

На рис. 2—6 представлены полученные в результате компьютерного моделирования графики переходных процессов в АТД при энергосберегающем управлении. Имитировали режим разгона привода в номинальный режим и дальнейшее скачкообразное изменение нагрузки. На рис. 7 представлен результат оценки наблюдателем момента сцепления $M_{\text{сц}}$. Система оценки момента сцепления достаточно адекватно реагирует на его изменение, что позволяет подстраивать момент тяги при меняющемся коэффициенте сцепления колес с поверхностью рельса и вычислять оптимальное значение потокосцепления ротора.

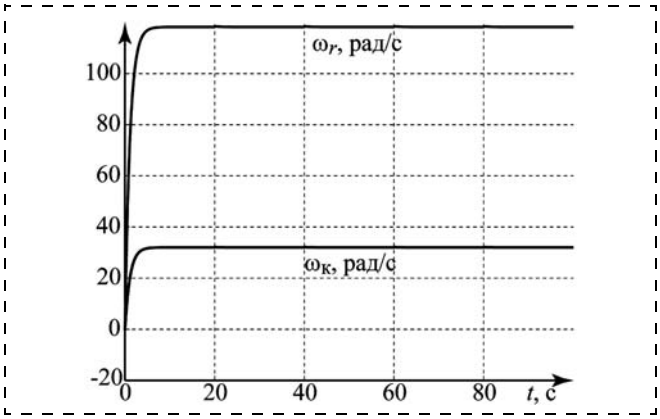


Рис. 2. Угловая скорость ротора АТД и КП

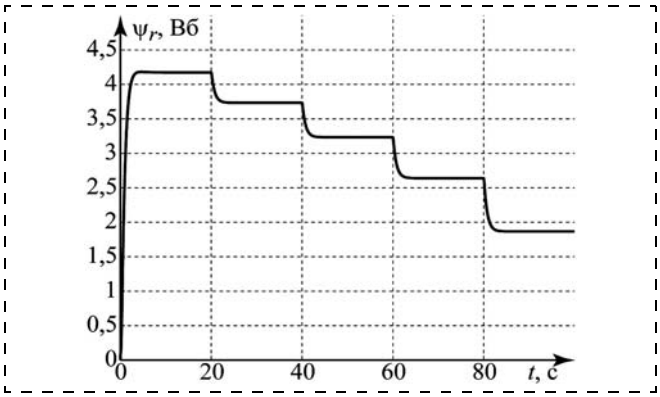


Рис. 3. Потокосцепление обмотки ротора

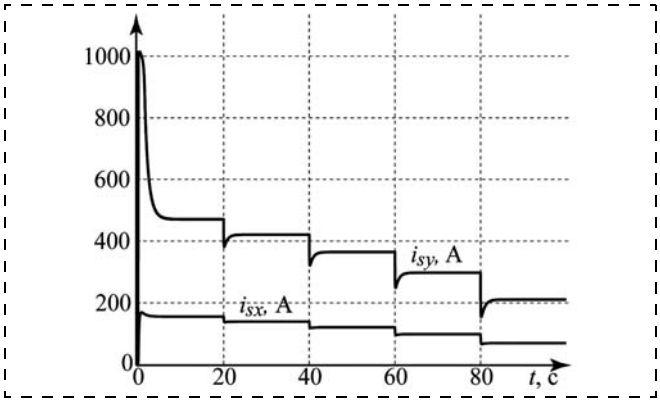


Рис. 4. Проекции тока статора

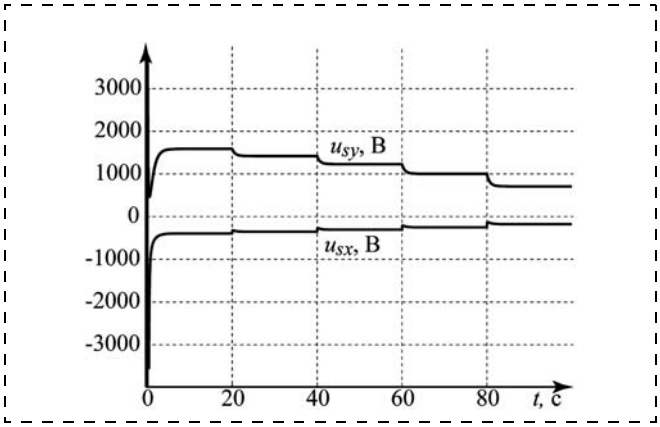


Рис. 5. Проекции напряжения статора

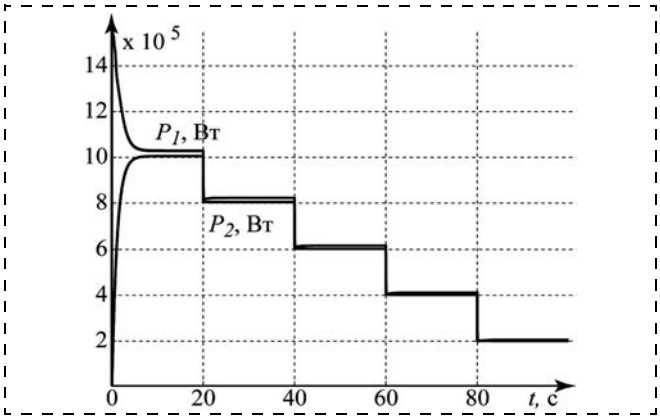


Рис. 6. Полезная и потребляемая мощности

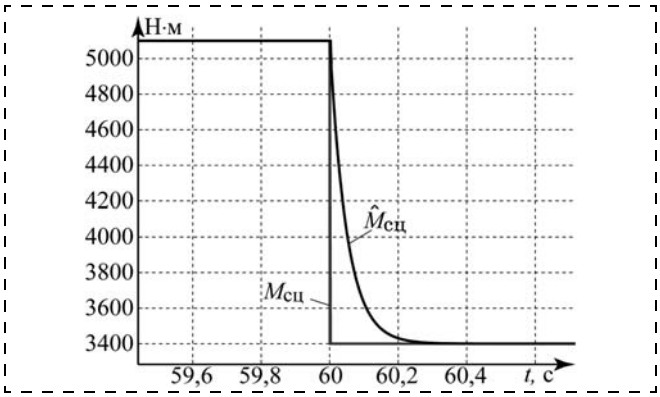


Рис. 7. Эталонное и наблюдаемое значение момента сцепления

На рис. 8 представлена сравнительная диаграмма КПД АТД при энергосберегающем и традиционном (поддержание номинального значения потокосцепления) способах управления. Результаты вычислительного эксперимента в полной мере подтверждают аналитические выкладки и позволяют сделать следующие выводы. В условиях вариации внешнего момента КПД двигателя при энергосберегающем управлении постоянен и максимален. При традиционном способе управления КПД зависит от значения момента сопротивления на валу АТД.

Использование асимптотического наблюдателя на момент сцепления позволяет определить такие

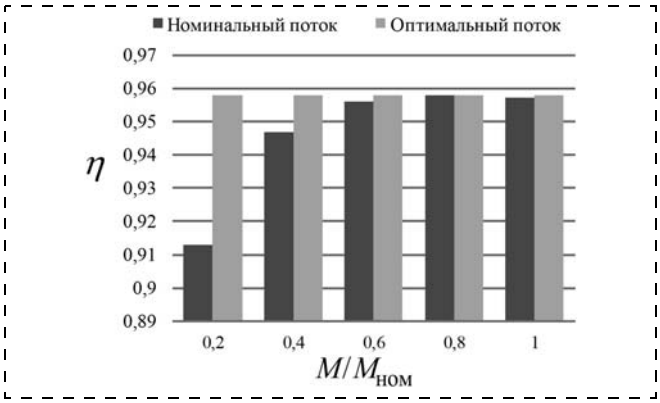


Рис. 8. Сравнительная диаграмма КПД АТД ($\omega_к = \omega_{к0}$, $M_{сц}$ = var)

стратегии управления системой "тяговый привод — колесная пара — путь", что замкнутая система будет обладать свойством инвариантности к неконтролируемому изменению момента сопротивления нагрузки. Это, в свою очередь, приводит к исключению статической ошибки по скорости и коррекции оптимального значения управляемой электромагнитной переменной. Это позволяет назвать данный способ управления эффективным, так как он в полной мере обладает адаптивными свойствами.

Заключение

В статье кратко изложены результаты применения методов синергетического синтеза для решения проблемы энергосберегающего управления АТД. При этом получены важные научные результаты, так как впервые в теории управления железнодорожными транспортными системами в аналитической форме найдены универсальные базовые законы энергосберегающего векторного управления системой "тяговый привод — колесная пара — путь", построенной на базе АД, с использованием полных нелинейных моделей движения. Указанные законы управления обеспечивают асимптотическую устойчивость замкнутой системы и инвариантность к внешним возмущениям. Это объясняется тем обстоятельством, что в основе синергетического подхода лежит базовый принцип асимптотического перехода от одного инвариантного многообразия к другому с последовательным понижением размерности многообразий [1—3]. Учитывая масштабность использования данного класса приводов в железнодорожном транспорте, можно предположить, что внедрение подобных регуляторов приведет к существенной экономии энергии и ресурсов.

Список литературы

1. **Колесникова А. А.** Синергетическая теория управления М.: Энергоатомиздат, 1994. 344 с.
2. **Колесников А. А.** Синергетическая концепция системного синтеза: единство процессов самоорганизации и управления // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2006. Т. 61. № 6. С. 10—38.
3. **Колесников А. А.** Синергетическая теория управления: концепции, методы, тенденции развития // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2001. Т. 23. № 5. С. 7—27.
4. **Разработка** комплекса предотвращения боксования: отчет о НИР (заключ.) / Рост. гос. ун-т. пут. сообщ. (РГУПС); рук. Коропец П. А. Ростов-на-Дону, 2000. 53 с.
5. **Колесников А. А., Веселов Г. Е.** и др. Синергетические методы управления сложными системами: Механические и электромеханические системы / Под общ. ред. А. А. Колесникова М.: КомКнига, 2006.
6. **Колесников А. А., Веселов Г. Е.** Синергетическое управление нелинейными электроприводами. III. Векторное управление асинхронными электроприводами // Известия вузов. Электромеханика. 2006. № 2. С. 25—36.
7. **Веселов Г. Е., Колесников А. А.** Аналитическое конструирование векторных законов управления асинхронными электроприводами // Известия ТРТУ. 1999. Т. 12. № 2. С. 58.
8. **Колесников А. А., Веселов Г. Е., Попов А. Н.** Синергетическое управление нелинейными электроприводами. I. Концептуальные основы синергетического синтеза систем // Известия вузов. Электромеханика. 2005. № 6. С. 8—15.
9. **Попов А. Н.** Синергетический синтез законов энергосберегающего управления электромеханическими системами // Известия ТРТУ. 2001. Т. 23. № 5. С. 179—185.
10. **Попов А. Н.** Синергетический синтез систем энергосберегающего управления электромеханическими процессами // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2011. Т. 119. № 6. С. 74—84.

УДК 62-5

Б. В. Новосёлов, д-р техн. наук, гл. науч. сотр.,
signal@kovrov.ru,
ОАО "Всероссийский научно-исследовательский институт «Сигнал»"

Использование критериев оценки плавности работы при проектировании следящих приводов

Дан обзор критериев оценки плавности работы следящих приводов, применяемых в различных отраслях науки и техники. Показаны достоинства и недостатки каждого из них, определены области их использования. Обсуждаются проблемные вопросы проектирования следящих приводов с высокой плавностью работы и, прежде всего, отсутствие метода синтеза приводов, обеспечивающего наряду с выполнением традиционных показателей качества требования по плавности.

Ключевые слова: *следящий привод, плавность, критерии оценки плавности, метод синтеза приводов*

Обеспечение плавного движения выходного вала привода в целом ряде решаемых задач является определяющей

Одной из важнейших задач теории и практики систем автоматического регулирования является создание быстродействующих следящих приводов с широким диапазоном регулирования скорости при обеспечении высокой точности и плавности отработки входных воздействий.

Обеспечение плавного движения исполнительной оси следящего привода в целом ряде случаев является определяющей задачей, так как неплавное перемещение объекта снижает его выходные характеристики, а иногда вообще не позволяет их обеспечить. К тому же неплавное перемещение исполнительной оси следящего привода и его составных частей вызывает ударные нагрузки в элементах, снижая надежность привода.

Причинами неплавного перемещения следящим приводом нагрузки являются внутренние и внешние возмущения, действующие на элементы привода:

нелинейная характеристика трения, кинематические погрешности и упругие деформации механических передач, помехи датчиков обратных связей, изменение коэффициентов усиления элементов и др.

Впервые вопрос обеспечения плавности работы следящих приводов на малых "ползучих" скоростях рассматривался в трудах З. Ш. Блоха [1], Дж. Хармера [2], В. А. Бесекерского [3]. Более полно этот вопрос исследован в работах В. А. Андрющенко [4, 5]. Но и в настоящее время проблема оценки и обеспечения плавной работы следящих приводов до конца не решена. Не закончена работа по исследованию влияния на плавность перемещения нагрузки того или иного возмущающего фактора. Нет и разработанных методов синтеза следящих приводов с учетом обеспечения требований по плавности при действии целого ряда возмущений, но прежде всего нет единого обоснованного критерия оценки плавности работы приводов.

№ п/п	Привод	Режимы работы	Требования по плавности
1	2Э61-Е1	$\Omega_1 = \begin{cases} 2\ ^\circ/_c — const \\ 9\ ^\circ/_c — const \end{cases}$	75 % $\Theta \leqslant$ (0...3) мрад 25 % $\Theta \leqslant$ (3...4) мрад $\begin{cases} \dot{\Theta} < 4{,}5 \text{ мрад/с} \\ \text{при } \omega_к > 2{,}5 \text{ Гц} \end{cases}$
2	2Э60-Е1	$\Omega_1 = \begin{cases} \leqslant 0{,}15\ ^\circ/_c — const \\ \geqslant 20\ ^\circ/_c — const \end{cases}$	$\Theta_{max} < 3$мрад; $\dot{\Theta} < 4{,}5$ мрад/с при $\omega_к > 2{,}5$ Гц
3	3У86-Э	$\Theta_1 = \Theta_{1m}\sin\omega_р t$ $\Theta_{1m} = 10^\circ$, $\omega_р = 0{,}16$ Гц	$\Theta_{max} < 3$ мрад 94 % $\dot{\Theta} \leqslant 2{,}5$ мрад/с при $T_н = 6{,}3$ с
4	3У86-1	$\Theta_1 = \Theta_{1m}\sin\omega_р t$ $\Theta_{1m} = 10^\circ$, $\omega_р = 0{,}16$ Гц	$\Theta_{max} < 3$ мрад 94 % $\dot{\Theta} \leqslant 2{,}5$ мрад/с при $T_н = 6{,}3$ с
5	9С839	$\Omega_1 = \begin{cases} \leqslant 0{,}025^\circ/_c — const \\ \geqslant 3\ ^\circ/_c — const \end{cases}$	$\Theta \leqslant 2$ мрад $\Pi = \frac{\Omega_{2max} - \Omega_{2min}}{\Omega_{2max} + \Omega_{2min}} \cdot 100 \leqslant 15$ %
6	СНСОПМ1	$\Omega_1 = \begin{cases} 0{,}03\ ^\circ/_c — const \\ 0{,}18\ ^\circ/_c — const \end{cases}$	$\Pi = \begin{cases} 20\ \% \\ 60\ \% \end{cases}$
7	СППУБМ9А34	$\Omega_1 = \leqslant 25\ ^\circ/_c$ — const	$\Theta \leqslant 5$ мрад $\Pi = \Theta_{max} - \Theta_{min} \leqslant 1{,}5$ мрад
8	2Э42	$\Omega_{1min} \leqslant 0{,}05$ % — const	$\Pi = \Theta_{max} - \Theta_{min} \leqslant 0{,}5$ мрад при $0 \leqslant t \leqslant T_н$
9	2Э58	$\Omega_{1min} \leqslant 0{,}02$ % — const	$\Pi = \Theta_{max} - \Theta_{min} \leqslant 0{,}5$ мрад при $0 \leqslant t \leqslant T_н$
10	9С814	$\Omega_{1min} \leqslant 0{,}3$ % — const	$\Pi = \frac{\Theta_{max} - \Theta_{min}}{\Theta_{max}} \leqslant \gamma$ при $0 \leqslant t \leqslant T_н$

Проектировщики в каждом конкретном случае используют "свой" критерий. В подтверждение сказанного в таблице даны примеры выдвигаемых требований по плавности к конкретным следящим приводам, разработанным ОАО "ВНИИ "Сигнал", сформулированных в технических условиях на приводы.

В таблице приняты следующие обозначения: Θ_1, Ω_1, $\omega_р$, Θ, $\omega_к$, Ω_2 — соответственно координата, скорость, частота входного воздействия, ошибка, частота изменения ошибки, выходная скорость следящего привода; $T_н$ — период наблюдения; П — показатель (критерий) плавности; γ — допускаемое значение П —эквивалент степени колебательности в свободном переходном процессе.

Теперь перейдем от конкретных разработок конкретного предприятия (см. таблицу) к анализу известных из отечественной и зарубежной литературы критериев оценки плавности работы следящих приводов.

Применяемые критерии оценки плавности работы следящих приводов

Чаще всего плавность оценивается коэффициентом неравномерности перемещения (%) вида [6, 7]

$$\Pi_1 = \frac{\Omega_{2max} - \Omega_{2min}}{\Omega_{2ср}} \cdot 100, \qquad (1)$$

где Ω_{2max}, Ω_{2min}, $\Omega_{2ср}$ — наибольшее, наименьшее и среднее значения скорости перемещения за цикл.

Такая оценка характеризует размах колебаний скорости, наложенных на основное движение, но совершенно не отражает частоту этих колебаний, т. е. не оценивает значение ускорения перемещения. Для иллюстрации представлены два графика скорости $\Omega_2(t)$ перемещения нагрузки с одинаковыми значениями Π_1, но абсолютно с различным характером изменения Ω_2 (рис. 1).

Кроме того, значение Π_1 будет зависеть и от величины $\Omega_{2ср}$. Однако оценка Π_1 проста, а поэтому до сих пор часто применяется на практике.

Иногда при оценке плавности перемещения конкретных следящих приводов в различных отраслях науки и техники несколько видоизменяют критерий Π_1. Так, при оценке равномерности пе-

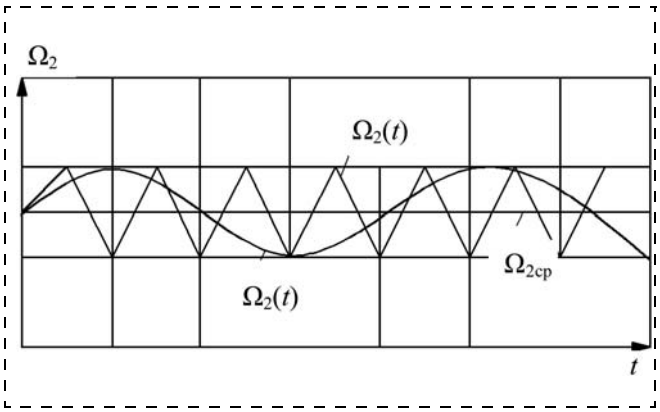


Рис. 1. Скорости перемещения нагрузки с одинаковыми значениями Π_1, но различным характером изменения

ремещения координатных столиков оптических приборов пользуются критерием (%) вида [6]

$$\Pi_2 = \frac{\sum\limits_{i=1}^{n-1} |S_i - S_{i+1}|}{(n-1)\Delta t} \Bigg/ \frac{\sum\limits_{i=1}^{n} S_i}{n\Delta t} \cdot 100,$$

где n — число рассматриваемых промежутков времени; S — путь, пройденный объектом за промежуток времени Δt, т. е. расстояние между смежными штрихами, или

$$\Pi_2 = \frac{\Delta\Omega_2}{\Omega_{2\text{ср}}} \cdot 100,$$

так как $\sum\limits_{i=1}^{n} S_i$ — сумма всего пути, а $\sum\limits_{i=1}^{n-1} |S_i - S_{i+1}|$ — сумма всех приращений пути.

При оценке равномерности перемещения плавильного узла в установках для выращивания монокристаллов в качестве критерия плавности (%) используется зависимость [9, 10]

$$\Pi_3 = \frac{\Delta\Theta_2\omega}{\Omega_{2\text{ср}}} \cdot 100, \qquad (2)$$

где $\Delta\Theta$, ω — амплитуда и частота колебаний перемещения, $\Omega_{2\text{ср}}$ — средняя скорость перемещения. Критерий (2) является разновидностью критерия (1), так как при периоде колебаний T имеем

$$\Pi_3 = \frac{\Delta\Theta_2}{T\Omega_{2\text{ср}}} \cdot 100 = \frac{\Delta\Omega_2}{T\Omega_{2\text{ср}}} \cdot 100.$$

Для устранения недостатков критериев Π_1, Π_2, Π_3 некоторые разработчики пользуются оценкой, представляющей собой отношение (%) усредненного модуля переменной составляющей функции скорости к среднему значению ее постоянной составляющей за время T [9, 10]:

$$\Pi_4 = \frac{\int\limits_0^T |\Omega_2(t) - \Omega_{2\text{ср}}|\,dt}{\Omega_{2\text{ср}}} \cdot 100; \qquad (3)$$

$$\Pi_5 = \frac{100}{T}\int\limits_0^T \left(1 - \frac{\Omega_2(t)}{\Omega_{2\text{ср}}}\right)^2 dt, \qquad (4)$$

где T — время измерения; $\Omega_2(t)$ — функция скорости; $\Omega_{2\text{ср}}$ — среднее значение скорости.

Следует отметить, что критерии Π_4, Π_5 представляют собой практически площадь между графиками скоростей $\Omega_2(t)$ и $\Omega_{2\text{ср}}$, а это позволяет оценить не только размах колебаний $\Omega_2(t)$, но и, в определенной степени, ускорение перемещения объекта.

При использовании критериев (3), (4) для равномерности движения имеем $\Pi_4 = \Pi_5 = 0$, а для скачкообразного движения — $\Pi_4 = \Pi_5 = 1$. Это предельные случаи.

Во многих объектах регулирования определяющим показателем плавности перемещения является ускорение ε_2 или даже его производная [12, 13]:

$$\Pi_6 = \left(\frac{d\varepsilon_2}{dt}\right)^{-1} = \left(\frac{d^2\Omega_2}{dt^2}\right)^{-1} = \left(\frac{d^3\Theta_2}{dt^3}\right)^{-1}.$$

Такая оценка используется и для оценки плавности разгона привода от нуля до максимальной скорости. Применение ее весьма ограниченно, и в дальнейшем критерий плавности должен связываться с амплитудой свободного колебания системы при нормированном возмущении или соответствующей составляющей усилия в кинематической цепи [12].

Для оценки неравномерности (плавности) работы определенного класса механизмов иногда измеряют колебания момента, необходимого для сообщения движения механизму. В этом случае критерием неравномерности (плавности) работы механизма является дискриминант неравномерности момента

$$\Pi_7 = \Delta M = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{M_{\max} + M_{\min}},$$

где $M_{\max}$, $M_{\min}$ — наибольший и наименьший моменты сопротивления движению (рис. 2). По критерию Π_7 можно оценивать правильность изготовления механизма, например, винтовой шариковой передачи [13].

В работах И. И. Артоболевского [14, 15] предложено несколько критериев плавности, близких по своему физическому смыслу к критериям Π_6, Π_7 и названных динамическим коэффициентом неравномерности движения Π_8, коэффициентом динамичности Π_9 и коэффициентом рывка Π_{10}:

$$\Pi_8 = \frac{\Omega_{2\text{к}} - \Omega_{2i}}{\Omega_{2\text{ср}}} = \frac{\Delta\Omega_2}{\frac{1}{\Delta t}\int\limits_{t_i}^{t_k} \Omega_2\,dt}; \qquad (5)$$

$$\Pi_9 = \frac{2\varepsilon_2}{\Omega_2^2} = 2\frac{I_n\varepsilon_2}{I_n\Omega_2^2} = \frac{M_{\text{и}}}{T_{\text{к}}}; \qquad (6)$$

$$\Pi_{10} = \frac{2\varepsilon_2}{\Omega_2^3} = 2\frac{I_n\dot{\varepsilon}_2}{I_n\Omega_2^3} = \frac{I_n\dot{\varepsilon}_2}{T\Omega_2} = \frac{N_{\text{р}}}{N_T}, \qquad (7)$$

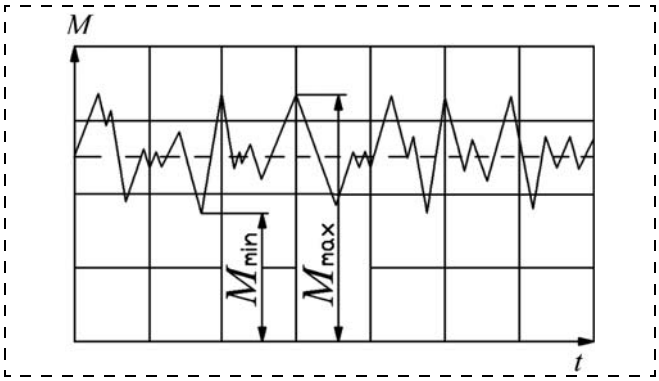


Рис. 2. Пульсации момента двигателя

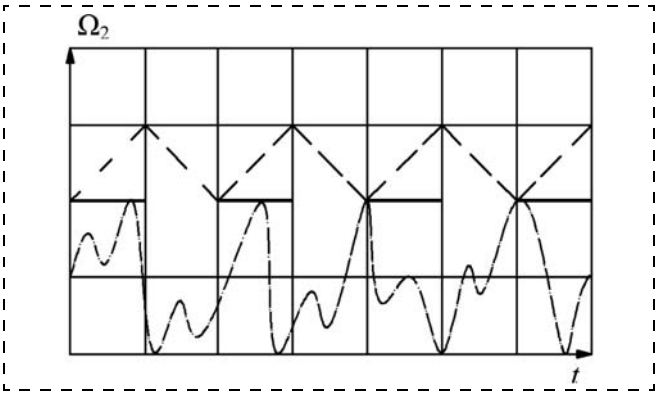


Рис. 3. Изменение скорости нагрузки при движении с остановками (▬), с равноускоренными участками (---) и по случайному закону (– • –)

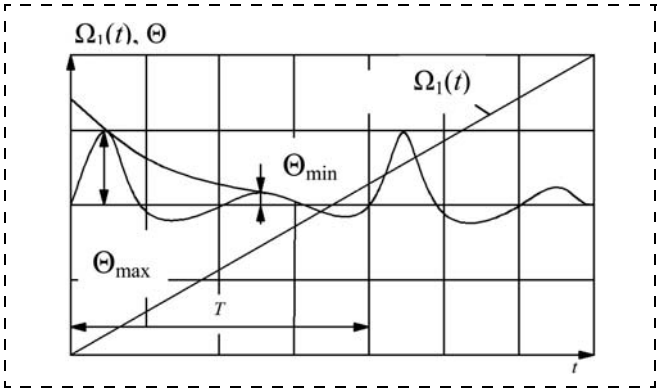


Рис. 4. Изменение ошибки привода в режиме отработки постоянной скорости

где Ω_2, ε_2 — скорость и ускорение перемещения объекта регулирования; I_n — момент инерции; $M_и$ — момент сил инерции начального движения; $T_к$ — кинетическая энергия привода; $N_р$, N_T — мгновенные мощности рывка и кинетической энергии соответственно.

Необходимо отметить, что использование того или иного критерия (5)—(7) определяется характером изменения скорости. Рис. 3 иллюстрирует три вида изменения скорости: при движении с остановками (жесткий удар), с равноускоренными участками (мягкий удар) и по случайному закону. Для движения с остановками оценка может быть выполнена только критерием $П_8$, так как критерии $П_9$ и $П_{10}$ не имеют в этом случае смысла. Движение с равноускоренными участками оценивается критериями $П_8$ и $П_9$, но $П_{10} = \infty$. В самом общем случае (движение по случайному закону) для комплексной оценки плавности необходимо учитывать все критерии $П_8$, $П_9$, $П_{10}$.

В ряде работ [3—5], исследующих динамику систем, работающих в области низких скоростей, за критерий плавности принимают отсутствие периодических остановок исполнительной оси при отработке системой заданной скорости $\Omega_1(t)$:

$$П_{11} = \Omega_1 - \Omega_2 \leqslant 0 \text{ при } \Omega_1 \to 0. \qquad (8)$$

Физический критерий (8) означает, что скорость изменения ошибки системы после начала движения должна быть отрицательной при сколь угодно малом значении входной скорости $\Omega_1 \to 0$. Этот критерий удобен для синтеза следящих приводов, но им можно пользоваться лишь в области малых скоростей; кроме того, он не дает количественной оценки плавности движения исполнительной оси.

Для следящих приводов, работающих в режимах, близких к отработке постоянных скоростей и не допускающих повышенных динамических нагрузок на передачи и объект регулирования, целесообразно использовать критерий вида [7, 9—11]

$$П_{12} = \frac{\Theta_{max} - \Theta_{min}}{\Theta_{max}} \leqslant \gamma, \qquad (9)$$

где Θ_{max}, Θ_{min} — максимальная и минимальная амплитуды ошибки в оцениваемом диапазоне перемещения объекта регулирования; γ — допустимое значение показателя — эквивалент степени колебательности привода в свободном переходном процессе. На рис. 4 показано изменение ошибки привода в режиме отработки постоянной скорости $\Theta_1(t) = \Omega_1 = \text{const}$.

Практически для любой системы в графике ошибки $\Theta(t)$ прослеживаются интервалы времени T, в течение которого система находится в режиме отработки некоторого рассогласования, вызванного внутренними возмущениями. Критерий (9) и раскрывает колебательные свойства системы. Это объясняется тем, что для многих современных приводов типичным является случай, когда ближайшими к мнимой оси являются комплексные корни $p_{1,2} = \alpha_1 \pm j\beta$, где $\alpha_1 = -h$. В этом случае переходная характеристика системы описывается выражением

$$\Theta_2(t) = A\mathbf{e}^{-\alpha_1 t}\sin(\beta t + \psi) + \sum_{k=3}^{n} C_k \mathbf{e}^{p_k t}, \qquad (10)$$

где A, C_k — произвольные постоянные.

При выполнении условия $|\text{Re } p_k| \gg |\alpha_1| = h$, $k = 3, 4, ..., n$, переходный процесс в основном будет определяться лишь первым членом в правой части соотношения (10):

$$\Theta_2(t) = A\mathbf{e}^{-\alpha t_1}\sin(\beta t + \psi). \qquad (11)$$

Выражение (11) описывает синусоидальные колебания с частотой β, амплитуда которых убывает по экспоненциальному закону с течением времени.

Интенсивность затухания этих колебаний может быть охарактеризована затуханием

$$\eta = \frac{A_{max}(t_1) - A_{max}(t_1 + 2\pi/\beta)}{A_{max}(t_1)},$$

где t_1 — произвольный фиксированный момент времени; $2\pi/\beta$ — период колебаний.

Наиболее широко для оценки плавности работы следящих приводов, предназначенных для перемещения различных оптических, тепловизионных, пеленгационных и других этого же типа приборов, применяют критерии, связанные с анализом спектра составляющих ошибки.

При работе полуавтоматической системы наведения, замкнутой через прицел и оператора, в качестве критерия плавности используют зависимость [10, 11]

$$\Pi_{13} = |\Theta(t)| < a/2,$$

где $a/2$ — разрешающая способность прицельного устройства.

С учетом запаздывания оператора при отработке рассогласования критерий Π_{13} несколько видоизменяется:

$$\Pi_{13} = |\Theta(t)| < \alpha \leqslant a/4.$$

Система наведения телевизионного пеленгатора должна непрерывно совмещать линию визирования с направлением на цель. Здесь уже кроме абсолютной величины ошибки наведения $\Theta(t)$ большое значение имеет скорость изменения ошибки $\dot{\Theta}(t)$, так как при увеличении $\Theta(t)$ ухудшается разрешающая способность телевизионного пеленгатора. Критерий оценки плавности принимает вид

$$\Pi_{14} = \begin{cases} |\Theta(t)| < \alpha; \\ |\dot{\Theta}(t)| < \beta. \end{cases} \qquad (12)$$

Величины α и β всегда имеют четко обоснованное значение. Так, к системе наведения и стабилизации радиолокационного пеленгатора, работающей в режиме поиска, предъявляется требование обзора заданного углового сектора за определенное время. Для надежного обнаружения цели необходимо, чтобы за промежуток времени $[t_i, t_{i+1}]$ угол, на который перемещается линия визирования в абсолютном пространстве, не превышал величины a, определяемой шириной диаграммы направленности:

$$|y(t_i) - y(t_{i+1})| < a. \qquad (13)$$

Если закон изменения угла наведения имеет вид

$$y(t) = \dot{u}\tau, \qquad (14)$$

то изменение ошибки

$$|\Theta(t_i) - \Theta(t_{i+1})| < a - \dot{u}\tau, \qquad (15)$$

где $\tau = t_{i+1} - t_i$ — период следования зондирующих импульсов.

Из зависимостей (13)—(15) следует, что

$$\frac{|\Delta\Theta|}{\tau} < \frac{a}{\tau} - \dot{u}$$

или

$$|\Theta(t)| < \beta = \frac{\Delta\Theta}{\tau} - \dot{u}.$$

Выражения (13)—(15) и определяют значения α, β в критерии (12).

В целом ряде систем в критерий Π_{14} добавляется еще одна составляющая:

$$\Pi_{15} = \begin{cases} |\Theta(t)| < \alpha; \\ |\dot{\Theta}(t)| < \beta; \\ |\ddot{\Theta}(t)| < \gamma. \end{cases} \qquad (16)$$

Вопросы синтеза следящих приводов с учетом обеспечения ими требований по плавности работы

Необходимость использования критерия Π_{15} хорошо иллюстрируется в итерационных системах, где второй (точный) канал отрабатывает ошибку первого (грубого) канала (рис. 5).

