

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 5 (122)

май

2011

Редакционный совет:

КУЗНЕЦОВ Н. А.
МАКАРОВ И. М.
МАТВЕЕНКО А. М.
ПЕШЕХОНОВ В. Г.
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М.
ФЕДОРОВ И. Б.

Главный редактор:
ТЕРЯЕВ Е. Д.

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

Выпускающий редактор:
ФИЛИМОНОВ Н. Б.

Ответственный секретарь:
ПЕТРИН К. В.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСАНДРОВ В. В.
АНТОНОВ Б. И.
АРШАНСКИЙ М. М.
БОГАЧЕВ Ю. П.
БУКОВ В. Н.
ВОСТРИКОВ А. С.
ГРАДЕЦКИЙ В. Г.
ГОЛУБЯТНИКОВ И. В.
ИВЧЕНКО В. Д.
ИЛЬЯСОВ Б. Г.
КАЛЯЕВ И. А.
КОЛОСОВ О. С.
КОРОСТЕЛЕВ В. Ф.
КРАСНЕВСКИЙ Л. Г.
КУЗЬМИН Н. Н.
ЛЕБЕДЕВ Г. Н.
ЛЕОНОВ Г. А.
ЛЁВИН Б. А.
ЛОХИН В. М.
НОРЕНКОВ И. П.
ПАВЛОВСКИЙ В. Е.
ПРОХОРОВ Н. Л.
РАПОПОРТ Э. Я.
РАЧКОВ М. Ю.
РЕЗЧИКОВ А. Ф.
СЕБРЯКОВ Г. Г.
СИГОВ А. С.
СИРОТКИН О. С.
СОЙФЕР В. А.
ТИМОФЕЕВ А. В.
ФИЛАРЕТОВ В. Ф.
ФУРСОВ В. А.
ХИМЕНКО В. И.
ЮРЕВИЧ Е. И.
ЮСУПОВ Р. М.

Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.
ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.
ЧУГУНОВА А. В.

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕХАТРОНИКИ

Кориков А. М. Еще раз о мехатронике как науке 2

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Филимонов А. Б., Филимонов Н. Б. Динамическая коррекция процессов регулирования методом линейно-квадратичной оптимизации 9
Ким Д. П. Определение желаемой передаточной функции при синтезе систем управления алгебраическим методом 15

КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА И ОПТИМИЗАЦИЯ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Алиев Т. А., Аббасов А. М., Ализаде А. А., Етирмишли Г. Д., Гулуев Г. А., Пашаев Ф. Г. Интеллектуальный мониторинг аномальных сейсмических процессов на острове Песчаный Каспийского моря с использованием робастной помехотехнологии 22
Вульфин А. М., Фрид А. И. Интеллектуальная автоматизированная система поддержки принятия решений для технологического комплекса приема—сдачи нефти 29
Лебедев Г. Н., Кузнецов И. Е., Михайлов В. В., Матвеев М. Г. Оптимальное управление качеством радиометеорологических измерений 35

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Подураев Ю. В. Компьютерная свертка видеоизображений в робототехнике: поиск решений в композициях древнерусской иконографии 40
Алиев М. Т., Буканова Т. С. Метод формирования изображения в режиме реального времени 47

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Герасун В. М., Рогачёв А. Ф., Несмиянов И. А., Павловский В. Е. Синтез манипулятора для мобильного робота на гусеничном шасси 51
Головин В. Ф., Архипов М. В., Журавлев В. В. Эргатические и биотехнические системы управления в медицинской робототехнике 54

Журнал в журнале

"УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА В АВИАКОСМИЧЕСКИХ И МОРСКИХ СИСТЕМАХ"

Дорожко В. М. Идентификация снижения сопротивляемости морского судна к динамическому воздействию ветровой нагрузки 58
Севрюк А. Н. Автоматическая классификация кластеризованных измерительных аномалий на борту АНПА 64
Бегичев Ю. И., Пономаренко А. В., Котицын Л. О., Сильвестров М. М., Чернышов В. А. Концепция построения учебно-тренировочных средств для эргономического сопровождения разработки и создания эргатического информационно-управляющего комплекса многоцелевых беспилотных летательных аппаратов 71
Contents 79

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

УДК 621.865.8; 382.049.77

А. М. Кориков, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой,
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники,
korikov@asu.tusur.ru

Еще раз о мехатронике как науке*

Рассмотрены объект и предмет исследования мехатроники с учетом ее междисциплинарного характера. Анализируются отличия мехатронных систем (МС) от обычных систем, оценки коэффициента интеллектуальности МС, интеллектуальность МС "в малом" и "в большом", связь интеллектуальности МС с ее разнообразием.

Ключевые слова: мехатроника, мехатронная система, коэффициент интеллектуальности, интеллектуальность, разнообразие

Мехатроника — "наука обо всем"?

По страницам журнала "Мехатроника, автоматизация, управление" можно проследить становление и развитие мехатроники как науки в России. Уже первые публикации содержали попытки расставить все точки над "и" в вопросах терминологии по мехатронике [1–3]. К настоящему времени общепризнано представление о мехатронике как области научно-технического знания и инженерной деятельности, системно объединяющей механику, электронику и информатику в интересах новых поколений техники и технологий [4–7]. Во многих определениях в качестве четвертой составляющей мехатроники отмечается также автоматика. Это вполне естественно при решении практических проблем мехатроники. Однако при исследовании ее теоретических аспектов эта составляющая учитывается информатикой, являющейся неологизмом от слов "ИНФОРмация" и "автоМАТИКА". Терминология и области исследований мехатроники конкретизируются в многочисленной научной и учебной литературе, а также в официальных документах: паспорте ВАК по научной специальности "Роботы, мехатроника и робототехнические системы" [8] и ФГОС ВПО РФ по направлению подготовки "Мехатроника и робототехника" [9, 10]. Это подтверждает тезис о том, что начальный период развития (допарадигмальная фаза) мехатроники как науки завершился, и мехатроника в настоящее время находится в нормальном

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 09-07-999029-р_офи).

периоде (парадигмальной фазе) своего развития, т. е. существует признанная научным сообществом доминирующая парадигма [4–11].

Тем не менее в сети Интернет и научных журналах встречаются весьма неопределенные и нестрогие толкования понятия "мехатроника". В сети Интернет найдем следующее: "...мехатроника становится "наукой обо всем" [12].

Автор цитируемой заметки из Википедии не претендует на научность своей публикации. К своему выводу он пришел после чтения статей по мехатронике. Например, в [13, с. 193] можно найти следующее развитие понятия "мехатроника": "термин "мехатроника" все чаще применяется как название машин различной физической природы с компьютерным управлением движением, отличающихся специальными разнородными техническими связями" (курсив наш). После просмотра цитируемой статьи [13] можно сделать тот же вывод, что и автор заметки [12].

К концу XX века кибернетика также становилась "наукой обо всем", что повлекло за собой ее трансформацию [4]. Еще в 1970 г. в перечне научных специальностей ВАК были специальности "техническая кибернетика" и "теоретическая кибернетика". Вскоре последняя была переименована в "математическую кибернетику". К настоящему времени специальность "техническая кибернетика" из номенклатуры научных специальностей ВАК исчезла, а "математическая кибернетика" объединена с "дискретной математикой" в одну научную специальность [14]. Эту ситуацию можно комментировать по-разному, тем не менее номенклатура научных специальностей ВАК является официальной констатацией состояния науки в стране. Эта констатация не означает исчезновение кибернетики как науки: исследования в области кибернетики продолжаются и в настоящее время, научные учреждения кибернетического профиля продолжают работать и наблюдается возрождение кибернетики в новом статусе [15].

Поддерживая тезис о том, что мехатроника представляет собой компьютерную парадигму развития технической кибернетики [4], попытаемся определить причины отмеченной тенденции отражения в Интернет-ресурсах и литературе современного состояния и развития мехатроники как науки. Для определения причин необходимо напомнить известные результаты, ставшие уже общим местом во многих изданиях.

Об определении понятия "мехатроника"

В любой науке выделяют объект и предмет исследования. Объект исследования — это то, на что направлен процесс познания, а предмет исследования — это наиболее значимые свойства, аспекты (стороны), особенности объекта, подлежащие изучению. Объект и предмет исследования логически следуют из определения науки.

Процитируем два определения мехатроники из официальных документов. В формуле ВАК по научной специальности 05.02.05 "Роботы, мехатроника и робототехнические системы" [8] дается следующее определение: *"Мехатроника" как отдельная область науки и техники основана на синергетическом объединении узлов точной механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами, обеспечивающими проектирование и производство качественно новых модулей, систем и машин с интеллектуальным управлением их функциональными движениями*".

ФГОС ВПО РФ по направлению 221000 "Мехатроника и робототехника" [9, 10] содержит следующее определение: *"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"*.

В ФГОС ВПО РФ дается также определение *мехатронной системы как "единого комплекса электро-механических, электрогидравлических, электронных элементов и средств вычислительной техники, между которыми осуществляется постоянный динамически меняющийся обмен энергией и информацией, объединенного общей системой автоматического управления, обладающей элементами искусственного интеллекта"*.

В статье [4] приведена подборка определений понятия "мехатроника" из отечественной и зарубежной литературы, анализ которых позволил авторам [4] сделать следующий вывод: в отечественной литературе наиболее удачной является трактовка мехатроники как "науки о механических, энергетических и информационных процессах и их функциональном взаимодействии в машинах с микропроцессорным управлением", а в зарубежной литературе — как "объединение механических и электронных компонентов, скоординированных архитектурой управления" [4, с. 5].

Из приведенных определений следует, что **объектом исследования** мехатроники как науки являются мехатронные системы и технологии во всем их многообразии. **Предметом исследования** мехатроники как науки являются наиболее значимые свойства, аспекты (стороны), особенности функционирования мехатронных систем (МС), законы и закономерности МС и мехатронных технологий (МТ) применительно ко всем разновидностям МС и МТ. Из этого определения

следует, что предметом исследования мехатроники является, в частности, и "компьютерное управление механическим движением" [4], и другие особенности МС и МТ, обеспечивающие "проектирование и производство **качественно новых** модулей, систем и машин с интеллектуальным управлением их функциональными движениями" [8] (курсив наш). Создаваемые и исследуемые МС отличаются от обычных систем, которые также могут состоять из механических, электронных и компьютерных компонентов, **новым качеством**. Возникает ряд вопросов по обеспечению нового качества МС. Вопросы "что? (элементы, компоненты) и как? (действия, процессы, технологии) системно объединяется в единый комплекс МС" также являются предметом исследования мехатроники.

Таким образом, понятия "мехатронная система" и "мехатронная технология" являются базовыми категориями мехатроники как науки. Иными словами, первое понятие отражает структурный базис мехатроники, а второе — технологический базис мехатроники [6]. Здесь уместно заметить, что любую науку можно трактовать в терминах теории систем, а само понятие "система" имеет двойственную природу: с одной стороны, понятие системы используется для обозначения некоторого реально существующего явления (в нашем случае технического (мехатронного) устройства), а с другой стороны, трактуется как комплекс подходов, принципов и методов исследования и представления этого явления. То есть во втором случае понятие "система" используется для обозначения некоторого процесса. Двойственная природа понятия системы иногда является причиной разногласий в научной среде, но в мехатронике как науке отмеченная двойственность не возникла и наблюдается однозначное толкование понятия "мехатронная система" как явления (технического устройства), а понятие "мехатронная технология" трактуется как процесс.

При дефиниции понятия МС можно использовать различные определения, в том числе приведенные выше определения из паспорта ВАК и ФГОС ВПО РФ и аналогичные определения из известной литературы, например, МС — "целесообразное сочетание *механических устройств* и электронно-вычислительных средств контроля и управления, образующих определенную информационно-управляемую целостность" [4] или МС — "*синергетическое объединение электроники, точной механики и компьютерного упрощения с элементами искусственного интеллекта*" [7].

Понятие "мехатронная технология" как технологический базис мехатроники достаточно точно определены в [6].

Каждая область применения МС вносит свою специфику в ее определение. В любой МС укруп-

ненно можно выделить три основные части: механическую (физическую), электронную и компьютерную (информационную). Синергетическое объединение этих частей образует систему в целом. В основе построения МС заложен принцип глубокой взаимосвязи механических, электронных и компьютерных частей (элементов), объединенных энергетическими и информационными потоками. Этот принцип необходимо поддерживать путем выбора мехатронных элементов на этапах моделирования и проектирования МС и технологически поддерживать на следующих этапах создания, производства и эксплуатации МС. Только тогда возможно появление нового качества МС и принципиального отличия МС от обычных систем, в которых тоже могут объединяться разнородные механические, электронные и компьютерные (информационно-управляющие) устройства от различных производителей.