Пусть в схеме (рис. 5) воздействие ошибки $\Theta(t)$ грубого канала на точный канал выражается через коэффициенты ошибки:

$$\Theta_T(t) = C_0\Theta(t) + C_1\dot{\Theta}(t) + \frac{C_2}{2!}\ddot{\Theta}(t) + \frac{C_3}{3!}\dddot{\Theta}(t) + \ldots$$

Если налагать требование

$$|\Theta_T(t)| < a$$

исходя из возможностей каждого из каналов, то можно записать

$$\left|C_0\Theta(t) + C_1\dot{\Theta}(t) + \frac{C_2}{2!}\ddot{\Theta}(t) + \frac{C_3}{3!}\dddot{\Theta}(t) + \ldots\right| \leqslant a.$$

Следовательно, необходимо требовать для грубого канала выполнение условий (16).

Критерий (16) налагает ограничения не только на предельное значение ошибки привода, но и определяет амплитуду и частоту наложенных колебаний исполнительной оси на основное ее движение по любому закону.

Например, пусть входное воздействие $\Theta_1(t)$ является гармонической функцией $\Theta_1(t) = \Theta_{1m}\sin\omega t$ (рис. 6).

Ошибка $\Theta(t)$ отработки такого воздействия носит вид этой же гармоники $\Theta_a(t)$, смещенной по фазе с наложенными на нее дополнительными гармониками $\Theta_b(t)$ (рис. 6), параметры которых легко заложить в значения α, β, γ критерия (16).

Проектировщиков часто интересует спектр наложенных колебаний. Поэтому на практике задают обычно параметры (амплитуду и частоту) входного

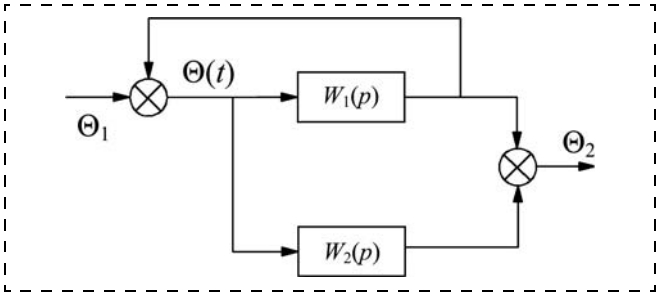


Рис. 5. Структурная схема двухканального привода

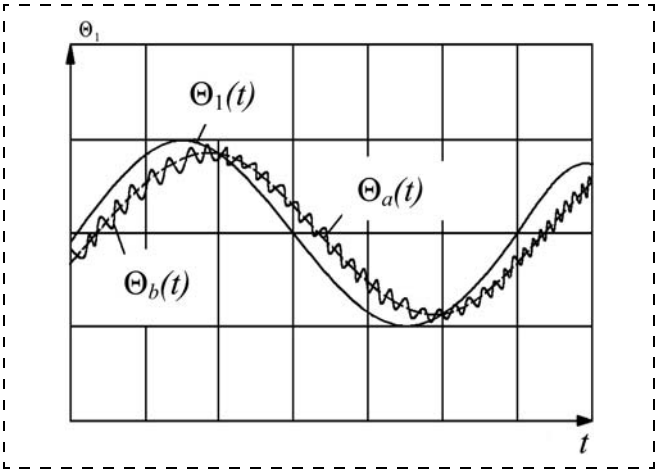


Рис. 6. Изменение ошибки при гармоническом входном воздействии

воздействия, допустимую ошибку $\Theta(t)$ и максимальную скорость изменения ошибки $\dot{\Theta}(t)$ при отработке этого входного воздействия.

Оценку же $\Theta_{max}(t)$ ведут на выходе дифференцирующего звена с фильтром определенного спектра частот ошибки, исключающего из процесса оценки плавности те наложенные на основное движение колебания, которые не воспринимаются объектом регулирования.

В ряде систем для оценки плавности их работы ведется контроль среднеквадратического отклонения скорости изменения ошибки (СКО СИО) σ:

$$\Pi_{16} = \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (\dot{\Theta}[i] - \dot{\Theta}_{ср})^2}{N-1}}, \qquad (17)$$

где $\dot{\Theta}[i]$ — значение составляющих скорости изменения ошибки Θ на интервале измерения Λt, мрад/с; $\dot{\Theta}_{ср}$ — среднее значение скорости изменения ошибки Θ на интервале измерения Λt, мрад/с; N — число точек на интервале измерения Λt, $N = \Lambda t/T$, где T — дискретность замеров.

Расчет параметров Π_{16} проводится, как правило, в течение пяти последних периодов гармонического входного воздействия $\Theta_1(t) = \Theta_{1max}\sin\omega t$ (общая длительность $\Theta_1(t)$ — шесть периодов) путем пересчета элементов массива ошибки положения Θ звеном с передаточной функцией, аналоговым эквивалентом которой является

$$W(p) = \frac{(T_1 p)^2}{(1 + T_1 p)(1 + T_2 p)^3}, \qquad (18)$$

где T_1, T_2, конкретно для системы 2Э61-Е1 (см. таблицу) равны $T_1 = 0{,}064$ с, $T_2 = 0{,}016$ с.

Алгоритм расчета текущей скорости изменения ошибки представлен на рис. 7.

Возмущения, действующие на элементы следящего привода, обычно носят случайный характер, а потому в ряде случаев целесообразно в качестве критериев плавности использовать интегральные оценки. К ним, в частности, можно отнести критерии (3), (4), но они не учитывают частотный состав ошибки привода. А это, как отмечалось выше, иногда является определяющим.

В работе [16] на основе спектральных представлений выходной координаты системы предложен критерий плавности вида

$$\Pi_{17} = \gamma \int_{\omega_н}^{\omega_к} [s(\omega) - \mu(\omega)]d\omega, \qquad (19)$$

где

$$\gamma = \begin{cases} 0 \text{ при } s(\omega) - \mu(\omega) < 0; \\ 1 \text{ при } s(\omega) - \mu(\omega) > 0; \end{cases} \qquad (20)$$

$s(\omega)$ — спектральная плотность процесса на выходе системы, описываемого функцией

$$\psi(t) = \varphi(t) + n(t); \qquad (21)$$

$\omega_н$, $\omega_к$ — круговые частоты, характеризующие начало и конец частотного диапазона спектра процесса $\psi(t)$; $\mu(\omega)$ — функция нечувствительности системы, характеризующая те амплитуды A_i и частоты ω_i, которые не воспринимаются объектом управления; $\varphi(t)$ — сложная гармоническая функция, состоящая из суммы гармоник

$$\varphi(t) = \sum_{i=-\infty}^{i=\infty} F_i \mathbf{e}^{j\omega_i t} = \sum_{-\infty}^{\infty} \mathbf{e}^{j\omega_i t} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} \varphi(t)\mathbf{e}^{j\omega_i t} dt; \qquad (22)$$

$n(t)$ — случайная функция, удовлетворяющая условиям стационарности и узкополосности:

$$n(t) = m_n + \sum_{k=0}^{\infty} A_k(t)\cos[K\Omega t + \beta_k(t)], \qquad (23)$$

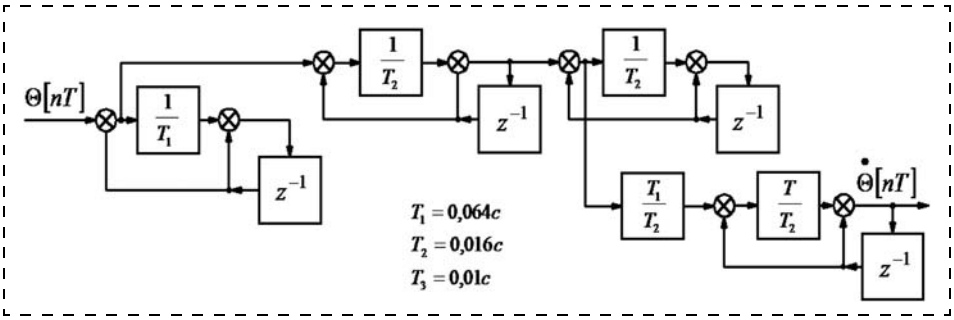


Рис. 7. Схема расчета текущей скорости изменения ошибки

m_n — математическое ожидание функции $n(t)$; $A_k(t)$, $\beta_k(t)$ — случайные функции амплитуды и фазы (полагаем, что $A_k(t)$, $\beta_k(t)$ независимы и имеют равномерный закон распределения с математическими ожиданиями m_A, m_β).

Учитывая выражения (20)—(23), можно записать

$$s(\omega) = \varphi^2(t) = \frac{1}{T}\int_0^T [\varphi(t) + n(t)]^2 dt =$$

$$= \frac{1}{T}\int_0^T \sum_{i=-\infty}^{\infty} (F_i \mathbf{e}^{j\omega_i t})^2 dt + \frac{1}{T}\int_0^T \sum_{\nu=-\infty}^{\infty} [F_{0\nu}(t)\mathbf{e}^{j\omega_i t}]^2 dt =$$

$$= \sum_{i=0}^{\infty} |F_i|^2 + \sum_{\nu=0}^{\infty} |F_{0\nu}(\omega)|^2.$$

Определение плавности по критерию Π_{17} при отмеченных условиях и допущениях выполняется следующим образом.

Энергетический спектр, или спектральная плотность процесса $s(\omega)$, определяется в диапазоне частот от 0 до ∞.

Спектральная плотность $s(\omega)$ и функции нечувствительности $\mu(\omega)$ представлены на рис. 8. Характеристика нечувствительности $\mu(\omega)$ представляет собой зависимость квадрата амплитуды A_k от частоты $\omega_к$, не воспринимаемых объектом управления. Если $s(\omega) > \mu(\omega)$, то процесс классифицируется как неплавный, а если $s(\omega) < \mu(\omega)$, то как плавный.

Основываясь на изложенной методике, в работах [9, 11] предложен критерий оценки плавности вида

$$\Pi_{18} = \gamma \int_{\omega_н}^{\omega_к} [s'(\omega) - \mu(\omega)] d\omega, \qquad (24)$$

где γ, $\omega_н$, $\omega_к$, $\mu(\omega)$ имеют тот же смысл, что и в зависимости (19); $s'(\omega)$ — спектральная плотность случайного процесса $k(t)$ или $\rho(t)$; $k(t) = 2\varepsilon_2/\Omega_2^2$ — коэффициент динамичности рывка вида (6); $\rho(t) = 2\dot{\varepsilon}_2/\Omega_2^3$ — коэффициент рывка вида (7); Ω_2, ε_2 — скорость и ускорение выходной координаты системы.

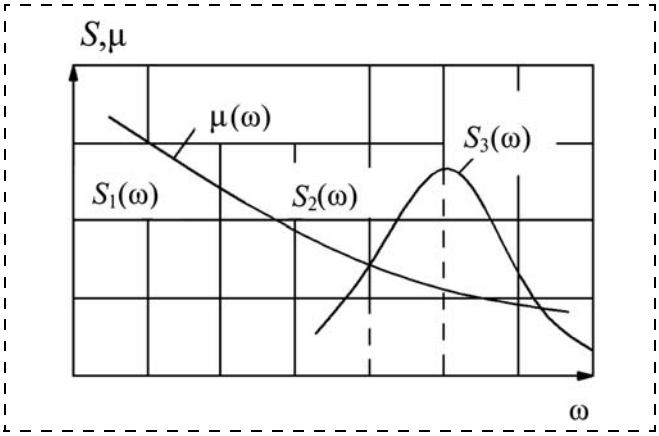


Рис. 8. Спектральные плотности $s(\omega)$ и функции нечувствительности $\mu(\omega)$

Достоинство критерия (24) в том, что, в отличие от критерия (19), в нем используется не сама непосредственно выходная координата, а безразмерная функция выходной координаты, отражающая динамические нагрузки в приводе.

Изучение литературы и общение с экспериментаторами показывает, что разнообразие рассмотренных критериев оценки плавности полностью удовлетворяют проектировщиков и экспериментаторов при решении конкретных задач. Однако возникают две проблемы: необходимость иметь, по возможности, для большинства решаемых задач единый обобщенный критерий оценки плавности и необходимость разработки метода синтеза приводов с использованием этого критерия.

Список литературы

1. **Блох З.** Ш. Динамика линейных систем автоматического регулирования машин. М.: Гостехиздат, 1952.
2. **Хармер Дж.** О скачкообразных движениях в позиционных следящих системах, вызываемых влиянием сухого трения // Сб. материалов конференции в Крэнфилде в 1951. М.: ИИЛ, 1954.
3. **Бесекерский В. А., Орлов В. А., Полонская Л. В., Федоров С. М.** Проектирование следящих систем малой мощности. Л.: Судпромгиз, 1958.
4. **Андрющенко В. А.** О плавности работы следящих систем // Сб. НТИ по приборостроению. 1961. № 2 (17). С. 10—18.
5. **Андрющенко В. А.** Основы теории проектирования приборных следящих систем низких скоростей. Автореферат диссертации доктора техн. наук. Л., 1979.
6. **Михайлов О. П., Лебединский Б. П.** Определение неравномерности вращения двигателей постоянного тока для станков с ЧПУ // Автоматические манипуляторы и металлообрабатывающее оборудование с программным управлением. Тула: ТПИ, 1986.
7. **Новосёлов Б. В., Бушенин Д. В.** Проектирование механических передач следящего привода. Владимир: ОСНТО, 1981.
8. **Рагузин Р. М., Ангальшток Ф. Ф.** Определение неравномерности движения механизмов // Изв. вузов. Приборостроение. 1973. Т. 16. № 11.
9. **Новосёлов Б. В., Морозов В. В., Потапова Л. Д.** Плавность работы электромеханических приводов. Владимир: ОСНТО, 1986.
10. **Новосёлов Б. В.** Механические передачи в следящем приводе. Обзор № 5550. М.: НТЦ "Информтехника", 1993.
11. **Новосёлов Б. В., Морозов В. В., Бушенин Д. В., Потапова Л. Д.** Плавность работы электромеханических приводов // Информэлектро. 493 — ЭТ. 1986. 180 с.
12. **Зусман В. Г., Мейстель А. М., Херсонский Ю. Н.** Автоматизация позиционных электроприводов. М.: Энергия, 1970.
13. **Соболевский Б.** Неравномерность работы винтовых шариковинтовых передач // Вестник машиностроения. 1980. № 12.
14. **Артоболевский Н. Н.** Об одном критерии режима установившегося движения рабочий машины // Сб. трудов по земледельческой механике. М.: Сельхозгиз, 1954. Т. 2.
15. **Артоболевский Н. Н., Лощигин В. С.** Динамика машинных агрегатов на предельных режимах движения. М.: Наука, 1977.
16. **Боровков А. Г.** Критерий плавности движения в задачах управления динамических систем // Системы автоматического управления: Сб. трудов МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1979. Вып. 7. № 314.

УДК 622.279.23

М. А. Джамалбеков, канд. техн. наук, доц.,
mjamalbayov@ctnet.az,
Бакинский государственный университет,
Научно-исследовательский институт
прикладной математики, г. Баку, Азербайджан

Алгоритм прогнозирования разработки газоконденсатных пластов при различных реологических режимах

Предлагается алгоритм для прогнозирования основных показателей разработки при истощении газоконденсатной залежи, представленной коллекторами с различными реологическими характеристиками. Газоконденсатная смесь представляется как взаимнорастворяемая двухфазная углеводородная жидкость, и учитываются релаксационные изменения пористости и проницаемости пласта-коллектора по мере падения пластового давления. Предложенный алгоритм апробирован на примере разработки гипотетической газоконденсатной залежи при заданной депрессии, различных значениях времени релаксации и степенях деформируемости.

Ключевые слова: *разработка газоконденсатной залежи, газоконденсатная залежь, алгоритм прогнозирования разработки, фильтрация газоконденсатной смеси, деформация пласта, релаксация пористости, бинарный модель, двухфазная двухкомпонентная система, режим истощения*

Введение

Известно, что разработка глубокозалегающих газоконденсатно-нефтяных месторождений сопровождается деформацией пород коллекторов, в результате чего изменяются их емкостные и коллекторские характеристики. Многочисленными научными работами установлено, что при разработке по мере падения внутрипорового давления пласты залежей нефти и газа подвергаются порой релаксационной и релаксационно-ползучей деформациям (см., например, [5—11]). С учетом этого обстоятельства в работах [3, 4] получены решения задач фильтрации газоконденсатной смеси в релаксационных и релаксационно-ползучих коллекторах. Решения задач фильтрации газоконденсатной смеси в упругих, упруго-релаксационных и релаксационно-ползучих пластах-коллекторах, изложенные в работах [1, 3, 4], могут стать основой для расчетных алгоритмов прогнозирования основных показателей разработки газоконденсатной залежи в деформируемых коллекторах с различными реологическими характеристиками.

Целью данной работы является выработка алгоритма для прогнозирования разработки газоконденсатных залежей, представленных упругими, релаксационно-упругими и релаксационно-ползучими коллекторами при истощении в различных технологических режимах.

Определение временных характеристик разработки

Известно, что согласно бинарной модели материальный баланс газа $q_г$ и конденсата q_k в условиях релаксационно-деформируемых пластов можно выразить следующей системой дифференциальных уравнений [3]:

$$q_г = -\frac{d}{dt}\left[\frac{(1-\rho)p\beta}{z(p)p_{at}}[1 - c(p)\overline{\gamma}] + \frac{\rho S(p)}{a(p)}\right]\Omega(p,t), \quad (1)$$

$$q_к = -\frac{d}{dt}\left[\frac{\rho}{a(p)} + (1-\rho)\frac{p\beta c(p)}{z(p)p_{at}}\right]\Omega(p,t), \quad (2)$$

где

$$\Omega(p,t) = \pi(R_к^2 - r_с^2)hm(p,t)$$

или для полосообразного пласта

$$\Omega(p,t) = bl_к hm(p,t).$$

Здесь $R_к$, $l_к$ — координаты контура питания в условиях радиального и прямолинейного течений; b — ширина пласта; $r_с$ — радиус скважины; h — толщина пласта; p — давление; ρ — насыщенность пор жидким конденсатом; a — объемный коэффициент жидкой фазы; z, β — коэффициенты сверхсжимаемости и температурной поправки; c — содержание потенциально жидких углеводородов в газовой фазе; $c\overline{\gamma}$ — долевое содержание потенциально жидких углеводородов в газовой фазе в пластовых условиях; p_{at} — атмосферное давление; t — время; m — пористость пласта; S — количество растворенного газа в нефти.

Из (1) и (2) можно получить следующую систему дифференциальных уравнений, позволяющую определить основные временные характеристики раз-

работки газоконденсатной залежи при различных условиях [3]:

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{\frac{q_г}{\Omega_0\overline{\Omega}}\left(\alpha_4 + \frac{\alpha_2}{G}\right) - (\alpha_2\alpha_3 + \alpha_1\alpha_4)\frac{1}{\overline{\Omega}}\frac{d\overline{\Omega}}{dt}}{(\alpha_5 + \alpha_6)\alpha_4 + (\alpha_7 + \alpha_8)\alpha_2}, \quad (3)$$

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{\frac{q_г}{\Omega_0\overline{\Omega}G} + (\alpha_7 + \alpha_8)\frac{dp}{dt} + \alpha_3\frac{1}{\overline{\Omega}}\frac{d\overline{\Omega}}{dt}}{\alpha_4}, \quad (4)$$

где газоконденсатный фактор G имеет вид

$$G = \frac{\frac{\overline{\mu}(p)a(p)p\beta}{z(p)p_{at}}[1 - c(p)\overline{\gamma}(p)] + \frac{S(p)}{\psi(\rho)}}{\frac{1}{\psi(\rho)} + \frac{\overline{\mu}(p)a(p)p\beta c(p)}{z(p)p_{at}}}; \quad (5)$$

$\overline{\mu}(p)$ — отношение вязкостей жидкой и газовой фаз; $\psi(\rho)$ — отношение относительных фазовых проницаемостей газовой и жидкой фаз; $q_г$ — дебит газа;

$$\alpha_1 = (1 - \rho)\frac{p\beta}{z(p)p_{at}}[1 - c(p)\overline{\gamma}(p)] - \rho\frac{S(p)}{a(p)},$$

$$\alpha_2 = \frac{p\beta}{z(p)p_{at}}[1 - c(p)\overline{\gamma}(p)] - \frac{S(p)}{a(p)},$$

$$\alpha_3 = \rho\frac{1}{a(p)} - (1 - \rho)\frac{p\beta c(p)}{z(p)p_{at}}, \ \alpha_4 = \frac{1}{a(p)} - \frac{p\beta c(p)}{z(p)p_{at}},$$

$$\alpha_5 = (1 - \rho)\left\{\frac{p\beta}{z(p)p_{at}}[1 - c(p)\overline{\gamma}(p)]\right\}',$$

$$\alpha_6 = \rho\left[\frac{S(p)}{a(p)}\right]', \ \alpha_7 = \rho\left[\frac{1}{a(p)}\right]', \ \alpha_8 = (1 - \rho)\left[\frac{p\beta c(p)}{z(p)p_{at}}\right]',$$

"′" — означает производную по p.

Для решения уравнений (3)—(4) требуются определения $\overline{\Omega}$ и $\frac{d\overline{\Omega}}{dt}$ для конкретного типа пласта-коллектора по деформируемости, где $\overline{\Omega} = \frac{\Omega}{\Omega_0}$ — отношение текущего объема Ω газонасыщенных пустот к его первоначальному значению Ω_0. Ниже приводим соотношения для $\overline{\Omega}$ и $\frac{d\overline{\Omega}}{dt}$ при различных деформациях пород коллектора.

В случае ***упругой деформации*** (изменение пористости подчиняется экспоненциальному закону) имеем

$$\overline{\Omega} = \frac{\Omega}{\Omega_0} = \exp[a_m(p - p_0)],$$

$$\frac{d\overline{\Omega}}{dt} = a_m\exp[a_m(p - p_0)]\frac{dp}{dt}, \quad (6)$$

где a_m — коэффициент упругого изменения пористости.

Уравнение (3) с учетом (6) будет иметь следующий вид [2]:

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{\frac{q_г}{\Omega_0\overline{\Omega}}\left(\alpha_4 + \frac{\alpha_2}{G}\right)}{(\alpha_5 + \alpha_6)\alpha_4 + (\alpha_7 + \alpha_8)\alpha_2 + (\alpha_2\alpha_3 + \alpha_1\alpha_4)\frac{1}{\overline{\Omega}}a_m\mathbf{e}^{a_m(p - p_0)}}. \quad (7)$$

В случае ***релаксационно-упругой деформации*** имеем

$$\frac{d\overline{\Omega}}{dt} = \frac{\overline{m}(p) - \overline{m}}{\tau_m}, \quad (8)$$

где

$$\overline{m}(p) = \frac{m(p)}{m_0}, \ \overline{m}(p) = \exp[a_m(p - p_0)];$$

m_0, τ_m — начальное значение коэффициента пористости и время релаксации, $\overline{m} = \frac{m}{m_0}$.

Уравнение (3) с учетом (8) примет следующий вид [3]:

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{\frac{q_г}{\Omega_0\overline{\Omega}}\left(\alpha_4 + \frac{\alpha_2}{G}\right) - (\alpha_2\alpha_3 + \alpha_1\alpha_4)\frac{1}{\overline{\Omega}}\frac{\overline{m}(p) - \overline{m}}{\tau_m}}{(\alpha_5 + \alpha_6)\alpha_4 + (\alpha_7 + \alpha_8)\alpha_2}. \quad (9)$$

В случае ***релаксационионно-ползучей деформации*** [4]:

$$\frac{d\overline{\Omega}}{dt} = a_m\frac{dp}{dt} + (p - p_0)(m_1 + a_m\gamma_m) + \gamma_m(1 - \overline{m}), \quad (10)$$

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{\frac{q_г}{\Omega_0\overline{\Omega}}\left(\alpha_4 + \frac{\alpha_2}{G}\right) + (\alpha_2\alpha_3 + \alpha_1\alpha_4)\frac{1}{\overline{\Omega}}[(p - p_0)(m_1 + a_m\gamma_m) + \gamma_m(1 - m)]}{(\alpha_5 + \alpha_6)\alpha_4 + (\alpha_7 + \alpha_8)\alpha_2 + (\alpha_2\alpha_3 + \alpha_1\alpha_4)\frac{1}{\overline{\Omega}}a_m}. \quad (11)$$

Уравнения (7), (9), (11) совместно с (4) позволяют определить основные параметры разработки на истощение газоконденсатной залежи с соответствующим характером сжимаемости пласта-коллектора. При этом либо дебит скважины по газу должен быть известен, либо должна быть известна депрессия (забойное давление), а дебит подлежит определению. В последнем случае для определения дебита можно использовать методику, предложенную в работах [1, 2].

Определение дебита при заданной депрессии

В работе [1] для мгновенного дебита скважины по газу дренируемой газоконденсатной залежи круговой и полосообразной формы получены следующие выражения:

$$q_г = \frac{2\pi h(H_к - H_с)}{\ln\frac{R_к}{r_с} - 0{,}5}; \quad (12)$$

$$q_г = \frac{2bh(H_к - H_с)}{l_к}, \quad (13)$$

где $H = \int\varphi(p, \rho)dp + \text{const}$ является функцией Христиановича,

$$\varphi = \left[\frac{f_г(\rho)p\beta}{z(p)p_{at}\mu_г(p)}[1 - c(p)\overline{\gamma}(p)] + \right.$$
$$\left. + \frac{f_к(\rho)S(p)}{a(p)\mu_к(p)}\right]k(p, t); \quad (14)$$

$f_к(\rho), f_г(\rho)$ — относительные фазовые проницаемости жидкой и газовой фаз; k — абсолютная проницаемость пласта.

Разница фиктивных напоров в (12) и (13) определяется выражением

$$H_к - H_с =$$
$$= \frac{A}{3}(p_к^3 - p_с^3) + \frac{B}{2}(p_к^2 - p_с^2) + C(p_к - p_с), \quad (15)$$

где, следуя работе [1], коэффициенты аппроксимации A, B, C могут быть аналитически рассчитаны из следующих соотношений:

$$A = \frac{2(\varphi_к + \varphi_с - 2\varphi_{ср})}{2(p_к - p_с)^2}, \; B = \frac{\varphi_к - \varphi_с}{p_к - p_с} - A(p_к + p_с),$$
$$C = \varphi_к - Ap_к^2 - Bp_к, \quad (16)$$

где $\varphi_к$, $\varphi_с$ — значения подынтегрального выражения при контурном и забойном давлениях; $\varphi_{ср} = \varphi(p_{ср}, \rho_{ср})$, $p_{ср} = \frac{p_к + p_с}{2}$.

Модели изменения коэффициентов пористости и проницаемости

Коэффициенты пористости и абсолютной проницаемости должны определяться в зависимости от реологического типа пласта-коллектора. Для этого в случае упругих пород можно использовать экспоненциальный закон изменения пористости и проницаемости от внутрипорового давления [2]:

$$m = m_0\exp[a_m(p - p_0)];$$
$$k = k_0\exp[\beta_k(p - p_0)]. \quad (17)$$

Исходя из результатов работы [5] изменение пористости релаксационно-упругого пласта можно описать следующим законом:

$$m + \tau_m\frac{\partial m}{\partial t} = m_0\exp[a_m(p - p_0)]. \quad (18)$$

Выражение (18) с учетом метода осреднения можно переписать в виде [3]

$$\frac{dm}{dt} = \frac{m_0\mathbf{e}^{a_m(p - p_0)} - m}{\tau_m}. \quad (19)$$

Известно, что в результате объемного сжатия пород коллекторов уменьшается объем их пустот. Это, естественно, приводит к уменьшению как пористости, так и проницаемости породы. При этом характер изменения и пористости и проницаемости подчиняются одному и тому же закону [11]. Изменения пористости и проницаемости при этом количественно характеризуются соответствующими коэффициентами деформации a_m и β_k. Известно, что отношение коэффициентов упругой деформации проницаемости β_k к пористости a_m изменяется в пределах 5...15, и это отношение является постоянным для конкретной залежи. В случае же релаксации скелет породы реагирует на изменение внутрипорового давления через определенное время, называемого времени релаксации. Поскольку понятие релаксации относится к сжимаемости скелета породы, то время релаксации является общим для пористости и проницаемости. Исходя из этих соображений можно утверждать, что при релаксации изменения пористости и проницаемости происходят по одному и тому же закону, с соответствующими коэффициентами упругой деформации. Учитывая это обстоятельство, можно утверждать, что такие выражения, как "релаксация пористости", "релаксация проницаемости" являются не совсем корректными. Поэтому τ_m правильнее назвать временем релаксации пласта (породы, скелета и т. п.), и, следовательно, изменение проницаемости при релаксационной деформации можно выражать следующим законом:

$$k + \tau_m\frac{\partial k}{\partial t} = k_0\exp[\beta_k(p - p_0)]. \quad (20)$$

С учетом метода осреднения (20) имеем

$$\frac{dk}{dt} = \frac{k_0\mathbf{e}^{\beta_k(p - p_0)} - k}{\tau_m}. \quad (21)$$

Уравнение для изменения пористости и проницаемости ползучего коллектора получено в виде [4]

$$\frac{dm}{dt} = m_0 a_m \frac{dp}{dt} + m_0(p - p_0)(m_1 + a_m\gamma_m) + \\ + \gamma_m(m_0 - m), \\ \frac{dk}{dt} = k_0\beta_k \frac{dp}{dt} + k_0(p - p_0)(k_1 + \beta_k\gamma_k) + \\ + \gamma_k(k_0 - k), \qquad (22)$$

где $\gamma_m = \frac{1}{\tau_m}$, m_1, k_1 — параметры ползучести.

Так, при заданном забойном давлении p_c (или депрессии) дебит газа можем рассчитать с помощью выражения (12) (или (13)) с учетом (15), (16) и одного из выражений (17), (21), (22) в зависимости от реологического типа пласта.

Алгоритм для прогнозирования разработки

Вышеприведенные расчетные соотношения позволяют создать программное обеспечение для прогнозирования основных показателей разработки газоконденсатных залежей, представленных упругими, релаксационно-упругими и релаксационно-ползучими коллекторами при различных технологических режимах. При этом можно использовать следующий алгоритм:

1. Вводятся начальные условия

$t = 0$, $p = p_0$, $\rho = \rho_0$, $m = m_0$, $k = k_0$, p_c или $q_г$ и исходные данные.

2. Вычисляется начальный газоконденсатный фактор G по формуле (5).

3. Вычисляются начальные газонасыщенный объем залежи, запасы газа и конденсата (при $\rho_0 = 0$):

$$V_{зап} = \pi R_k^2 h m_0 \left[\frac{1 - c(p_0)\bar{\gamma}(p_0)}{z(p_0)p_{at}}\right], \; V_{kзап} = \frac{V_{зап}}{G}.$$

4. Вычисляется значение дебита скважины по газу: при заданном темпе отбора газа (n процентов в год от начальных балансовых запасов) дебит определяется выражением $q_г = \frac{V_{зап}n}{100}$, а при режиме заданной депрессии данный этап пропускается.

5. Вычисляется значение $\frac{d\bar{\Omega}}{dt}$ с помощью одного из выражений (4), (6), (8) в зависимости от реологической модели пласта-коллектора.

6. Определяются текущие значения пористости и проницаемости пласта одним из соотношений (17), (19), (21), (22) в зависимости от реологических свойств коллектора залежи.

7. Если рассматривается режим заданной депрессии, то $q_г$ определяется следующим образом, иначе этот этап пропускается:

вычисляются значения $\varphi(p, \rho)$ по формуле (14) и A, B, C по формуле (16);

определяется фиктивная депрессия $H_к - H_с$ по выражению (15) и дебит $q_г$ по выражению (12) или (13) в зависимости от формы залежи.

8. Определяется текущее значение дебита по конденсату $q_к = \frac{q_г}{G}$.

9. Для времени $t + \Delta t$ вычисляется текущее значение конденсатонасыщенности ρ по формуле (2) совместно с (5) или (7), или (9).

10. Для времени $t + \Delta t$ вычисляется значение среднепластового давления p по формуле (5) или (7), или (9) в зависимости от реологической модели.

11. Определяются текущие значения накопленного отбора газа и конденсата и, следовательно, их коэффициенты извлечения:

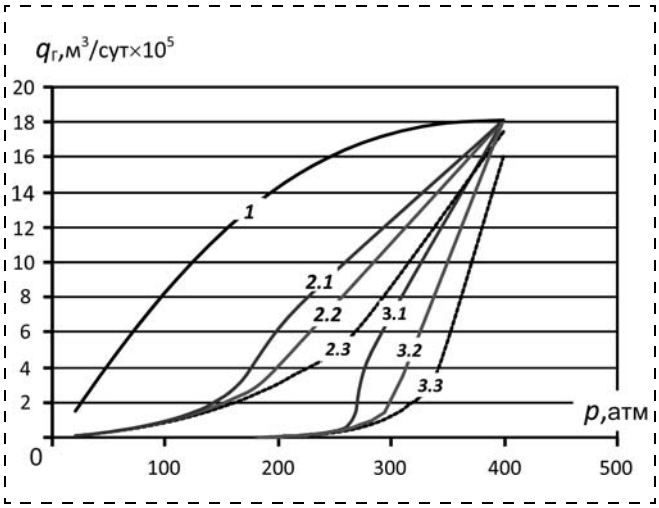
$$K_г = \frac{\sum_{t=0}^{t} q_г \Delta t}{V_{зап}} \text{ и } K_к = \frac{\sum_{t=0}^{t} q_к \Delta t}{V_{kзап}}.$$

12. Проверяем значение пластового давления: если оно больше определенного его значения как конечного, то переходим к пункту 3, иначе переходим к пункту 13.

13. Вывод результатов и конец.

Апробация алгоритма и результаты компьютерных экспериментов

По изложенному алгоритму были выполнены численные расчеты, позволившие определить особенности влияния деформаций на добывную характеристику скважины при различных реологиях пласта-коллектора. Был рассмотрен режим заданной депрессии 1,0 МПа. Газоконденсатная залежь имела круговую форму и следующие исходные данные: начальное пластовое давление p_0 = 40,0 МПа;



Изменение дебита газа от пластового давления при недеформируемых (кривая *1*), слабодеформируемых (кривые *2*) и сравнительно сильнодеформируемых пластах (кривые *3*):
2.1, 3,1 — τ_m = 5 л; *2.2*, *3.2* — τ_m = 3 г; *2.3*, *3.3* — упругий пласт

радиус контура $R_k = 1000$ м; начальная проницаемость $k_0 = 0{,}05 \cdot 10^{-12}$ м^2; начальная пористость $m_0 = 0{,}2$; мощность пласта $h = 50$ м;

Расчеты проведены для трех общих случаев по степени деформируемости (см. рисунок) — недеформируемого (кривая *1*), слабо- и сравнительно сильнодеформируемых коллекторов (кривые *2* и *3*, соответственно). При этом каждый из деформируемых вариантов (кривые *2.1—2.3* и *3.1—3.3*) были рассмотрены для двух значений времени релаксации τ_m — 3,0 года и 5,0 лет и для упругого (т. е. $\tau_m = 0$) пласта. Расчеты выполнены для значения коэффициента упругого изменения пористости $a_m = 0{,}00075$ и $a_m = 0{,}0025$ 1/МПа — для слабо- и сравнительно сильнодеформируемых коллекторов. Во всех вариантах $\frac{\beta_k}{a_m} = 10$. Для сопоставления полученных результатов с недеформируемым случаем был рассмотрен и вариант, когда пласт не деформируем (кривая *1*).

Результаты изменения дебитов газа с падением среднепластового давления показывают, что деформации пласта сильно влияют на добывные характеристики коллектора, и это влияние является не только количественным, оно является и качественным. Интересен тот факт, что при определенном значении времени релаксации вне зависимости от степени деформируемости пласта-коллектора зависимость дебита от пластового давления приобретает иной характер.

Так, если сопоставлять варианты релаксационно-упругие (*2.1*, *2.2* и *3.1*, *3.2*) и упругий (*2.3* и *3.3*), то можно увидеть, что при времени релаксации, равном трем годам, между этими вариантами существуют лишь количественные отличия. А при времени релаксации $\tau_m = 5$ лет, влияние времени релаксации на изменения дебитов носит качественный характер.

Эффект значительного повышения темпа снижения дебита в поздних стадиях разработки, когда время релаксации $\tau_m = 5$ лет можно объяснить значительным запаздыванием изменения проницаемости. Релаксация, задерживая ухудшение проницаемости, препятствует падению дебита с таким темпом, как это происходит в варианте $\tau_m = 3$ года (кривые *2.2* и *3.2*), однако в поздней стадии разработки ухудшение проницаемости проявляет себя и наблюдается характер снижения дебита, демонстрируемый на рисунке.

Заключение

Приведенные выше результаты численных экспериментов показали, что влияние релаксации на показатели разработки значительно. А при определенных значениях времени релаксации оно носит качественный характер. Анализ полученных результатов подтвердил, что учет релаксации изменения фильтрационно-емкостных характеристик пласта-коллектора необходим.

Список литературы

1. **Abasov M. T., Orudjaliev F. G., Djamalbekov M. A.** Scientific Basis Gas Condensate Reservoirs Development in Deformed Reservoir Rocks // Proceedings of the 11 Symposium on Mining Chemistry. Visegrad, Hungary: 22—24 October, 1986. P. 187—206.
2. **Джамалбеков М. А., Гулиев М. Ф.** Фильтрация двухфазных углеводородных смесей в чисто трещиноватых коллекторах // Вести Бакинского Университета. Сер. физико-математических наук. 2011. № 2. С. 73—79.
3. **Джамалбеков М. А.** Моделирование истощения газоконденсатных залежей в релаксационно-деформируемых коллекторах // Докл. НАНА. 2012. Т. LXVI, № 3. С. 3—12.
4. **Джамалбеков М. А.** Особенности истощения газоконденсатной залежи в релаксационно-деформируемых коллекторах // Изв. НАНА. Сер. наук о Земле. 2012. № 5. С. 23—32.
5. **Кулиев А. М., Казымов Б. З.** Деформация горных пород и ее влияние на их фильтрационно-емкостные свойства и на процессы фильтрации и разработки месторождений нефти и газа. Баку: Элм, 2009. 88 с.
6. **Желтов Ю. П.** Деформация горных пород. М.: Недра, 1966. 298 с.
7. **Молокович Ю. М., Непримеров Н. Н., Пикуза В. И., Штанин А. В.** Релаксационная фильтрация. Казань: Изд-во КГУ, 1980. 136 с.
8. **Абасов М. Т., Джалилов К. Н., Керимов З. А., Мирзоева Д. Р.** О фильтрации жидкости в релаксационно-сжимаемом и ползучем пластах при релаксации скорости и давления // Изв. АН Азерб. Сер. наук о Земле. 2000. № 2. С. 25—38.
9. **Абасов М. Т., Дунямалыев М. А., Кулиев А. М.** Приток нефти к цепочке скважин в пласте с релаксационным режимом // Изв. АН Азерб. Сер. наук о Земле. 1995. № 1—3. С. 23—32.
10. **Кулиев А. М., Эфендиев Р. М., Казымов Б. З., Тагиева С. Э.** Моделирование процесса разработки нефтяных месторождений при режиме растворенного газа с учетом релаксации горных пород // Изв. АН Азерб. Сер. наук о Земле. 1998. № 2. С. 21—25.
11. **Горбунов А. Т.** Разработка аномальных нефтяных месторождений. М.: Недра, 1981. 237 с.

УДК 621.391:519.24

Ф. Г. Гаращенко, д-р техн. наук, проф.,
В. Т. Матвиенко, канд. физ.-мат. наук, доц.,
matvienko.vt@gmail.com,
Киевский национальный университет
имени Тараса Шевченко

Адаптивный метод дистанционного обнаружения химических компонентов в растениях на основе градиентного подхода

Предложены адаптивные модели аппроксимации сигналов в структурно-параметрических классах функций. Аппроксимация осуществляется с помощью итерационной процедуры в форме системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Проведенный вычислительный эксперимент подтверждает эффективность предложенного подхода.

Ключевые слова: *адаптивный алгоритм, градиентный метод, аппроксимация, обнаружение*

По поводу аппроксимации непрерывных и дискретных сигналов написано много работ [1—6]. Однако появляются важные прикладные задачи, особенно в области информатики и прикладной математики, которые требуют разработки и апробации новых подходов к аппроксимации экспериментальных данных. Это связано с тем, что обработка данных ведется в реальном времени. К разработанным алгоритмам выдвигаются достаточно четкие требования относительно их конструктивности в программировании, оптимальности по быстродействию и необходимости в реальном времени решать поставленные задачи.

Таким требованиям отвечают адаптивные алгоритмы, которые основаны на градиентных подходах [7, 8]. Описан подход к аппроксимации непрерывных процессов, на основе которого выписываются дискретные аналоги. Понятно, что в прикладных задачах измеряются сигналы в дискретные моменты. Поэтому разностные схемы могут оказаться более удачными для их использования.

Исследование сходимости итерационных процедур можно осуществлять па основе методов Ляпунова [7], практической устойчивости [9—15] и использования специальных критериев устойчивости [16].

Предложенные методы апробированы на конкретных задачах в области дистанционного обнаружения химических компонентов в растениях.

Аппроксимация непрерывных сигналов

Допустим [4], что мы знаем непрерывный (для простоты — скалярный) сигнал, который необходимо аппроксимировать параметрически заданным семейством

$$x(t) \approx \psi(t, \alpha) = \psi(t, \alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_n). \qquad (1)$$

Если сигнал известен на отрезке $[t_0, t]$, то ставится задача адаптивной коррекции вектора параметров α таким образом, чтобы минимизировать определенную невязку. Для этого мы будем рассматривать два вида невязок:

а) непосредственно в момент t

$$I_1(\alpha) = (\psi(t, \alpha) - \varphi(t))^2; \qquad (2)$$

б) среднеквадратичное приближение на интервале $[t_0, t]$

$$I_2(\alpha) = \int_{t_0}^{t} (\psi(\tau, \alpha) - \varphi(\tau))^2 d\tau. \qquad (3)$$

Для коррекции параметров с целью минимизировать невязку (2) запишем непрерывную итерационную процедуру

$$\frac{d\alpha}{dt} = -\mathrm{grad}_\alpha I_1(\alpha) = -2(\psi(t, \alpha) - \varphi(t))\mathrm{grad}_\alpha \psi(t, \alpha) \qquad (4)$$

с некоторыми начальными данными

$$\alpha(t_0) = \alpha^{(0)}. \qquad (5)$$

Для отыскания вектора параметров α необходимо решать задачу Коши (4), (5). Если существует стационарное решение задачи (4), (5), т. е. $\alpha(t) \to \bar{\alpha}$ при $t \to \infty$, то $\bar{\alpha}$ можно взять в качестве решения поставленной задачи. Необходимо отметить, что при решении некоторых практических задач такая простая процедура дает неплохие результаты.

Для интегральной невязки записываем такую же систему обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\frac{d\alpha}{dt} = -\mathrm{grad}_\alpha I_2(\alpha) =$$
$$= -2\int_{t_0}^{t} (\psi(\tau, \alpha) - \varphi(\tau))\mathrm{grad}_\alpha \psi(\tau, \alpha) d\tau. \qquad (6)$$

Поскольку в правую часть системы (6) входит интеграл, то ее можно переписать в более конструктивном виде

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} = -2(\psi(t, \alpha) - \varphi(t))\mathrm{grad}_\alpha \psi(t, \alpha). \qquad (7)$$

Так как (7) — система обыкновенных дифференциальных уравнений порядка $2n$, записанная в нормальной форме, то начальными условиями для нее необходимо выбрать следующие:

$$\alpha(t_0) = \alpha^{(0)}, \ \frac{d\alpha(t_0)}{dt} = 0. \qquad (8)$$

Таким образом, во втором случае нужно численно решать одним из методов, например, Рунге—Кутта, задачу Коши (7), (8). Как и в предыдущем случае, если при решении (7), (8) существует граница $\alpha(t) \to \bar{\alpha}$, $t \to \infty$, то ее можно взять за решение поставленной задачи. При этом начальные данные необходимо выбирать из области сходимости предложенных итерационных процедур.

Их сходимость можно исследовать на основе второго метода Ляпунова. Поэтому параметр $\alpha^{(0)}$ будем выбирать из области асимптотической устойчивости соответствующей системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Если же будут выполняться условия теоремы Барбашина—Красовского об устойчивости в целом, то сходимость записанных итерационных процедур будет иметь место для любых начальных данных $\alpha^{(0)} \in E^n$.

Рассмотрим более конкретные задачи сформулированного типа. Допустим, что мы имеем систему базисных функций

$$\varphi_1(t),\ \varphi_2(t),\ ...,\ \varphi_n(t),\ t \geqslant t_0, \tag{9}$$

а функцию $\psi(t, \alpha)$ будем выбирать в виде линейной комбинации

$$\psi(t, \alpha) = \sum_{j=1}^{n} \alpha_j \varphi_j(t). \tag{10}$$

Для этого случая систему обыкновенных дифференциальных уравнений (4) запишем в виде

$$\frac{d\alpha_i}{dt} = -2\left(\sum_{j=1}^{n} \alpha_j \varphi_j(t) - \varphi(t)\right)\varphi_i(t),\ i = 1, 2, ..., n. \tag{11}$$

Система (11) — это линейная неоднородная система обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\frac{d\alpha_i}{dt} = -2\varphi_i(t) \sum_{j=1}^{n} \varphi_j(t)\alpha_j + 2\varphi(t)\varphi_i(t),\ i = 1, 2, ..., n, \tag{12}$$

которую можно переписать в векторно-матричной форме:

$$\frac{d\alpha}{dt} = A(t)\alpha + f(t),\ t \geqslant t_0. \tag{13}$$

Здесь $\alpha^{\text{т}} = (\alpha_1,\ \alpha_2,\ ...,\ \alpha_n)$, $f^{\text{т}}(t) = 2\varphi(t)(\varphi_1(t), \varphi_2(t), ..., \varphi_n(t))$,

$$A(t) = \begin{pmatrix} -2\varphi_i^2(t) & -2\varphi_1(t)\varphi_2(t) & \dots & -2\varphi_1(t)\varphi_n(t) \\ -2\varphi_1(t)\varphi_2(t) & -2\varphi_2^2(t) & \dots & -2\varphi_2(t)\varphi_n(t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -2\varphi_1(t)\varphi_n(t) & -2\varphi_2(t)\varphi_n(t) & \dots & -2\varphi_n^2(t) \end{pmatrix}$$

— симметричная матрица размерности $n \times n$, ^{т} — знак транспонирования.

Согласно формуле Коши решение задачи (5), (13) можно записать следующим образом:

$$\alpha(t) = W(t, t_0)\alpha^{(0)} + \int_{t_0}^{t} W(t, \tau)f(t)d\tau, \tag{14}$$

где $W(t, \tau)$ — нормированная фундаментальная матрица решений однородной системы, которая отвечает (13), т. е.

$$\frac{dW}{dt} = A(t)W,\ W(\tau, \tau) = E_n. \tag{15}$$

По аналогии можно выписать системы дифференциальных уравнений для интегральной невязки (3) при условии (10). В этом случае систему (6) можно записать в следующем виде:

$$\frac{d\alpha_i}{dt} = -2\int_{t_0}^{t}\left(\sum_{j=1}^{n} \alpha_j \varphi_j(\tau) - \varphi(\tau)\right)\varphi_i(\tau)d\tau,$$
$$i = 1, 2, ..., n. \tag{16}$$

Система (16) является линейной системой интегродифференциальных уравнений, которую путем дифференцирования можно свести к системе дифференциальных уравнений вида (7):

$$\frac{d^2\alpha_i}{dt^2} = -2\left(\sum_{j=1}^{n} \alpha_j \varphi_j(t) - \varphi(t)\right)\varphi_i(t),\ i = 1, 2, ..., n. \tag{17}$$

Линейную систему (17) можно записать в векторно-матричной форме:

$$\frac{d\bar{\alpha}}{dt} = \bar{A}(t)\bar{\alpha} + \bar{f}(t), \tag{18}$$

где $\alpha^{\text{т}} = \left(\alpha^{\text{т}}, \frac{d\alpha^{\text{т}}}{dt}\right)$, $\bar{f}^{\text{т}}(t) = (0^{\text{т}},\ f^{\text{т}}(t))$ — векторы размерности $2n$, $\bar{A}(t) = \begin{pmatrix} 0 & E_n \\ A(t) & 0 \end{pmatrix}$ — матрица размерности $2n \times 2n$ с известными элементами.

Но неоднородную линейную систему обыкновенных дифференциальных уравнений (18), в силу (8), необходимо рассматривать с частично фиксированными начальными условиями. Для того чтобы найти общее решение системы (18) при любых $\alpha^{(0)}$, воспользуемся формулой Коши

$$\bar{\alpha}(t) = \bar{W}(t, t_0)\bar{\alpha}(t_0) + \int_{t_0}^{t} \bar{W}(t, \tau)\bar{f}(\tau)d\tau. \tag{19}$$

Здесь $\bar{W}(t, \tau)$ — нормированная фундаментальная матрица решений однородной системы

$$\frac{d\bar{\alpha}}{dt} = \bar{A}(t)\bar{\alpha}. \tag{20}$$

Эта матрица удовлетворяет системе (20) при единичных начальных условиях, т. е.

$$\frac{d\bar{W}}{dt} = \bar{A}(t)\bar{W},\ \bar{W}(t_0, t_0) = E_{2n}. \tag{21}$$

Переписав формулу (20) с учетом структуры векторов $\bar{\alpha}$, $\bar{f}$ и представления матрицы $\bar{W}$ в блочно структурной форме

$$\bar{W}(t, \tau) = \begin{pmatrix} W^{(1,1)}(t, \tau) & W^{(1,2)}(t, \tau) \\ W^{(2,1)}(t, \tau) & W^{(2,2)}(t, \tau) \end{pmatrix},$$

где $W^{(i,j)}(t, \tau)$ — квадратные матрицы размерности n, придем к следующим векторным соотношениям:

$$\alpha(t) = W^{(1,1)}(t, t_0)\alpha^{(0)} + \int_{t_0}^{t} W^{(1,2)}(t, \tau)f(\tau)d\tau, \quad (22)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = W^{(2,1)}(t, t_0)\alpha^{(0)} + \int_{t_0}^{t} W^{(2,2)}(t, \tau)f(\tau)d\tau. \quad (23)$$

Из формул (22), (23) видно, что для анализа настройки вектора параметров нам необходимо лишь первое соотношение. Оно нам будет необходимо и для оценки области сходимости итерационной процедуры (18) по начальным приближениям.

Иногда для определения, например, стационарных режимов изменения вектора $\alpha(t)$ необходимо задавать краевые условия для производной:

$$\frac{d\alpha(T)}{dt} = \alpha^{(1)}. \quad (24)$$

Тогда, воспользовавшись условиями (24) и соотношением (23), можно определить соответствующие начальные данные:

$$\alpha^{(0)} = W^{(2,1)^{-1}}(T, t_0)\left[\alpha^{(1)} - \int_{t_0}^{T} W^{(2,2)}(T, \tau)f(\tau)d\tau\right]. \quad (25)$$

В этом случае решение (22) представим в конечном виде:

$$\alpha(t) = W^{(1,1)}(t, t_0)\, W^{(2,1)^{-1}}(t, t_0)\left[\alpha^{(1)} - \right.$$

$$\left. - \int_{t_0}^{T} W^{(2,2)}(T, \tau)f(\tau)d\tau\right] + \int_{t_0}^{t} W^{(2,2)}(T, \tau)f(\tau)d\tau. \quad (26)$$

Анализ сходимости итерационных процедур

Можно проводить анализ сходимости итерационных процедур с помощью методов Ляпунова.

Рассмотрим случай минимизации невязки (2).

Пусть рассматривается итерационная схема, основанная на минимизации невязки (2). Допустим, что решение задачи Коши (5), (13) удовлетворяет условию $\alpha^{(1)}(t, t_0, \alpha^{(0)}) \to \bar{\alpha} = \text{const}$, $t \to \infty$. Тогда заменой

$$\alpha = \alpha^{(1)}(t, t_0, \alpha^{(0)}) + \nu(t) \quad (27)$$

мы придем к однородной системе линейных дифференциальных уравнений относительно новой переменной $\nu(t)$:

$$\frac{d\nu}{dt} = A(t)\nu, \; t \geqslant t_0. \quad (28)$$

Тогда, в предположении, что начальные данные (5) могут быть возмущенными, анализ сходимости итерационной процедуры (13) будет эквивалентен исследованию устойчивости решения $\nu(t) \equiv 0$, $t \geqslant t_0$ линейной однородной системы (28). Справедливая следующая теорема.

Теорема. Для сходимости итерационной схемы (13)

$$\alpha(t, t_0, \alpha^{(0)} + \nu^{(0)}) \to \bar{\alpha}, \; t \to \infty \quad (29)$$

при возмущенных начальных данных необходимо и достаточно, чтобы нормированная фундаментальная матрица $W(t, t_0)$ удовлетворяла условию

$$W(t, t_0) \to 0, \text{ когда } t \to \infty. \quad (30)$$

Доказательство сформулированной теоремы проводится на основе замены (27), записи и анализа решения задачи Коши для однородной системы (28):

$$\nu(t) = W(t, t_0)\nu^{(0)}. \quad (31)$$

Здесь $\nu^{(0)}$ — n-мерный вектор начальных данных для однородной системы (28), $\bar{\alpha}$ — n-мерный стационарный вектор, который является решением поставленной задачи.

Замечание. Необходимо отметить, что при выполнении условий сформулированной теоремы сходимость итерационной процедуры будет выполняться для любых начальных данных, т. е. в целом. Это следует из того, что фундаментальная матрица не зависит от начальных данных.

Обнаружение химических компонентов в растениях

Покажем конструктивность и эффективность предложенного подхода, прежде всего, на основе обработки спектральных данных растений, загрязненных химическими элементами. Будем считать, что осуществлено загрязнение растений некоторыми химическими элементами и получены его спектральные данные. Их будем считать базисными функциями для распознавания их в новых экспериментальных данных. Обозначим базисные спектральные функции, которые представляют собой спектральные данные загрязнений растения известными химическими элементами,

$$\varphi_1(t), \varphi_2(t), \ldots, \varphi_n(t), \; t_0 \leqslant t \leqslant T.$$

Пусть $\varphi(t)$, $t \in [t_0, T]$ — измеренная спектральная функция загрязнения неизвестным химическим элементом. Функцию $\psi(t, \alpha)$ будем выбирать в виде линейной комбинации (10): $\psi(t, \alpha) = \sum_{j=1}^{n} \alpha_j \varphi_j(t)$.

Система обыкновенных дифференциальных уравнений для этого случая имеет вид (11):

$$\frac{d\alpha_i}{dt} = -2\left(\sum_{j=1}^{n} \alpha_j \varphi_j(t) - \varphi(t)\right)\varphi_i(t), \; i = 1, 2, \ldots, n.$$

Ее запишем в векторно-матричной форме (13):

$$\frac{d\alpha}{dt} = A(t)\alpha + f(t), \; t \in [t_0, T].$$

В случае рассмотрения дискретных сигналов решение системы (13) можно представить следующим образом:

$$\alpha(i+1) = \alpha(i) + (A(t_i)\alpha(i) + f(t_i))\Delta t, \; t \in [t_0, T],$$

где $\Delta t = t_i - t_{i-1}$ — шаг квантования по времени.

В зависимости от вида экспериментальных данных для улучшения обнаружения признаков вклада химических загрязнений нужно провести некоторые математические преобразования, в частности:

- для каждой выбранной дискретной базисной функции (с основным химическим загрязнением) строится новый базис, который является разницей функций старого базиса и исследуемых экспериментальных данных;
- над дискретными базисными функциями и исследуемыми экспериментальными данными целесообразно сделать дискретное преобразование Фурье и считать их новыми преобразованными базисными и исследуемыми экспериментальными данными.

По описанному выше адаптивному алгоритму был проведен численный эксперимент. В качестве базисных функций были избраны спектральные экспериментальные данные для растительных образцов, которые были загрязнены химическими соединениями CaCl и $K_2Cr_2O_7$. Вычислительный эксперимент подтвердил работоспособность алгоритма при обнаружении химических элементов в растениях и показал загрязнение экспериментального образца соединением $K_2Cr_2O_7$.

Список литературы

1. **Ахиезер Н. И.** Лекции по теории аппроксимации. М.: Наука, 1965. 407 с.
2. **Носач В. В.** Решение задач аппроксимации с помощью персональных компьютеров. М.: МИКАП, 1994. 382 с.
3. **Задирака В. К.** Цифровая обработка сигналов. К.: Наукова думка, 1993. 294 с.
4. **Гаращенко Ф. Г., Швец О. Ф., Дегтяр О. С.** Адаптивные модели аппроксимации сигналов в структурно-параметрических классах функций // Проблемы управления и информатики. 2011. № 2. С. 69—77.
5. **Гаращенко О. Ф.** Оптимальний вибір частотно-фазових характеристик в задачах гармонічної апроксимації функцій // Вісник Київського університету. Сер. фіз.-мат. науки. 2003. № 1. С. 145—149.
6. **Гаращенко О. Ф., Кириченко Н. Ф.** Об одном методе последовательного построения матриц ортогональных преобразований // Проблемы управления и информатики. 2005. № 1. С. 75—87.
7. **Евтушенко Ю. Г.** Методы решения экстремальных задач и их применение в системах оптимизации. М.: Наука, 1982. 432 с.
8. **Гаращенко Ф. Г., Панталієнко Л. А.** Аналіз та оцінка параметричних систем. К.: ІСДО, 1995. 140 с.
9. **Башняков О. М., Гаращенко Ф. Г., Пічкур В. В.** Практична стійкість, оцінки та оптимізація. К.: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2008. 383 с.
10. **Бублик Б. Н., Гаращенко Ф. Г., Кириченко Н. Ф.** Структурно-параметрическая оптимизация и устойчивость динамики пучков. К.: Наукова думка, 1985. 304 с.
11. **Гаращенко Ф. Г., Башняков А. Н.** Анализ сходимости итерационных процедур на основе методов практической устойчивости // Проблемы управления и информатики. 1999. № 2. С. 15—25.
12. **Гаращенко Ф. Г.** Исследование задач практической устойчивости численными методами и оптимизация динамики пучков // ПММ. 1987. Т. 51. № 5. С. 717—723.
13. **Гаращенко Ф. Г.** О численном подходе решения задач устойчивости на конечном интервале времени // Доклады АН УССР. Сер. А. 1981. № 11. С. 78—81.
14. **Гаращенко Ф. Г., Кириченко Н. Ф.** Исследование задач по практической устойчивости и стабилизации движения // Изв. АН СССР. Сер. Механика твердого тела. 1975. № 6. С. 15—24.
15. **Гаращенко Ф. Г., Куценко И. А.** Практическая устойчивость дискретных процессов, оценки и их оптимизация // Проблемы управления и информатики, 1997. № 5. С. 50—61.
16. **Гаращенко Ф. Г.** Устойчивость по направлению, построение оптимальных функций Ляпунова и множеств устойчивости // Автоматика. 1986. № 5. С. 39—42.

ИНФОРМАЦИЯ

CLAWAR ASSOCIATION

IARP
International Advanced Robotics Programme

Международный симпозиум

«ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ РОБОТОТЕХНИКА - РОБОТОТЕХНИКА ДЛЯ РАБОТЫ В УСЛОВИЯХ ОПАСНОЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ (ЭР–2013)»

в рамках
VI Петербургского международного инновационного форума и XVII Международного форума «Российский промышленник»

1-3 октября 2013 года
ЦНИИ РТК, Тихорецкий пр., 21
Санкт-Петербург

Подробная информация о симпозиуме на сайте: http://er.rtc.ru/

УДК 004.932.2

В. В. Инсаров, д-р техн. наук,
зам. начальника отделения,
wiliam@gosniias.ru,
С. В. Тихонова, ведущий инженер,
ФГУП Государственный научно-исследовательский
институт авиационных систем, г. Москва

Задача принятия решений при комплексировании изображений различных спектральных диапазонов*

Рассмотрен один из аспектов проблемы построения многоканальных бортовых систем визирования наземных сцен, датчики которых работают в двух или более различных спектральных диапазонах. Предложен алгоритм принятия решений, позволяющий определить необходимые условия коплексирования изображений различных каналов, основанный на использовании объективного критерия оценки качества этих изображений. В качестве критерия предложено значение конечного результата выполнения задачи наведения беспилотного летательного аппарата — значение вероятности правильного распознавания (селекции) заданного объекта сцены при известном эталонном изображении и принятом алгоритме распознавания (используемом геометрическом контексте сцены).

Ключевые слова: *комплексирование изображений, слияние изображений, многоканальные системы визирования*

В настоящее время в автономных системах наведения беспилотных летательных аппаратов наибольшее распространение нашли пассивные оптико-электронные датчики телевизионного и тепловизионного типа, позволяющие получать изображения наземных сцен, например, в виде последовательности растровых статических изображений.

Основные достоинства этого типа датчиков заключаются в следующем:

- пассивный принцип получения входной информации, обеспечивающий скрытность применения беспилотных летательных аппаратов;
- высокие значения углового разрешения;
- высокая чувствительность матричных фотоприемных устройств (МФПУ), обеспечивающая эффективную работу при обнаружении и распознавании слабоконтрастных или замаскированных объектов наземных сцен;
- достаточно малые веса, габаритные размеры и энергопотребление датчиков с МФПУ, не требующих оптико-механических сканирующих устройств.

Однако несмотря на отмеченные выше достоинства, применение каждого из этих датчиков в отдельности не позволяет в полной мере обеспечить устойчивое функционирование системы наведения в условиях широкого диапазона изменения состояния и характеристик внешней среды — круглосуточности и всепогодности, широкой номенклатуры объектов и сцен, помех естественного и искусственного происхождения и т. п.

Наиболее приемлемые в этом случае результаты позволяет получить использование активно развивающихся в последнее время многоканальных бортовых систем визирования наземных сцен, датчики которых работают в двух или более различных спектральных диапазонах. Цель комплексирования (слияния) изображений, полученных в различных спектральных диапазонах, состоит в получении некоего нового изображения, которое содержит объекты и детали, видимые только на одном из исходных снимков и не видимые на другом. При этом для дальнейшей обработки могут быть использованы как изображения, полученные в отдельных каналах, так и комплексированное изображение, полученное в результате объединения в единое целое информации из различных каналов.

Использование таких комплексированных изображений при решении задач обнаружения и распознавания объектов сложных наземных сцен может иметь значительные преимущества по сравнению с одноканальными вариантами, поскольку позволяет обеспечить:

- повышение уровня достоверности принятия решений при использовании комплексной информации о геометрическом и яркостном контексте наблюдаемых объектов;
- повышенный уровень распознавания закамуфлированных объектов, поскольку гораздо труднее сделать объект невидимым в разных спектральных диапазонах;
- повышенный уровень помехозащищенности из-за трудностей одновременной постановки помех в разных спектральных диапазонах;

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 11-08-00703-а.

- работоспособность при эффектах загораживания объектов сцены и сложном текстурированном фоне подстилающей поверхности;
- повышенный уровень распознавания при плохих погодных условиях, поскольку датчики различных диапазонов по-разному чувствительны к одним и тем же погодным условиям; например, туман или смог приводят к значительному снижению контраста в видимом диапазоне, в то время как другие погодные условия, например дождь, приводят к снижению температурного контраста.

Очевидно, что практическая реализации слияния изображений в многоканальных бортовых системах наведения сводится к решению целого комплекса взаимосвязанных задач содержательного, методологического, алгоритмического и вычислительного уровней. Одной из таких задач является алгоритмизация процесса принятия решений, рассматриваемого ниже.

При рассмотрении работы многоканальных бортовых систем визирования комплексированное изображение часто считается безусловно наилучшим из всего набора полученных изображений.

Однако это не всегда верно. Но даже в том случае, когда это утверждение верно, комплексирование может оказаться нецелесообразным, если для решения поставленной задачи достаточно изображения, полученного одним из каналов.

Рассмотрим примеры, приведенные на рис. 1. Здесь представлены три пары телевизионных (ТВ, слева)/тепловизионных (ТП, справа) изображений многообъектных наземных сцен, полученных при различных условиях наблюдения.

Первая пара получена при хороших погодных условиях. Очевидно, что для решения большинства задач одного из изображений будет достаточно. Слияние изображений не требуется.

Вторая пара изображений получена в сложных погодных условиях. Очевидно, что по ТВ изображению невозможно получить никакой информации. Слияние изображений бесполезно.

Третья пара изображений получена при хороших погодных условиях. При этом ТП изображение позволяет выделить дополнительные важные признаки сцены — топливные баки, которые на ТВ изображении замаскированы растительностью. Слияние

Рис. 1. Примеры регистраций наземных сцен многоканальной системой визирования (ТВ — слева, ТП — справа)

изображений целесообразно, и, вероятно, позволит повысить вероятность распознавания.

Можно также представить ситуации, когда слияние изображений, полученных датчиками различной природы, приведет к частичной потере информации. Например, при слиянии контрастного изображения с большим числом мелких деталей и изображения с хорошо выделяемыми крупными деталями после дальнейшей обработки результирующего изображения контурным препаратом вероятность распознавания может ухудшиться по сравнению с вероятностью распознавания при работе только по второму изображению (за счет наличия на результирующем изображении большого числа паразитных контуров).

Таким образом, возникает проблема — как из набора изображений (полученных каждым из каналов + комплексированное) автоматически выбрать самое качественное, т. е. изображение, наилучшим образом подходящее для решения поставленной задачи.

Большинство работ, посвященных оценке качества (и улучшению качества) изображений, акцентируют внимание на изображениях, предназначенных для восприятия человеком. Считается, что человеческий глаз наилучшим образом воспринимает изображение, гистограмма которого близка к нормальному распределению. При этом, чем больше динамический диапазон — тем больше информации о мелких деталях содержится в изображении. При получении и обработке изображения стараются увеличить контраст изображения и при этом избежать потери информации в самых светлых и самых темных частях изображения.

В тех случаях, когда изображение предназначено для автоматической обработки, эти правила действуют не всегда.

Например, логично предположить, что для работы алгоритмов, основанных на выделении контуров, качественным будет изображение с хорошими контурами, т. е. оценку качества следует проводить после обработки изображения контурным препаратом. Гистограмма изображения, прошедшего такую обработку, будет иметь распределение, весьма далекое от нормального.

Следовательно, рассмотрению задачи принятия решения о слиянии разноспектральных изображений или отказе от него должно предшествовать решение задачи оценки качества исходных изображений (прошедших соответствующую предобработку) с использованием тех или иных объективных критериев [1].