Мы живем в мире систем, среди которых имеется великое разнообразие технических систем. В наше время многие технические системы (в перспективе их число возрастет многократно) могут быть отнесены к классу "...машин различной физической природы с компьютерным управлением движением, отличающихся специальными разнородными техническими связями" [13, с. 193]. Означает ли это, что все машины, удовлетворяющие данному определению, являются МС? Ответ следует положительный, если эти машины обладают новым качеством, порождаемым синергией механических, электронных и компьютерных частей (элементов) МС и элементами искусственного интеллекта (ИИ). Возникают вопросы об оценке нового качества и о показателях качества МС. Возникает также вопрос о сути принципиального отличия МС от обычных систем. Искомая суть может быть в том, что синергия порождает в МС новое качество, свойственное системам ИИ, т. е. МС становится в какой-то мере системой ИИ. Можно ли определить эту меру? Как отвечает на данный вопрос теория систем ИИ?

Интеллектуальное управление МС

Известно, что термин "ИИ" (Artificial Intelligence) был предложен в 1956 г. на семинаре с таким же названием в Дартсмудском колледже (США). В переводе с английского термин "Intelligence" означает "умение рассуждать разумно", а не "интеллект" (Intellect), как это иногда толкуется. За 50 лет в области ИИ сложилось более десятка направлений научных исследований. В настоящее время ИИ — это направление науки и техники, ориентированное на создание программно-аппаратных средств решения интеллектуальных задач. МС решает одну из таких задач: интеллектуальное управление механическим движением.

Длительное время под понятием система ИИ (СИИ) понималась в основном система, реализующая "антропоморфные функции", т. е. функции "естественного" интеллекта (ЕИ) человека. Еще в начале XX века была предложена и методически развита идея количественной оценки уровня ЕИ человека с помощью системы тестов и определяемого на их основе коэффициента интеллектуальности IQ. С тех пор IQ успешно используется во многих странах мира для самых разнообразных целей. Известны попытки использования аналогов коэффициента интеллектуальности IQ (AIQ) для оценки уровня интеллектуальности СИИ [16, 17]. В частности, в [17] рассматриваются оценки интеллектуальности СИИ, основанные на:

- сравнении характеристик рассматриваемой системы с общим набором базовых показателей некоторой идеализированной СИИ, по своим характеристикам соответствующей современным представлениям о такой желаемой СИИ. Результатом сравнения является значение абсолютного коэффициента интеллектуальности AAIQ, определяющего близость рассматриваемой системы к идеализированной (желаемой) СИИ;
- определении степени соответствия значений выбранных проблемно-ориентированных показателей интеллектуальности, характеризующих систему заданного класса, заданным (желаемым) значениям. В результате такого сравнения оценивается относительный коэффициент интеллектуальности RAIQ, который определяет степень соответствия рассматриваемой системы конкретным проблемно-ориентированным требованиям, предъявляемым к ее интеллектуальным возможностям;
- гипотезе о том, что основным назначением элементов ИИ, вводимых в прикладную компьютерную систему, является снижение интеллектуальной нагрузки на пользователя системы (а для МС — и физической нагрузки). Поэтому степень снижения интеллектуальной нагрузки может быть использована в качестве критерия кажущейся интеллектуальности СИИ (CAIQ). Таким образом, значение CAIQ определяет, в какой мере рассматриваемая СИИ снижает интеллектуальную нагрузку на пользователя по сравнению с аналогичными системами такого же функционального назначения.

Изложенные и многие другие близкие к ним подходы имеют общий недостаток, состоящий в том, что они базируются на экспертных оценках интеллектуальности СИИ и, следовательно, вносят субъективность в результат оценивания AIQ. В связи с этим представляют интерес попытки объективной оценки AIQ. В [18] вводятся понятия "уровень" и "степень" интеллектуальности СИИ. Система имеет

слои обработки неопределенной информации: интерактивный человеко-машинный диалог; прогноз событий; самообучение и адаптация; работа с базами событий, знаний и формирование решений; исполнительный. Понятие "степень интеллектуальности" вводится в [18] по аналогии с понятием "устойчивость" систем автоматического управления (САУ): степень интеллектуальности определяется "в малом", "в большом" и "в целом". В первом случае функционирование ограничено двумя нижними, во втором — тремя, а в третьем — всеми пятью слоями интеллектуальности. В [19] данная аналогия модернизирована, но суть ее сохранилась. Отметим, что обсуждаемая аналогия, как и всякая другая, имеет "плюсы" и "минусы". "Плюсы" этой аналогии очевидны, а "минус" состоит в том, что для нелинейных САУ устойчивость режима работы (состояния равновесия) "в большом" не означает, что она будет обладать и свойством устойчивости "в малом". Например, если поведение системы описывается уравнением Ван-дер-Поля [20], то она будет неустойчива "в малом" относительно положения равновесия, но устойчива при значительных отклонениях, т. е. "в большом". Следовательно, в обсуждаемую аналогию необходимо внести некоторую коррекцию, смысл которой станет очевидным после рассмотрения понятий "интеллектуальность в малом" и "интеллектуальность в большом", впервые предложенных в [21].

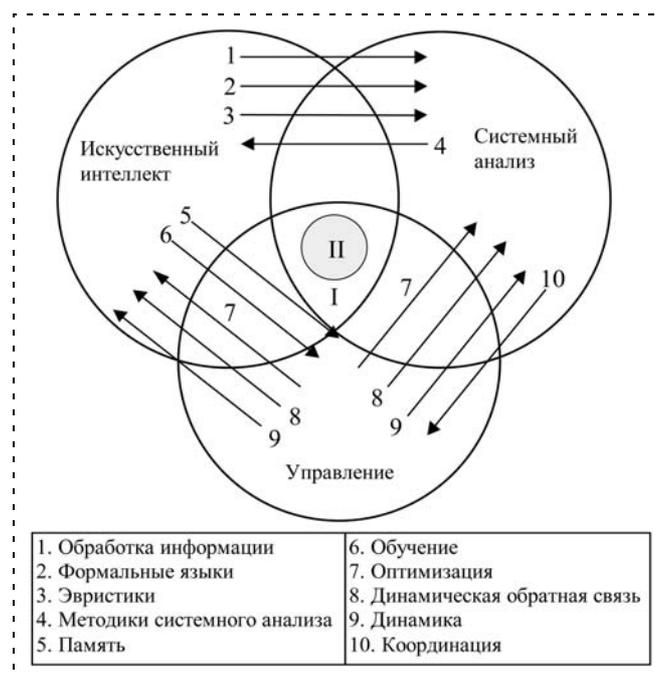
Проблемы интеллектуального управления МС являются междисциплинарными и находятся на пересечении теории управления и ИИ. Теоретически они в значительной степени идентичны проблемам создания интеллектуальных автоматизированных систем обработки информации и управления (АСОИУ), возникающим на стыке электроники и информатики как аппаратно-программное объединение электронных и компьютерных устройств. Эту аналогию можно использовать при исследовании задач интеллектуального управления МС.

В научно-технической литературе [21—25] предлагается понятийный аппарат, концепции создания и конкретные реализации интеллектуальных АСОИУ. Становление и развитие теории и практики интеллектуальных АСОИУ в значительной степени стимулируется теорией систем и системным анализом. Пересечение теории управления, искусственного интеллекта и системного анализа (область I на рисунке) образует область, которую принято именовать интеллектуальным управлением [22] или управлением, обладающим свойством "интеллектуальности в малом" [21].

Управление, обладающее свойством "интеллектуальности в большом", является подобластью II области I (см. рисунок) и вполне согласуется с понятием "интеллектуального управления" [15, 18—25].

Стрелками на этом рисунке обозначено взаимное влияние трех базовых научных теорий, т. е. это концепции и методы, переносимые из одной теории в другую и формирующие комплексную методику решения неформализованных задач (НФ-задач) управления сложными динамическими системами (в нашем случае МС). Введение с помощью рисунка понятия "интеллектуальности в малом" и "интеллектуальности в большом" разъясняется далее в определениях 1 и 2.

Используемые в мехатронике понятия адаптации, интеллектуальности и интеллектуальности прошли апробацию в теории управления. По этому вопросу неоспорим и общепризнан вклад Я. З. Цыпкина [26], который считал, что в теории управления следует выделить три периода: детерминизма, стохастичности и адаптивности. В настоящее время мы являемся свидетелями становления и развития нового, четвертого периода теории управления: периода интеллектуальности. Особенности названных периодов развития теории управления изложены в научной и учебной литературе (см., например, [20]). В периоды детерминизма, стохастичности и адаптивности ставились и решались формализованные задачи. Период интеллектуальности принципиально отличается от перечисленных трех периодов постановкой и решением средствами вычислительной техники НФ-задач (в ранних работах по ИИ использовался термин "слабоструктурированные задачи") [20, 25]. Вместе с Я. З. Цыпкиным [20, 26] подчеркнем, что периоды детерминизма, стохастичности, адаптивности и интеллектуальности не сменяют друг друга подобно кадрам в кино. Каждый из них зарождается в недрах предшествующих периодов, и их проблематика существует в настоящее время.



Упомянутое выше определение из ФГОС ВПО РФ [9, 10] представляет МС как единый комплекс мехатронных элементов, объединенный общей САУ, обладающей элементами ИИ. В теории управления такие САУ принято называть интеллектуальными системами управления (ИСУ). Для ИСУ справедливы следующие пять принципов [18, 21]:

- информационное взаимодействие ИСУ с реальным внешним миром с использованием специально организованных информационных каналов связи;
- принципиальная открытость системы для повышения интеллектуальности и совершенствования собственного поведения;
- наличие механизмов прогноза изменений внешнего мира и собственного поведения системы в динамически меняющемся внешнем мире;
- многоуровневая иерархическая структура, построенная в соответствии с правилом: повышение интеллектуальности и снижение требований к точности по мере повышения ранга иерархии в системе (и наоборот);
- сохраняемость функционирования (возможно с некоторой потерей качества или эффективности, т. е. с некоторой деградацией) при разрыве связей или потере управляющих воздействий от высших уровней иерархии.

Следуя работам [18, 21], поясним кратко суть перечисленных принципов.

Первый принцип подчеркивает непосредственную связь ИСУ с внешним миром. Находясь в непрерывном взаимодействии с внешним миром, ИСУ получает из него всю необходимую информацию для принятия решений и пополнения знаний. ИСУ, в свою очередь, может оказывать на внешний мир непосредственное активное воздействие в результате реализации собственного поведения.

Принципиальная открытость систем в соответствии со вторым принципом обеспечивается наличием таких уровней высшего ранга в иерархической структуре ИСУ, как самонастройка, самоорганизация и самообучение.

В соответствии с третьим принципом ИСУ нельзя считать в достаточной мере интеллектуальной, если она не обладает возможностью прогноза изменений самого внешнего мира и собственного в нем поведения (в динамически изменяющемся внешнем мире). Система без прогноза (функционирующая именно в динамически меняющемся внешнем мире) может оказаться в критической ситуации, из которой не сможет найти выход из-за временных ограничений на работу механизмов формирования управляющих воздействий, определяющих ее поведение, адекватное этой ситуации. Примером является автономно функционирующая МС в экстремальной ситуации.

Четвертый принцип позволяет наметить пути построения моделей ИСУ в тех случаях, когда неточность знаний о модели САУ или ее поведении можно скомпенсировать за счет увеличения числа уровней интеллектуальности, а также за счет использования совершенных механизмов принятия решений в условиях неопределенности в алгоритмах управления ИСУ.

Пятый принцип устанавливает лишь частичную потерю интеллектуальности, но не прекращение функционирования МС при отказах в работе высших уровней иерархии ИСУ. Сохранение автономного функционирования в рамках более простого поведения системы, характерного для нижних уровней структуры управления, также чрезвычайно важно для автономно функционирующих систем в реальном внешнем мире. Примером могут служить интеллектуальные роботы. Перечисленные пять принципов построения ИСУ позволяют ввести понятия "интеллектуальность в малом" и "интеллектуальность в большом" [21]:

Определение 1. ИСУ, организованные и функционирующие в соответствии с пятью принципами (в полном их объеме), называются ИСУ, обладающими свойством "интеллектуальности в большом".

Определение 2. ИСУ, структурно не организованные в соответствии с приведенными выше пятью принципами, но использующие при функционировании знания (например, в виде правил) как средство преодоления неопределенности входной информации, модели САУ или ее поведения, называются ИСУ, обладающими свойством "интеллектуальности в малом".

Из определения 1 следует, что системы, обладающие свойством "интеллектуальности в большом", должны иметь многоуровневую иерархическую структуру со следующими уровнями: самоорганизации; обучения; прогноза событий; адаптации; формирования решений; работы с базами событий и знаний; планирования операции по реализации сформированного решения; исполнительный. Каждый из перечисленных уровней имеет свою специфику и может состоять из нескольких подуровней. На самом нижнем исполнительном уровне обычно используются традиционные САУ. Уровни более высокого ранга рассматриваются как надстройка над ними.

Определение 2 соответствует общепринятому определению интеллектуальной системы, ориентированной на обработку знаний в целях решения задачи. Если решаются задачи управления, то такие системы именуют также системами интеллектуального управления [22].

Примеры ИСУ, обладающих свойствами "интеллектуальности в малом" и "интеллектуальности в большом", имеются в [18–21]. Например, ИСУ на базе экспертной системы, снабженная механиз-

мами обучения и прогноза развития текущих ситуаций, удовлетворяет пяти принципам построения ИСУ и, следовательно, относится к системам управления, обладающим свойством "интеллектуальности в большом". Примером ИСУ, обладающей свойством "интеллектуальности в малом", являются ИСУ на основе экспертных регуляторов, использующих технологию инженерии знаний и рассуждений на знаниях. В структуре таких ИСУ, так же, как и в структуре адаптивных САУ, кроме основного контура управления (управляющее устройство — объект управления (УУ—ОУ)) имеется интеллектуальная обратная связь с включенной в нее упрощенной экспертной системой. Специфика МС состоит в том, что в основном контуре управления ОУ может быть механическим устройством, в частности, ОУ может быть роботом-манипулятором.

Итак, из приведенных выше рисунка и определений 1, 2 следует, что *ИСУ (СИИ), интеллектуальная "в большом", обладает также свойством "интеллектуальности в малом"*. Введенные в [21] термины "интеллектуальность в малом" и "интеллектуальность в большом" вполне согласуются с понятиями "слабого и сильного ИИ" [27]. В свете изложенного вопрос об "интеллектуальности в целом" пока предлагаем оставить открытым, учитывая, что среди исследователей ИИ до сих пор не существует доминирующей точки зрения на критерии интеллектуальности.

Один из основателей теории систем У. Р. Эшби сформулировал закон "*необходимого разнообразия*", учитывающий предельную осуществимость системы при ее создании [28]. Приведем два важных следствия из этого закона:

- система, способная справиться с решением проблемы, обладающей определенным *разнообразием* (сложностью), должна иметь *разнообразие* управляющей подсистемы (разнообразие методов, алгоритмов и средств решения проблемы (управления объектом)), превышающее *разнообразие* управляемой подсистемы (сложность объекта);
- рост *разнообразия* на верхнем уровне организации сложной системы обеспечивается ограничением *разнообразия* на предыдущих уровнях, и наоборот, рост *разнообразия* на нижнем уровне разрушает верхние уровни (закон иерархических компенсаций (закон Седова)).

Известно, что коэффициент интеллектуальности IQ (AIQ для ИСУ) пропорционален разнообразию (сложности) решаемых задач (тестов, проблем). Используя это утверждение и приведенные выше следствия из закона "необходимого разнообразия", получим следующие выводы:

- ИСУ, обладающая большим разнообразием методов, алгоритмов и средств решения проблемы (управления объектом), имеет большую степень интеллектуальности (большой AIQ). Следова-

тельно, структура такой ИСУ является сложной, многоуровневой и многоконтурной, что вполне соответствует выводам работ [18, 19];

- ИСУ, обладающая большим разнообразием на верхних уровнях и, соответственно, имеющая большую степень интеллектуальности на этих уровнях, должна иметь ограниченное разнообразие на нижних уровнях (ограничение по степени интеллектуальности), что обеспечивает автоматизм исполнения, высокую точность и быстродействие. Следовательно, *рост "интеллектуальности в большом" ограничивает "интеллектуальность в малом"*.

В заключение отметим, что объект и предмет исследования мехатроники как науки имеют чрезвычайно большое разнообразие в силу ее междисциплинарного характера как области научно-технического знания и инженерной деятельности. В этой области ведут исследования ученые и специалисты, имеющие разные научные специальности, различное базовое образование и свои собственные традиции проведения исследований. Это обогащает мехатронику как науку, но и порождает необходимость анализа возникающих при этом проблемных вопросов. В данной статье изложен анализ некоторых из подобных вопросов.

Список литературы

1. Подураев Ю. В., Кулешов В. С. Принципы построения и современные тенденции развития мехатронных систем // Мехатроника. 2000. № 1. С. 5—10.
2. Антонов Б. И., Филимонов Н. Б. Не "обо всем", а о мехатронике (о границах проблематики журнала) // Мехатроника. 2000. № 6. С. 43—47.
3. Аршанский М. М., Шалобаев Е. В. Мехатроника: основы глоссария // Мехатроника. 2001. № 4. С. 47—48.
4. Теряев Е. Д., Филимонов Н. Б., Петрин К. В. Мехатроника как компьютерная парадигма развития технической кибернетики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 6. С. 2—10.
5. Теряев Е. Д., Филимонов Н. Б. Наномехатроника: состояние, проблемы, перспективы // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 1. С. 2—14.
6. Подураев Ю. В. Актуальные проблемы мехатроники // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 4. С. 50—54.
7. Ющенко А. С. Эргатические мехатронные системы // Мехатроника, автоматизация, управление. 2006. № 3. С. 12—24.
8. Паспорта специальностей научных работников [Электронный ресурс]: Высшая аттестационная комиссия (ВАК): Справочные материалы. 2010. Режим доступа: http://vak.ed.gov.ru/ru/help_desky, свободный.
9. Приказ Минобрнауки РФ 09.11.2009 г. № 545 "Об утверждении и введении в действие ФГОС ВПО по направлению 221000 "Мехатроника и робототехника" (бакалавр)" [Электронный ресурс]: Минобрнауки РФ: Федеральные государственные образовательные стандарты. 2010. Режим доступа: http://www.edu.ru/db-mon/mo/Data/d_09/m545.html, свободный.
10. Приказ Минобрнауки РФ 08.12.2009 г. № 702 "Об утверждении и введении в действие ФГОС ВПО по направлению 221000 "Мехатроника и робототехника" (магистр)" [Электронный ресурс]: Минобрнауки РФ: Федеральные государственные образовательные стандарты. 2010. Режим доступа: http://www.edu.ru/db-mon/mo/Data/d_09/m702.html, свободный.
11. Кориков А. М. О развитии понятия "мехатроника" // Доклады ТУСУР. 2010. № 1. С. 199—202.

12. **Мехатроника** сегодня [Электронный ресурс]: Wikipedia. 2010. Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/>, свободный. Загл. с экрана. Текст на экране рус.
13. **Осипов Ю. М.** К вопросу о развитии понятия "мехатроника" // Доклады ТУСУР. 2010. № 1. С. 193—198.
14. **Номенклатура** специальностей научных работников [Электронный ресурс]: Высшая аттестационная комиссия (ВАК): Справочные материалы. 2010. Режим доступа: http://vak.ed.gov.ru/ru/help_desk/, свободный.
15. **Соколов Б. В., Юсупов Р. М.** Роль и место некибернетики в современной структуре системных знаний // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 6. С. 11—21.
16. **Толковый словарь** по искусственному интеллекту / Сост. А. Н. Аверкин, М. Г. Газе-Рапопорт, Д. А. Пospelов. М.: Радио и связь, 1999.
17. **Литвинов В. А., Оксанич И. Н.** Оценка уровня виртуальной интеллектуальности прикладной программно-технической системы на основе анализа эргономической модели // Математичні машини і системи. 2008. № 2. С. 100—105.
18. **Лохин В. М., Захаров В. Н.** Интеллектуальные системы управления: понятия, определения, принципы построения // Мехатроника. 2001. №2. С. 27—35.
19. **Шалобаев Е. В.** Теоретические и практические проблемы развития мехатроники // Современные технологии / Под ред. проф. С. А. Козлова. СПб: Спб ГИТМО (ТУ), 2001. С. 46—67.
20. **Кориков А. М.** Основы теории управления. Томск: Изд-во НТЛ, 2002.
21. **Захаров В. Н.** Интеллектуальные системы управления: основные понятия и определения // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1997. № 3. С. 138—145.
22. **Васильев С. Н., Жарков А. К., Федосов Е. А., Федун Б. Е.** Интеллектуальное управление динамическими системами. М.: Физматлит, 2000.
23. **Захаров В. Н.** Современная информационная технология в системах управления // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2000. № 1. С. 70—78.
24. **Юсупов Р. М.** К 90-летию академика Е. П. Попова // Информационно-управляющие системы. 2005. № 1. С. 51—57.
25. **Кориков А. М., Калайда В. Т.** Интеллектуальные автоматизированные системы обработки информации и управления: проблемы разработки и исследования // Доклады ТУСУР. 2005. № 3. С. 35—40.
26. **Цыпкин Я. З.** Адаптация и обучение в автоматических системах. М.: Наука, 1968.
27. **Искусственный интеллект** [Электронный ресурс]: Психологос. 2011. Режим доступа: http://www.psychologos.ru/index.php?title=Искусственный_интеллект_&printable=yes
28. **Эшби У. Р.** Введение в кибернетику. М.: ИЛ, 1959.

🌸 Поздравляем Юбилера! 🌸



*Главному научному сотруднику ИПУ им. В. А. Трапезникова РАН,
ведущему научному сотруднику ИМАШ им. А. А. Благонравова РАН,
профессору МГУ им. М. В. Ломоносова, МГУПИ и МИРЭА(ТУ),
выпускающему редактору журнала "Мехатроника, автоматизация, управление",
доктору технических наук, профессору*

Николаю Борисовичу ФИЛИМОНОВУ *исполнилось 60 лет*

Н. Б. Филимонов — талантливый ученый и преподаватель, видный специалист в области автоматизации процессов управления, один из ярких представителей отечественной научной школы по технической кибернетике В. В. Солодовникова. К числу его основных научных достижений следует отнести формирование нового перспективного научного направления — теории полиэдральной оптимизации дискретных динамических процессов управления и наблюдения. Он внес заметный вклад в развитие ряда ключевых направлений современной теории автоматического управления: проблемы динамического качества процессов управления, принципа динамической развязки многоконтурных систем регулирования, концепции многорежимного управления сложными динамическими объектами, методов анализа и синтеза систем терминального управления. В последние годы научные интересы Н. Б. Филимонов связаны с актуальными вопросами автоматизации эргатических систем управления подвижными объектами и интеллектуализации мехатронных информационно-управляющих систем.

Высокий профессионализм, широкая эрудиция, большая трудоспособность, чуткость и отзывчивость снискали ему большое уважение учеников и коллег.

*Уважаемый Николай Борисович!
Редакционный совет и редакционная коллегия журнала поздравляют Вас
и желают Вам крепкого здоровья, большого счастья, новых творческих успехов
в Вашей многогранной деятельности!*

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 62-50; 517.977.5; 681.5.01

А. Б. Филимонов¹,

д-р техн. наук, проф., гл. научн. сотр.,

Н. Б. Филимонов²,

д-р техн. наук, проф., гл. научн. сотр.

¹ Институт машиноведения

им. А. А. Благодирова РАН

² Институт проблем управления

им. В. А. Трапезникова РАН,

nbfilimonov@mail.ru

Динамическая коррекция процессов регулирования методом линейно-квадратичной оптимизации

Предлагается новый метод регулирования, основанный на предварительной коррекции динамики объекта регулирования в соответствии с заданной эталонной моделью. Задача коррекции решается методом линейно-квадратичной оптимизации, в котором оптимизируемые интегральные квадратичные критерии служат мерой отклонения переходных характеристик скорректированного объекта от их эталонных значений.

Ключевые слова: задача синтеза системы регулирования, динамическое качество процессов регулирования, эталонная модель динамики объекта, коррекция динамики объекта, формализм линейно-квадратичной оптимизации

"...современная теория управления приводит к результатам, которые согласуются с выводами классической теории управления, но при этом они проще получаются и легче интерпретируются... дальнейшие достижения в теории оптимального управления зависят от формулирования уже известных результатов в наиболее ясной форме"

Рудольф Е. Калман (R. E. Kalman)

"Линейно-квадратичный тренд" современной автоматики

Проблема качества процессов управления, несмотря на давнюю историю развития, до сих пор остается важнейшей и слабо развивающейся в теории и практике автоматических систем. Более того, приходится констатировать, что в исследованиях данной проблемы последних десятилетий в известной мере утрачена преемственность с интуитивно ясными и технически содержательными классиче-

скими представлениями о качестве процессов управления, выработанными отечественной школой автоматике [1].