Наиболее объективным критерием оценки качества изображения представляется значение конечного результата выполнения задачи — в случае решения задачи распознавания это вероятности

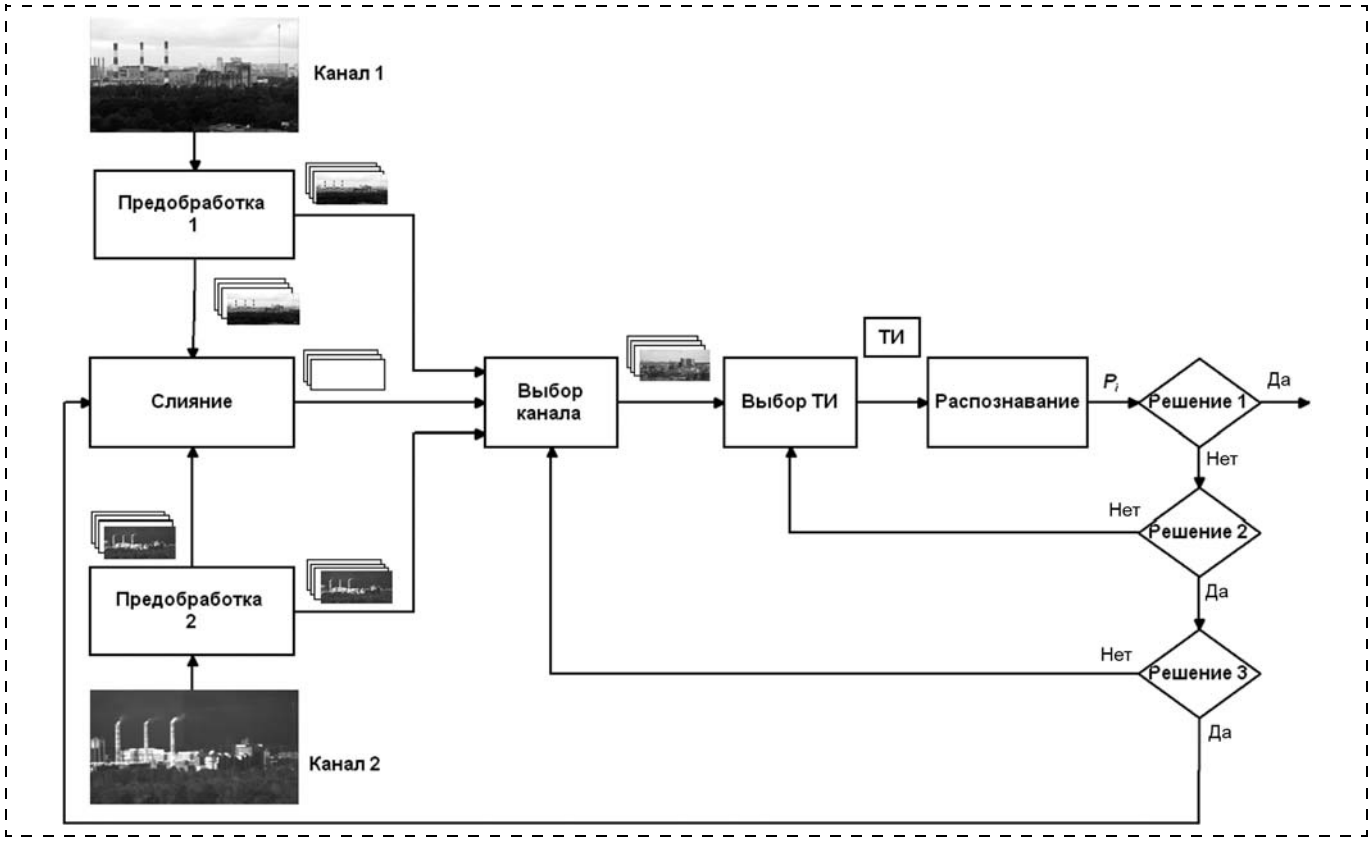


Рис. 2. Схема алгоритма принятия решений

правильного распознавания (селекции) заданного объекта сцены при известном эталонном изображении (ЭИ), принятом алгоритме распознавания (используемом в данном случае в геометрическом контексте) и ограничении общего времени решения задачи [2].

При учете возможного разнообразия условий полета и наблюдаемых сцен возникает необходимость в реализации достаточно сложной многоэтапной автоматической процедуры оценки качества полученных изображений и принятии решений в соответствии с принятым критерием.

На рис. 2 представлена возможная схема алгоритма принятия решений, и ниже дано ее описание.

Блоки "Предобработка 1, 2". Предобработка исходных изображений, полученных в каналах 1 и 2 (ТВ и ТП). На выходе — набор изображений, полученных в результате применения различных алгоритмов предобработки. Будем называть эти изображения, полученные датчиком, текущими (ТИ).

Блок "Слияние" (изображений). На вход блока слияния изображений поступает информация из блоков предобработки. Слияние может выполняться с использованием различных алгоритмов. Соответственно, на выходе блока слияния также получается набор изображений. Блок слияния включается только при выполнении ряда дополнительных условий (см. ниже).

Блок "Выбор канала". Выбор канала может осуществляться путем простого перебора или же предпочтение может отдаваться конкретному каналу в зависимости от внешних условий (например, в условиях недостаточной видимости предпочтение может отдаваться ТП каналу).

Блок "Выбор ТИ" осуществляет выбор одного изображения из набора изображений, полученных на выходе блоков предобработки или блока слияния. Выбор может осуществляться путем простого перебора или же после ранжирования изображений по качеству. При таком ранжировании могут быть использованы критерии качества изображения, подробнее рассмотренные в работе [1].

Блок "Распознавание". На вход блока распознавания поступает текущее изображение (выбранное в блоке выбора ТИ). На выходе блока — значение вероятности распознавания заданного объекта наземной сцены, полученное в результате реализации одного из алгоритмов распознавания, рассмотренных в работе [2].

Блоки "Решение 1", "Решение 2", "Решение 3" проверяют последовательно выполнение ряда условий.

Решение 1. Если вероятность распознавания, полученная на выходе блока распознавания, выше порога 1 — текущее изображение ТИ можно использовать для решения задачи распознавания.

Решение 2. Если вероятность распознавания ниже порога 1 (и проверены не все ТИ из набора, полученного в данном канале) — выбирается следующее ТИ из набора (Блок выбора ТИ).

Решение 3. Если вероятность распознавания ниже порога 1 (и проверены все ТИ из набора, полученного в данном канале) — выбирается следующий канал (блок выбора канала).

Если вероятность распознавания ниже порога 1, и проверены все каналы получения информации — выполняется слияние изображений, и повторяются процедуры "Выбор ТИ" — "Распознавание" — "Решение 1" ("Решение 2", "Решение 3").

Если ни в одном из случаев не достигнуто значение вероятности распознавания выше порога 1, выбирается ТИ, дающее наивысшее значение вероятности распознавания. Если это значение выше заданного порога 2, то в дальнейшем используется это ТИ. Если вероятность распознавания меньше порога 2, то происходит отказ от использования системы.

Здесь под порогом 1 понимается заранее заданное значение вероятности распознавания заданного объекта рассматриваемой сцены. Под порогом 2 понимается заданное минимально допустимое значение указанной вероятности.

Реализацию рассмотренной многоэтапной автоматической процедуры оценки качества изображений, полученных в телевизионном и тепловизионном каналах, и принятия решений в соответствии с принятым критерием проводили в тестовом режиме математического моделирования для достаточно представительного набора регистраций наземных сцен и различных состояний внешней среды (круглосуточности и всепогодности).

Полученные результаты позволяют однозначно определить необходимые условия коплексирования информации двух оптико-электронных каналов — типа "да"/"нет", т. е. комплексирование возможно и целесообразно/комплексирование невозможно или нецелесообразно — в зависимости от значений критерия качества изображений каждого из каналов и комплексированного изображения.

В дальнейшем следует рассмотреть возможность вычислительной реализуемости рассмотренного алгоритма принятия решений в бортовых вычислительных системах для использования в бортовых многоканальных системах визирования беспилотных летательных аппаратов и других типов робототехнических систем.

Список литературы

1. **Инсаров В. В., Ким В. Я., Тихонова С. В.** Методы оценки качества статических изображений, полученных при дистанционном зондировании сложно структурированных наземных сцен // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 8. С. 54—60.

2. **Гнилицкий В. В., Инсаров В. В.** Обнаружение и локализация объектов на изображениях наземных сцен // Известия РАН. Теория и системы управления. 2011. № 6.

УДК 004.896:681.5

С. В. Манько, д-р техн. наук, проф,
cpd@mirea.ru,
Д. А. Пименов, аспирант,
littore@gmail.com,
МГТУ МИРЭА

Визуальная ассоциация данных в автономных робототехнических системах на основе метода вероятностной фильтрации

Описывается метод структурного анализа визуальных данных, позволяющий робототехнической системе в режиме реального времени оценить вероятность повторного посещения некоторой пространственной единицы на основании ее графического описания. Предлагаемый алгоритм не ограничивается традиционным поиском семантически близких изображений, но учитывает их сравнительную описательность, являющуюся ключевым параметром в условиях неструктурированной динамической среды функционирования.

Ключевые слова: *визуальная ассоциация, самолокализация и картографирование (SLAM), определение местоположения*

Введение

В данной статье рассматривается итеративный алгоритм вероятностной фильтрации получаемых от средств технического зрения графических данных, позволяющий робототехнической системе эффективно распознать повторное посещение некоторого ранее пройденного участка местности, что, в свою очередь, является наиболее действенным методом борьбы с постоянно накапливаемыми системой навигации ошибками позиционирования и позволяет восстановить структурное восприятие окружающего мира после сбоя оборудования или же "слепого" перемещения системы.

Сложности, возникающие при решении данной задачи, определены целым рядом причин. Во-первых, мир представляет собой сложную нелинейную динамическую систему — даже описания одного и того же места могут обладать существенными отличиями, связанными с изменением освещения или расположения точки наблюдения, появлением или исчезновением в кадре людей или машин, сменой погоды и т. д. Во-вторых, являясь конечным множеством нередко похожих друг на друга макроэлементов, мир имеет тенденцию к визуальному самоповторению. Такие текстуры, как "кирпичная стена" или "листва" могут быть встречены практически повсюду, и основной задачей системы навигации в этом случае является количественная оценка описательности визуальных данных, позволяющая отличить семантическую идентичность сцен от их структурного дублирования.

Предлагаемое нами решение данной проблемы берет за основу обобщенный метод составления словаря визуальных примитивов [1], позволяющий получить компактное описание основных структурных элементов наблюдаемой системами технического зрения сцены. Формируемые на основании проводимого семантического анализа гипотезы затем преобразуются в вероятность повторного посещения посредством Байесовской фильтрации, позволяющей использовать для их проверки накапливаемый робототехнической системой опыт.

При этом в целях избежания возможных ошибок, которые могут оказаться фатальными для всего процесса самолокализации, наиболее вероятные кандидаты в дальнейшем проверяются также и на синтаксическую сопоставимость.

Современные методы структурной декомпозиции изображений

В целях эффективного поиска и сопоставления графических материалов было предложено множество алгоритмов, первый из которых, основанный на использовании словаря визуальных примитивов, был представлен широкой общественности в 2003 г. в работе [1]. Основным его принципом является декомпозиция дескрипторного множества, получаемого в результате выделения визуальных лексем из некоторого заранее формируемого тренировочного набора данных, на конечное число кластеров, объединяющих близкие по своим параметрам элементы. Центры полученных кластеров в многомерном пространстве при этом интерпретируются как независимые визуальные слова, сопоставление с которыми позволяет заменить каждый описываемый дескриптор порядковым номером ближайшего к нему слова (рис. 1, см. вторую сторону обложки), что существенно увеличивает "масштабируемость" используемого алгоритма.

Следующим этапом развития данного метода стало использование дерева знаний, формируемого на основании исходного словаря его повторной *k-means*-группировкой и индексированием, позволяющим добиться ощутимого прироста быстродействия [2]. Еще лучшие результаты были достигнуты применением приблизительной *k-means*-кластеризации, совмещенной с составлением случайного формируемого леса *kd-деревьев* [3]. Впоследствии было доказано, что дальнейшее улучшение качества может быть получено при использовании дополнительного двоичного дескрипторного префикса, в том числе позволяющего проводить частичную геометрическую проверку еще на стадии оценки семантической сопоставимости [16, 17]. При этом для нахождения и описания характерных точек изображения используется алгоритм SIFT (Scale Invariant Feature Transform) [4], известный своей робастностью к аффинным преобразованиям сцены.

Составление словаря визуальных примитивов

Отдельного упоминания требуют особенности программной реализации вышеописанного метода

визуальных примитивов, используемого в рамках данной работы:

- составление словаря выполняется офф-лайн, что позволяет максимально полно использовать имеющуюся "тренировочную" информацию;
- квантование визуальных лексем проводится с помощью алгоритма автоматического определения оптимального метода ассоциации и соответствующих ему параметров (*FLANN*) [15];
- изображения могут быть представлены с помощью различных алгоритмов поиска (*SIFT* [5], *SURF* [7], *STAR* [11], *MSER* [6], *FAST* [8, 9], *HARRIS* [10], *GFTT* [12]) и описания (*SIFT* [5], *SURF* [7], *BRIEF* [13]) значимых точек. Один из этих алгоритмов выбирает пользователь в зависимости от ожидаемых параметров среды функционирования робототехнической системы (к примеру, возможных изменений освещенности, наиболее вероятного разброса наблюдений в пределах занимаемой роботом единицы пространства, погодных условий и пр.);
- в зависимости от требований к качеству словаря и времени его формирования кластеризация дескрипторных множеств может проводиться и такими традиционными методами, как *k-средних* [14] и *k-средних*++ [18], и их иерархическими вариациями, позволяющими ускорить процесс в несколько сотен, а иногда и тысяч раз за счет незначительного уменьшения эффективности алгоритма.

Алгоритм вероятностной фильтрации

Предположим, что I_t — данные, поступающие в систему от средств технического зрения в некоторый момент времени t и приводимые в результате квантования к виду $Z_t = \{z_1, z_2, ..., z_v\}$, где z_i — булева величина, указывающая на наличие или отсутствие визуального слова i в полученных наблюдениях, а v — общий размер используемого словаря визуальных примитивов. В таком случае под $Z^t = \{Z_1, Z_2, ..., Z_t\}$ следует понимать полную совокупность наблюдений, имеющихся на момент времени t и квантизованных согласно описанной выше схеме.

Допустим, что *гипотеза повторного посещения* в тот же момент времени описывается случайной величиной S_t. Пусть выражение $S_t = i$ указывает, что измерение I_t является результатом повторного посещения некоторого места L_i, где $i \in [-1, 0, 1 ... t - h]$. Под $S_t = -1$ здесь следует понимать отсутствие искомого соответствия. Необходимо также отметить, что поиск не проводится для последних h изображений, так как в силу геометрической близости Z_t всегда обладает значительным сходством с соседними во времени сценами Z^{t-1}, Z^{t-2} ... $Z^{t-(h+1)}$, что может привести к неверной трактовке тавтологических признаков.

На основе всего вышесказанного проблема выявления повторных посещений может быть сформулирована в виде поиска *основной гипотезы*, значение которой в общем случае удовлетворяет условию

$$S_t = \mathrm{argmax}_{i=-1,0,...,t-h}\, p(S_t = i|Z^t),$$
$$\text{причем } p(S_t \geqslant -1|Z^t) = 1.$$

Определенная подобным образом проблема повторных посещений представляет собой классическую задачу самолокализации, одним из наиболее эффективных методов решения которой является рекурсивный фильтр Байеса, позволяющий существенно уменьшить влияние на общий процесс случайных ошибок ассоциации. Полагая процесс сценообразования *марковским* (т. е. не зависящим от предыдущих своих состояний при условии наличия косвенной информации о текущем), находим:

$$p(S_t|Z^t) =$$
$$= \frac{p(Z_t|S_t)}{p(Z_t|Z^{t-1})} \cdot \sum_{j=-1}^{t-h} p(S_t|S_{t-1} = j) \cdot p(S_{t-1} = j|Z^{t-1}),$$

где $p(Z_t|S_t)$ — коэффициент семантической совместимости наблюдений (величина, пропорциональная числу семантически близких элементов в обоих изображениях), $p(Z_t|Z^{t-1})$ — коэффициент нормализации, являющийся постоянным для каждого из изображений и для удобства заменяемый константой, $p(S_t|S_{t-1})$ — модель движения системы (изменения вероятностной функции распределения во времени), а $p(S_{t-1}|Z^{t-1})$, соответственно, апостериорная вероятность, полученная на предыдущем шаге алгоритма. Иными словами, топологические характеристики системы в каждый момент времени являются производной от предыдущего своего состояния, измененного в соответствии с моделью движения и уточненного на основании семантического и структурного сходства рассматриваемых сцен.

◆ *Модель движения*

В связи с постоянным перемещением робототехнической системы вероятность $p(S_t|S_{t-1})$ ее пребывания в каждой конкретной единице пространства претерпевает существенные изменения с течением времени. Наиболее правдоподобной в данном случае представляется следующая закономерность: находясь изначально в некотором месте и продолжая движение в одном из возможных направлений в течение одной единицы времени, робототехническая система имеет высокую вероятность оказаться в одном из соседних мест, что может быть более формально представлено следующим образом:

- $p(S_t = -1|S_{t-1} = -1) = 0{,}9$ — зная, что в момент времени $t - 1$ повторного посещения не произошло, можно с высокой степенью уверенности отрицать его наличие и в следующий момент t;
- $p(S_t = i|S_{t-1} = -1) = \frac{0{,}1}{t-h}$, $i \in [0; t - h]$ — как бы то ни было, оставшаяся вероятность должна

быть равномерно распределена между всеми ранее посещенными местами, за исключением последних h;

- $p(S_t = -1|S_{t-1} = j) = 0{,}1$, $j \in [0; t - (h + 1)]$ — наличие повторного посещения делает его отсутствие в следующий момент времени маловероятным;
- $p(S_t = i|S_{t-1} = j) = 0{,}1$, $i \in [0; t - h]$, $j \in [0; t - (h + 1)]$ — принимая повторное нахождение в некоторой позиции в момент времени $t - 1$ за данность, следует ожидать повторное нахождение в той же или в одной из смежных с ней позиций в ближайшем будущем. В нашем случае вероятность определяется абсолютным расстоянием между координатами последовательных местоположений и может быть представлена суммой гауссовских распределений, число ненулевых коэффициентов которых выбирается согласно скорости и частоте снятия измерений.

◆ *Коэффициент семантической совместимости*

Будучи наиболее важной составляющей используемого нами фильтра Байеса, коэффициент семантической совместимости $p(Z_t|S_t)$ представляет собой простую и интуитивную схему оценки сходства полученных системой технического зрения изображений: каждой полученной в промежутке времени $[0; t - h]$ сцене присваивается изначально равный нулю накопительный "счетчик" сходства, итеративно увеличиваемый на определенную величину (равную значению весовой функции TF-IDF для данного слова) с каждым новым найденным соответствием (рис. 2, см. вторую сторону обложки). Под TF-IDF (Term Frequency — Inverse Document Frequency) подразумевается совокупность различных алгоритмов ранжирования документов, исходя из которых вес структурного элемента ("слова") определяется пропорциональностью числа употреблений этого слова в тексте и обратной пропорциональностью частоте употребления этого слова в других документах всей коллекции [19].

Особого внимания здесь требует гипотеза $p(S_t = -1|Z_t)$, определяющая вероятность отсутствия повторного посещения в момент времени t. Именно способность робототехнической системы количественно оценить возможность своего нахождения в незнакомой местности, адекватно интерпретируя относительную схожесть принципиально различных мест, отличает классические методы ассоциации изображений от полностью визуального алгоритма SLAM.

В нашем случае искомая величина рассчитывается как вероятность повторного посещения некоторого места, соответствующего наблюдению I_{-1}, виртуальному изображению, формируемому на каждом шаге алгоритма и состоящему из n наиболее часто встречающихся визуальных слов, принадлежащих множеству Z^t.

Таким образом, I_{-1} можно считать "наиболее вероятным (типичным)" изображением, схожесть с которым будет особенно высока в том случае, когда I_t содержит значительное число "универсальных" слов, что в традиционных алгоритмах нередко приводит к ложной фиксации повторных посещений.

Когда все коэффициенты семантического соответствия найдены, необходимо выделить подмножество изображений, наиболее близких к рассматриваемому изображений $H_t \subseteq I^{t-p}$, чьи коэффициенты больше пороговой величины, рассчитываемой по формуле $k_{\text{порог}} = \mu + \sigma$, где $\mu = \frac{1}{t-p}\sum_{i=1}^{t-p} x_i$ — среднее арифметическое, а $\sigma = \sqrt{\frac{1}{t-p}\sum_{i=1}^{t-p}(x_i - \mu)^2}$ — среднеквадратическое отклонение (x_i — i-й коэффициент семантического сходства). Далее, если некоторое изображение попадает в указанное подмножество, соответствующая ему априорная вероятность $p(S_t = i|Z^{t-1})$ умножается на величину $\xi = \frac{L(S_t = i|Z^t) - k_{\text{порог}}}{\mu}$ (рис. 3). Вероятностные меры сходства изображений, не относящихся к указанному подмножеству, изначально принимаются равными единице. После обновления апостериорной вероятности согласно указанной схеме проводится нормализация.

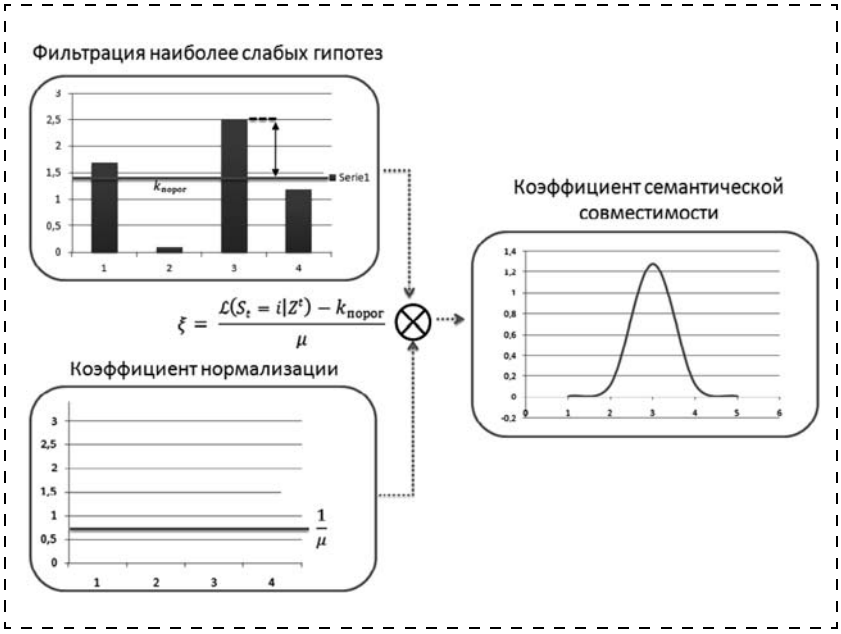


Рис. 3. Схема преобразования "счетчиков" визуального сходства изображений для выбранной группы сцен в коэффициенты семантической совместимости

- ***Анализ апостериорной вероятности***

После того, как полная апостериорная вероятность была найдена и нормализована, необходимо выбрать основную гипотезу, вероятность которой превышает некоторый устанавливаемый пользователем порог. При этом наличие ярковыраженного пика вероятности, соответствующего ровно одному изображению при использовании фронтальной камеры маловероятно. Напротив, вероятность обычно распределена между несколькими (за исключением I_{-1}) соседними изображениями в силу их визуального сходства. Таким образом, вместо поиска отдельных пиков вероятности следует искать группу соседних изображений, сумма вероятностей которых больше некоторого определяемого пользователем порога. Как только одно или несколько изображений были выбраны в качестве наиболее вероятных гипотез повторного посещения, необходимо выполнить геометрическое сопоставление сцен для устранения случайных ошибок самолокализации. В случае успеха алгоритм возвращает *фундаментальную матрицу*, описывающую пространственную трансформацию между наблюдениями Z_t и Z_i, и вносит соответствующие изменения в составляемую карту местности. В противном случае гипотеза отвергается, что, однако, оставляет за ней высокую вероятность принадлежности посещенному ранее месту, которая будет учтена на следующем шаге алгоритма, что, в свою очередь, значительно увеличивает устойчивость системы по отношению к существенной информационной загрязненности среды функционирования.

Результаты экспериментов

В целях проверки эффективности предлагаемого в рамках данной статьи алгоритма обнаружения повторных посещений используется видеоряд, полученный с помощью перемещаемой вручную в городских условиях фронтальной камеры, траектория которой образует несколько замкнутых контуров, и представляющий собой последовательность из 1063 сцен в формате *.ppm (240 × 192 пикселя), соответствующих 35-минутной навигационной сессии. Для эксперимента была выбрана ручная видеокамера с углом обзора, равным 60°, автоматической экспозицией и частотой дискретизации 0,5 Гц в силу высокой глубины сцены. Приводимые статистические данные были получены на процессоре Intel Core 2 Duo 2.1 ГГц, ОЗУ 2.00 Гбайт.

Полная траектория камеры указана на рис. 4 (см. третью сторону обложки), где используется последовательность точек желтого, зеленого и красного цветов в целях обозначения верных и ошибочных результатов классификации, где последние возникают при наличии значительных информационных шумов, к примеру, движущихся пешеходов или машин. Основной проблемой в таком случае становится стадия геометрического сопоставления, отсеивающая высоковероятные гипотезы повторного посещения по причине временного наличия элементов, не удовлетворяющих общему закону трансформации, определяемого фундаментальной матрицей.

Пример подобной ситуации приведен на рис. 5 (см. третью сторону обложки) и свидетельствует об устойчивости предлагаемой вероятностной модели к временным изменениям сцены: даже несмотря на то, что случайно попавший в кадр прохожий заслоняет существенное число характерных точек полученного изображения, соответствующая ему гипотеза повторного посещения все равно признается главной. При этом, как видно из рис. 4 (см. третью сторону обложки), первое совпадение было обнаружено лишь спустя двадцать итераций с момента фактического посещения уже нанесенного на карту места, что объясняется в первую очередь реактивностью выбранной нами вероятностной модели. Создавая некоторые неудобства в тех случаях, когда участки траектории робототехнической системы пересекаются лишь на короткие промежутки времени, данное свойство системы позволяет преодолеть фундаментальную проблему классических алгоритмов ассоциации, связанную с неразличимостью визуальных данных и известную как perceptual aliasing problem.

Зависимость полноты поиска (процентного отношения выявленных действительных событий повторного посещения к фактическому их числу) от точности алгоритма (выражаемая в процентах величина, обратно пропорциональная числу ошибочных решений) для рассматриваемого нами случая приведена на рис. 6 для двух различных пороговых значений структурного сходства (k_{geom}).

Данный график позволяет сделать следующие важные выводы:

- описанный алгоритм обладает абсолютной точностью в пределах некоторого значения эффек-

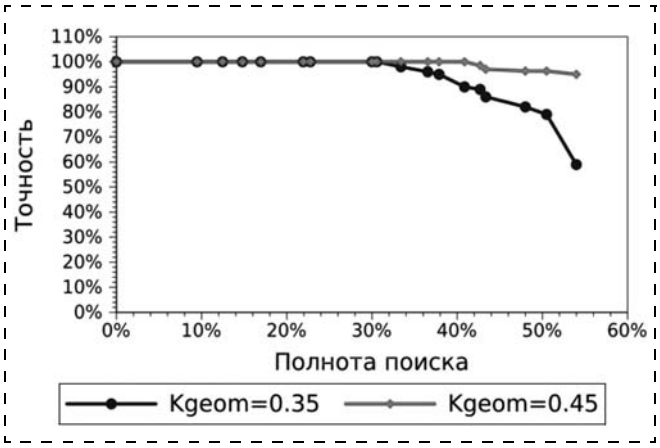


Рис. 6. Зависимость точности алгоритма от его эффективности для двух пороговых значений геометрической сопоставимости

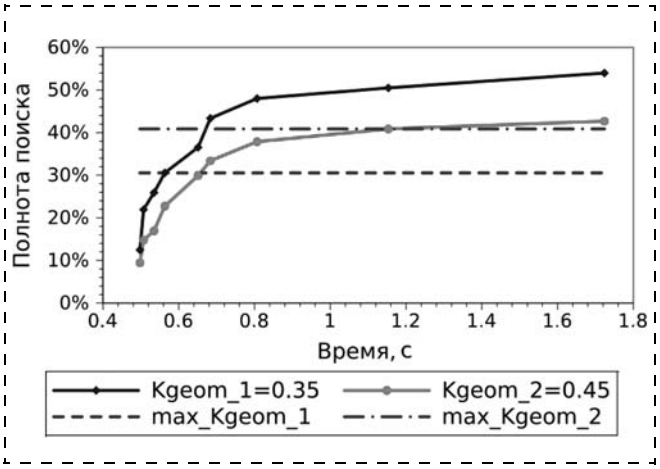


Рис. 7. Зависимость полноты поиска предлагаемого алгоритма от времени обработки одного изображения для двух пороговых значений геометрической сопоставимости

тивности, зависящего от пороговой величины геометрической сопоставимости;

- варьируя пороговые значения геометрической сопоставимости, можно добиться существенного улучшения эффективности алгоритма;
- значения полноты поиска, полученные для пороговых значений, полностью удовлетворяют требованиям систем навигации и позволяют говорить о высокой производительности предложенного алгоритма.

Следует, однако, обратить внимание, что полнота поиска в этом случае является, в первую очередь, функцией затрачиваемого времени (рис. 7), пропорционального числу гипотез, которые были утверждены алгоритмом вероятностной фильтрации и нуждаются в проверке на структурную сопоставимость. Легко заметить, что общее время, необходимое алгоритму для обработки одного изображения и достаточное для достижения полноты поиска в 30,5 %, при точности 100 % составляет 0,49 с (при k_{geom} = 0,35), тогда как для получения 40,8 % этот параметр необходимо увеличить почти втрое, до 1,7 с (при k_{geom} = 0,45). Таким образом, регулируя значение k_{geom}, пользователь может выбирать оптимальное соотношение прямо пропорциональных времени и качества системы.

Очевидно, что максимально возможное быстродействие алгоритма ассоциации может быть получено при использовании исключительно семантических методов анализа (при k_{geom} = 0), а минимальное — при сравнении изображений лишь на предмет их структурного сходства (k_{prob} = 0), что, обеспечивая максимально возможную полноту поиска, ни при каких условиях не может гарантировать требуемый уровень точности.

Отдельно следует отметить, что за исключением пренебрежимо малого прироста ресурсоемкости априорной оценки местоположения, предлагаемый алгоритм гарантирует полную независимость сложности проводимых на каждом шаге алгоритма вычислений от общего числа наличествующих в памяти системы наблюдений, что дает огромный выигрыш во времени в долгосрочной перспективе.

Выводы

В данной статье был предложен вероятностный метод анализа визуальных данных, позволяющий решать сложные задачи ассоциации в режиме реального времени даже при условии значительных изменений параметров окружающей среды. В ходе проводимых экспериментов было успешно зафиксировано значительное число имеющихся совпадений (более 30 %) при полном отсутствии ошибочных ассоциаций, что позволяет говорить о высокой эффективности алгоритма при решении традиционных для современной робототехники задач выявления повторного посещения, локализации "потерявшегося" робота и проведения многоэтапного картографирования. При этом рассматриваемый алгоритм может быть продуктивно применен как сам по себе, так и в качестве вспомогательного для более традиционных методов самолокализации и картографирования.

Существует также ряд направлений, работа в которых теоретически могла бы улучшить качество разрабатываемого алгоритма. К данным направлениям можно отнести:

- исследование методов улучшения качества визуального словаря и его влияния на общую эффективность работы системы. Являясь по своей структуре обычным словарем, список визуальных примитивов может быть преобразован в соответствии с алгоритмами, разработанными в первую очередь для анализа и представления текстов; последствия подобных преобразований неочевидны и требуют дальнейшего изучения;
- методы обновления словаря в процессе навигации. Важным элементом автономной навигации является оценка адекватности восприятия системой среды функционирования, что в случае использования словаря, составленного в режиме офф-лайн, зависит, прежде всего, от использовавшихся для обучения графических материалов. Поэтому при низкой описательности используемого словаря система должна самостоятельно провести его улучшение, не прерывая при этом стандартных операций сбора и анализа данных;
- методы выбора оптимального словаря. Другим подходом к описанной выше проблеме может стать производимый на начальном этапе функционирования системы выбор наиболее подходящего словаря из конечного множества заранее подготовленных, что должно избавить пользователя от необходимости регулирования данного параметра вручную.

Список литературы

1. **Sivic J., Zisserman A.** Video Google: A text retrieval approach to object matching in videos // Proc. of the International Conference on Computer Vision, Nice, France, October 2003.
2. **Nister D., Stewenius H.** Scalable recognition with a vocabulary tree // In Conf. Computer Vision and Pattern Recognition. 2006. V. 2. P. 2161—2168.
3. **Philbin J., Chum O., Isard M., Sivic J., Zisserman A.** Object retrieval with large vocabularies and fast spatial matching // IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2007.
4. **Lowe D. G.** Object recognition from local scale-invariant features // Proc. of the 7th Internat. Conf. on Computer Vision. Kerkyra, 1999. V. 35. P. 1150—1157.
5. **Lowe D. G.** Distinctive image features from scale-invariant keypoints // International Journal of Computer Vision. 2004. 60 (2). P. 91—110.
6. **Matas J., Chum O., Urban M., Pajdla T.** Robust wide baseline stereo from maximally stable extremal regions // Proc. of British Machine Vision Conference. 2002.
7. **Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Van Gool L.** Speeded-up robust features (SURF) // Computer Vision and Image Understanding. 2008. 110 (3). P. 346—359.
8. **Rosten E., Drummond T.** Machine Learning for High-Speed Corner Detection // Proc. of ECCV (1). 2006. P.430—443.
9. **Rosten E., Drummond T. W.** Fusing points and lines for high performance tracking // The 10th International Conf. on Computer Vision (ICCV 2005), Beijing. China. October. 2005.
10. **Harris C. G., Stephens M.** A combined corner and edge detector // Alvey vision conference. 1988. P. 147—151.
11. **Agrawal M., Konolige K.** "enSurE: Center Surround Extremas for Realtime Feature Detection and Matching // Computer Vision — ECCV 2008 10th European Conference on Computer Vision. Proc. P. IV, Marseille, France, October 12—18, 2008.
12. **Jianbo S., Tomasi C.** Good features to track // Computer Vision and Pattern Recognition. 1994 IEEE Computer Society Confe. on Proceedings CVPR '94, 1994.
13. **Calender M., Lepetit V., Strecha C., Fua P.** BRIEF: Binary Robust Independent Elementary Features, 11th European Conf. on Computer Vision (ECCV), Heraklion, Crete. LNCS Springer, September 2010.
14. **Fukunaga K., Narendra P. M.** A branch and bound algorithm for computing k-nearest neighbors // IEEE Trans. 1975.
15. **Muja M., Lowe D. G.** Fast Approximate Nearest Neighbors with Automatic Algorithm Configuration // Proc. Int'l Conf. Computer Vision Theory and Applications. 2009.
16. **Jegou H., Douze M., Schmid C.** Hamming embedding and weak geometric consistency for large scale image search / In Andrew Zisserman David Forsyth, Philip Torr, editor // European Conference on Computer Vision. V. I of LNCS, P. 304—317. Springer. 2008.
17. **Jcgou H., Douzc M., Schmi C. D.** Hamming embedding and weak geometry consistency for large scale image search — extended version. Technical report, INRIA, RR 6709, 2008.
18. **Arthur D., Vassilvitskii S.** k-means++: the advantages of careful seeding // 'SODA '07: Proc. of the eighteenth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms', Society for Industrial and Applied Mathematics. Philadelphia, PA, USA, 2007. P. 1027—1035.
19. **Wu H. C., Luk R. W. P., Wong K. F., Kwok K. L.** Interpreting tf-idf term weights as making relevance decisions // ACM Transactions on Information Systems. 2008. 26 (3). P. 1—37.