В современной автоматике при синтезе автоматических систем все большую популярность находят требования не желаемого или допустимого, а оптимального качества процесса управления синтезируемой системы [2]. При этом безраздельное господство получили квадратичные критерии оптимальности, породившие класс линейно-квадратичных (ЛК) задач управления и являющиеся исходными в ставшем уже классическим методе аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР) Калмана—Летова. Здесь критерий качества задается в виде интегральной квадратичной формы от тех или иных показателей фактического переходного процесса либо от невязки (рассогласования) фактического и желаемого (эталонного) переходных процессов системы и требуется обеспечить максимальную их близость (см., например, [2, с. 379—382; 3, с. 483—484; 4, с. 240—242; 5, с. 704—705]).

Следует отметить, что возникновению и развитию квадратичных критериев качества во многом способствовали не столько потребности автоматике, сколько попытки разработать единую теорию синтеза автоматических систем на основе достижений математической теории оптимизации. Данные попытки основаны на очевидных достоинствах методологии квадратичной оптимизации процессов управления: внешней простоте, законченности, аналитичности и вычислительной эффективности решения. Однако, несмотря на чрезвычайную популярность и видимые достоинства, методология квадратичной оптимизации процессов управления неоднократно подвергалась резкой критике со стороны ведущих отечественных и зарубежных ученых [6]. Так, еще Беллман (R. E. Bellman) достаточно аргументированно утверждал, что "для многих задач вопросы оптимальности совсем не существенны. Это просто математический инструмент, который помогает нам формализовать слово "можно". При этом он отмечал, что введение интегрального квадратичного критерия — "вопрос математического удобства и часто диктуется желанием применить для решения задачи аналитические методы и получить решение в явном виде", а касаясь задачи АКОР, особо подчеркивал, что данной "менее важной задачей" часто заменяют исходную, "более реалистичную задачу" оптимизации.

Действительно, в рамках известных постановок задач ЛК-оптимального регулирования, в сущности, выхолащивается собственно проблема динамического качества процессов регулирования. В данной статье предлагается новый метод синтеза систем автоматического регулирования (САР), показывающий возможность конвергенции классической концепции прямых показателей качества процессов регулирования и методологии АКОР. Метод основан на динамической коррекции объекта управления, которая осуществляется посредством применения формализма ЛК-задач оптимизации. В основе решаемой задачи коррекции лежит идея постулирования желаемых динамических свойств синтезируемой системы в виде заданной эталонной модели скорректированного объекта. Алгоритмизация задач коррекции базируется на формализме ЛК-задач управления, причем оптимизируемые интегральные квадратичные функционалы служат мерой отклонения формируемых переходных характеристик каналов регулирования от эталонных значений.

Классическая ЛК-задача управления

Пусть объект управления является линейной стационарной динамической системой, описываемой в переменных состояния уравнениями вида

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_0 \mathbf{x} + \mathbf{B}_0 \mathbf{u}; \quad (1)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}_0 \mathbf{x}, \quad (2)$$

где $t \in [0, \infty)$, $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^r$ — управляющий вход, $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ — состояние, $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^m$ — управляемый выход объекта; $\mathbf{A}_0 \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\mathbf{B}_0 \in \mathbb{R}^{n \times r}$, $\mathbf{C}_0 \in \mathbb{R}^{m \times n}$ — числовые матрицы, причем $m \leq n$.

Рассмотрим классическую стационарную ЛК-задачу оптимальной стабилизации Калмана—Летова с интегральным квадратичным критерием оптимальности процесса управления

$$\mathcal{F} = \int_0^{\infty} [\mathbf{y}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{y}(t) + \mathbf{u}^T(t) \mathbf{R} \mathbf{u}(t)] dt \rightarrow \min, \quad (3)$$

где "т" — символ транспонирования, а $\mathbf{Q} \in \mathbb{R}^{m \times m}$ и $\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{r \times r}$ — симметрические положительно определенные матрицы.

Как известно [2—5], решением ЛК-задачи стабилизации (1)—(3) является закон регулирования

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K} \mathbf{x}, \quad (4)$$

где

$$\mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}_0^T \mathbf{P}, \quad (5)$$

а $\mathbf{P} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ — симметрическая матрица, являющаяся решением алгебраического матричного уравнения Риккати

$$\mathbf{P} \mathbf{B}_0 \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}_0^T \mathbf{P} - \mathbf{P} \mathbf{A}_0 - \mathbf{A}_0^T \mathbf{P} - \mathbf{C}_0^T \mathbf{Q} \mathbf{C}_0 = 0. \quad (6)$$

Проблемные аспекты рассматриваемой ЛК-задачи стабилизации для теории и практики синтеза САР обусловлены принципиальной *несводимостью* комплекса важных для инженерных приложений требований к качеству процессов регулирования к единому скалярному критерию вида (3). Действительно, данные критерии *не имеют непосредственного физического смысла*, а реальная подоплека их широкого использования заключается лишь в возможности получения решения в аналитической форме (4)—(6). Кроме того, критерии данного вида *не информативны*, поскольку их значение определяется не только весовыми матрицами \mathbf{Q} и \mathbf{R} , но также и собственной динамикой самого объекта, т. е. тройкой матриц \mathbf{A}_0 , \mathbf{B}_0 , \mathbf{C}_0 . Данные негативные обстоятельства породили давнюю дискуссионную проблему выбора весовых коэффициентов применяемых интегральных квадратичных критериев [6].

Задача динамической коррекции объекта управления

Далее полагаем, что вход и выход объекта управления являются скалярными: $m = r = 1$. Таким образом, объект описывается уравнениями

$$\dot{x} = \mathbf{A}_0 x + \mathbf{B}_0 u, \quad (7)$$

$$y = \mathbf{C}_0 x. \quad (8)$$

В основу предлагаемого метода синтеза САР положена идея *декомпозиции* задачи регулирования на две подзадачи: предварительной динамической коррекции объекта и формирования закона регулирования для скорректированного объекта. Данную идею воплощает схема САР, представленная на рис. 1. Здесь y^* — уставка (задающее воздействие), ε — сигнал рассогласования между уставкой и выходом объекта.

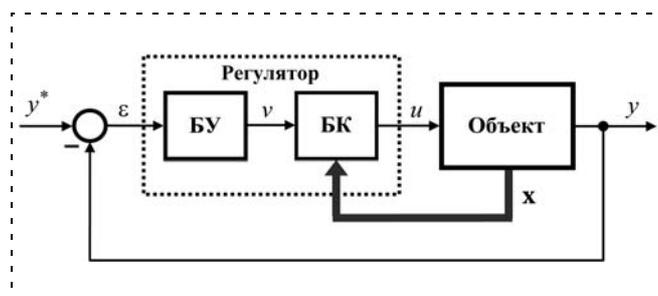


Рис. 1

Регулятор состоит из двух блоков: *блока коррекции* (БК), исправляющего динамику объекта в соответствии с заданной эталонной динамической моделью, и *блока управления* (БУ), реализующего типовой закон регулирования.

Пусть желаемая скорректированная динамика объекта представлена эталонной моделью в виде динамической системы порядка n_M , описываемой в переменных состояния уравнениями вида

$$\dot{\mathbf{x}}_M = \mathbf{A}_M \mathbf{x}_M + \mathbf{B}_M v; \quad (9)$$

$$y_M = \mathbf{C}_M \mathbf{x}_M, \quad (10)$$

где $v \in \mathbb{R}$ — вход; $\mathbf{x}_M \in \mathbb{R}^{n_M}$ — состояние; $y_M \in \mathbb{R}$ — выход модели; $\mathbf{A}_M, \mathbf{B}_M, \mathbf{C}_M$ — числовые матрицы соответствующих размеров.

Передаточные функции объекта регулирования и эталонной модели по каналу "вход—выход", соответственно, равны

$$W(s) = \mathbf{C}(\mathbf{E}_{n_p} s - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} \text{ и} \\ W_M(s) = \mathbf{C}_M(\mathbf{E}_{n_M} s - \mathbf{A}_M)^{-1} \mathbf{B}_M,$$

где s — комплексная частота, \mathbf{E}_p — единичная матрица p -го порядка.

Динамическая коррекция объекта предназначена обеспечить ему желаемую динамику в соответствии с эталонной моделью (9)—(10):

$$y(t) \approx y_M(t). \quad (11)$$

Предлагаемое схемное решение БК отражает рис. 2, а функционирование БК подчиняется уравнениям

$$u = v + \tilde{u}; \quad (12)$$

$$\tilde{u} = \tilde{u}_1 + \tilde{u}_2 + \tilde{u}_3; \quad (13)$$

$$\tilde{u}_1 = -\mathbf{K}_1 \mathbf{x}; \quad (14)$$

$$\tilde{u}_2 = -\mathbf{K}_2 \mathbf{x}_M; \quad (15)$$

$$\tilde{u}_3 = -K_3 v. \quad (16)$$

Заметим, что в структуру БК включена компонента (9) эталонной модели, представленная динамическим звеном с маркировкой $(\mathbf{A}_M, \mathbf{B}_M)$ и генерирующая вектор состояния модели \mathbf{x}_M .

Для сравнения динамики скорректированного объекта и эталонной модели будем исходить из их реакции на постоянное воздействие

$$v(t) = v(0) = \text{const} \neq 0 \quad (t > 0), \quad (17)$$

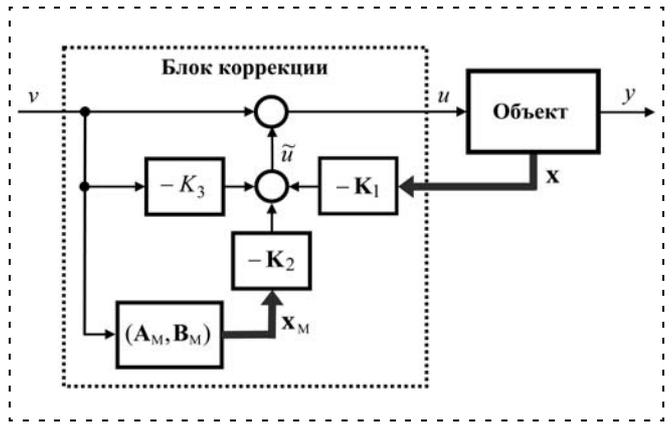


Рис. 2

причем качество коррекции будем оценивать интегральным квадратичным функционалом

$$\int_0^{\infty} \Delta y(t)^2 dt, \quad (18)$$

где $\Delta y(t)$ — сигнал рассогласования выходов объекта и модели:

$$\Delta y = y - y_M. \quad (19)$$

Вспомогательная ЛК-задача управления

Разработанный метод структурно-параметрического синтеза блока коррекции основывается на решении вспомогательной ЛК-задачи оптимизации для управляемой системы, структура которой представлена на рис. 3. Данная система включает три компонента: точную копию (модель) объекта, динамический эталон (9), (10), а также *задатчик* (3), генерирующий тестовый сигнал $v(t)$. В рассматриваемой системе управляющим воздействием является сигнал $\tilde{u}(t)$, а выходом — сигнал рассогласования выходов модели объекта $\hat{y}(t)$ и эталона $y_M(t)$:

$$\Delta \hat{y}(t) = \hat{y}(t) - y_M(t). \quad (20)$$

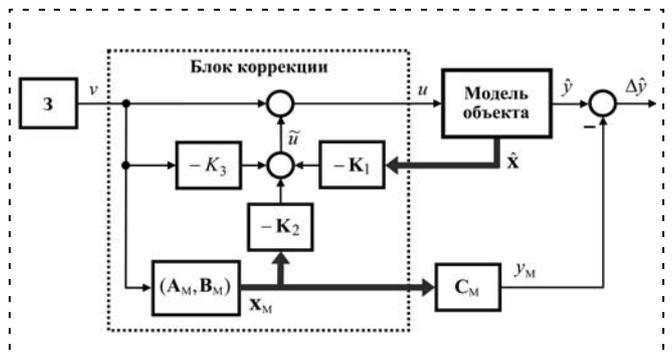


Рис. 3

падающих начальных состояниях объекта и его модели будет выполняться равенство

$$y(t) = \hat{y}(t).$$

Отсюда же и из (19), (20) следует, что значение оптимизируемого функционала (31) в условиях его параметризации (32) будет определять значение критерия качества коррекции (18).

Пример 1. Рассмотрим объект управления третьего порядка, описываемый уравнениями (1)–(2) с матрицами состояния, управления и выхода:

$$\mathbf{A}_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -0,5 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{C}_0 = [1,5 \ 0 \ 0].$$

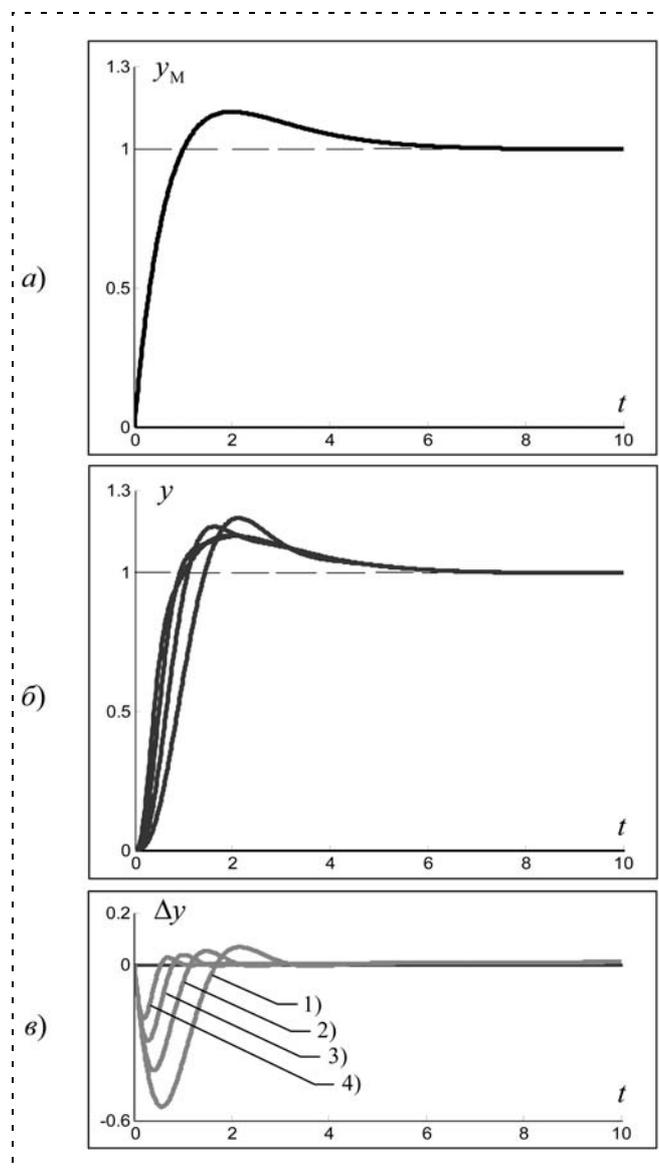


Рис. 4

Передаточная функция данного объекта равна

$$W_0(s) = \frac{3}{s(s+1)(2s+1)}.$$

Зададим эталонную модель передаточной функцией

$$W_M(s) = \frac{2s+1}{(s+1)^2}.$$

Приведем результаты расчета параметров БК рассматриваемого объекта управления для ряда вариантов значений весового множителя g .

1) $g = 10^2$:

$$\mathbf{K}_1 = [15,00 \ 10,08 \ 3,60], \mathbf{K}_2 = [-2,77 \ -0,53], \\ K_3 = -7,94; \Lambda = \{-1,00; -1,00; -1,27 \pm 2,06i; -2,55\};$$

2) $g = 10^3$:

$$\mathbf{K}_1 = [47,43 \ 22,99 \ 5,85], \mathbf{K}_2 = [-13,35 \ -4,23], \\ K_3 = -22,16; \Lambda = \{-1,00; -1,00; -1,84 \pm 3,09i; -3,68\};$$

3) $g = 10^4$:

$$\mathbf{K}_1 = [150,00 \ 51,57 \ 9,20], \mathbf{K}_2 = [-55,94 \ -21,60], \\ K_3 = -55,80; \Lambda = \{-1,00, -1,00; -2,68 \pm 4,57i; -5,35\};$$

4) $g = 10^5$:

$$\mathbf{K}_1 = [474,3 \ 114,3 \ 14,2], \mathbf{K}_2 = [-213,6 \ -91,2], \\ K_3 = -132,8; \Lambda = \{-1,00; -1,00; -3,91 \pm 6,73i; -7,83\}.$$

На рис. 4, *a* представлена эталонная переходная характеристика скорректированного объекта, на рис. 4, *b* — переходные характеристики скорректированного объекта, а на рис. 4 *в* — их отклонения от эталона для четырех рассматриваемых вариантов решения задачи.

Синтез системы автоматического регулирования

Как отмечалось выше, задача регулирования согласно предлагаемой блочной структуре САР (см. рис. 1) распадается на две независимые подзадачи: задачу динамической коррекции объекта в соответствии с заданным эталоном и задачу формирования закона регулирования исходя из эталонной динамики скорректированного объекта. Результатом решения указанных подзадач является конструирование блока коррекции и блока управления в предложенной структуре регулятора.

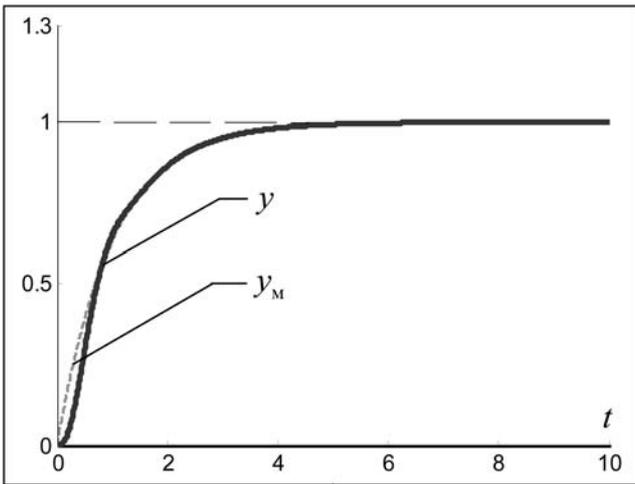


Рис. 5

Пример 2. Обратимся к объекту управления из примера 1. Примем следующую эталонную модель динамики скорректированного объекта:

$$W_M(s) = \frac{1}{s+1}. \quad (38)$$

Результат решения базовой ЛК-задачи управления для $g = 10^4$:

$$K_1 = [150,00 \ 51,57 \ 9,20], \quad K_2 = -68,69, \quad K_3 = -30,30.$$

Отметим интересный факт: матричные коэффициенты усиления K_1 БК в данном и предыдущем примерах полностью совпадают!

Рис. 5 иллюстрирует результат выполненной динамической коррекции объекта: видно, что переходная характеристика скорректированного объекта близка к эталонной.

В блоке регулирования реализуем ПИ-закон регулирования. Его передаточная функция

$$W_R(s) = k_P + \frac{k_I}{s}.$$

Выберем следующую настройку регулятора: $k_P = 0,6$, $k_I = 1$. В этом случае эталонной передаточной функции скорректированного объекта (38) отвечает следующая передаточная функция замкнутой системы:

$$\hat{W}(s) = \frac{0,6s+1}{s^2+1,6s+1}. \quad (39)$$

Полюсы последней равны $-0,8 \pm 0,6i$.

На рис. 6 представлены фактическая (сплошная линия) и эталонная (штриховая линия) переходные характеристики САР, а также разница между ними.

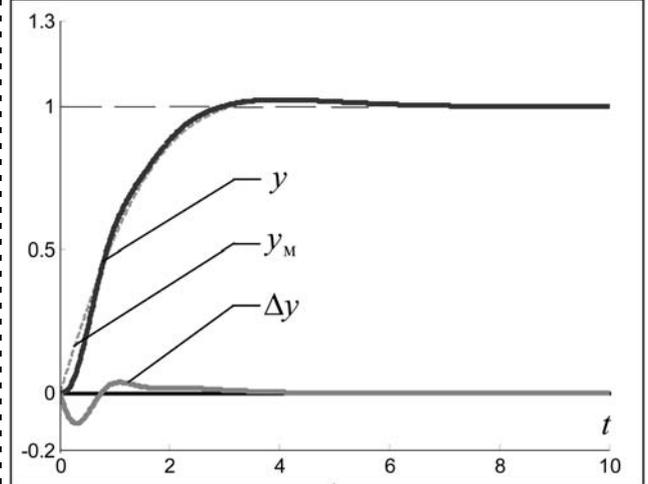


Рис. 6

Видно, что данные переходные характеристики практически совпадают, причем спектр синтезированной САР

$\Lambda = \{-0,8243 \pm 0,6124i; -2,1746 \pm 4,4937i; -5,7070\}$, т. е. доминирующие полюса замкнутой системы близки к полюсам желаемой передаточной функции (39).

Замечание. Предложенный метод динамической коррекции объекта управления (7), (8) довольно просто распространяется на класс объектов управления общего вида (1), (2). Для этого необходимо выполнить структурные изменения блока коррекции с учетом векторной природы входа u и выхода y объекта. При этом потребуются многоканальная модель эталонной модели динамики скорректированного объекта, а также придется модифицировать оптимизируемый функционал (31), что повлечет за собой соответствующие структурные изменения в уравнении Риккати (34) и последующих соотношениях (35)–(37), определяющих параметры блока коррекции.

Список литературы

1. Солодовников В. В., Филимонов Н. Б. Динамическое качество систем автоматического регулирования. М.: МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1987.
2. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987.
3. **Машиностроение.** Энциклопедия в 40 тт. Т. 1–4. Автоматическое управление. Теория / Е. А. Федосов, А. А. Красовский, Е. П. Попов и др. Под общ. ред. Е. А. Федосова. М.: Машиностроение, 2000.
4. **Современная прикладная теория управления.** В 3-х чч. Ч. I. Оптимизационный подход в теории управления / Под ред. А. А. Колесникова. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000.
5. **Методы классической и современной теории автоматического управления.** В 5-ти тт. Т. 4. Теория оптимизации систем автоматического управления / Под ред. К. А. Пупкова и Н. Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004.
6. **Филимонов Н. Б.** Проблема качества процессов управления: смена оптимизационной парадигмы // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 12. С. 2–11.

Д. П. Ким, д-р техн. наук, проф.,
МИРЭА (технический университет), Москва,
dpkim@yandex.ru

Определение желаемой передаточной функции при синтезе систем управления алгебраическим методом

Исследуются типовые нормированные передаточные функции, которые используются при определении желаемых передаточных функций. Рассматриваются возможности использования той или иной нормированной передаточной функции в зависимости от числа нулей в передаточной функции синтезируемой системы.

Ключевые слова: желаемая передаточная функция, нормированная передаточная функция (НПФ), биномиальная (колебательная, геометрическая и арифметическая) НПФ, время регулирования, перерегулирование

Введение

Определение желаемой передаточной функции при синтезе систем автоматического управления (САУ) алгебраическим методом основано на использовании нормированных передаточных функций (передаточных функций в форме Вишнеградского). При этом в качестве основных, как правило, рассматриваются четыре типа нормированных передаточных функций — передаточные функции с четырьмя типовыми характеристическими нормированными полиномами (знаменателями) [1], которые отличаются между собой набором корней. Такими полиномами являются: 1) полином с одинаковыми корнями, представляющий собой бином Ньютона $(q + 1)^n$; 2) полином из произведений $n/2$ трехчленов $(q^2 + 2z_n\beta_nq + \beta_n^2)$ при четном n и произведений $(n - 1)/2$ трехчленов $(q^2 + 2z_n\beta_nq + \beta_n^2)$ и одного двучлена $(q + \alpha_n)$ при нечетном n ; 3) полином, корни которого образуют арифметическую прогрессию; 4) полином, корни которого образуют геометрическую прогрессию. Для удобства будем называть эти полиномы и передаточные функции с такими характеристическими полиномами соответственно *биномиальным*, *колебательным*, *арифметическим* и *геометрическим*.

Если передаточная функция объекта имеет только левые нули и левые и нулевые полюса, причем число нулевых полюсов не превышает r , то при синтезе астатической системы r -го порядка алгебраическим методом числитель передаточной функции синтезированной системы совпадает с хвостовой частью знаменателя с r слагаемыми [2]. В данной статье

рассматривается определение желаемых передаточных функций при синтезе САУ, когда задан объект такого типа. Определение желаемых передаточных функций при синтезе САУ, когда передаточная функция объекта, кроме левых нулей и полюсов, содержит один правый нуль, был рассмотрен в [3], нулевые полюса и один правый полюс — в [2].