УДК 004.93

В. А. Бимаков, директор,
Е. В. Бимаков, ведущий инженер,
robint@mail.ru,
ООО "Воксельная техника", г. Ижевск,
Т. Р. Касимов, инженер,
НТУ "ИТЦ" ОАО "ИМЗ "Аксион-холдинг"

О применении воксельных вычислителей для решения задач стереозрения и навигации автономного робота

Рассматриваются вопросы применения новых специализированных вычислительных устройств — так называемых воксельных вычислителей (ВВ). Метод обработки сцен и изображений, реализуемый в ВВ, позволяет предложить эффективные сверхбыстродействующие алгоритмы для решения задач технического зрения и навигации автономных мобильных роботов.

Ключевые слова: *скоростная обработка сцен и изображений, стереозрение, навигация автономных мобильных роботов*

Понятие воксельного вычислителя и его отличительные признаки

Пиксельный (иначе точечный или дискретный) метод геометрического моделирования обладает исключительными преимуществами по глубокому распараллеливанию следующих основных процедур обработки сцен (ОПОС) [1]:

- теоретико-множественных операций над геометрическими моделями;
- анализа геометрических моделей на пересекаемость;
- геометрических преобразований (поворот, перенос, сжатие);
- операций вычисления объема (площади) воксельной (пиксельной) модели;
- определения положения модели в пространстве.

В полной мере реализовать эти преимущества позволяют специализированные вычислительные устройства — так называемые устройства параллельной обработки *n*-мерных пиксельных моделей (УОПМ) [1—6]. *Воксельный вычислитель* (ВВ) представляет собой частный случай УОПМ и предназначен для параллельной обработки двумерных (пиксельных) и трехмерных (воксельных) геометрических моделей [4, 5]. Отличительными признаками ВВ являются следующие:

1) в ВВ роль адресуемых информационных единиц выполняют не только числовые двоичные переменные (как в обычных числовых компьютерах), но также двумерные бинарные изображения (БИ) квадратного формата $A\sqrt{A} \times A\sqrt{A}$ и трехмерные

БИ кубического формата $A \times A \times A$ (где $A = q^2$, $q \geqslant 2$ — число целое);

2) в состав ВВ помимо обычного арифметико-логического узла, предназначенного для обработки чисел, входят аппаратные средства, позволяющие выполнять все вышеперечисленные ОПОС над пиксельными и воксельными геометрическими моделями (представленными в виде одноцветного содержимого адресуемых БИ) за время, сравнимое с элементарным тактом управления ВВ;

3) система команд ВВ помимо арифметико-логических команд, используемых для обработки чисел, содержит набор команд, оперирующих адресуемыми 2D- и 3D-БИ, каждая из таких команд реализует одну ОПОС над одноцветным содержимым адресуемых БИ, этот набор является *функционально полным*, позволяющим выполнять весь цикл скоростной обработки сцены или изображения на основе применения только пиксельных и воксельных моделей.

Состав воксельного вычислителя

ВВ — это многопроцессорная ОКМД-система, в которой функцию устройства управления выполняет *блок программного управления* (БПУ). Назначением БПУ (выполняемого по одной из известных схем) является хранение команд и числовых данных, организация их последовательного извлечения из памяти программ и данных (ППД), осуществление арифметико-логической обработки чисел, хранящихся в ППД. Однако главным компонентом воксельного вычислителя, обеспечивающим рекордно высокую производительность этих устройств при обработке сцен и изображений, является *блок обработки бинарных изображений* (БОБИ). В состав БОБИ входят:

1) *сверхоперативная RAM-память бинарных изображений* (СПБИ) для хранения адресуемых БИ (иначе АБИСП) формата $A\sqrt{A} \times A\sqrt{A}$ или формата $A \times A \times A$;

2) A^3-разрядные двоичные *регистры* (РгБИ) для хранения бинарных изображений-операндов, имеющих формат АБИСП и извлекаемых из СПБИ на время выполнения ОПОС;

3) *теоретико-множественные преобразователи* одноцветного содержимого БИ-операндов (ТМПБИ);

4) *геометрические преобразователи* содержимого БИ-операнда (ГПБИ);

5) *вычислитель значения меры* (ВМБИ) одноцветного содержимого БИ-операнда (понятие меры $\mu^{(n)}$ является n-мерным обобщением понятий длины ($\mu^{(1)}$), площади ($\mu^{(2)}$) и объема ($\mu^{(3)}$) [7]);

6) *формирователь* (ФКЗБИ) числового кода (КЗБИ), интегрально описывающего характер заполнения БИ-операнда одноцветным содержимым;

7) *буферная память* (БПБИ) для временного (сверхоперативного) хранения участка обрабатываемого БИ-операнда;

8) *оперативная RAM-память бинарных изображений* (ОПБИ) для хранения адресуемых БИ, формат которых представляет некоторую часть АБИСП (строку, столбец, слой, группу столбцов, группу слоев и т. п.) и имеет общее название "АБИОП-формат". Емкость ОПБИ является наращиваемой и значительно превышает общую емкость СПБИ.

Перечисленные первый, второй и третий компоненты БОБИ вместе могут быть представлены в виде единой процессорной матрицы (ПрМ), состоящей из A^3 однотипных процессоров (ОПр), связанных сетью межпроцессорных связей и обладающих собственной локальной памятью (ЛП) [1]. Одному пикселю-квадратику 1×1 (или вокселю-кубику $1 \times 1 \times 1$) АБИСП в ПрМ соответствует один ОПр. ЛП всех ОПр ПрМ образуют вместе СПБИ.

Применение ВВ для решения задачи стереозрения

Рассмотрим возможности применения ВВ для высокоскоростного решения классической задачи о декодировании данных о дальности, скрытых в двух плоских полутоновых изображениях 3D-сцены, сфотографированной из двух разных точек.

♦ *Погрешность установки фотопреобразователей внутри стереосистемы*

Любая стереосистема обладает своими, только ей присущими особенностями, учет которых может повысить скорость и качество автоматического восстановления 3D-сцены по полученной стереопаре. К ним можно отнести:

- погрешность установки фотопреобразователей внутри стереосистемы;
- шум видеокамер

и др.

Если проецируемая 3D-сцена удалена от центра стереосистемы на "бесконечно большое" расстояние (по сравнению с базой стереосистемы), на картинных плоскостях обоих объективов стереосистемы левая и правая оптические проекции такой "бесконечно удаленной" сцены (БУС) будут абсолютно одинаковыми, а все эпиполярные линии на этих проекциях будут параллельны прямой, соединяющей оптические центры объективов $Об_{лев}$ и $Об_{прав}$ (рис. 1, *а*).

Свяжем с БУС мировую систему координат $O_м X_м Y_м Z_м$, в которой ось $O_м Z_м$ совпадает с направлением фотографирования, а ось $O_м X_м$ (рис. 1, *а*) параллельна эпиполярным линиям. После запоминания оптических проекций БУС на фотоносителях полного совпадения левого и правого фотографических изображений наблюдаться не будет (рис. 1, *б*). Несовпадение по яркости корреспондирующих пикселей обусловлено шумом фотопреобразовате-

лей (фотопленки, ПЗС-матриц и др.) и их различной чувствительностью, а несовпадение координат ($x_{лев} \neq x_{прав}$; $y_{лев} \neq y_{прав}$) сопряженных (корреспондирующих) пикселей, а также направлений эпиполярных линий ($\Psi_{лев} \neq \Psi_{прав}$) на левом и правом изображениях — погрешностью установки фотопреобразователей внутри стереосистемы (рис. 1, *б*).

Перед обработкой стереопары средствами ВВ ее левое и правое изображения размещаются в СПБИ адресуемыми бинарными фрагментами $A\sqrt{A} \times A\sqrt{A}$, при этом стороны этих изображений располагаются вдоль направления параллельного переноса (*OX*) АБИСП-фрагментов $A\sqrt{A} \times A\sqrt{A}$, аппаратно реализованного в процессорной матрице $A \times A \times A$ [1—5] ВВ. Для предельного распараллеливания процедуры поиска сопряженных пикселей на этих изображениях средствами ВВ необходимо, чтобы направления эпиполярных линий на левом и правом изображениях-препаратах совпадали с направлением *OX*, а также с направлением строк этих изображений, а координаты сопряженных пикселей на обоих изображениях стереопары БУС были одинаковыми (рис. 1, *в*). Так как на исходных фотоизображениях стереопары (рис. 1, *б*) эти условия

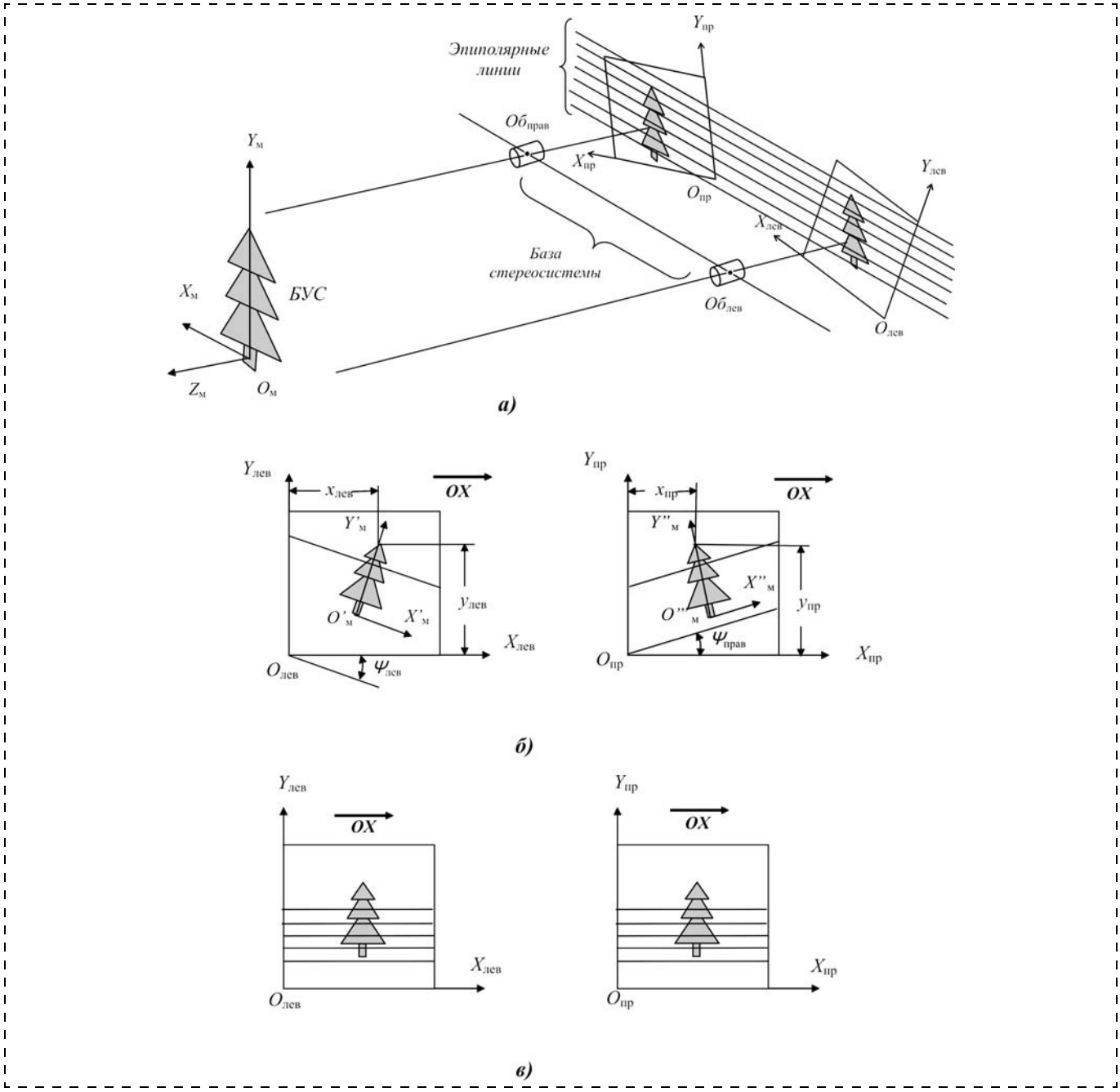


Рис. 1. Влияние погрешности установки фотоносителей на качество формирования стереопары

не выполняются, необходимо априорно знать значения $\Psi_{лев}$, $\Psi_{пр}$, $\Delta X = x_{лев} - x_{пр}$, $\Delta Y = y_{лев} - y_{пр}$, которые для каждой стереосистемы (при правильной ее эксплуатации) должны быть величинами постоянными (и изменяемыми только в чрезвычайных ситуациях, например, при столкновениях робота с препятствием).

Угол $\Psi_{лев}$ определяется как угол между осью $O_{лев}X_{лев}$ (совпадающей с направлением строки левого изображения) и проекцией оси $O_{м}X_{м}$ на левом изображении. Угол $\Psi_{пр}$ определяется как угол между осью $O_{пр}X_{пр}$ (совпадающей с направлением строки правого изображения) и проекцией оси $O_{м}X_{м}$ на правом изображении. После определения значений $\Psi_{лев}$ и $\Psi_{пр}$ (например, на этапе заводских испытаний стереосистемы) эти значения сохраняются (например, в формуляре стереосистемы) для последующего использования в алгоритмах программ обработки стереопар с применением ВВ.

Для определения ΔX и ΔY сначала изменяется угловая ориентация левого и правого изображений стереопары (например, с помощью ВВ) до значений $\Psi_{лев} = \Psi_{пр} = 0$, после чего отыскивается сопряженная пара пикселей, отображающих характерный точечный элемент на тестовой БУС (например, "вершину ели", рис. 1, *б*). Вычисляются координаты этих сопряженных пикселей на левом ($x_{лев}$, $y_{лев}$) и правом ($x_{пр}$, $y_{пр}$) изображениях стереопары БУС, а затем вычисляются ΔX и ΔY. Найденные значения ΔX и ΔY сохраняются (например, в формуляре конкретной стереосистемы) для последующего использования в алгоритмах программ обработки стереопар с применением ВВ.

♦ *Шум фотопреобразователей*

Пусть левое и правое изображения состоят из L пикселей. Из-за яркостного шума и несовпадения координат пикселей число сопряженных пар пикселей на стереопаре БУС будет меньше L. По левому и правому полутоновым изображениям сцены, предварительно выровненным по $\Psi_{лев}$, $\Psi_{пр}$, ΔX, ΔY (рис. 1, *в*) и состоящим из L пикселей каждое, построим дополнительное бинарное изображение-препарат (БИ-препарат), в котором каждый i-й пиксель (где $i = 1, ..., L$) равен "1", если яркость соответствующего i-го пикселя левого изображения совпадает (с заданной точностью) с яркостью i-го пикселя правого изображения, и равен "0" — в противном случае. При отсутствии шума такой БИ-препарат полностью состоял бы только из единичных пикселей. Но из-за шума видеокамер он будет содержать также и нулевые пиксели. Естественно предположить, что соседями этих нулевых пикселей тоже могут быть нулевые пиксели. При этом чем ниже частота шума камеры, тем большим числом нулевых пикселей-соседей будут окружены нулевые пиксели БИ-препарата.

С учетом возможностей ВВ по распараллеливанию процедур локальной фильтрации для оценки *частоты шума* видеокамер стереосистемы удобно использовать величину g. Для вычисления g многократно проводим фильтрацию БИ-препарата. Каждая такая однократная фильтрация БИ-препарата заключается в преобразовании его нулевых пикселей, имеющих в качестве своих ближайших пикселей-соседей хотя бы один единичный пиксель, в единичные пиксели. Фильтрация БИ-препарата продолжается M раз до тех пор, пока все его L пикселей не станут единичными. Частоту шума видеокамер будет характеризовать величина $g = 1/M$.

♦ *Построение воксельной модели 3D-сцены по стереопаре*

Восстановление 3D-сцены по стереопаре средствами ВВ заключается в послойном (толщина слоя равна 1) построении воксельной модели сцены, состоящей из вокселей-кубиков $1 \times 1 \times 1$. Простейший алгоритм такого восстановления заключается в последовательном выполнении следующих вычислительных процедур:

1) левое и правое изображения стереопары выравниваются по углу и координатам (исходя из известных значений $\Psi_{лев}$, $\Psi_{пр}$, ΔX, ΔY, указанных в формуляре применяемой стереосистемы);

2) на неподвижное левое полутоновое изображение "накладывается" правое полутоновое изображение, максимально сдвинутое вправо по эпиполярным линиям (рис. 2). Максимальный сдвиг правого полутонового изображения определяется минимально возможной областью перекрытия, до-

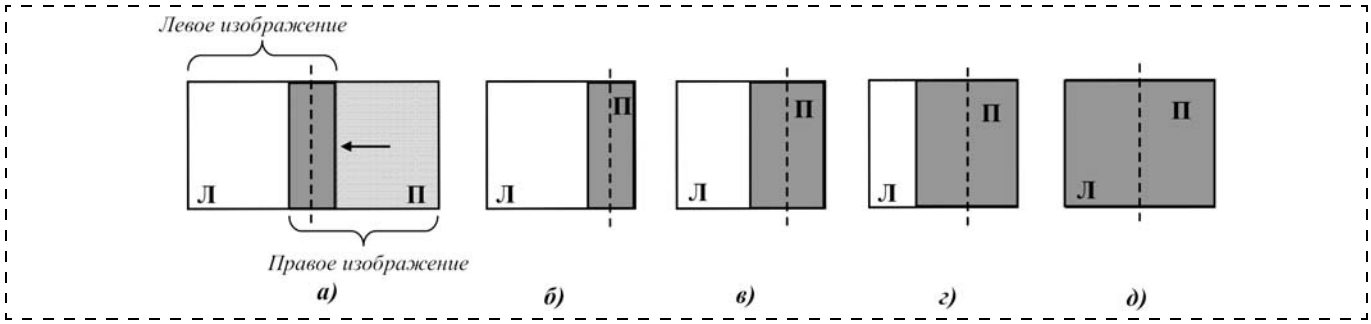


Рис. 2. Наложение изображений стереопары друг на друга со сдвигом

пускающей возможность выполнения последующих вычислительных процедур;

3) по результатам сравнения яркости пикселей, "лежащих друг под другом" и принадлежащих взаимно перекрываемых частям двух полутоновых изображений, формируется плоское бинарное изображение БИ1. Если яркость каждого i-го пикселя левого изображения (где $1 \leqslant i \leqslant L$) равняется (с заданной степенью точности) яркости пикселя, принадлежащего правому изображению и лежащего над i-м пикселем левого изображения, i-му пикселю БИ1 присваивается значение "1", в противном случае — "0";

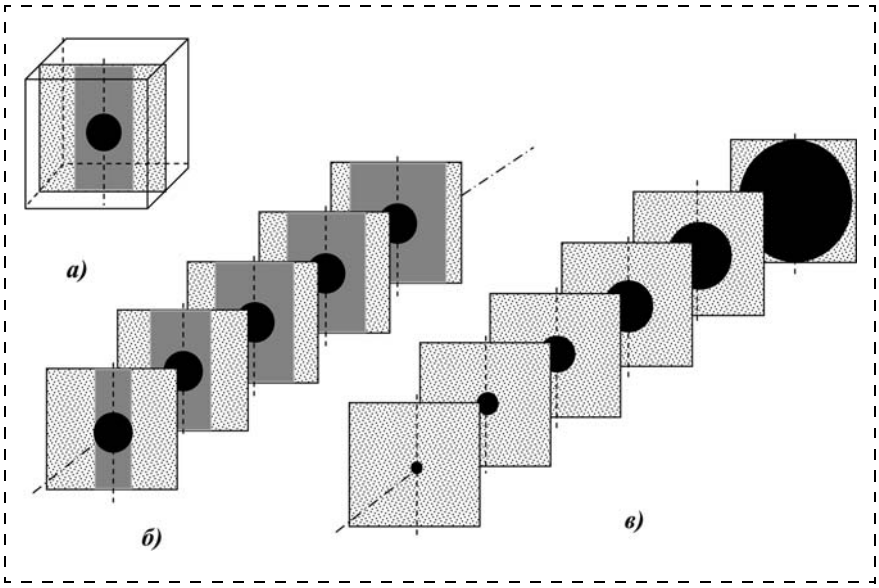


Рис. 3. Построение воксельной модели 3D-сцены по стереопаре

4) далее из БИ1 сначала путем копирования (БИ2 = БИ1), а затем обнуления единичных пикселей БИ2, ближайшая окрестность которых содержит нулевые пиксели, формируется плоский БИ-препарат БИ2. Из БИ2 сначала путем копирования (БИ3 = БИ2), а затем обнуления единичных пикселей, принадлежащих БИ3, ближайшая окрестность которых содержит нулевые пиксели, формируется БИ-препарат БИ3 и т. д. Это делается в целях удаления небольших областей совпадения яркости сравниваемых пикселей (предположительно, "случайного совпадения"). Число (m) плоских БИ-препаратов, синтезируемых подобным образом, определяется значением g, а также особенностями распределения яркости на изображениях стереопары;

5) на последнем БИ-препарате (БИm) соседние пиксели каждого единичного пикселя m раз принудительно устанавливаются в "1" в целях восстановления исходных размеров больших участков, в которых распределение яркости пикселей, лежащих друг под другом во взаимно наложенных полутоновых изображениях, полностью совпадает (предположительно, "совпадает неслучайно"). После этого воксельная модель БИ-препарата БИm (в которой пиксель-квадратик 1 × 1 заменен воксель-кубиком 1 × 1 × 1 той же яркости) объявляется воксельной моделью (ненормализованной по масштабу) первого (т. е. наиболее близко расположенного к стереосистеме) слоя восстанавливаемой 3D-цены (рис. 3, *б*). Заканчивается построение этой воксельной модели слоя нормализацией его содержимого по масштабу (рис. 3, *в*), т. е. переходом от угловых (видимых) размеров объектов слоя к их линейным (истинным) размерам;

6) для получения воксельной модели следующего слоя сцены правое изображение, наложенное на левое, сдвигается влево на один пиксель-квадрат 1 × 1 относительно неподвижного левого изображения, после чего повторяются:

6.1) процедура сравнения яркости наложенных изображений с одновременным синтезом изображения БИ1;

6.2) процедура удаления малых областей совпадения яркостей пикселей на БИ-препарате БИm;

6.3) нормализация масштаба восстанавливаемого слоя 3D-модели сцены. Полученное БИ будет воксельной моделью второго слоя восстанавливаемой сцены, которое удалено по глубине от первого слоя на 1 воксель-кубик 1 × 1 × 1;

7) многократно выполняя подобные процедуры (до полного наложения левого и правого изображений стереопары), строятся воксельные модели всех слоев восстанавливаемой сцены. Объединяя все полученные нормализованные воксельные модели отдельных слоев в одно общее 3D-БИ, строится полная воксельная нормализованная модель восстановленной сцены.

Синтез воксельной модели 3D-области, свободной от препятствий

ВВ позволяет чрезвычайно быстро (за десятые, сотые доли секунды) синтезировать трехмерные модели любых произвольных областей, свободных от препятствий, а также за доли секунд решать задачи распознавания и задачи навигации автономного робота. К тому же ВВ относительно дешев, имеет небольшие габаритные размеры, потребляет мало энергии. Это делает ВВ весьма перспективным инструментом для использования его в системах управления высокоадаптивными мобильными роботами. При этом в качестве исходных данных для построения областей, свободных от препятствий, могут выступать:

- воксельная модель сцены, восстановленная по стереопаре (см. предыдущий раздел);
- результаты лазерного сканирования сцены.

♦ ***Построение по данным анализа стереопары***

Метод построения воксельной модели области, свободной от препятствий, опирается на тот факт, что каждый единичный (т. е. непрозрачный) воксель 3D-модели сцены, построенной по стереопаре (см. предыдущий раздел), является дискретной моделью точки, наблюдаемой как левой, так и правой видеокамерой стереосистемы. Таким образом, участок луча, восстановленного из центра объектива и проходящего через указанную точку, не пересекается ни одним непрозрачным препятствием наблюдаемой сцены (рис. 4, *а*). Воксельная модель области, свободной от препятствий, представляет собой объединение воксельных моделей всех свободных участков подобных лучей сцены (рис. 4, *б*, *в*).

Чтобы построить воксельную модель области, свободной от препятствий, организуется сканирование воксельной модели сцены моделью луча (или моделью пучка лучей). Если модель пучка пересекает препятствие, телесный угол этого пучка в дальнейшем (при необходимости) подробно исследуется моделями более узких пучков (или даже моделями отдельных лучей) для локализации обнаруженного препятствия. В самом узком пучке (или

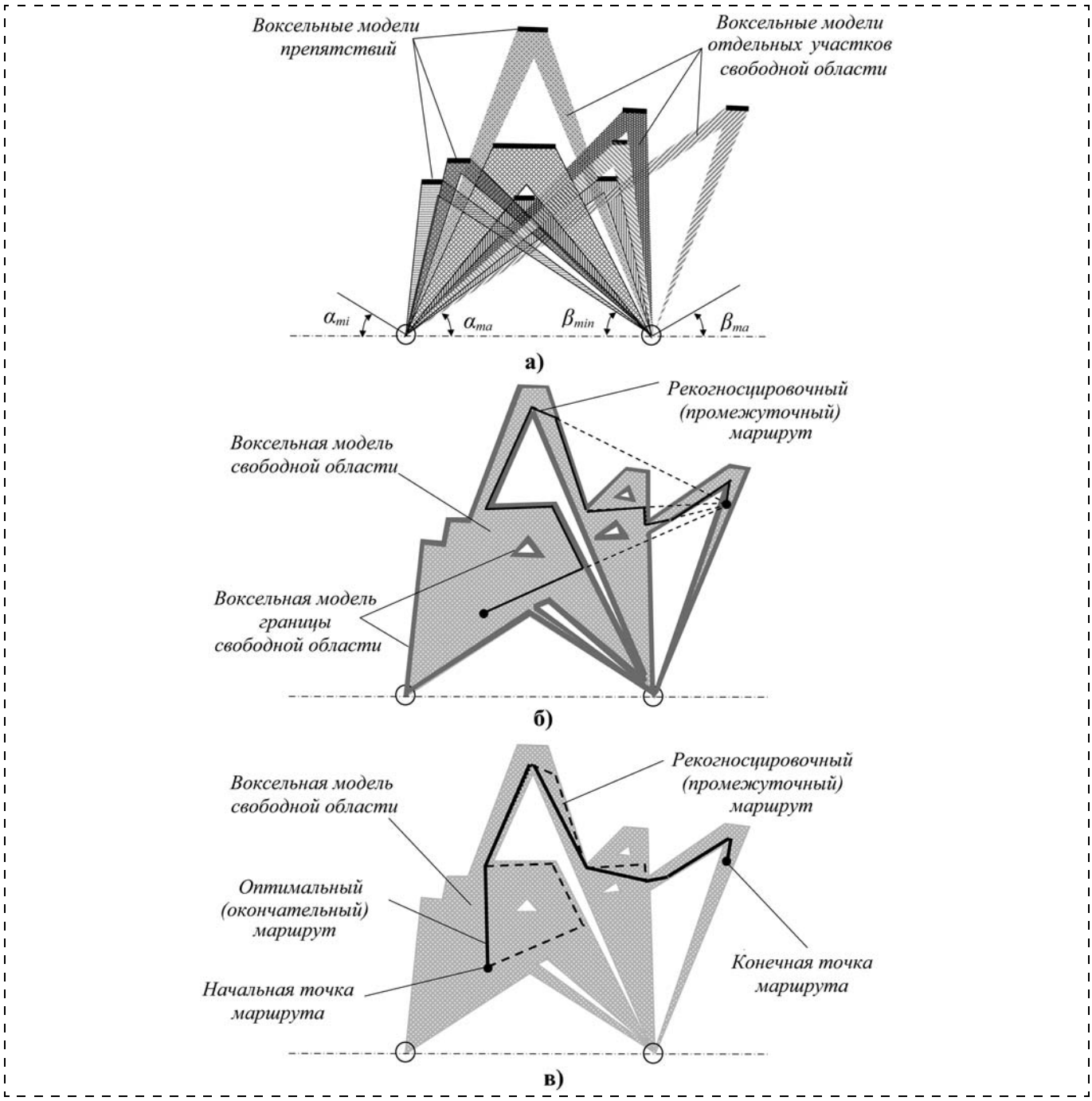


Рис. 4. Синтез и использование модели области, свободной от препятствий

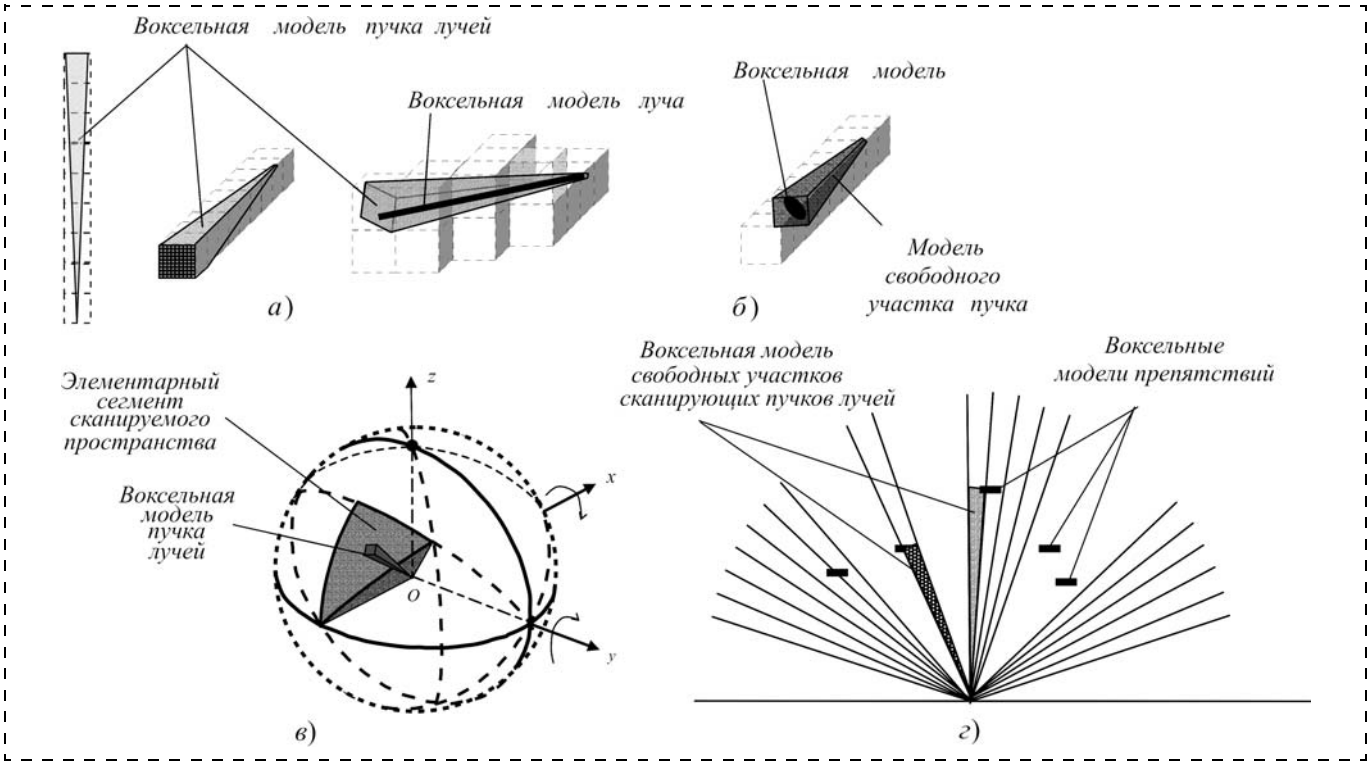


Рис. 5. Сканирование воксельной модели сцены пучком лучей средствами ВВ

луче), пересекающем препятствие, выделяется участок от начала пучка до первого пересечения этого пучка с препятствием (рис. 5, *б*). Воксельные модели таких выделенных участков после их объединения образуют воксельную модель искомой свободной области, используемую в дальнейшем роботом для планирования своих перемещений. Благодаря сверхвысокой скорости выполнения ОПОС построение воксельной модели свободной области пространства может быть выполнено за десятые и даже сотые доли секунды (в зависимости от разрешения синтезируемой модели и производительности применяемого ВВ).

♦ *Построение по данным лазерного сканирования*

ВВ позволяет сверхбыстро преобразовать числовую модель сцены, представленную в виде набора координат отсканированных точек ("облака точек"), в сплошную воксельную модель свободной области. В свою очередь, сплошная воксельная модель сцены с помощью ВВ может быть использована для сверхскоростного выполнения задач, связанных с навигацией робота, а также задач по распознаванию 3D-объектов, расположенных внутри наблюдаемой сцены.

Процедура преобразования "облака точек" в трехмерную сплошную воксельную модель сцены представляет собой виртуальную имитацию процесса сканирования (ранее реально выполненного лазерным лучом дальномера при формировании "облака точек") воксельной модели сцены воксельной моделью пучка лучей (рис. 6) средствами ВВ. При этом ис-

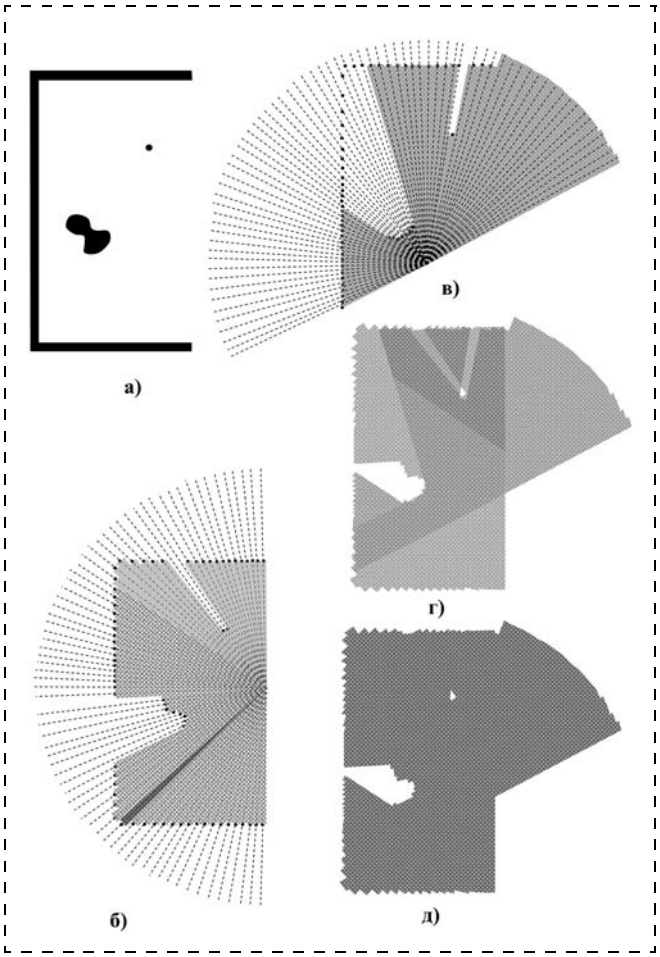


Рис. 6. Построение области, свободной от препятствий, по данным лазерного сканирования

ходное "облако точек" выполняет функцию направляющего "шаблона" для организации такого "виртуального сканирования". Телесный угол моделируемого пучка определяется периодом ранее выполненного лазерного сканирования (чем выше период сканирования, тем больше телесный угол воксельной модели пучка).

Для каждого положения лазерного сканера внутри наблюдаемой сцены (рис. 6, *а*) строится свое "облако точек" (рис. 6, *б*, *в*). По каждому такому "облаку точек" строится своя версия сплошной воксельной модели свободной области. Все полученные версии воксельной модели области (рис. 6, *б*, *в*, *г*) объединяются в одну общую модель (рис. 6, *д*) с учетом истинного положения лазерного сканера внутри наблюдаемой 3D-сцены в момент формирования "облаков точек".

♦ *Использование воксельной модели свободной области сцены*

Воксельная модель свободной области наблюдаемой сцены используется в дальнейшем для планирования оптимального пути перемещения робота (или его манипуляторов) внутри наблюдаемой сцены от одной точки сцены к другой (см. рис. 4, *б*, *в*). Средства ВВ, позволяющие сверхбыстро выполнять ОПОС над воксельными 3D-моделями, предельно упрощают поиск этого оптимального пути.

Список литературы

1. **Бимаков В. А.** Высокоскоростная обработка *n*-мерных пиксельных геометрических моделей // Информационные технологии. 2009. № 3. С. 29—36.
2. **Бимаков В. А., Бимаков Е. В.** Принципы построения и функционирования устройств для высокоскоростной обработки *n*-мерных пиксельных геометрических моделей // Информационные технологии. 2012. № 6. С. 44—49.
3. **Бимаков В. А.** Высокоскоростная обработка пиксельных моделей для решения задач управления автономным роботом // Мехатроника, автоматизация, управление. Приложение. 2008. № 12. С. 2—8.
4. **Бимаков В. А., Бимаков Е. В.** Устройство обработки двухмерных и трехмерных изображений. Патент РФ № 2289161. Бюл. № 34 от 10.12.2006.
5. **Бимаков В. А., Бимаков Е. В.** Устройство обработки двухмерных и трехмерных изображений. Патент РФ № 2376637. Бюл. № 35 от 20.12.2009.
6. **Бимаков В. А., Бимаков Е. В.** Устройство управления автономным роботом. Патент РФ № 2424105. Бюл. № 20 от 20.07.2011 г.
7. **Колмогоров А. Н., Фомин С. В.** Элементы теории функций и функционального анализа. М.: Наука, 1981.

ПАМЯТИ КОЛЛЕГИ И ТОВАРИЩА

НОРЕНКОВ
Игорь Петрович

(19.08.1933—31.12.2012)

На 80-м году ушел из жизни известный ученый, блестящий преподаватель, талантливый организатор и замечательный человек, член редколлегии журнала "Мехатроника, автоматизация, управление" — **Игорь Петрович Норенков**.

Основатель и до последнего времени руководитель кафедры систем автоматизированного проектирования МГТУ им. Н. Э. Баумана, Заслуженный деятель науки и техники РФ, лауреат Государственной премии СССР, доктор технических наук, один из ведущих специалистов в области современных информационных технологий, Игорь Петрович внес неоценимый вклад в развитие российской науки и образования.

И. П. Норенков родился 19 августа 1933 г., в 1960 г. закончил МВТУ им. Н. Э. Баумана (ныне МГТУ им. Н. Э. Баумана) по специальности "Математические машины". В 1975 г. за большой вклад в теорию и практику методов автоматизированного проектирования электронных схем Игорь Петрович был удостоен Государственной премии СССР.

Игорь Петрович являлся одним из пионеров компьютеризации проектно-конструкторской деятельности, руководителем одной из ведущих отечественных школ в области моделирования и оптимизации. И. П. Норенков в 1982 г. основал в МВТУ им. Н. Э. Баумана одну из первых отечественных кафедр в области систем автоматизированного проектирования, которая занимает ведущее место в системе подготовки высококвалифицированных специалистов в области автоматизации проектирования.

Все знали И. П. Норенкова как высокоинтеллегентного ученого, которого отличали широкий научный кругозор, постоянное стремление двигаться вперед, доброжелательность, отзывчивость. В памяти друзей и коллег он останется очень светлым человеком.

Редколлегия и редакция журнала "Мехатроника, автоматизация, управление"
выражают глубокое соболезнование родным и близким покойного.
Вечная память об Игоре Петровиче Норенкове навсегда сохранится в наших сердцах.

Управление и информатика в авиакосмических и морских системах

№ 2
ФЕВРАЛЬ
2013

Главный редактор:

ЛЕБЕДЕВ Г. Н.

Ответственный секретарь:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСЕЕВ В. В.
БАРАНОВ Л. А.
БЕЛОКОНОВ И. В.
БУКОВ В. Н.
ВАСИЛЬЕВ В. И.
ГОДУНОВ В. А.
ГУРЕВИЧ О. С.
ГУРСКИЙ Б. Г.
ЕФИМОВ В. В.
ЗАЙЦЕВ А. В.
КРЫЖАНОВСКИЙ Г. А.
НЕСТЕРОВ В. А.
ОХТИЛЕВ М. Ю.
ПАНКРАТОВ В. М.
РАСПОПОВ В. Я.
САБО Ю. И.
СТЕПАНОВ О. А.
СОЛДАТКИН В. М.
ФИЛИМОНОВ Н. Б.
ХИМЕНКО В. И.
ЧЕБУРАХИН И. Ф.
ШИРЯЕВ В. И.
ШКОЛИН В. П.

Редакция:

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

СОДЕРЖАНИЕ

Алгулиев Р. М., Оруджов Г. Г., Сабзиев Э. Н.
Восстановление потерянной полетной информации методом нейронных сетей 56

Алешкин В. В., Плотников П. К., Челноков Ю. Н.
Определение конфигурации блока датчиков при асимптотическом оценивании параметров движения 60

Мироненко А. А.
Модель программного движения судна в стесненных водах 65

© Издательство "Новые технологии", "Мехатроника, автоматизация, управление", 2013.

УДК 681.5.015.(26 + 44)

Р. М. Алгулиев, член-корр. НАНА,
д-р техн. наук, проф., директор,
rasim@science.az,
Г. Г. Оруджов, канд. техн. наук, зав. отд.,
gazanfar.orujov@gmail.com,
Э. Н. Сабзиев, канд. физ.-мат. наук, консультант,
elkhan@kiber.az,
Институт информационных технологий
Национальной академии наук Азербайджана,
г. Баку

Восстановление потерянной полетной информации методом нейронных сетей

Обсуждаются некоторые вопросы обеспечения безопасности полета летательного аппарата. Анализируется современное состояние проблемы безопасности полета и рассматривается концепция безопасности с учетом перспективных аэронавигационных технологий с функциями CNS/ATM, в соответствии с которой одним из основных критериев для оценки качества пилотирования и функционирования подсистем самолета является полетная информация, зарегистрированная в бортовом регистраторе. Предлагается аппарат нейронной сети для восстановления потерянных данных в полетной информации.

Ключевые слова: *летательный аппарат, безопасность полетов, полетная информация, нейронные сети, восстановление потерянных данных, концепция CNS/ATM, GPS*

Введение

Известно, что наиболее важным критерием качества эксплуатации воздушного судна является безопасность его полета. В целях повышения уровня безопасности полета летательного аппарата (ЛА) в настоящее время осуществляется комплекс мероприятий, одним из которых является межполетная обработка полетной информации (ПИ), записанной в бортовом магнитном накопителе ("черный ящик") [1—6].

Существующие системы обработки ПИ позволяют выполнять:

- полную графическую и цифровую обработку полетной информации;
- идентификацию траектории полета в горизонтальной плоскости на фоне географической карты местности;
- визуализацию пространственного положения ЛА в трехмерной системе координат;
- оценку действий экипажа по управлению ЛА и многое другое.

Как правило, по завершении каждого полета информация, записанная в "черном ящике", тщательно анализируется для оценки действий экипажа и работоспособности подсистем ЛА. По результатам этого анализа принимается решение о дальнейшей эксплуатации исследуемого ЛА и о допуске экипажа к следующему полету (off-line режим).

Известны также работы, посвященные восстановлению потерянной или искаженной ПИ, уточнению бортовых измерений и идентификации траектории полета [7—11].

В начале 1980-х г. ICAO (International Civil Aviation Organization, ICAO — Международная организация гражданской авиации) признала, что возможности существующих аэронавигационных систем ограничены. В 1983 г. в ICAO был создан специальный комитет по будущим аэронавигационным системам FANS (Future Air Navigation System). Комитету было поручено изучить, определить и оценить перспективные аэронавигационные технологии и выработать рекомендации по развитию аэронавигации на будущее. Комитет FANS, изучив существующие системы с функциями CNS/ATM (CNS — Communication, Navigation, Surveillance — связь, навигация, наблюдение; ATM—Air Traffic Management — Организация воздушного движения), пришел к выводу, что радионавигационные системы рубежа XX—XXI вв. могут преодолеть ограничения существующих систем только с использованием принципиально новых концепций и систем CNS, а единственным оптимальным вариантом, на базе которого могут быть реализованы новые системы, являются спутниковые технологии.

Системы CNS/ATM могут способствовать созданию единого информационного обеспечения для пилотов (борт летательного аппарата) и диспетчеров (наземная служба обеспечения полетов) с надежной и скоростной связью между собой в on-line режиме [12—17].

Следовательно, исследования в целях обеспечения безопасности полетов следует продолжить согласно концепции CNS/ATM посредством создания интеллектуальных систем поддержки принятия решений (ИСППР) в on-line режиме. Для оказания экипажу помощи в экстремальной ситуации в on-line режиме предлагается проводить обработку полетной информации от GPS, гироскопа скорости, допплеровского радиолокатора и системы воздушных сигналов в двух вариантах:

- путем использования на борту ЛА ИСППР, работающей в on-line режиме;
- с помощью наземной ИСППР со специальными средствами связи с бортом в реальном масштабе времени.

В первом случае предполагается размещение ИСППР непосредственно на борту ЛА. ИСППР анализирует всевозможные внутренние и внешние угрозы в течение всего полета и оказывает помощь экипажу в принятии решения в экстремальных ситуациях.

Во втором случае выполняется работа на земле с привлечением при необходимости опытных экспертов.

Для принятия правильного решения в целях обеспечения безопасности полета в обоих случаях требуются достоверные данные о состоянии подсистем ЛА и о качестве управления экипажем ЛА в реальном масштабе времени, надежные и быстродействующие средства связи с бортом ЛА с использованием CNS/ATM-технологий.

Статистика ICAO свидетельствует, что доля авиакатастроф по вине экипажа очень высока, так как в экстремальной ситуации экипажу очень трудно объективно оценить происходящие на борту и за бортом процессы и принять правильное решение для спасения ЛА в on-line режиме. Следовательно, в некоторых случаях экипаж мог бы спасти ЛА, если бы имел полное и четкое представление о происходящих на борту и вне борта нештатных ситуациях.

Основные угрозы, приводившие к авиационным происшествиям, условно можно разделить на две группы: *внутренние* и *внешние*.

Внутренние угрозы включают в себя отказ подсистем ЛА и ошибки экипажа, которые выявляют путем анализа ПИ, зарегистрированной в "черном ящике". К внутренним угрозам можно отнести искажение или частичную потерю полетной информации при измерении параметров движения бортовыми датчиками и передаче информации по линиям связи.

Внешние угрозы включают в себя опасность столкновения с земной поверхностью, другими ЛА или со стаей птиц и опасности атмосферного характера, которые контролируются с использованием информации о воздушной обстановке, получаемой от радаров различного назначения и путем применения спутниковой технологии. Одними из основных целей применения CNS/ATM-технологии являются обнаружение и нейтрализация внешних угроз с помощью GPS (Global Positioning System).

Однако навигация по GPS наряду с несомненными достоинствами имеет один серьезный недостаток: по разным причинам она может отключаться на короткое время (до 1 мин). Используя информацию от гироскопа скорости, допплеровского радиолокатора и системы воздушных сигналов, можно вырабатывать навигационное решение при кратковременных отключениях GPS [12]. А информация от гироскопа скорости, допплеровского радиолокатора, системы воздушных сигналов составляет основу ПИ, с помощью которой можно определить и устранить внутреннюю угрозу. Поэтому восстановление и уточнение ПИ являются актуальной задачей.

Постановка задачи

Известно, что в бортовом регистре типа ТЕСТЕР-УЗ кадр ПИ состоит из $N = 256$ двоичных кодов и составляет 1 с полетного времени. Практика показывает, что при регистрации ПИ в бортовом регистраторе и перезаписи ее на магнитный накопитель компьютера для цифровой обработки обнаруживается потеря некоторой части информации. Этот факт выражается в том, что в каждом случае фиксации данных вместо предполагаемого набора N упорядоченных значений измерений в кадре иногда поступают M ($M < N$) измерений. При этом заранее неизвестно, какие именно измерения пропущены в этой последовательности, и, следовательно, этот кадр отбраковывается. Для более достоверного описания полета требуется найти пропущенные измерения и восстановить их значения [18—20]. Восстановление неполных кадров имеет исключительное значение для анализа причин летных происшествий.

Знание характера поведения группы определенных параметров отчасти позволяет прогнозировать их дальнейшее поведение по времени. Эта идея и легла в основу предлагаемого метода восстановления.

В данной статье предлагается один алгоритм на базе нейронной сети для восстановления потерянных данных.

Алгоритм восстановления потерянной полетной информации

Для нахождения позиций потерянных значений измерений в кадре и восстановления их значений предлагается применять нейронную сеть. Пусть $\mathbf{x}(t_i) = (x_1(t_i), x_2(t_i), ..., x_N(t_i))$, $i = 1, 2, ..., t_i = i\Delta t$, $\Delta t = \text{const}$ — векторная форма записи последовательности фиксируемых данных. Обычно среди них выделяют три группы сильно коррелированных данных: данные, относящиеся к продольному каналу, боковому каналу и каналу высоты. Обозначим $\mathbf{y}(t_i) = (y_1(t_i), y_2(t_i), ..., y_m(t_i))$ вектор-функцию, которая является определенным подмножеством значений сильно коррелированных данных $\mathbf{x}(t_i)$, относящихся к одному из каналов и включающих в себе также данные, подлежащие восстановлению. В качестве паттерна входной активности подберем временной ряд $\{\mathbf{y}(t_i), i = 1, 2, ..., p\}$. Предлагается определить модель линейной авторегрессии для некоторого $k < p$ в виде

$$\mathbf{y}(t_s) = \sum_{j=1}^{k} w_i \mathbf{y}(t_{s-k-1+j}),\ s = k+1, k+2, ..., p. \quad (1)$$

Заметим, что главной отличительной чертой применяемой схемы является то, что в качестве паттерна входной активности выступают не скалярные данные, а m-мерные векторы.

Легко видеть, что общее число уравнений равно $m(p - k)$, в то время как число неизвестных равно k. Тройку натуральных чисел (m, p, k) будем называть характеристическими числами данного метода.

Переписав покомпонентно, составим матрицу системы уравнений (1):

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} y_1(t_1) & y_1(t_2) & \dots & y_1(t_k) \\ y_2(t_1) & y_2(t_2) & \dots & y_2(t_k) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_m(t_1) & y_m(t_2) & \dots & y_m(t_k) \\ y_1(t_2) & y_1(t_3) & \dots & y_1(t_{k+1}) \\ y_2(t_2) & y_2(t_3) & \dots & y_2(t_{k+1}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_m(t_2) & y_m(t_3) & \dots & y_m(t_{k+1}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_1(t_{p-k}) & y_1(t_{p-k+1}) & \dots & y_1(t_{p-1}) \\ y_2(t_{p-k}) & y_2(t_{p-k+1}) & \dots & y_2(t_{p-1}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_m(t_{p-k}) & y_m(t_{p-k+1}) & \dots & y_m(t_{p-1}) \end{bmatrix}.$$

Для применения идеологии нейронной сети необходимо выполнение следующих условий [21—23]:

(А) выполнение неравенства $m \times (p - k) > k$;

(Б) $\mathrm{rg}\mathbf{A} = k$.

Очевидно, при выполнении условий (А) и (Б) система (1) является переопределенной линейной алгебраической системой. Поэтому неизвестные коэффициенты $w_1, w_2, \dots, w_k$ будем искать как точку, реализующую в евклидовом пространстве $\Re^k$ минимум следующего функционала:

$$J(w_1, w_2, \dots, w_k) \equiv \sum_{s=k+1}^{p} \left\| \mathbf{y}(t_s) - \sum_{j=1}^{k} w_j \mathbf{y}(t_{s-k-1+j}) \right\|^2.$$

Под знаком нормы понимается обычная евклидова норма, т. е. $\|\mathbf{y}\| = \left(\sum_{i=1}^{m} y_i^2 \right)^{1/2}$. $J(w_1, w_2, \dots, w_k)$ является положительным и непрерывно-дифференцируемым функционалом относительно весовых коэффициентов $w_1, w_2, \dots, w_k$, которые являются обычными действительными числами. Задача $J(w_1, w_2, \dots, w_k) \to \min$, $(w_1, w_2, \dots, w_k) \in \Re^k$ может быть сведена к исследованию системы

$$\frac{\partial J}{\partial w_r}(w_1, w_2, \dots, w_k) = 0,\ r = 1, 2, \dots, k.$$

Написав квадрат нормы в виде произведения ($\|\mathbf{y}\|^2 = \mathbf{y}\mathbf{y}^{\mathrm{T}}$), вычислим производные

$$\frac{\partial J}{\partial w_r}(w_1, w_2, \dots, w_k) =$$

$$= \frac{\partial}{\partial w_r} \sum_{s=k+1}^{p} \left(\mathbf{y}(t_s) - \sum_{j=1}^{k} w_j \mathbf{y}(t_{s-k-1+j}) \right) \times$$

$$\times \left(\mathbf{y}(t_s) - \sum_{j=1}^{k} w_j \mathbf{y}(t_{s-k-1+j}) \right)^{\mathrm{T}} =$$

$$= 2 \cdot \sum_{s=k+1}^{p} \left(\mathbf{y}(t_s) - \sum_{j=1}^{k} w_j \mathbf{y}(t_{s-k-1+j}) \right) \times$$

$$\times \left(\frac{\partial}{\partial w_r} \left[\mathbf{y}(t_s) - \sum_{j=1}^{k} w_j \mathbf{y}(t_{s-k-1+j}) \right] \right)^{\mathrm{T}} =$$

$$= -2 \cdot \sum_{s=k+1}^{p} \left(\mathbf{y}(t_s) - \sum_{j=1}^{k} w_j \mathbf{y}(t_{s-k-1+j}) \right) \times$$

$$\times (\mathbf{y}(t_{s-k-1+r}))^{\mathrm{T}},\ r = 1, 2, \dots, k.$$

Отсюда получаем уравнение

$$\sum_{s=k+1}^{p} \left(\sum_{j=1}^{k} w_j \mathbf{y}(t_{s-k-1+j} \right) -$$

$$- \mathbf{y}(t_s))(\mathbf{y}(t_{s-k-1+r}))^{\mathrm{T}} = 0,\ r = 1, 2, \dots, k.$$

Таким образом, для весовых коэффициентов w_i ($j = 1, 2, \dots, k$) получаем следующую систему линейных алгебраических уравнений:

$$\sum_{j=1}^{k} w_j \sum_{n=0}^{p-k-1} \mathbf{y}(t_{j+n})(\mathbf{y}(t_{r+n}))^{\mathrm{T}} =$$

$$= \sum_{n=0}^{p-k-1} \mathbf{y}(t_{k+n+1})(\mathbf{y}(t_{r+n}))^{\mathrm{T}},\ r = 1, 2, \dots, k. \quad (2)$$

Матрица системы (2) имеет следующий вид:

$$\mathbf{B} \equiv \begin{bmatrix} \sum_{n_1=0}^{p-k-1} \left\| \mathbf{y}(t_{1+n_1}) \right\|^2 & \sum_{n_1=0}^{p-k-1} \mathbf{y}(t_{1+n_1})(\mathbf{y}(t_{2+n_1}))^{\mathrm{T}} & \dots & \sum_{n_1=0}^{p-k-1} \mathbf{y}(t_{1+n_1})(\mathbf{y}(t_{k+n_1}))^{\mathrm{T}} \\ \sum_{n_2=0}^{p-k-1} \mathbf{y}(t_{2+n_2})(\mathbf{y}(t_{1+n_2}))^{\mathrm{T}} & \sum_{n_2=0}^{p-k-1} \left\| \mathbf{y}(t_{2+n_2}) \right\|^2 & \dots & \sum_{n_2=0}^{p-k-1} \mathbf{y}(t_{2+n_2})(\mathbf{y}(t_{k+n_2}))^{\mathrm{T}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{n_k=0}^{p-k-1} \mathbf{y}(t_{k+n_k})(\mathbf{y}(t_{1+n_k}))^{\mathrm{T}} & \sum_{n_k=0}^{p-k-1} \mathbf{y}(t_{k+n_k})(\mathbf{y}(t_{2+n_k}))^{\mathrm{T}} & \dots & \sum_{n_k=0}^{p-k-1} \left\| \mathbf{y}(t_{k+n_k}) \right\|^2 \end{bmatrix}.$$

Видно, что матрица **B** — симметричная. Покажем, что при выполнении условий (Б) матрица **B** — положительно-определенная матрица.

С этой целью рассмотрим все j-мерные ($j = 1, 2, \dots, k$) главные миноры B_j матрицы **B**:

$$B_j \equiv \begin{bmatrix} \sum\limits_{n_1=0}^{p-k-1} \left\|\mathbf{y}(t_{1+n_1})\right\|^2 & \sum\limits_{n_1=0}^{p-k-1} \mathbf{y}(t_{1+n_1})(\mathbf{y}(t_{2+n_1}))^{\mathrm{T}} & \dots & \sum\limits_{n_1=0}^{p-k-1} \mathbf{y}(t_{1+n_1})(\mathbf{y}(t_{j+n_j}))^{\mathrm{T}} \\ \sum\limits_{n_2=0}^{p-k-1} \mathbf{y}(t_{2+n_2})(\mathbf{y}(t_{1+n_2}))^{\mathrm{T}} & \sum\limits_{n_2=0}^{p-k-1} \left\|\mathbf{y}(t_{2+n_2})\right\|^2 & \dots & \sum\limits_{n_2=0}^{p-k-1} \mathbf{y}(t_{2+n_2})(\mathbf{y}(t_{j+n_2}))^{\mathrm{T}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum\limits_{n_j=0}^{p-k-1} \mathbf{y}(t_{j+n_j})(\mathbf{y}(t_{1+n_j}))^{\mathrm{T}} & \sum\limits_{n_j=0}^{p-k-1} \mathbf{y}(t_{j+n_j})(\mathbf{y}(t_{2+n_j}))^{\mathrm{T}} & \dots & \sum\limits_{n_j=0}^{p-k-1} \left\|\mathbf{y}(t_{j+n_j})\right\|^2 \end{bmatrix} =$$

$$= \sum_{n_1, n_2, \dots, n_j = 0}^{p-k-1} \begin{bmatrix} \left\|\mathbf{y}(t_{1+n_1})\right\|^2 & \mathbf{y}(t_{1+n_1})(\mathbf{y}(t_{2+n_1}))^{\mathrm{T}} & \dots & \mathbf{y}(t_{1+n_1})(\mathbf{y}(t_{j+n_j}))^{\mathrm{T}} \\ \mathbf{y}(t_{2+n_2})(\mathbf{y}(t_{1+n_2}))^{\mathrm{T}} & \left\|\mathbf{y}(t_{2+n_2})\right\|^2 & \dots & \mathbf{y}(t_{2+n_2})(\mathbf{y}(t_{j+n_2}))^{\mathrm{T}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{y}(t_{j+n_j})(\mathbf{y}(t_{1+n_j}))^{\mathrm{T}} & \mathbf{y}(t_{j+n_j})(\mathbf{y}(t_{2+n_j}))^{\mathrm{T}} & \dots & \left\|\mathbf{y}(t_{j+n_j})\right\|^2 \end{bmatrix}, \; j = 1, 2, \dots, k.$$

В силу условия (Б) каждый детерминант под знаком суммы представляет собой детерминант матрицы Грамма [24] некоторого базиса в пространстве $\Re^j$ и, следовательно, положителен. Отсюда в силу критерия Сильвестра [24] следует положительная определенность матрицы **B**.

Теперь для решения системы уравнения (2) можем применять схему Холецкого. Коротко опишем алгоритм метода Холецкого [25]. Обозначим $b_{i,j} \equiv \sum\limits_{n=0}^{p-k-1} \mathbf{y}(t_{i+n})(\mathbf{y}(t_{j+n}))^{\mathrm{T}}$ — элементы матрицы **B**. Суть метода Холецкого заключается в представлении матрицы **B** в виде произведения $\mathbf{GG}^{\mathrm{T}}$. Элементы g_{ij} матрицы **G** вычисляются по формулам:

$$g_{ii} = \sqrt{b_{ii} - \sum_{n=1}^{i-1} g_{in}^2}, \; g_{ij} = \frac{b_{ii} - \sum\limits_{n=1}^{j-1} g_{in} g_{jn}}{g_{jj}},$$
$$j = 1, 2, \dots, i-1, \; i = 1, 2, \dots, k.$$

Таким образом, задача (2) сводится к поочередному решению следующих матричных уравнений:

$$\mathbf{Gu} = \mathbf{f}, \; \mathbf{G}^{\mathrm{T}}\mathbf{w} = \mathbf{u}, \tag{3}$$

где $\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_k)^{\mathrm{T}}$, $\mathbf{u} = (u_1, u_2, \dots, u_k)^{\mathrm{T}}$,

$$\mathbf{f} = \left(\sum_{n=0}^{p-k-1} \mathbf{y}(t_{k+n+1})(\mathbf{y}(t_{1+n}))^{\mathrm{T}}, \sum_{n=0}^{p-k-1} \mathbf{y}(t_{k+n+1}) \times \right.$$
$$\left. \times (\mathbf{y}(t_{2+n}))^{\mathrm{T}}, \dots, \sum_{n=0}^{p-k-1} \mathbf{y}(t_{k+n+1})(\mathbf{y}(t_{k+n}))^{\mathrm{T}} \right)^{\mathrm{T}}.$$

Решая систему (3), получаем набор $w_1, w_2, \dots, w_k$, что позволяет прогнозировать измерения $y(t_{p+1}) = \sum\limits_{j=1}^{k} w_j \mathbf{y}(t_{p-k+j})$, т. е. в качестве паттерна выходной активности будет вступать вектор-функция $\mathbf{y}(t)$ при $t = t_{p+1}$.

Далее, путем сопоставления измерений неполного кадра и прогнозируемого набора представляется возможным определить и восстановить потерянные данные в кадре, заменяя их соответствующими элементами вектора $\mathbf{y}(t_{p+1})$.

При цифровой обработке предложенным методом значений измерений в кадре, конечно, не исключаются случаи, когда при выбранной тройке характеристических чисел (m, p, k) условия (А) и (Б) не выполняются. В этом случае необходимо подбирать другую тройку (m, p, k) или же применять другие методы.

Выводы

1. Согласно концепции CNS/ATM предложено создание бортовых и наземных интеллектуальных систем поддержки принятия решении в целях обеспечения безопасности полетов, которые будут функционировать параллельно в on-line режиме.

2. Предложен алгоритм восстановления потерянной полетной информации методом нейронных сетей.

Список литературы

1. **Комплекс** WinArm 32. Возможности комплекса. URL: http://www.winarin.ru/content/view/29/32/

2. **Интегрированный** наземно-бортовой комплекс регистрации, контроля и обработки полетной информации КАРАТ. URL: http://www.gosniias.ru/works4.html, http://www.gosniias.ru/pages/karat/man.pdf

3. **Славутич:** Программный комплекс. Описание применения. Программно-аппаратный комплекс обработки и анализа информации бортовых средств регистрации полетной информации, шифр "MONSTR". URL: http://www.kavr.com.ua/ru/service?id = 11

4. **Программное** обеспечение "СКАТ" URL: http://www.topazlab.ru/production-skat-Soc-UBD.html

5. **Керимов К. В.** Разработка и исследование методов синтеза системы оперативной обработки полетной информации на базе новой информационной технологии: Дисс. работа на со-

искание ученой степени кандидата технических наук. Институт информационных технологий НАНА, Баку, 1998. 115 с.
6. **Азизов Р. А.** Разработка методов и алгоритмов оперативной обработки полетной информации: Дисс. работа на соискание ученой степени кандидата технических наук. Институт информационных технологий НАНА, Баку, 2004. 160 с.
7. **Orujov G. H., Mamedova M. H.** An expert system for aircraft pilots training // Proc. of the 6th IFAC Symposium on Automated Systems Based on Human Skill Joint Design of Technology and Organization. Kranjska Gora, Slovenia, 1997.
8. **Abbasov A., Mamedova M., Orujov G. H., Aliev H.** Synthesis of the methods of subjective knowledge representations in problems of fuzzy pattern recognition // Mechatronics. 2001. V. 11. № 4. P. 439—449.
9. **Оруджов Г. Г.** Методика идентификации математической модели летательного аппарата // Тр. II Междунар. конф. "Идентификация систем и задачи управления" (SICPRO'03). Институт проблем и управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва, 2003. С. 2340—2345.
10. **Алгулиев Р. М., Оруджов Г. Г., Сабзиев Э. Н.** Идентификация траектории полета летательного аппарата // Тр. III Междунар. конф."Идентификация систем и задачи управления" (SICPRO'04). Институт проблем и управления им. В. А. Трапезникова, РАН, Москва, 2004. С. 343—347.
11. **Малогабаритные** интегрированные навигационные системы для авиационного применения. URL: www.teknol.ru/pdf/cn2-TO.pdf.
12. **Bevly D. M., Gebre-Egziabher D., Parkinson B.** Parametric error equations for dead reckoning navigators used in ground vehicle guidance and control // Navigation. 2006. V. 53. N 3. P. 135—147.
13. **Зобов Н. Ф., Кошелев Б. В.** Современные проблемы развития и внедрения аэронавигационной системы будущего. М.: Изд. МАИ, 2003. 204 с. URL: http://www.iqlib.ru/book/preview/B9EEFB19E94F47818BB04E6D0787D BFD
14. **Национальный** план для систем CNS/ATM. Циркуляр 278-AN/164. Инструктивный материал. ИКАО. Монреаль, Канада, 2000. 139 с. URE: http://www.twirpx.com/file/345014/
15. **Глобальный** аэронавигационный план применительно к системам CNS/ATM. Doc 9750. ИКАО. 2007. 186 с. URL: http://aviadocs.net/icaodocs/Docs/9750_cons_ru.pdf
16. **Руководство** по требуемым характеристикам связи (RCP). ИКАО. 2008. 62 с. URL: www.aerohelp.ru/data/432/9613.pdf, www.icao.int airspot.ru/book/file/840/9869_cons_ru.pdf
17. **Guide** to methods & tools for airline flight safety analysis. Prepared by: GAIN Working Group B. Analytical Methods and Tools. Second Edition, 2003. URL: http://flightsafety.org/files/analytical_methods_and_tools.pdf
18. **Пашковский И. М., Леонов В. А., Поплавский Б. К.** Летные испытания самолетов и обработка результатов испытаний. М.: Машиностроение, 1985. 416 с.
19. **Методическое** пособие по объективному контролю (система "Тестер" — "Луч-71"). 1982. 112 с.
20. **Алгулиев Р. М., Оруджов Г. Г., Сабзиев Э. Н.** Об одном методе восстановления потерянной полетной информации // Тр. III Междунар. конф. "Идентификация систем и задачи управления" (SICPRO'04). Институт проблем и управления им. В. А. Трапезникова РАН. Москва, 2004. С. 348—352.
21. **Уоссермен Ф.** Нейрокомпьютерная техника: теория и практика. М.: Мир, 1992. 184 с.
22. **Головко В. А.** Нейронные сети: обучение, организация и применения. М.: Радиотехника, 2001. 256 с.
23. **Осовский С. Нейронные** сети для обработки информации. М.: Финансы и статистика, 2004. 344 с.
24. **Беклемишев Д. В.** Курс аналитической геометрии и линейной алгебры. М.: Наука, 1987. 320 с.
25. **Fox L.** Practical solution of linear equations and inversion of matrices // Nat. Bur. Standards App. Math. 1954. Ser. 39. P. 1—54.

УДК 531.383

В. В. Алешкин, канд. техн. наук, докторант,
aleshkinvv@ya.ru,
П. К. Плотников, д-р техн. наук, проф.,
pribor@sstu.ru,
Ю. Н. Челноков, д-р физ.-мат. наук, проф.,
chelnokovYuN@info.sgu.ru,
Саратовский государственный университет

Определение конфигурации блока датчиков при асимптотическом оценивании параметров движения

Развивается асимптотический подход к решению задачи определения компонентов вектора абсолютной угловой скорости движения объекта по информации блока трех двухстепенных гироскопов. Показывается, что с помощью выбора ориентации гироскопов в блоке могут быть обеспечены заданные динамические свойства идентификатора. Решение задачи получено с учетом нелинейных ограничений, налагаемых условиями ортогональности матриц направляющих косинусов осей чувствительности датчиков в блоке. Приведены результаты моделирования, подтверждающие снижение методических погрешностей оценивания параметров движения объекта.