Типовые нормированные передаточные функции

В литературе известны два вида колебательных нормированных полиномов. Первый — это колебательный нормированный полином, когда все его параметры не зависят от степени n : $\alpha_n = \beta_n = 1$, $z_n = z = 0,75$ [1]. Такой полином и передаточную функцию с таким характеристическим полиномом будем называть соответственно *колебательным нормированным полиномом* и *колебательной нормированной передаточной функцией с коэффициентом демпфирования $z = 0,75$* . Второй — колебательный нормированный полином, характеризующийся тем, что время регулирования передаточной функции с таким характеристическим полиномом и не обладающей нулем, является минимальным [4]. Нормированный колебательный полином второго вида и передаточную функцию с таким характеристическим полиномом будем называть *оптимальными*.

Кроме указанных выше двух видов колебательных полиномов рассмотрим еще колебательный полином, отличающийся от колебательного нормированного полинома первого вида только тем, что коэффициент демпфирования $z = 0,7$. Этот полином характерен тем, что время регулирования колебательной нормированной передаточной функции второго порядка с таким характеристическим полиномом и не обладающей нулем принимает минимальное значение.

Время регулирования в данной статье определяется как минимальное время, по истечении которого отклонение переходной функции от установившегося значения не превышает $\Delta = 0,05h(\infty)$ ($h(\infty)$ — установившееся значение переходной функции).

Коэффициенты колебательного нормированного полинома с коэффициентом демпфирования $z = 0,75$ приведены в [1], коэффициенты оптимального колебательного нормированного полинома — в [4]. Коэффициенты колебательного нормированного полинома с коэффициентом демпфирования $z = 0,7$ для $n = 2 \dots 6$ имеют следующий вид:

$n = 2$	1	1,4	1				
$n = 3$	1	2,4000	2,4000	1			
$n = 4$	1	2,8000	3,3600	2,8000	1		
$n = 5$	1	3,8000	6,7600	6,7600	3,8000	1	
$n = 6$	1	4,2000	8,8800	11,1440	8,8800	4,2000	1

Таблица 1

Разности арифметического нормированного полинома

α	n				
	2	3	4	5	6
0,1	9,9000	2,1612	1,1249	0,7519	0,5634
0,2	4,8000	1,4319	0,8205	0,5738	0,4412
0,3	3,0333	1,0682	0,6430	0,4600	0,3582
0,4	2,1000	0,8225	0,5106	0,3705	0,2908
0,5	1,5000	0,6328	0,4013	0,2939	0,2320
0,6	1,0667	0,4751	0,3060	0,2257	0,1789
0,7	0,7286	0,3381	0,2203	0,1634	0,1299
0,8	0,4500	0,2155	0,1417	0,1056	0,0841
0,9	0,2111	0,1036	0,0686	0,0513	0,0410

Перейдем к рассмотрению арифметических и геометрических *нормированных передаточных функций* (НПФ). Первый член a и разность d прогрессии корней арифметического нормированного полинома n -го порядка связаны соотношением

$$a(a+d)(a+2d) \cdots (a+(n-1)d) = 1. \quad (1)$$

В табл. 1 приведены разности d в зависимости от первого члена a для возрастающей арифметической прогрессии. При $a = 1$ арифметический нормированный полином обращается в биномиальный.

Первый член a и знаменатель q прогрессии корней геометрического нормированного полинома связаны соотношением

$$a^n q^{(n-1)n/2} = 1, \text{ или } q = 1/a^{2/(n-1)}. \quad (2)$$

При первом члене $a = 1$ геометрический полином так же, как и арифметический, обращается в биномиальный.

Из арифметических и геометрических НПФ, полюса которых образуют возрастающие и убывающие прогрессии, рассмотрим только арифметические и геометрические НПФ, полюса которых образуют возрастающие прогрессии. Как будет показано ниже, НПФ, полюса которых образуют убывающие арифметические и геометрические прогрессии, совпадают с одноименными НПФ, полюса которых образуют возрастающие прогрессии, если они имеют одинаковую степень устойчивости. У НПФ, полюса которых образуют возрастающие арифметические и геометрические прогрессии, их степени устойчивости равны первым членам; убывающие арифметические и геометрические прогрессии — последним членам.

Утверждение 1. Два арифметических нормированных полинома одной и той же степени, корни которых образуют возрастающую и убывающую арифметические прогрессии, совпадают, если первый член первой и последний член второй прогрессий равны.

Доказательство. Рассмотрим два арифметических нормированных полинома с одинаковыми степенями. Пусть их корни образуют возрастающую и убывающую арифметические прогрессии, у которых a и a_1 — первые члены, а d и $(-d_1)$ — разности этих прогрессий соответственно. Произведения членов этих прогрессий должны быть равны единице, так как они равны последним слагаемым нормированных полиномов (см. (1)):

$$a(a+d) \cdots (a+(n-1)d) = 1; \quad (3)$$

$$a_1(a_1-d_1) \cdots (a_1-(n-1)d_1) = 1. \quad (4)$$

И так как по условию первый член возрастающей прогрессии и последний член убывающей прогрессий равны, имеем

$$a = a_1 - (n-1)d_1,$$

откуда

$$a_1 = a + (n-1)d_1. \quad (5)$$

Подставив выражение (5) в (4) и записав левую часть полученного выражения в обратном порядке, получим

$$a(a+d_1) \cdots (a+(n-1)d_1) = 1. \quad (6)$$

Из (3) и (6) заключаем, что $d_1 = d$. Следовательно, корни обоих полиномов и соответствующие им арифметические полиномы равны.

Утверждение 2. Два геометрических нормированных полинома одной и той же степени, корни которых составляют возрастающую и убывающую геометрические прогрессии, совпадают, если первый член первой и последний член второй прогрессий равны.

Доказательство. Рассмотрим два геометрических нормированных полинома с одинаковыми степенями. Пусть их корни образуют возрастающую и убывающую геометрические прогрессии, у которых a и a_1 — первые члены, а q и q_1 — знаменатели этих прогрессий соответственно. Знаменатели геометрических прогрессий связаны с первыми членами соотношениями (см. (2))

$$q = 1/a^{2/(n-1)}, \quad q_1 = 1/a_1^{2/(n-1)}. \quad (7)$$

Члены возрастающей и убывающей прогрессий соответственно имеют следующий вид:

$$a, aq, \dots aq^{n-2}, aq^{n-1}; \quad (8)$$

$$a_1, a_1q_1, \dots a_1a_1^{n-2}, a_1a_1^{n-1}. \quad (9)$$

Подставив выражения для q_1 из (7) в последний член (9) и приравняв его с первым членом возрастающей прогрессий (8), получим

$$a = 1/a_1 \text{ или } a_1 = 1/a. \quad (10)$$

Соотношение (7) для q_1 после подстановки в него выражения для a_1 из (10) принимает вид

$$q_1 = a^{2/(n-1)}. \quad (11)$$

Корни (8) после подстановки выражения для q из (7) и корни (9) после подстановки выражений для a_1 и q_1 из (10) и (11), соответственно, примут вид

$$a, a^{(n-3)/(n-1)}, \dots, a^{(n-3)/(n-1)}, 1/a,$$

$$1/a, a^{(n-3)/(n-1)}, \dots, a^{(n-3)/(n-1)}, a.$$

Отсюда видно, что корни обоих рассматриваемых полиномов совпадают: вторая последовательность отличается от первой только порядком расположения ее членов.

Очевидно, что если нормированный полином, корни которого образуют возрастающую арифметическую или геометрическую прогрессию, является характеристическим полиномом системы управления, то первый член равен степени устойчивости этой системы; если же указанные корни образуют убывающую арифметическую или геометрическую прогрессию, то последний член прогрессий равен степени устойчивости соответствующей системы. Поэтому из *утверждения 1* следует, что две арифметические НПФ, полюса которых образуют возрастающие и убывающие арифметические прогрессии, при равенстве их числителей равны между собой, если они имеют одинаковую степень устойчивости. Аналогично из *утверждения 2* следует, что две геометрические НПФ, полюса которых образуют возрастающие и убывающие геометрические прогрессии, при равенстве их числителей также равны, если они имеют одинаковую степень устойчивости.

Итак, в качестве типовых НПФ рассматриваются колебательные и биномиальные НПФ, арифметические и геометрические НПФ, полюса которых образуют возрастающие прогрессии. Исследуем основные показатели качества (время регулирования τ_p и перерегулирование σ) для систем с указанными типовыми НПФ.

Нормированные передаточные функции, не содержащие нули

Пусть НПФ не содержит нулей, т. е. числитель является константой. Значение константы в числителе на характер переходного процесса и соответственно на показатели качества в переходном режиме не влияет. Для определенности примем эту

константу равной единице, что соответствует астатической системе 1-го порядка.

Сначала исследуем показатели качества арифметической и геометрической НПФ. У них перерегулирование равно нулю. Поэтому ограничимся рассмотрением зависимости времени регулирования от первого члена прогрессий полюсов указанных передаточных функций, т. е. от их степени устойчивости.

На рис. 1 представлены кривые зависимости времени регулирования от степени устойчивости арифметической НПФ, а на рис. 2 — то же для геометрической НПФ для $n = \overline{1, 6}$.

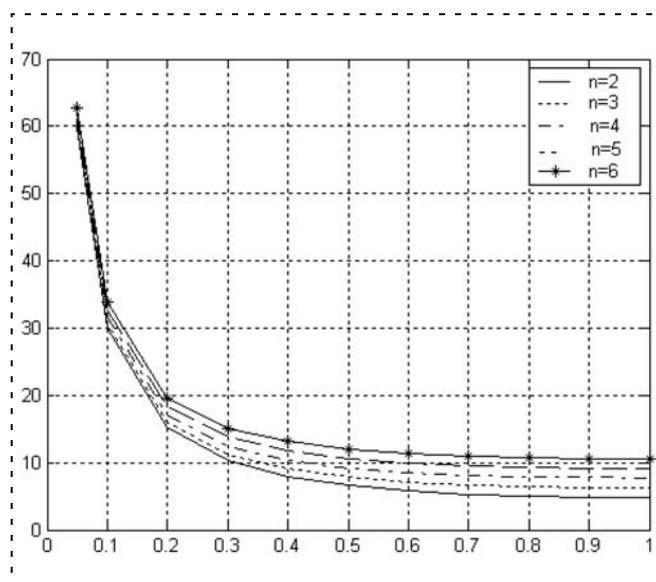


Рис. 1. Кривые зависимости времени регулирования от степени устойчивости арифметической НПФ ($r = 1$)

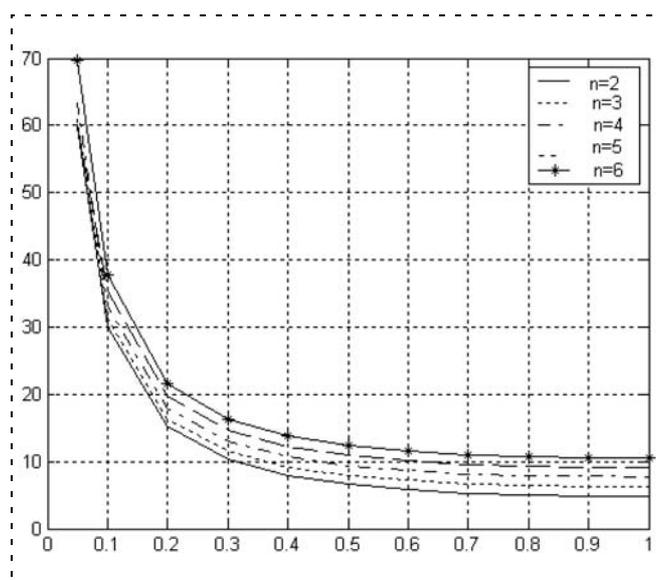


Рис. 2. Кривые зависимости времени регулирования от степени устойчивости геометрической НПФ ($r = 1$)

Таблица 2

Время регулирования для биномиальной НПФ ($r = 1$)

Время регулирования	n				
	2	3	4	5	6
τ_p	4,74	6,30	7,75	9,15	10,51

Таблица 3

Характеристики колебательных НПФ ($r = 1$)

Вид колебательных НПФ	Характеристики	n				
		2	3	4	5	6
$z = 0,7$	τ_p	2,90	4,41	7,26	5,99	9,43
	σ	4,60	1,52	6,69	3,45	8,08
$z = 0,75$	τ_p	3,13	4,69	5,02	6,43	6,80
	σ	2,84	0,77	3,88	1,79	8,08
Оптимальная	τ_p	4,38	4,07	4,57	5,71	6,22
	σ	5,00	0,49	4,73	0,00	5,00

Как видно, кривые на этих рисунках расположены в порядке возрастания порядка передаточной функции n : нижняя кривая (сплошная линия) соответствует $n = 2$, верхняя кривая (сплошная линия со звездочками) — $n = 6$.