Ключевые слова: *блок датчиков, информация, первичная обработка, методические погрешности, снижение*

Введение

В работах [1—3] показано, что в качестве алгоритма оценивания (идентификации) параметров движения объекта могут применяться уравнения обратной задачи для блока трех двухстепенных гироскопов. При этом точность оценивания зависит от собственных динамических свойств идентификатора. В данной работе решается задача определения конфигурации блока гироскопов, обеспечивающей заданные свойства идентификатора. Задача решена с использованием методов модального управления в предположении возможности точного измерения токов в обмотках датчиков моментов и углов относительных движений главных осей гиротахометров.

Постановка задачи

Блок измерителей угловой скорости состоит из трех гиротахометров (ГТ), ориентация каждого из которых в блоке задается тремя последовательными поворотами $\theta_3^i \to \theta_2^i \to \theta_1^i$ (i = 1, 2, 3).

На рис. 1 правый ортогональный трехгранник U (U_1, U_2, U_3) связан с корпусом блока, трехгранники Z^i (Z_1^i, Z_2^i, Z_3^i), Z_i (Z_{1i}, Z_{2i}, Z_{3i}) связаны, соответ-

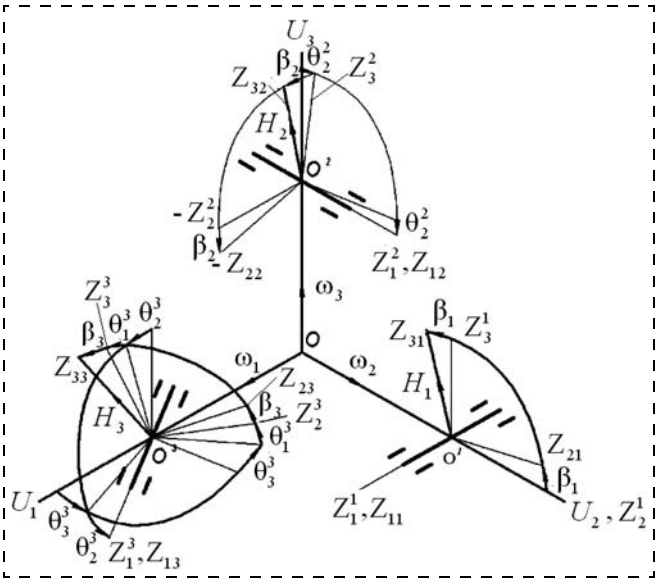


Рис. 1. Конфигурация блока ГТ

ственно, с корпусом и рамкой i-го ГТ, причем ось Z_{3i} является осью кинетического момента, а ось Z_{1i} — выходной осью ГТ. Угол β_i характеризует относительное движение рамки i-го ГТ. Гиротахометры 1 и 2 расположены так, что $\theta_j^1 = 0$ ($j = 1, 2, 3$); $\theta_3^2 = 90°$; $\theta_2^2 \neq 0$; $\theta_1^2 = 0$.

Взаимная ориентация трехгранников определяется равенствами

$$(Z_1^i,\ Z_2^i,\ Z_3^i) = \mathbf{N}^i(U_1,\ U_2,\ U_3);$$

$$(Z_{1i},\ Z_{2i},\ Z_{3i}) = \mathbf{K}^i(Z_1^i,\ Z_2^i,\ Z_3^i)\ (i = 1, 2, 3),$$

где $\mathbf{N}^i(n_{lj}^i)$, $\mathbf{K}^i(K_{lj}^i)$, $(i, l, j = 1, 2, 3)$ — матрицы направляющих косинусов.

Уравнения движения главных осей ГТ относительно трехгранника U можно представить в виде

$$A_i\ddot{\beta}_i + c_i\dot{\beta}_i + Q_i = -H_i\sum_{j=1}^{3} d_{2j}^i\omega_j - A_i\sum_{j=1}^{3} d_{1j}^i\dot{\omega}_j - $$
$$- B_i\left(\sum_{j=1}^{3} d_{2j}^i\omega_j\right)\left(\sum_{j=1}^{3} d_{3j}^i\omega_j\right); \qquad (1)$$

$$\sum_{\mu=0}^{n} a_\mu^i \overset{(\mu)}{Q_i} = k^i\sum_{\nu=0}^{m} b_\nu^i \overset{(\nu)}{\beta_i}; \qquad (2)$$

$$\mathbf{D}^i = \mathbf{K}_i\mathbf{N}^i;\ A_i = I_i + E_i;\ B_i = F_i - D_i - I_i\ (i = 1, 2, 3).$$

Здесь H_i — кинетический момент ротора i-го ГТ; I_i — экваториальный момент инерции ротора i-го ГТ; E_i, F_i, D_i — моменты инерции рамки i-го ГТ относительно осей Z_{i1}, Z_{i2}, Z_{i3} соответственно; Q_i — момент обратной связи; c_i — коэффициент демпфирования; k_i, a_μ^i, b_ν^i — коэффициенты регуляторов электромеханических обратных связей ГТ; ω_j ($j = 1, 2, 3$) — проекции абсолютной угловой скорости объекта на оси U_i ($j = 1, 2, 3$); μ, ν — порядок производной.

На объекте наблюдаемыми являются углы β_i ($i = 1, 2, 3$) относительных движений главных осей ГТ и величины Q_i, определяемые путем измерения токов в обмотках датчиков моментов ГТ. Производные $\dot{\beta}_i$, $\ddot{\beta}_i$ ($i = 1, 2, 3$) также могут быть измерены или вычислены. Поэтому, считая β_i, $\dot{\beta}_i$, $\ddot{\beta}_i$, Q_i известными, обозначая неизвестные проекции угловой скорости ω_j через x_j и обращая переменные в уравнениях (1), получим уравнения обратной задачи для блока трех ГТ:

$$A_i\sum_{j=1}^{3} d_{1j}^i\dot{x}_j + H_i\sum_{j=1}^{3} d_{2j}^i x_j +$$
$$+ B_i\left(\sum_{j=1}^{3} d_{2j}^i x_j\right)\left(\sum_{j=1}^{3} d_{3j}^i x_j\right) = -A_i\ddot{\beta}_i - c_i\dot{\beta}_i - Q_i$$
$$(i = 1, 2, 3). \qquad (3)$$

Уравнения (3) являются алгоритмом вычисления компонент вектора абсолютной угловой скорости объекта по сигналам блока трех ГТ, который может быть реализован на бортовом вычислительном устройстве. При таком подходе обеспечивается алгоритмическая компенсация погрешностей ГТ, вызванных угловыми движениями объекта [1].

Для эффективной работы вычислителя и наиболее полной компенсации методических и динамических погрешностей необходимо, чтобы: а) единственные решения системы (3) были асимптотически устойчивыми по Ляпунову; б) динамические свойства системы были достаточно хорошими. В частности, время переходных процессов в решениях $x_j(t)$ должно быть меньше, чем в ГТ. Остальные параметры переходных процессов должны удовлетворять общепринятым требованиям [4].

Задача построения такой системы сводится к определению параметров H_i, A_i, B_i и углов θ_1^i, θ_2^i, θ_3^i взаимной ориентации ГТ на объекте. Ориентация гироскопов, кинетические моменты и моменты инерции определяют при малых $\beta_i \leqslant 1...2°$ ($i = 1, 2, 3$) (в области асимптотической устойчивости) динамические свойства решений уравнений (3). Поскольку параметры A_i, B_i, H_i, θ_j^i входят в автономные уравнения, имеет смысл именно из них определить оптимальные значения этих параметров. Рассмотрим решение этой задачи.

Условия существования решения задачи

Принимая за невозмущенное движение частное решение $x_j^0(t) = \omega_j(t)$ ($j = 1, 2, 3$) системы (3), соответствующее некоторым начальным условиям $x_{j0}^0 = x_j^0(t_0)$, и обозначая возмущения $y_j(t) = x_j(t) - x_j^0(t)$, где $x_j(t)$ — другие частные решения системы (3), соответствующие начальным условиям

$x_{j0} = x_j(t_0)$, получим систему уравнений возмущенного движения

$$A_i \sum_{j=1}^{3} d_{1j}^i \dot{y}_j + H_i \sum_{j=1}^{3} d_{2j}^i y_j +$$

$$+B_i\left(\sum_{j=1}^{3} d_{2j}^i y_j\right)\left(\sum_{j=1}^{3} d_{3j}^i y_j\right)+B_i\left[\left(\sum_{j=1}^{3} d_{2j}^i y_j\right)\left(\sum_{j=1}^{3} d_{3j}^i x_j^0\right)+\right.$$

$$\left.+\left(\sum_{j=1}^{3} d_{2j}^i x_j^0\right)\left(\sum_{j=1}^{3} d_{3j}^i y_j^0\right)\right] = 0 \ (i = 1, 2, 3). \quad (4)$$

Если сигналы от ГТ не поступают ($\beta_i = \dot{\beta}_i = \ddot{\beta}_i = 0$, $Q_i = 0$ ($i = 1, 2, 3$)), что имеет место при $\omega_j = 0$, то нелинейная неавтономная система (4) превращается в автономную, совпадающую по форме с уравнениями собственного движения системы (3):

$$A_i \sum_{j=1}^{3} n_{1j}^i \dot{y}_j + H_i \sum_{j=1}^{3} n_{2j}^i y_j +$$

$$+ B_i\left(\sum_{j=1}^{3} n_{2j}^i y_j\right)\left(\sum_{j=1}^{3} n_{3j}^i y_j\right) = 0 \ (i = 1, 2, 3). \quad (5)$$

В случае использования одинаковых ГТ систему (5) можно привести к виду

$$y_k' = \sum_{j=1}^{3} C_{kj} y_j + \sum_{j=1}^{3} P_{kj} y_j + R_k(y_j) \ (k = 1, 2, 3), \quad (6)$$

где $y_k' = \dfrac{dy_j}{d\tau}$ ($k = j = 1, 2, 3$), $\tau = ht$, $h = \dfrac{H_i}{A_i}$ ($i = 1, 2, 3$), C_{kj} ($k, j = 1, 2, 3$) — элементы матрицы **C**, состоящей из направляющих косинусов тех ГТ, ориентацию которых мы задаем заранее. Например, мы полагаем, что один или два ГТ расположены ортогонально по отношению к осям объекта. Ориентацию остальных ГТ, т. е. $P_{kj}(n_{kj}^i)$ будем определять исходя из необходимых динамических свойств решений уравнений обратной задачи; $R_k(x_j)$ — совокупность нелинейных членов уравнения (5).

В отличие от системы (5) коэффициенты системы (6) зависят только от углов ориентации ГТ на объекте и не зависят от их параметров.

В отношении системы (6) можно поставить следующую задачу: необходимо найти такие коэффициенты P_{kj} линейных относительно фазовых координат функций $U_k = \sum_{j=1}^{3} P_{kj} y_j$, которые обеспечивали бы асимптотическую устойчивость невозмущенного движения $y_j = 0$ в силу уравнений (6), причем на движениях $y_j(t)$ этой системы минимизировался бы интегральный критерий качества переходных процессов

$$J = \int_0^\infty \Phi(y, U) d\tau.$$

Формализм решения такого рода задач хорошо известен [4, 5]. Специфика настоящей задачи состоит в том, что синтезируемые коэффициенты P_{kj} суть функции элементов n_{kj}^i ($k, j = 1, 2, 3$) матриц направляющих косинусов $\mathbf{N}^i$ ($i = 1, 2, 3$), которые должны удовлетворять шести нелинейным соотношениям (условиям ортогональности):

$$\sum_{j=1}^{3} n_{kj}^i n_{lj}^i = \sum n_{jk}^i n_{jl}^i = \begin{cases} 0 \text{ при } l \neq k, \\ 1 \text{ при } l = k \end{cases}$$

$$(i, l, k = 1, 2, 3). \quad (7)$$

При выполнении условия rang**W** = 3,

$$\mathbf{W} = \{\mathbf{U}, \mathbf{CU}, \mathbf{C}^2\mathbf{U}\}, \ \mathbf{U} = (P_{ki}), \ \mathbf{C} = (C_{kl})$$

$$(k, j = 1, 2, 3) \quad (8)$$

решение поставленной задачи возможно по уравнениям первого приближения системы (6) [5].

Определим наиболее простые схемы расположения трех ГТ на объекте, при которых эта задача может быть решена. Для этого проверим выполнимость условий (8) существования решения задачи выбора ориентации ГТ в случае неортогонального расположения одного ГТ.

Положим, что два ГТ расположены на объекте взаимно ортогонально, причем оси $O^1 Z_j^1$ ($j = 1, 2, 3$) одного из них параллельны соответствующим осям OU_j ($j = 1, 2, 3$) объекта, т. е. $\mathbf{N}^1 = \mathbf{E}$, где **E** — единичная матрица размера 3 × 3. Тогда матрица ориентации второго ГТ, с точностью до знаков, может иметь один из трех видов:

$$\begin{array}{ccc} \text{I} & \text{II} & \text{III} \\ \mathbf{N}^2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; & \mathbf{N}^2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}; & \mathbf{N}^2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \end{array}$$

Остальные случаи ориентации второго ГТ нарушают условия существования и единственности решений системы (5). В случае I rang**W** = 1, в случаях II и III rang**W** = 3.

Таким образом, задача определения ориентации ГТ в принципе имеет решение при неортогональном расположении одного ГТ и взаимно ортогональном — двух других в случаях II и III. Однако как будет показано в дальнейшем, найти требуемую, в смысле свойств а), б), ориентацию ГТ удалось лишь в более общем случае неортогонального расположения двух гиротахометров.

Определение ориентации осей ГТ в блоке

Рассмотрим решение задачи выбора ориентации третьего ГТ в случае, когда второй может быть повернут на угол θ_2^2 вокруг оси чувствительности.

Уравнения первого приближения возмущенного движения имеют вид

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = -y_2; \\ \dot{y}_2 = \dfrac{1}{n_{12}^3 + n_{13}^3 \operatorname{ctg}\theta_2^2}\left[y_1\left(\dfrac{n_{13}^3}{\sin\theta_2^2} - n_{21}^3\right) + \right. \\ \left. + y_2(n_{11}^3 - n_{22}^3) + y_3 n_{23}^3\right] = u; \\ \dot{y}_3 = -y_1/\sin\theta_2^2 + u\operatorname{ctg}\theta_2^2. \end{cases} \quad (9)$$

Для решения задачи воспользуемся результатами работы [6], где показано, что если коэффициенты характеристического уравнения системы третьего порядка

$$l_0\lambda^3 + l_1\lambda^2 + l_2\lambda + l_3 = 0 \quad (10)$$

удовлетворяют соотношениям

$$\frac{l_0}{l_3} = \frac{T^3}{8};\ \frac{l_1}{l_3} = \frac{T^2}{2};\ \frac{l_2}{l_3} = T, \quad (11)$$

то решения системы асимптотически устойчивы, причем показатель колебательности не превышает единицы, а перерегулирование равно 8,12 %. В (11) T — произвольная величина, взятая из области $0 < T < 1$.

Если построить блок ГТ так, что между коэффициентами характеристического уравнения системы (9) будут выполняться соотношения (11), то динамические свойства системы (3) будут близки к свойствам систем, описанных в работе [6].

Для системы (9) коэффициенты l_j имеют вид

$$l_0 = n_{13}^3\cos\theta_2^2 + n_{12}^3\sin\theta_2^2;$$

$$l_1 = n_{23}^3\cos\theta_2^2 + n_{22}^3\sin\theta_2^2 - n_{11}^3\sin\theta_2^2;$$

$$l_2 = n_{13}^3 - n_{21}^3\sin\theta_2^2;\ l_3 = n_{23}^3.$$

Используя соотношения (11) и (7), получим систему девяти нелинейных алгебраических уравнений с одиннадцатью неизвестными n_{Kj}^3 ($K, j = 1, 2, 3$), T, θ_2^2. Разрешим эту систему относительно n_{Kj}^3 ($K, j = 1, 2, 3$), считая T и θ_2^2 заданными;

$$n_{22}^3 = \frac{1}{\sqrt{1 + r^2 + (m_2 + m_1 r)^2}};$$

$$n_{21}^3 = r n_{22}^3;\ n_{23}^3 = m_1 n_{21}^3 + m_2 n_{22}^3;$$

$$n_{11}^3 = \frac{n_{23}^3(\cos\theta_2^2 - b) + n_{22}^3\sin\theta_2^2}{\sin\theta_2^2};$$

$$n_{12}^3 = \frac{n_{23}^3(c - T\cos\theta_2^2) - n_{21}^3\cos\theta_2^2\sin\theta_2^2}{\sin\theta_2^2};$$

$$n_{13}^3 = T n_{23}^3 + n_{21}^3\sin\theta_2^2;$$

$$n_{33}^3 = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{n_{13}^3 n_{21}^3 - n_{11}^3 n_{23}^3}{n_{12}^3 n_{21}^3 - n_{11}^3 n_{22}^3}\right)^2 + \left(\dfrac{n_{22}^3(n_{13}^3 n_{21}^3 - n_{11}^3 n_{23}^3)}{n_{21}^3(n_{12}^3 n_{21}^3 - n_{11}^3 n_{22}^3)} - \dfrac{n_{23}^3}{n_{21}^3}\right)^2}};$$

$$n_{32}^3 = -\frac{n_{33}^3(n_{13}^3 n_{21}^3 - n_{11}^3 n_{23}^3)}{n_{12}^3 n_{21}^3 - n_{11}^3 n_{22}^3};$$

$$n_{31}^3 = -\frac{n_{22}^3 n_{32}^3 + n_{23}^3 n_{33}^3}{n_{21}^3}, \quad (12)$$

где

$$b = \frac{T^2}{2};\ c = \frac{T^3}{8};$$

$$m = T^2 + b^2 + c^2 - 2\cos\theta_2^2(Tc + b) + \cos 2\theta_2^2;$$

$$m_1 = -2\frac{(T - \cos\theta_2^2)\sin\theta_2^2}{m};\ m_2 = -2\frac{(\cos\theta_2^2 - b)\sin\theta_2^2}{m};$$

$$P_1 = \frac{T m_1^2 + m_1\sin\theta_2^2 + m_1(\cos\theta_2^2 - b)\sin\theta_2^2}{\sin\theta_2^2};$$

$$P_2 = \frac{T m_2^2 + m_2(c - T\cos\theta_2^2)}{\sin\theta_2^2};$$

$$P_3 = 1 - \cos\theta_2^2 + m_2\left(\frac{\cos\theta_2^2 - b}{\sin\theta_2^2} + \sin\theta_2^2\right) +$$

$$+ m_1\left(\frac{c - T\cos\theta_2^2}{\sin\theta_2^2} + 2Tm_2\right);$$

$$r = \frac{-P_3 - \sqrt{P_3^2 - 4P_1P_2}}{2P_1}. \quad (13)$$

Знаки перед радикалом в формулах (12) выбираются такими, чтобы трехгранник Z^3 после преобразования $\mathbf{N}^3$ оставался правым.

Область существования F решений (12), (13) ограничена кривой $f(T, \theta_2^2) = 0$ (рис. 2), где функция $f(T, \theta_2^2)$ имеет вид

$$P_3^2(T, \theta_2^2) - 4P_1(T, \theta_2^2)P_2(T, \theta_2^2) = 0.$$

Задавая любую пару чисел $T, \theta_2^2 \in F$, по формулам (12), (13) получим углы ориентации ГТ на объ-

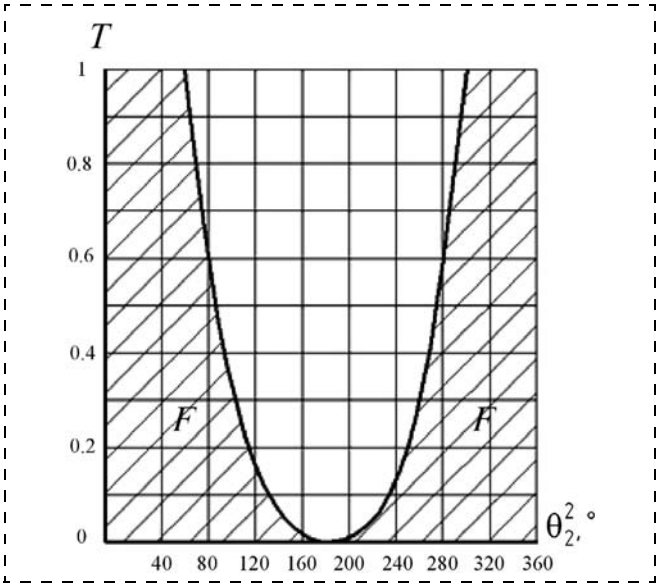


Рис. 2. Область существования решения

екте, при которых уравнения (3) будут иметь асимптотически устойчивые решения:

$$\theta_1^3 = \mathrm{arctg}\frac{n_{23}^3}{n_{33}^3};\ \theta_2^3 = -\arcsin n_{13}^3;\ \theta_3^3 = \mathrm{arctg}\frac{n_{13}^3}{n_{11}^3}. \quad (14)$$

Для конкретизации значений T, θ_2^2 и определения соответствующей взаимной ориентации ГТ исследовали влияние величин T, θ_2^2 на динамические свойства решений $x_j(t)$ (j = 1, 2, 3), в частности, на показатели качества переходных процессов. С этой целью проводили моделирование работы бортового вычислителя, определяющего угловую скорость объекта по сигналам тройки ГТ, расположенных на объекте различным образом. Каждое конкретное положение ГТ определяли по формулам (12), (13) путем варьирования T при фиксированных θ_2^2. Параметры ГТ, приведенные к H_i, задавали следующими:

$$H_i = 1;\ A_i = 0{,}16 \cdot 10^{-2}\ \text{с};\ B_i = 0{,}213 \cdot 10^{-3}\ \text{с};$$
$$C_i = 0{,}133 \cdot 10^{-2}.$$

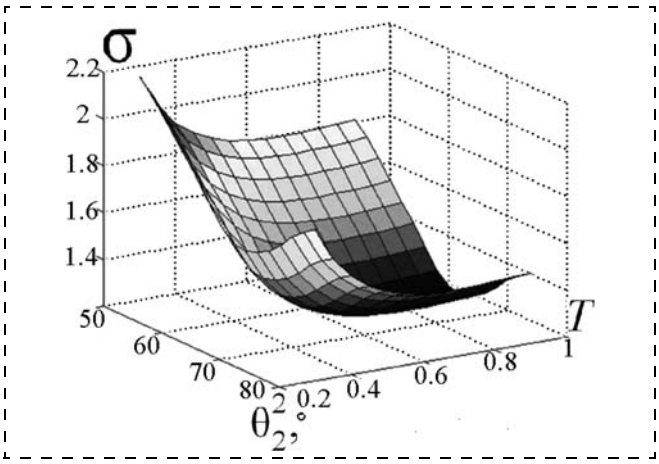


Рис. 3. Зависимость среднего перерегулирования $\sigma(T, \theta_2^2)$

Коэффициенты электромеханических обратных связей, приведенные к величине k_i, равны

$$k^i = 1;\ a_0^i = 1 \cdot 10^{-3};\ a_1^i = 0{,}67 \cdot 10^{-5};$$
$$a_2^i = 0{,}15 \cdot 10^{-7};\ b_0^i = 1 \cdot 10^{-3};\ b_1^i = 0{,}26 \cdot 10^{-4};$$
$$b_2^i = 0{,}28 \cdot 10^{-9};\ a_3^i = 0{,}1 \cdot 10^{-12}.$$

Наиболее критичным к изменениям T, θ_2^2 параметром переходных процессов является перерегулирование σ_j в решениях $x_i(t)$ (j = 1, 2, 3). Трехмерный график зависимости среднего перерегулирования $\sigma(T, \theta_2^2)$ приведен на рис. 3.

Поверхность $\sigma(T, \theta_2^2)$ имеет минимум в точке $T = 0{,}66$, $\theta_2^2 = 66°$[1]. Можно утверждать, что система, для которой $T = 0{,}66$, $\theta_2^2 = 66°$ будет иметь лучшие параметры переходных процессов, чем другие[2].

Задавая значения $T = 0{,}66$, $\theta_2^2 = 66°$ по формулам (12)—(14), получим

$$\theta_1^3 = -15{,}638°;\ \theta_2^3 = 28{,}137°;\ \theta_3^3 = 13{,}144°.$$

Напомним, что первые два ГТ ориентированы в блоке в соответствии с углами

$$\theta_j^1 = 0\ (j = 1, 2, 3);\ \theta_1^2 = 0;\ \theta_2^2 = 66°;\ \theta_3^2 = 90°.$$

Моделирование работы блока гироскопов по уравнениям (1), (2) и вычислителя, определяющего оценки угловых скоростей объекта по алгоритму вида (3), соответствующему данной ориентации ГТ в блоке, дало следующие результаты:

а) при ступенчатом изменении $\omega_j(t)$ (j = 1, 2, 3) перерегулирование в решениях $x_j(t)$ не превышает 10,37 %; время переходных процессов составляет $0{,}25 \cdot 10^{-2}$ с, в то время как переходные процессы в гиротахометрах по $\beta_i(t)$ и $Q_i(t)$ затухают за $0{,}6 \cdot 10^{-1}$ с. Погрешность определения статических значений $\omega_j = 6°/\text{с}$ (j = 1, 2, 3) по алгоритму (3) составляет $0{,}6 \cdot 10^{-8}$ %, непосредственно по току датчиков моментов ГТ (т. е. по Q_i) — 1,93 %, Графики изменения компонентов вектора угловой скорости объекта, вычисленных по алгоритму (3) ($x_j(t)$) и непосредственно по показаниям гиротахометров ($x_j^*(t^*)$), представлены на рис. 4;

б) при изменении компонент угловой скорости вращения объекта по гармоническим законам с частотой 2,5 Гц относительные погрешности определения их текущих значений по алгоритму (3) не превышают $0{,}58 \cdot 10^{-4}$ %, непосредственно по токам датчиков моментов ГТ — 3,35 %.

---

[1] Аналогичная точка существует при $\theta_2^2 = 294°$.

[2] Становится очевидным вывод о том, что получить требуемые свойства решений уравнений (5) при неортогональном расположении одного ГТ невозможно, так как точки с координатами $T = 0{,}66$; $\theta_2^2 = 90°$ и $T = 0{,}66$; $\theta_2^2 = 270°$ находятся вне области F.

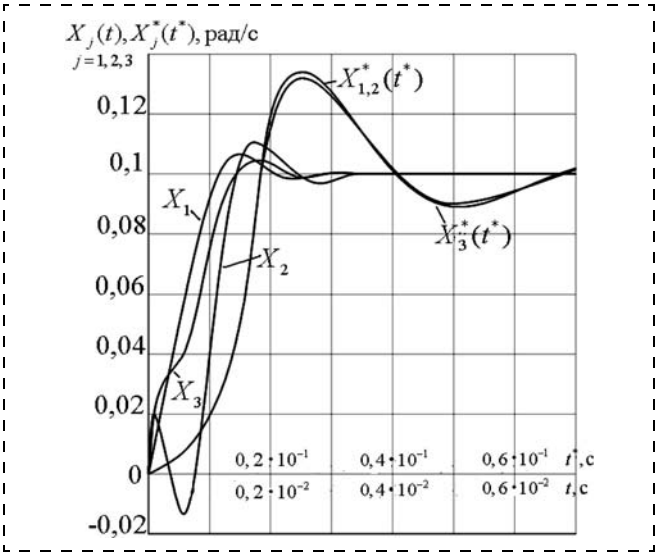


Рис. 4. Переходные процессы в оценках угловых скоростей

Таким образом, полученная ориентация ГТ на объекте обеспечивает необходимые динамические свойства решений задачи вычисления угловой скорости по алгоритму вида (3). Вычисление компонент $\omega_j(t)$ (j = 1, 2, 3) угловой скорости объекта по алгоритму, соответствующему данной ориентации ГТ, позволяет с высокой точностью определять $\omega_j(t)$ по сигналам трех ГТ, компенсируя методические и, в значительной степени, динамические погрешности последних.

Заключение

Применение уравнений вида (3) в качестве алгоритма оценивания компонент вектора абсолютной угловой скорости объекта по информации блока трех одинаковых ГТ, расположенных в блоке в соответствии с полученными в работе углами ориентации, позволяет существенно снизить методические погрешности, учтенные в исходной математической модели блока датчиков.

Список литературы

1. **Плотников П. К.** Измерительные гироскопические системы. Саратов: Изд-во Саратовского государственного университета, 1976. — 164 с.
2. **Плотников П. К.** К вопросу построения алгоритмов оценивания параметров движения по сигналам датчиков первичной информации // Изв. РАН. МТТ. 1990. № 1. С. 12—22.
3. **Ткаченко А. И.** Асимптотическое решение задачи определения параметров движения // Изв. РАН. МТТ. 1980. № 4. С. 22—29.
4. **Летов А. М.** Динамика полета и управление. М.: Наука, 1969. 359 с.
5. **Малкин И. Г.** Теория устойчивости движения / И. Г. Малкип. М.: Наука, 1966. 530 с.
6. **Плотников П. К.** Динамические свойства одного множества линейных непрерывных систем // Изв. вузов. Приборостроение. 1973. Т. 16, № 12. С. 46—51.

УДК 656.61.052.4:629.12.014.6

А. А. Мироненко, канд. техн. наук, доц.,
alex_mironenko@mail.ru,
ФГБОУ ВПО ГМУ им. адм. Ф. Ф. Ушакова

Модель программного движения судна в стесненных водах

Рассматривается программное движение судна в стесненных водах на основе градиентного подхода. Элементы модели — градиенты кинематических параметров и их функциональные изменения — аппроксимируются сигмоподобными функциями. Предлагается оригинальный подход к заданию коэффициента наклона сигмоподобных функций экспоненциальной функцией. Результаты могут быть использованы в современных электронных картографических навигационно-информационных системах, предназначенных для планирования программного движения судна, при автоматическом управлении по траектории.

Ключевые слова: *программное движение, траектория, сигмоподобная функция, градиент*

Особенности судовождения в стесненных водах

Обеспечение безопасности мореплавания остается одной из актуальнейших проблем морской науки. Один из возможных путей обеспечения безопасности основывается на уменьшении влияния человеческого фактора посредством передачи части функций судоводителя системам искусственного интеллекта, в частности, функций планирования маршрута, выбора режимов движения и управления судном по траектории [1—4]. Это связано с тем, что судоводители могут не владеть некоторыми знаниями, которых они либо не обнаружили в литературе, либо не акцентировали на них внимание, либо не приобрели в процессе повседневной практической деятельности, так как в настоящее время карьерный рост происходит быстро, и с рядом важнейших факторов судоводитель может не столкнуться [5].

Общеизвестно, что умения и знания, необходимые для безопасного судовождения в стесненных водах и в открытом море, значительно различаются. В стесненных районах плавания происходит наибольшее число аварий, навалов, посадок на мель, поскольку судовождение происходит в непосредственной близости от берегов, на мелководье, при наличии других судов, искусственных береговых сооружений, в зоне более интенсивного воздействия приливо-отливных течений, банок, мелководья, проходящих судов и т. п. [6].

Кроме того, как показывают исследования [7, 8], на практике лоцманы часто проводят суда с бóльшими размерами, чем предусмотрено текущими условиями судоходства: высотой прилива, погодными условиями, ограничениями по скорости и наличием соответствующего буксирного обеспе-

чения. Процесс прохода узкостью, каналом усугубляет плотность судопотока, непредсказуемые изменения в погодных условиях, фрахтовое расписание, вынужденные отклонения от предполагаемого маршрута судна [7]. Поэтому, как отмечается в работе [5], искусством маневрирования в узкостях следует овладеть, особенно для крупных судов, поскольку многие водные пути для них узки и мелководны.

Именно поэтому в последние четыре десятилетия исследования маневренных качеств судна значительно стимулировались проблемой увеличивающихся размеров судов (танкеров и контейнеровозов), смежной проблемой ухудшения маневренных качеств судов на мелководье и в портовых водах, увеличивающимися скоростями судов, значительным развитием компьютерной индустрии и относительно новыми возможностями электронных (компьютерных) тренажеров [9]. Принятые Международной морской организацией (IMO) стандарты маневренных качеств судов относятся к полной загрузке, полному ходу и глубокой, нестесненной воде, а влияние мелководья, стесненных вод, малых скоростей движения не оговаривается [6].

Необходимо учитывать и экономическую составляющую. Как известно, значительную расходную часть бюджета судна занимают расходы на топливо. Поэтому даже незначительная текущая его экономия ведет к ощутимой ежегодной выгоде. По данным исследования [10] эта экономия достигается оптимизацией следующих составляющих:

1) процессов изменения частоты вращения главного двигателя или угла поворота лопастей винта регулируемого шага в зависимости от изменения внешних условий;

2) управления скоростью без пиков расхода топлива при выходе судна на малые глубины, изменении гидрометеорологических условий;

3) планирования маршрута и определения скорости движения по маршруту при наличии данных об изменении гидрометеорологической обстановки (условий).

В соответствии с перечисленным выше и требованиями резолюции IMO A.893(21) маршрут судна планируется заранее (до выхода судна из порта) на весь переход (от причала порта отхода до причала порта прихода). Маршрут представляет некоторую траекторию, ограниченную справа и слева гарантированной полосой проводки, в пределах которой и должно удерживаться судно. Множество факторов и вариантов решений, зависимость качества решения от знаний, опыта и состояния команды мостика (лоцмана, капитана, вахтенных помощников) порождают множество схем маневрирования для удержания судна на маршруте, в общем случае — в пределах заданной гарантированной полосы проводки. Как следует из исследований [1—11], от оптимальности выбранного маршрута и возможности последующего точного удержания судна на нем, несомненно, напрямую зависит безопасность судовождения, особенно в стесненных водах и на подходах к ним.

Современный подход к программированию маршрута судна

В период с 2012 по 2018 гг. на морских судах использование электронных картографических навигационно-информационных систем (ECDIS) станет обязательным. При всех преимуществах ECDIS [12, 13] методы планирования и прокладки маршрута пока остаются традиционно "ручными" и основываются, преимущественно, на представлении маршрута судна отрезками прямых и дугами окружностей. Вместе с тем ECDIS дают возможность планировать маршрут судна на основе новых технологий, обеспечивающих минимизацию "ручного" труда. Эти технологии должны учитывать динамические особенности при движении судна по траектории, к которым относятся: изменения текущей скорости; изменение угла дрейфа; процесс одержания поворота; воздействия со стороны мелководья, банок; знания экспертов об особенностях маневрирования в стесненных водах и т. п. Для решения этих задач синтезирована универсальная модель программных движений судна по результатам исследований экспериментальных лоцманских проводок судов в акваториях портов Новороссийск, Туапсе, Керченском проливе [2, 14].