Таким образом, с ростом порядка передаточной функции, как и следовало ожидать, время регулирования возрастает. Кроме того, из приведенных графиков следует, что время регулирования арифметических и геометрических НПФ как функция от первого члена прогрессии a принимает минимальное значение при его граничном значении, т. е. когда они обращаются в биномиальные НПФ. Поэтому при определении желаемой передаточной функции, не обладающей нулями, из четырех рассмотренных НПФ достаточно ограничиться двумя — биномиальными и колебательными НПФ.

В табл. 2 приведены время регулирования τ_p для биномиальной НПФ (перерегулирование $\sigma = 0$), а в табл. 3 — время регулирования τ_p и перерегулирование σ для колебательных НПФ. Из табл. 2, 3 следует, что время регулирования для $n = 2$ меньше всего у колебательной НПФ с коэффициентом демпфирования $z = 0,7$, а для остальных n — у оптимальной колебательной НПФ. При этом у оптимальной колебательной НПФ при $n = 3$ перерегулирование близко к нулю, а при $n = 5$ — равно нулю.

Из изложенного следует, что при определении желаемой передаточной функции, если требуется, чтобы у синтезируемой системы был монотонный переходный процесс, нужно воспользоваться биномиальной НПФ (при $n = 5$ можно воспользоваться и оптимальной колебательной НПФ). Но если для синтезируемой системы важно время регулирования и небольшое перерегулирование допустимо, то

при определении желаемой передаточной функции можно воспользоваться при $n = 2$ колебательной НПФ с коэффициентом демпфирования $z = 0,7$, а при остальных значениях n — оптимальной колебательной НПФ.

Однако следует иметь в виду, что при преобразовании НПФ в желаемую передаточную функцию выполняется подстановка

$$q = \alpha s,$$

и время регулирования t_p желаемой передаточной функции и время регулирования τ_p НПФ связаны соотношением

$$t_p = \alpha \tau_p.$$

Поэтому время регулирования τ_p можно подкорректировать до нужного значения путем выбора параметра α при преобразовании НПФ в желаемую передаточную функцию.

Типовые нормированные передаточные функции с одним нулем

Рассмотрим астатическую систему второго порядка ($r = 2$). При этом ограничимся случаем, когда ее числитель содержит один нуль, и он совпадает с суммой двух последних слагаемых ее знаменателя. При наличии нулей в передаточной функции система управления обладает большим перерегулированием [1, 4]. Поэтому в этом случае важно определить тип НПФ, при которой указанный показатель принимает минимальное значение.

В табл. 4 и в табл. 5 приведены перерегулирование σ и время регулирования τ_p биномиальной НПФ и колебательных НПФ, соответственно. Из

Таблица 4

Характеристики биномиальной НПФ ($r = 2$)

Характеристики	n				
	2	3	4	5	6
τ_p	4,14	6,57	8,60	10,45	12,20
σ	13,53	24,89	34,75	43,68	51,81

Таблица 5

Характеристики колебательных НПФ ($r = 2$)

Вид колебательных НПФ	Характеристики	n				
		2	3	4	5	6
$z = 0,7$	τ_p	2,34	5,63	6,41	7,67	11,44
	σ	21,03	33,84	54,32	63,88	84,23
$z = 0,75$	τ_p	4,32	5,78	6,68	8,06	10,95
	σ	19,42	31,98	50,21	59,49	76,89
Оптимальная	τ_p	4,34	4,94	6,07	6,47	9,95
	σ	21,37	38,86	55,67	70,77	83,37

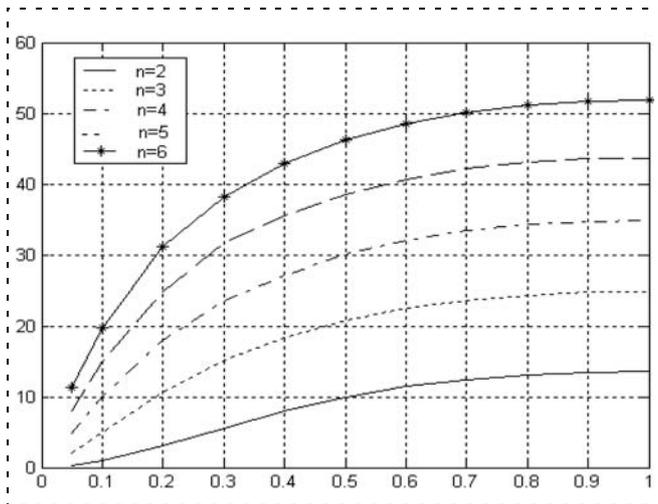


Рис. 3. Кривые зависимости перерегулирования от степени устойчивости арифметической НПФ ($r = 2$)

этих таблиц видно, что перерегулирование колебательных НПФ велико, и оно значительно больше перерегулирования биномиальной НПФ. Поэтому дальше имеет смысл рассматривать только арифметические и геометрические НПФ, так как биномиальная передаточная функция представляет собой частный случай указанных передаточных функций.

На рис. 3 и рис. 4 представлены соответственно кривые зависимости перерегулирования арифметической и геометрической НПФ от значения их степени устойчивости. Из этих графиков следует, что как для арифметической, так и для геометрической НПФ, при росте степени устойчивости перерегулирование увеличивается, достигая максимума при граничном значении $a = 1$, т. е. при биномиальной НПФ. При этом, когда $n = 2$, перерегулирования обеих НПФ при всех значениях степени устойчивости одинаковы. В остальных случаях перерегулирование при одних значениях степени устойчиво-

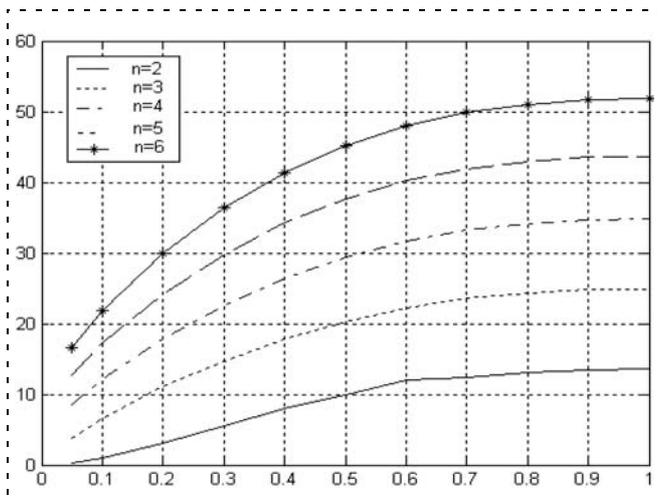


Рис. 4. Кривые зависимости перерегулирования от степени устойчивости геометрической НПФ ($r = 2$)

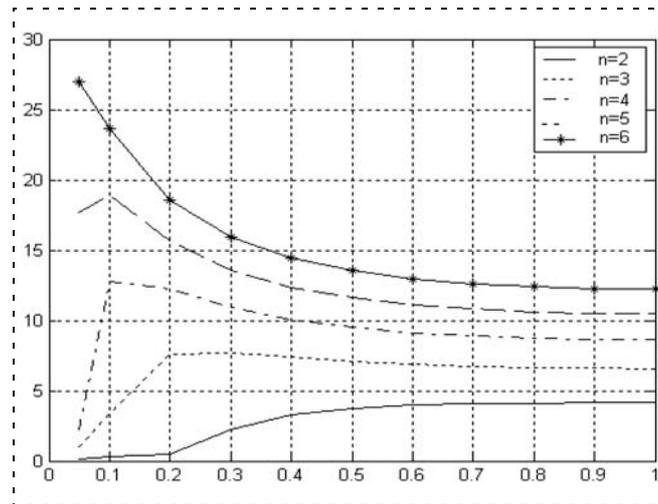


Рис. 5. Кривые зависимости времени регулирования от степени устойчивости арифметической НПФ ($r = 2$)

сти меньше у арифметической НПФ, при других — у геометрической НПФ. Если при выборе НПФ в качестве показателя качества принять только перерегулирование, то нужно остановиться в зависимости от n на арифметической или геометрической НПФ с как можно меньшим значением степени устойчивости. Однако надо учитывать, что чрезмерно малое значение степени устойчивости может привести к нарушению грубости системы.

На рис. 5 представлены кривые зависимости времени регулирования от степени устойчивости для арифметической и на рис. 6 — для геометрической НПФ. Как видно из этих графиков, однозначной закономерности поведения времени регулирования в зависимости от степени устойчивости не существует. Время регулирования арифметической НПФ с ростом степени устойчивости при $n = 2$ монотонно возрастает, при $n = \overline{3,5}$ сначала воз-

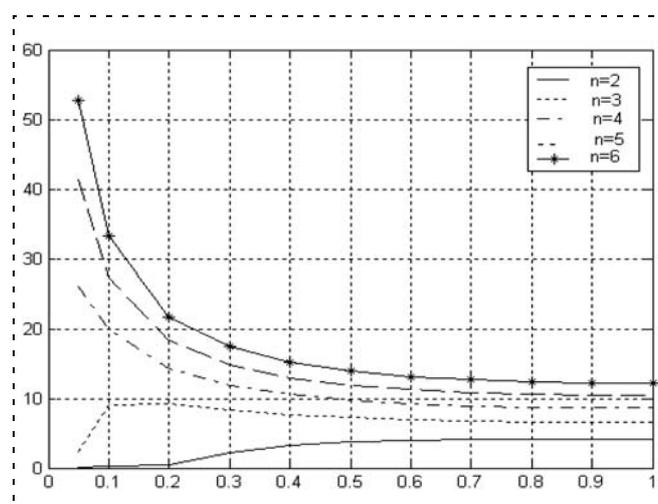


Рис. 6. Кривые зависимости времени регулирования от степени устойчивости геометрической НПФ ($r = 2$)

растает, затем убывает и при $n = 6$ — монотонно убывает. Время регулирования для геометрической НПФ с ростом степени устойчивости при $n = 2$ монотонно возрастает, при $n = 3$ — сначала возрастает, затем убывает и при $n = 4, 6$ монотонно убывает. Сравнивая время регулирования арифметической и геометрической НПФ, находим, что оно при $n = 2$ одинаково, при $n = 3, 6$ у арифметической НПФ меньше, чем у геометрической (при степени устойчивости, близкой к единице, времена регулирования у обеих передаточных функций равны), т. е. по времени регулирования арифметическая НПФ имеет преимущество перед геометрическим НПФ. Однако, чтобы удовлетворить заданным требованиям к перерегулированию и времени регулирования, в зависимости от порядка НПФ нужно будет в одних случаях использовать геометрическую НПФ, в других — арифметическую НПФ.

Таким образом, когда желаемая передаточная функция имеет один нуль в числителе, при ее определении потребуется использовать обе НПФ — арифметическую и геометрическую.

Типовые нормированные передаточные функции с двумя нулями

Рассмотрим астатическую систему третьего порядка ($r = 3$). При этом ограничимся случаем, когда ее числитель содержит два нуля и он совпадает с суммой трех последних слагаемых ее знаменателя.