Предлагаемая математическая модель основывается на предположении о возможности представления кинематических параметров движения судна в виде текущих приращений курса, угла дрейфа, скорости относительно грунта:

$$\begin{aligned}
&\nabla HDG_{Si} = \nabla HDG_0 + \nabla HDG_i^u;\\
&\alpha_{Si} = \alpha_0 + \Delta\alpha_i^u;\\
&SOG_{Si} = SOG_0 + \Delta SOG_i^u;\\
&HDG_{Si} = HDG_0 + \int\nabla HDG_{Si}dS;\\
&COG_{Si} = COG_0 + HDG_{Si} + \alpha_{Si};\\
&u = (\delta,\ n),
\end{aligned} \tag{1}$$

где Δ, ∇ — знаки приращений и градиентов соответствующих параметров; HDG — истинный курс судна, °; COG — направление вектора перемещения точки управления судна относительно грунта, °; SOG — скорость относительно грунта по COG, м/с; α — угол дрейфа, °; u — индекс управляющего воздействия, вызвавшего изменение соответствующего параметра; δ — угол перекладки руля, °; n — частота вращения винта, мин$^{-1}$; S — расстояние, м; 0, i — индексы начальных и текущих значений.

Приращения в выражениях (1) предлагается представлять сигмоподобными функциями от расстояния, пройденного по предполагаемой траектории. На основе аппроксимации экспериментальных данных установлено, что аргументами этих функций должны также являться параметры, характеризующие приращения соответствующих кинематических параметров и скорости их изменения в виде градиентов:

$$\nabla HDG_i^u = \frac{\nabla HDG_{\max}^u}{1+\exp\left(4(S_{HDG}^u - S_i)\dfrac{\nabla\nabla HDG_{\max}^u}{\nabla HDG_{\max}^u}\right)};$$

$$\Delta\alpha_i^u = \frac{\Delta\alpha_{\max}^u}{1+\exp\left(4(S_\alpha^u - S_i)\dfrac{\nabla\alpha_{\max}^u}{\Delta\alpha_{\max}^u}\right)}; \qquad (2)$$

$$\Delta SOG_i^u = \frac{\Delta SOG_{\max}^u}{1+\exp\left(4(S_{SOG}^u - S_i)\dfrac{\nabla SOG_{\max}^u}{\Delta SOG_{\max}^u}\right)},$$

где max — индекс максимального значения параметра, вызванного текущим воздействием; $\nabla\nabla HDG_{\max}^u$ — наибольшее значение скорости градиента HDG от соответствующего силового воздействия, °/м^2.

Результаты моделирования по скорректированной модели (по выражениям (1), (2)) по сравнению с моделью работы [2] показали хорошую сходимость с экспериментальными данными (рис. 1).

Дальнейшие экспериментальные исследования возможности применения в математической модели программного движения судна сигмоподобных функций и результаты математического моделирования позволили установить следующие свойства:

1) в числителе экспоненты выражения (2) постоянный коэффициент равен четырем;

2) при умножении сигмоподобной функции (2) на коэффициент усиления и обеспечения постоянства коэффициента наклона необходимо внести коэффициент усиления в знаменатель показателя степени экспоненты.

Обоснование этих выводов можно подтвердить поведением сигмоподобных функций и их производных с постоянным значением коэффициента наклона (не зависящим от коэффициента усиления) и с коэффициентом наклона, зависящим от отношения скорости градиента к коэффициенту усиления (градиенту кинематического параметра), в виде, соответственно, выражений

$$\nabla HDG_i^u = \frac{\nabla HDG_{\max}^u}{1+\exp((S_{HDG}^u - S_i)k_s)}; \qquad (3)$$

$$\nabla HDG_i^u = \frac{\nabla HDG_{\max}^u}{1+\exp\left(4(S_{HDG}^u - S_i)\dfrac{\nabla\nabla HDG_{\max}^u}{\nabla HDG_{\max}^u}\right)}, \qquad (4)$$

где k_s — постоянный коэффициент наклона сигмоподобной функции, не зависящий от коэффициента усиления ($\nabla HDG_{\max}^u$).

Результаты моделирования с различными коэффициентами усиления сигмоподобной функции по выражениям (3), (4) при постоянном значении ко-

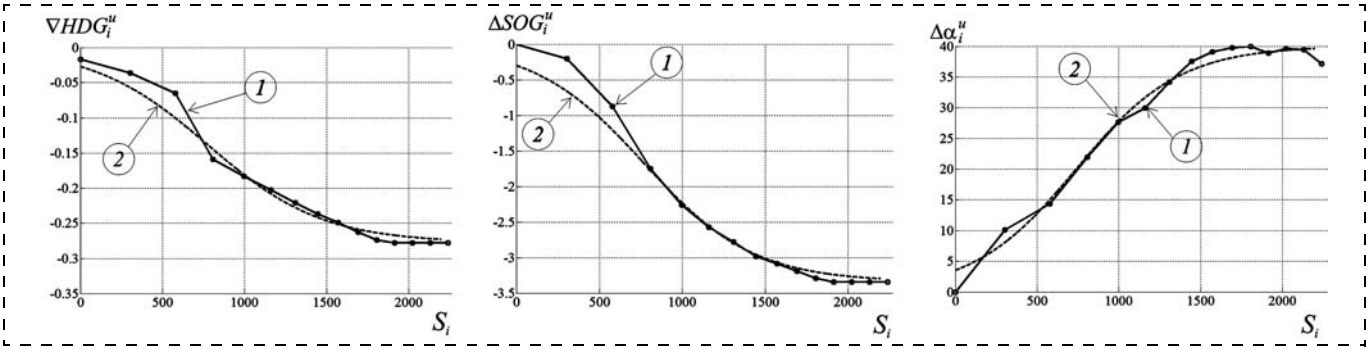


Рис. 1. Кинематические параметры программного движения (1), (2):
1 — экспериментальные данные, *2* — модель

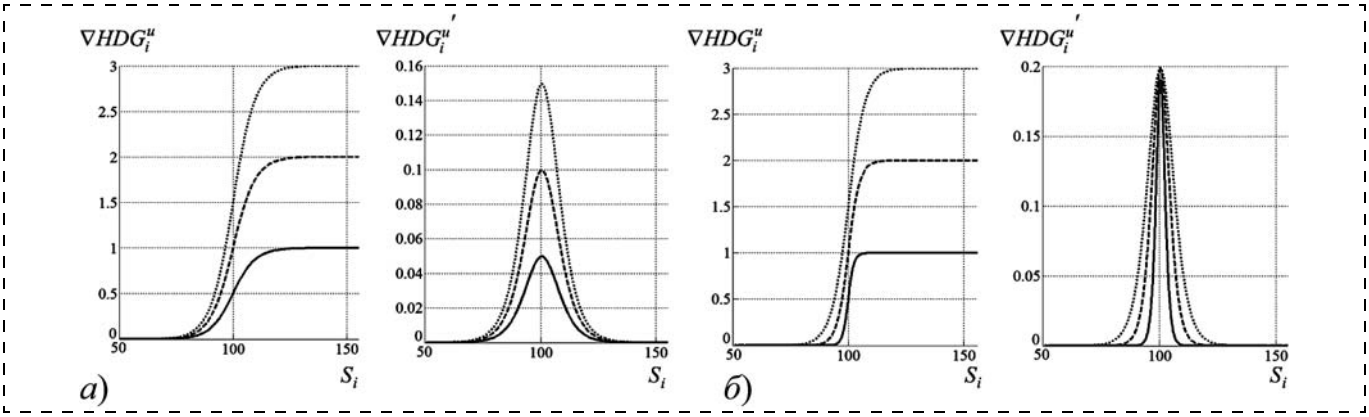


Рис. 2. Результаты моделирования по выражениям:
а — (3); *б* — (4)

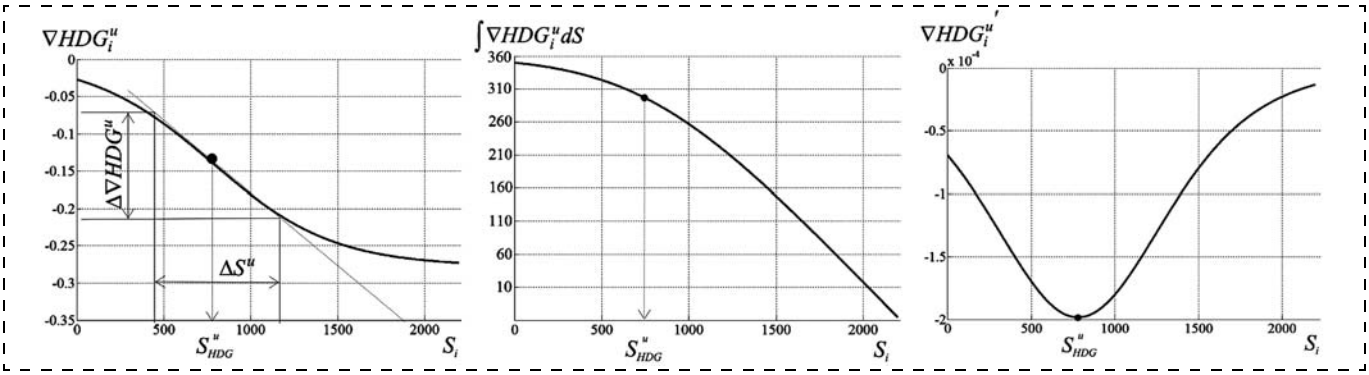


Рис. 3. Результаты моделирования по выражениям (5)

эффициента наклона в точке перегиба функции приведены на рис. 2. В результате моделирования выявлено, что производная сигмоподобной функции (3) в точке ее перегиба (рис. 2, *а*) не постоянна при изменении коэффициента усиления и в общем случае не равна заданному коэффициенту наклона. Напротив, производная сигмоподобной функции (3) постоянна в точке перегиба при изменении коэффициента усиления по выражению (4) и соответствует принятому коэффициенту наклона (рис. 2, *б*).

Поскольку использование сигмоподобной функции вида (4) позволяет добиться равенства производной в точке перегиба функции и коэффициента наклона (неизменности градиента кинематического параметра), то эта модификация сигмоподобной функции использована в модели (2). Тогда выражения для кинематического параметра курс судна, а именно градиент, изменение параметра и скорость градиента, примут следующий вид:

$$\nabla HDG_i^u = \frac{\nabla HDG_{\max}^u}{1+\exp\left(4(S_{HDG}^u - S_i)\dfrac{\nabla\nabla HDG_{\max}^u}{\nabla HDG_{\max}^u}\right)};$$

$$\int \nabla HDG_i^u dS = \frac{1}{4}\frac{(\nabla HDG_{\max}^u)^2}{\nabla\nabla HDG_{\max}^u} \times$$

$$\times \ln\frac{1}{1+\exp\left(4(S_i - S_{HDG}^u)\dfrac{\nabla\nabla HDG_{\max}^u}{\nabla HDG_{\max}^u}\right)} + C; \qquad (5)$$

$$(\nabla HDG_i^u)' = -4\nabla\nabla HDG_{\max}^u \times$$

$$\times \frac{\exp\left(4(S_{HDG}^u - S_i)\dfrac{\nabla\nabla HDG_{\max}^u}{\nabla HDG_{\max}^u}\right)}{\left(1+\exp\left(4(S_{HDG}^u - S_i)\dfrac{\nabla\nabla HDG_{\max}^u}{\nabla HDG_{\max}^u}\right)\right)^2};$$

где C — постоянная интегрирования, °.

Результаты моделирования по выражениям (5) приведены на рис. 3.

Совершенствование модели программного движения судна

В результате дальнейших исследований модели (1), (2), (5) установлено следующее:

1) при задании градиентов (скоростей градиентов) модели в соответствии с экспериментальными кинематическими параметрами для сигмоподобных функций вида (3), (4) невозможно получить модельное нулевое значение градиентов (скоростей градиентов) в начальной точке маневра (см. рис. 1, 3);

2) задавая постоянное значение коэффициента наклона сигмоподобных функций вида (3), (4), сложно добиться соответствия модельных значений кинематических параметров экспериментальным на начальном периоде маневра (рис. 3);

3) скорости градиентов кинематических параметров изменяются равномерно, что не соответствует реальному (физическому) процессу (рис. 3).

При таких допущениях модель (2) может считаться упрощенной (опорной, базовой). В подобной модели задаются только максимальные значения градиентов, скоростей градиентов (ускорения) соответствующих параметров (для точки перегиба сигмоподобной функции) и предполагается их равномерное изменение. Таким образом, очевидно, что хотя характер сигмоподобных функций и соответствует характеру изменения кинематических параметров [2], сигмоподобные функции обладают значительной инерционностью при описании реального физического процесса на его начальном периоде.

Для устранения вышеуказанных недостатков модели (2) предлагается использовать переменное значение коэффициента кривизны (радиуса кривизны) сигмоподобной функции. Анализ источников [11, 15] и исследования [2, 14] показали, что для моделирования переменного (изменяемого) коэффициента кривизны (радиуса кривизны) сигмоподобной функции целесообразно применение экспоненциальной функции. Подобный подход позволяет точнее описать реальный физический процесс, а именно изменения на начальном этапе (маневренном и эволюционном) кинематических параметров от силового воздействия. Данный коэффициент позволяет описать неравномерное изменение градиентов — их быстрое увеличение до макси-

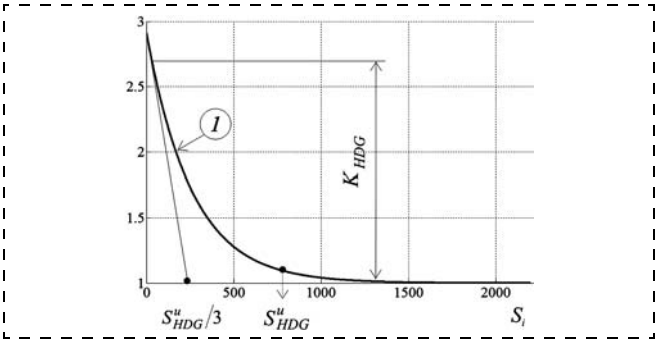


Рис. 4. Характер изменения множителя $R_m(S_i)$:
1 — модель множителя R_m, определяющего характер коэффициента кривизны (радиуса кривизны)

мального значения в течение маневренного и эволюционного периодов и дальнейшее их плавное уменьшение до нулевого значения, что соответствует установившемуся периоду маневра (рис. 4):

$$\omega(t) = \frac{K}{T}\exp\left(-\frac{t}{T}\right);$$

$$R_m(S_i) = \left(\frac{K_{HDG}}{(S^u_{HDG}/3)}\exp\left(-\frac{S_i}{(S^u_{HDG}/3)}\right)+1\right), \qquad (6)$$

где $\omega(t)$ — переходная характеристика; K — коэффициент передачи; T — постоянная времени, с; t — текущее время, с; R_m — множитель, определяющий изменение коэффициента наклона (радиуса кривизны) сигмоподобной функции; K_{HDG} — коэффициент, определяющий предельное значение коэффициента наклона (радиуса кривизны) сигмоподобной функции, м.

Принимая допущение, что после силового воздействия процесс практически установится при прохождении судном расстояния S^u_{HDG} по траектории (что аналогично длительности переходного процесса для динамических процессов), получаем, что знаменатели дроби и показатель степени экспоненты выражения (6) будут соответствовать $(S^u_{HDG}/3)$. Коэффициент K_{HDG} уравнения (6) численно соответствует радиусу кривизны сигмоподобной функции для начальной точки маневра, а единица в показателе степени экспоненты введена для исключения умножения на ноль и соответствия градиента коэффициенту наклона на установившемся периоде маневра.

Подставив в степень экспоненты соответствующих кинематических параметров модели (2) уравнения типа (6), получим новую модель программного движения судна:

$$\nabla HDG^u_i = \frac{\nabla HDG^u_{\max}}{1+\exp\left(4(S^u_{HDG}-S_i)\frac{\nabla\nabla HDG^u_{\max}}{\nabla HDG^u_{\max}}\left(\frac{K_{HDG}}{(S^u_{HDG}/3)}\exp\left(-\frac{S_i}{(S^u_{HDG}/3)}\right)+1\right)\right)};$$

$$\Delta\alpha^u_i = \frac{\Delta\alpha^u_{\max}}{1+\exp\left(4(S^u_{\alpha}-S_i)\frac{\nabla\alpha^u_{\max}}{\Delta\alpha^u_{\max}}\left(\frac{K_{\alpha}}{(S^u_{\alpha}/3)}\exp\left(-\frac{S_i}{(S^u_{\alpha}/3)}\right)+1\right)\right)}; \qquad (7)$$

$$\Delta SOG^u_i = \frac{\Delta SOG^u_{\max}}{1+\exp\left(4(S^u_{SOG}-S_i)\frac{\nabla SOG^u_{\max}}{\Delta SOG^u_{\max}}\left(\frac{K_{SOG}}{(S^u_{SOG}/3)}\exp\left(-\frac{S_i}{(S^u_{SOG}/3)}\right)+1\right)\right)};$$

$$u = (\delta,\ n),$$

где K_α, K_{SOG} — коэффициенты, определяющие предельное значение коэффициента наклона (радиуса кривизны) соответствующих сигмоподобных функций, м.

Результаты моделирования по выражению (7) для кинематического параметра курс судна показаны на рис. 5.

По результатам моделирования очевидно (рис. 5), что в начальный момент силового воздействия градиент кинематического параметра и скорость градиента кинематического параметра практически равны нулю, кроме того, скорость градиента кинематического параметра изменяется неравномерно. Результаты моделирования полученной модели программного движения судна (7) в сравнении с экспериментальными (натурными) данными приведены на рис. 6.

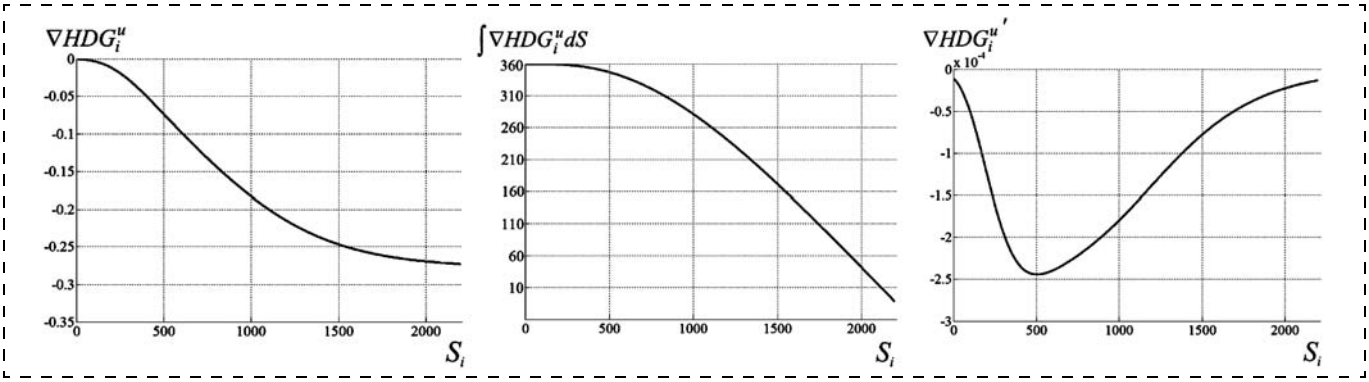


Рис. 5. Результаты моделирования по выражениям (7)

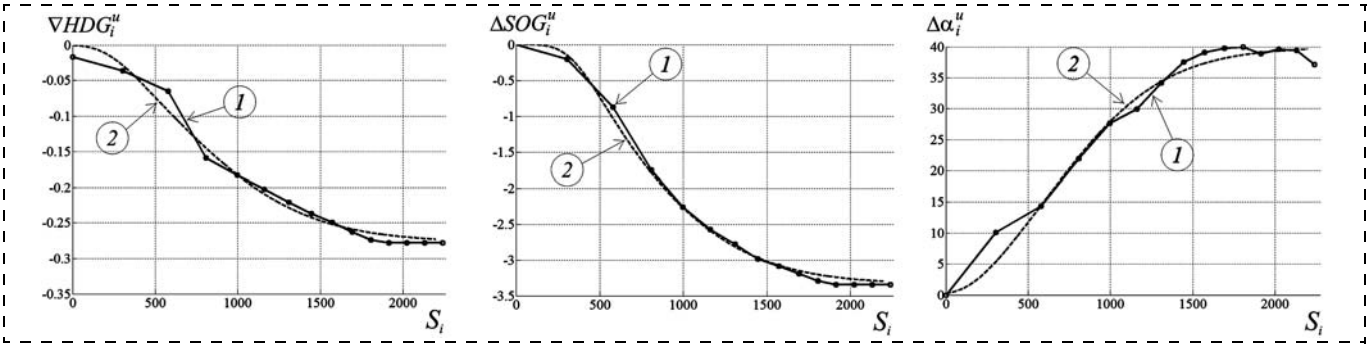


Рис. 6. Результаты моделирования по модели программного движения (1), (7):
1 — экспериментальные данные, *2* — модель

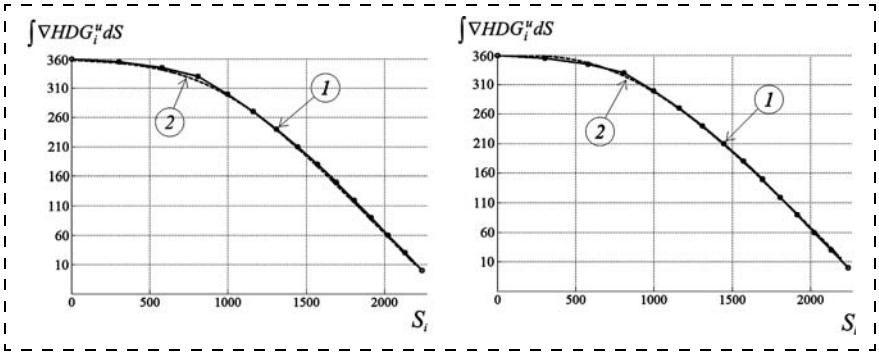


Рис. 7. Результаты моделирования различных моделей курса судна:
1 — экспериментальные данные, *2* — модель

Результаты сравнения моделей курса судна при выполнении циркуляции/поворота для различных систем уравнений (1), (2) (с постоянным коэффициентом наклона (радиуса кривизны) сигмоподобной функции) и (1), (7) (с переменным коэффициентом наклона (радиуса кривизны) сигмоподобной функции) приведены на рис. 7.

Результаты исследований показали, что предлагаемые уравнения (1), (7) точнее и полнее описывают изменения кинематических параметров программного движения судна при движении по траектории, устраняются присущие модели (1), (2) недостатки, вызванные инерционностью сигмоподобных функций вида (3), (4).

Заключение

Данный подход может войти в состав математического обеспечения современных навигационных комплексов, интеллектуальных систем, использоваться при разработке новых схем маневрирования, войти в состав лоцманских планшетов, обучающих тренажерных комплексов судоводителей. Это позволит перейти на новый качественный уровень планирования программного движения судна в стесненных, портовых водах на основе технологий ECDIS и других систем автоматического управления. Кроме того, результаты могут использоваться и для оценки проекта судоходного пути, канала, а именно для оценки возможности безопасной проводки судна по разработанному пути, каналу.

Список литературы

1. **Смоленцев С. В.** Человеческий фактор и пути обеспечения безопасности мореплавания с использованием динамических семантических сетей // Морские информационные технологии. Сб. науч. тр. / Под ред. А. Е. Сазонова. СПб.: Элмор, 2002. С. 4—8.
2. **Мироненко А. А.** Программирование траектории и режимов движения судна в стесненных водах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 3. С. 49—55.
3. **Васьков А. С., Мироненко А. А.** Перспективные технологии управления процессами судовождения // AFES 2005. The sixth international scientific forum AIMS for future of engineering science. March 23—30, 2005. Hong Kong. С. 72—73.
4. **Шерстюк В. Г.** Принципы интеллектуальной поддержки принятия решений по управлению движением судна // Вестник Херсонского национального технического университета. 2009. № 3 (36). С. 133—141.
5. **Пламмер К. Дж.** Маневрирование судов в узкостях. Л.: Судостроение, 1986. 80 с.
6. **John Frittelli.** Ship navigation in harbors: Safety issues // CRS Report for Congress. February 8. 2008. URL: http://www.policyarchive.org/handle/10207/bitstreams/ 19247.pdf
7. **Demirbilek Z., Sargent F.** Deep-Draft Coastal Navigation Entrance Channel Practice. Coastal Engineering Technical Note CETN I-63, U. S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS. 1999. URL: http://chl.erdc.usace.army.mil/library/ publications/chetn/pdf/cetn-i-63.pdf.
8. **William O. Gray, Jennifer Waters, Alan Blume, Alexander C. Landsburg.** Channel Design and Vessel Maneuverability — Next Steps. URL: http://webster-new.dmz.usna.edu/NAOE/channel/final.pdf
9. **Journee J. M. J., Pinkster J.** Introduction in ship hydromechanics. Delft University of Technology. April 2002. URL: http://www.shipmotions.nl/DUT/LectureNotes/ShipHydromechanics_Intro.pdf.
10. **Hellström Th.** Optimal Pitch, Speed and Fuel Control at Sea // Journal of Marine Science and Technology. 2004. V. 12. N 2. P. 71—77.
11. **Меньшенин О. И., Васьков А. С.** Основы построения систем автоматического управления движением судна. М.: Мортехинформреклама, 1985. 76 с.
12. **Вагущенко Л. Л.** Судовые навигационно-информационные системы. Одесса: Фенікс, 2004. 302 с.
13. **Гагарский Д. А.** Электронные картографические системы в современном судовождении. СПб.: ГМА им. Адм. Макарова С. О., 2007. 124 с.
14. **Мироненко А. А.** Динамический синтез программного движения судна // Эксплуатация морского транспорта. 2012. № 1 (67). С. 7—11.
15. **Методы** классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 3-х т. Т. 1. Анализ и статистическая динамика систем автоматического управления / Под ред. Н. Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. 748 с.

CONTENTS

Shalobaev E. V., Tolochka R.-T. About Recommendations about Terminology in the Field of Mechatronics 2

Terminology pressing questions in area mechatronics in connection with the occurrence 25 anniversary in Russia of the term "mechatronics", and also — distribution of the terms recommended by standing committee on standardization of terminology of the International organization under the theory of cars and mechanisms (PC "A" IFToMM) are considered.

Keywords: *mechatronics, micro- and nanomechatronics, terminology, the international compiler, the microsystemtechnics, triad "sensor controls-controlers-aktjuator", mechtronics system*

Kim D. P. Marginal Stability and Synthesis of Control Systems of Maximum Degree of Stability. 6

We consider marginal stability and obtain necessary conditions and a criterion for the marginal stability as well as necessary and sufficient conditions for the vanishing of the Hurwitz determinants. An algorithm for synthesizing control systems of maximum degree of stability is developed on the basis of these marginal stability conditions. Formulas for the optimal parameters of a physically realizable PID controller for third order plants are obtained.

Keywords: *marginal stability, synthesis of control systems, the criterion of marginal stability, the maximum degree of stability*

Asanov A. Z., Demyanov D. N. Analytical Synthesis of a Multilinked Regulator for Quasi-Adaptive Control System. 12

We offer a solution for the problem of analytical synthesis of a multilinked regulator of the automatic system with a reference model. We also formulated conditions, implementation of which guarantees the system's stability and realizability. The problem solution is based on use of the embedding technology.

Keywords: *multilinked dynamic object, synthesis, adaptive system, systems embedding technology, condition of realizability*

Veselov G. E., Popov A. N., Radionov I. A. Energy-Efficient Control of Asynchronous Traction Motor: Synergetics Approach. 18

In this article we explore the problem of energy-efficient control action design for the asynchronous traction drive. This system includes traction drive, wage wheels and surface of track. For forming of traction motor torque we should use the information about torque of wage wheels coupling with the surface. Because we can't measure this value, we propose to use the asymptotical observer for evaluation of coupling torque. To solve these problems we use the methods and principles of synergetics control theory.

Keywords: *synergetics approach, asynchronous traction drive, energy-efficient, torque of coupling*

Novosyolov B. V. Valuation Criteria Use of Operation Smoothness when Designing the Servo Drives. 22

The valuation criteria overview of operation smoothness of servo drives used in different technics branches is provided. The advantages and disadvantages of each drive are indicated and their fields of application are defined. The designing problems of servo drives with high operation smoothness are specified and foremost the absence of drives' synthesis method which provides the smoothness requirements equally with execution of conventional quality ratings.

Keywords: *servo drive, smoothness, valuation criteria of smoothness, drives' synthesis method*

Jamalbayov M. A. The Algorithm to Forecasting of the Gas Condensate Reservoir Development at Various Rheological Conditions 29

In work the algorithm for forecasting of the development of by compressible gas-condensate reservoir on depletion drive is offered. Thus the gas-condensate mix is represented as interphase exchanged diphase hydrocarbon system and is considered relaxable — compressibility of a layer.

Results of computer experiments are given and it is investigated features of exhaustion of a gas-condensate deposit in relaxable — compressible formation and influence of time of a relaxation of a layer to the main features of development.

Keywords: *development of a gas-condensate reservoir, gas-condensate reservoir, algorithm of forecasting of development, filtration of a gas-condensate mix, layer deformation, porosity relaxation, binary model, diphasic two-componental system, exhaustion mode*

Garashchenko F. G., Matvienko V. T. Adaptive Method Distance Detection of Chemical Component in Plants on Foundation of Gradient Approach 34

Adaptive signals approximation models in structural-parametric classes of functions are considered. Approximation is made by using an iterative procedure in the form of an ordinary differential equations system. The conducted calculable experiment confirms efficiency of propose approach.

Keywords: *adaptive algorithm, gradient method, approximation, detection*

Insarov W. V., Tikhonova S. V. Problem of Decision-Making at a Multi-Spectral Image Fusion 38

This paper focuses on one of problems that arises in process of creation of multichannel onboard systems (with two or more channels) intended for sighting of multiobjective land scenes.

The decision-making algorithm is offered that allows to define necessary conditions of fusion of images obtained by the various channels. The decision is based on use of objective criterion of an assessment of quality of these images.

Probability of the correct recognition of given object on a scene using given algorithm of recognition is offered as a criterion of image quality.

Keywords: *image fusion, multispectral image, multispectral image sensors*

Manko S. V., Pimenov D. A. Visual Probabilistic Filtering Based Association in Mobile Robotic Systems 42

The present article introduces probabilistic approach to visual data analysis facilitating real-time loop closure detection in autonomous robotic systems. The proposed technique is not limited by traditional similarity check but rather estimates relative descriptiveness of observations which is crucial for navigation in weakly structured, dynamic, self-repeating environment. Furthermore, employing the pre-learned visual vocabulary and inverted indices leverages significant calculation speed-up and makes algorithm complexity nearly independent from the number of locations in the map.

Keywords: *visual association, topological SLAM, place recognition*

Bimakov V. A., Bimakov E. V., Kasimov T. R. About of Application of Voxel Computers for the Solution Problems of Stereovision and of Navigation of Autonomous Robot. 47

Questions of application of new specialized computers, called "voxel computers" (VC), for the solution of a problem of stereovision and a problem of navigation of autonomous robot are being considered. The method, used in VC to process scenes and the images, allows to offer effective high-speed algorithms for the solution of problems of the technical vision and of the navigation of autonomous mobile robots.

Keywords: *high-speed processing of scenes and images, the stereovision, the navigation of autonomous mobile robots*

Alguliyev R. M., Orujov G. H., Sabziev E. N. Restoration of the Lost Flight Information by a Method of Neural .56

The article is devoted to some of the issues to ensure safety of flight of the aircraft. The analysis of the current state of security issues and discussed the concept of flight safety, taking into account prospective aeronautical technology with the functions of the CNS/ATM. In this concept, one of the main criteria to assess the quality of piloting the aircraft and the functioning of the subsystems is a flight information recorded in the onboard recorder. However, due to failures in the measurement of movement parameters on-board sensors and data transmission over the communication lines revealed loss of some of the information.

In this paper we propose a neural network device for recovering lost data in the flight information.

Keywords: *aircraft, flight safety, flight information, neural networks, the restoration of lost data, the concept of CNS/ATM systems, GPS*

Aleshkin V. V., Plotnikov P. K., Chelnokov Ju. N. Determination of the Configuration for the Block of Sensors in Case of Asymptotic Movement Parameters Evaluation 60

The asymptotic approach to the problem of vehicle absolute angular rate components determination using the information of three two-axial gyroscopes is presented. It is shown that by means of selection of the gyroscopes orientation in the block the set of needed identifier dynamic properties can be provided. Solution of this problem is received with some nonlinear restrictions imposed by conditions of orthogonality of sensors sensitivity axes direction cosines matrices in the block. The modeling results that confirms decrease of movement parameters estimation methodical errors are presented.

Keywords: *sensors block, information, preprocessing, the methodic errors, reduction*

Mironenko A. A. Vessel's Program Motion Model in Restricted Waters 65

Vessel's program motion in restricted waters on the basis of gradient approach is under consideration. The elements of the model, gradients of kinematic parameters as well as their functional alterations, are approximated by sigma functions. The original approach to setting of sigma functions' slop angle coefficient by exponential function is suggested. The results can be applied to modern Electronic Chart Display and Information System (ECDIS) meant for vessel's program motion planning and automatic track controlling.

Keywords: *program motion, track, sigma function, gradient*

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромынский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5397**, тел./факс: **(499) 269-5510**

Дизайнер *Т. Н. Погорелова.*
Технический редактор *Е. В. Конова.* Корректор *Т. В. Пчелкина.*

Сдано в набор 29.11.2012. Подписано в печать 15.01.2012. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН213. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Адвансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Адвансед солюшнз".
105120, г. Москва, ул. Нижняя Сыромятническая, д. 5/7, стр. 2, офис 2.