В табл. 6 приведены перерегулирование σ и время регулирования τ_p биномиальной НПФ, а в табл. 7 — то же для колебательных НПФ. Из этих таблиц видно, что перерегулирование колебательных НПФ велико, и оно значительно больше перерегулиро-

Таблица 6

Характеристики биномиальной НПФ ($r = 3$)

Характеристики	n				
	2	3	4	5	6
τ_p	—	2,71	7,12	9,92	12,21
σ	—	20,60	40,60	59,88	78,57

Таблица 7

Характеристики колебательных НПФ ($r = 3$)

Вид колебательных НПФ	Характеристики	n				
		2	3	4	5	6
$z = 0,7$	τ_p	—	5,05	7,43	8,86	12,37
	σ	—	25,62	57,00	80,80	116,0
$z = 0,75$	τ_p	—	2,93	7,47	9,06	10,09
	σ	—	24,60	53,71	76,59	108,3
Оптимальная	τ_p	—	5,50	6,96	7,23	9,13
	σ	—	30,59	60,72	97,61	121,1

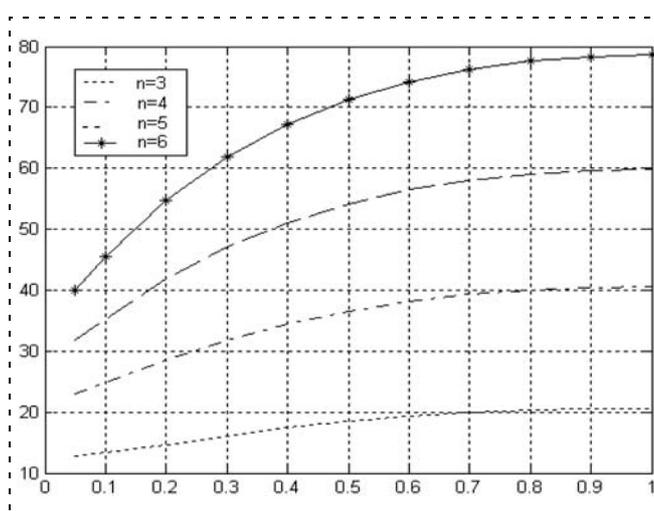


Рис. 7. Кривые зависимости перерегулирования от степени устойчивости арифметической НПФ ($r = 3$)

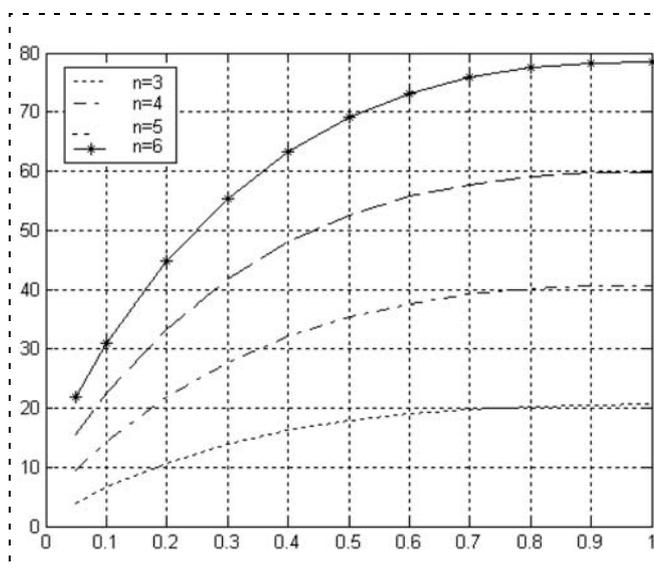


Рис. 8. Кривые зависимости перерегулирования от степени устойчивости геометрической НПФ ($r = 3$)

вания биномиальной НПФ. Поэтому дальше, как и в случае с одним нулем, имеет смысл рассматривать только арифметические и геометрические НПФ, так как биномиальная НПФ, как указывалось, представляет собой частный случай указанных передаточных функций.

На рис. 7 представлены кривые зависимости перерегулирования от степени устойчивости для арифметической НПФ, а на рис. 8 — то же для геометрической НПФ. В обоих случаях с ростом степени устойчивости перерегулирование монотонно возрастает при всех порядках передаточной функции. И чем выше порядок n , тем больше перерегулирование. При этом перерегулирование арифметической НПФ при всех значениях степени устойчивости и порядка НПФ больше, чем перерегулирование геометрической НПФ.

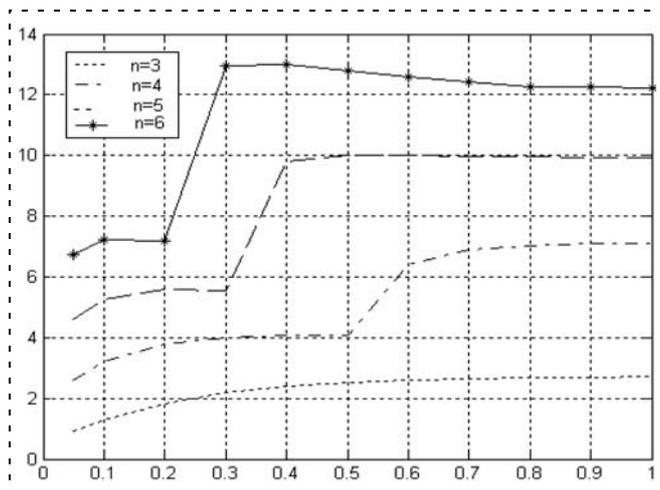


Рис. 9. Кривые зависимости времени регулирования от степени устойчивости арифметической НПФ ($r = 3$)

На рис. 9 и рис. 10 представлены кривые зависимости времени регулирования арифметической и геометрической НПФ от степени устойчивости. Время регулирования арифметической НПФ при всех значениях степени устойчивости больше времени регулирования геометрической НПФ, когда $n = 3$, и меньше, — когда $n = 4, 6$.

Итак, и в случае, когда желаемая передаточная функция имеет два нуля, потребуется использовать обе передаточные функции: арифметическую и геометрическую НПФ.

Как известно, степень устойчивости характеризуется как показатель быстродействия. Однако это, в какой-то мере, справедливо, когда корни характеристического уравнения являются действительными. Когда же характеристическое уравнение имеет комплексные корни или все его корни действительны, но передаточная функция имеет нули, степень устойчивости не может служить мерой быстродействия. Действительно, степень устойчиво-

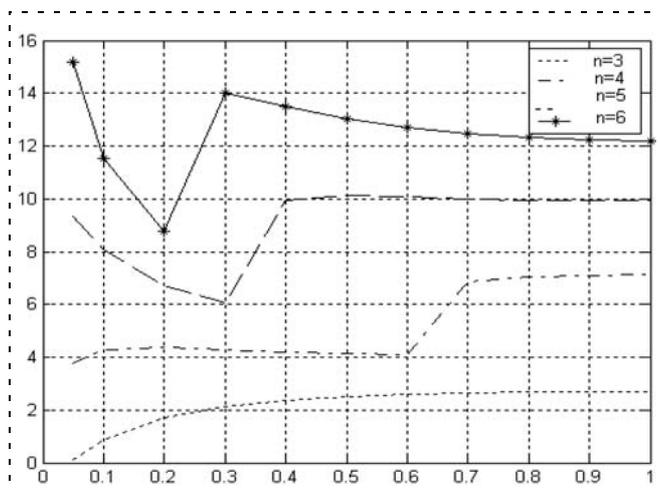


Рис. 10. Кривые зависимости времени регулирования от степени устойчивости при геометрической НПФ ($r = 3$)

сти биномиальной НПФ равна единице, а степень устойчивости колебательной НПФ меньше единицы. Но, тем не менее, время регулирования колебательной НПФ меньше времени регулирования биномиальной НПФ. Точно так же время регулирования арифметической и геометрической НПФ, имеющих нули, во многих случаях тем меньше, чем меньше их степень устойчивости.

Заключение

Если передаточная функция объекта имеет только левые нули и, кроме левых полюсов, один нулевой или правый полюс, и левые нули и полюса объекта компенсируются левыми полюсами и нулями передаточной функции регулятора, то передаточная функция САУ, синтезируемая алгебраическим методом, не содержит нулей [5]. И в этом случае при определении желаемой передаточной функции можно использовать биномиальную или колебательную нормированную передаточную функцию. В тех случаях, когда передаточная функция синтезируемой системы обладает нулями, при определении желаемой передаточной функции нужно воспользоваться арифметическими или геометрическими нормированными передаточными функциями. При этом, как было установлено, во многих случаях, чем меньше степень устойчивости, тем меньше перерегулирование и время регулирования.

Степень устойчивости может служить алгебраическим запасом устойчивости, так как она характеризует близость системы к границе устойчивости. При малых ее значениях система может стать негрубой. Поэтому возникает проблема, каким должно быть минимальное значение степени устойчивости, при котором не нарушается грубость (робастность) системы. На подобную проблему, которая возникает при синтезе САУ в связи с компенсацией близких к мнимой оси левых нулей и полюсов передаточной функции объекта, впервые было обращено внимание в [6].

Список литературы

1. Поспелов Г. С. Основы автоматики / Под ред. А. А. Красовского. М.: ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1954.
2. Ким Д. П. Алгебраический метод синтеза линейных непрерывных систем управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 1. С. 9–15.
3. Ким Д. П. Синтез неминимально-фазовых систем управления с заданным временем регулирования // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 4. С. 5–10.
4. Красовский А. А., Поспелов Г. С. Основы автоматики и технической кибернетики. М.-Л.: ГОСЭНЕРГОИЗДАТ, 1962.
5. Ким Д. П. Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы. Изд. второе, исправленное и дополненное. М.: ФИЗМАТ ЛИТ, 2007.
6. Солодовников В. В., Филимонов Н. Б. Динамическое качество систем автоматического регулирования. М.: МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1987.

КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА И ОПТИМИЗАЦИЯ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

УДК 519.216

Т. А. Алиев¹, д-р техн. наук, проф.,
академик НАН Азербайджана, директор,

А. М. Аббасов², д-р техн. наук, проф.,
академик НАН Азербайджана, зав. лаб.,

А. А. Ализاده³, д-р геол.-мин. наук, проф.,
академик НАН Азербайджана, вице-президент,

Г. Д. Етирмишли⁴,

канд. геол.-мин. наук, доц., ген. директор,

Г. А. Гулуев¹, зав. лаб.,

Ф. Г. Пашаев¹, ст. научн. сотр.,

¹ Институт кибернетики НАН Азербайджана

² Институт информационных технологий
НАН Азербайджана

³ Институт геологии НАН Азербайджана,

⁴ Республиканский центр

Сейсмологической службы НАН Азербайджана,
telmancyber@rambler.ru

Интеллектуальный мониторинг аномальных сейсмических процессов на острове Песчаный Каспийского моря с использованием робастной помехотехнологии

Рассматривается один из возможных вариантов решения задачи мониторинга аномальных сейсмических процессов. Предлагается система, в которой сейсмоакустическая информация из глубинных пластов земли получается с помощью акустических датчиков (гидрофонов), установленных на устье консервированных нефтяных скважин. Непрерывный анализ полученной сейсмоакустической информации осуществляется на сервере центра мониторинга с использованием робастной помехотехнологии. Приводятся технические характеристики системы и некоторые экспериментальные данные, подтверждающие надежность и достоверность результатов мониторинга.

Ключевые слова: сейсмоакустическая система мониторинга, помеха, аномальные сейсмические процессы, краткосрочный прогноз

Введение

В настоящее время по вине сейсмических систем мониторинга землетрясения с катастрофическими последствиями своевременно не прогнозируются. Для стран, находящихся в сейсмоактивных регионах, запоздалая регистрация землетрясения с по-

мощью известных стандартных наземных сейсмо- станций создает серьезную проблему, а это, в свою очередь, приводит к большим человеческим жертвам.

В связи с этим требуется создание новых более эффективных технологий и систем мониторинга начала зарождения аномальных сейсмопроцессов [1, 2].

С учетом вышесказанного для городов, расположенных в подобных регионах, очевидна необходимость создания общегородской системы непрерывного мониторинга скрытого периода начала аномальных сейсмических процессов (АСП).

Постановка задачи

Известно, что в сейсмических регионах [1, 3] время T_0 между двумя АСП меняется в диапазоне нескольких месяцев. Зарождение аномальных сейсмических процессов характеризуется периодом T_1 , который может длиться сутками, часами. При достижении АСП критического состояния начинается время T_2 , которое исчисляется минутами, секундами. При этом и происходит землетрясение. После чего снова начинается новый период времени покоя T_0 .

Несмотря на указанные различия длительностей времен T_0 , T_1 , T_2 задача мониторинга сводится к обеспечению надежной индикации начала периода T_1 скрытого зарождения АСП. В настоящее время в существующих известных системах регистрируется начало периода T_2 . К сожалению, эти системы не обеспечивают надежный и достоверный мониторинг начала времен T_1 , что является одним из серьезных недостатков современных систем и средств как контроля, так и мониторинга АСП.

В связи с этим целесообразно рассмотреть этот вопрос более подробно.

Допустим, что при нормальном состоянии объекта в период времени T_0 для зашумленных сигналов $g(i\Delta t) = X(i\Delta t) + z(i\Delta t)$, получаемых на выходах соответствующих датчиков, выполняются известные классические условия, т. е. справедливы равенства [4, 5]

$$\omega_{T_0} [g(i\Delta t)] = \frac{1}{\sqrt{2\pi Dg}} e^{\frac{(g(i\Delta t))^2}{2Dg}},$$
$$D_\varepsilon \approx 0, D_g \approx D_X; R_{gg}(\mu) \approx R_{XX}(\mu);$$
$$m_g \approx m_X \approx m_\varepsilon \approx 0; R_{X\varepsilon}(\mu = 0) \approx 0, r_{X\varepsilon} \approx 0, \quad (1)$$

где $\omega_{T_0} [g(i\Delta t)]$ — закон распределения сигнала $g(i\Delta t)$; D_ε, D_X, D_g — оценки дисперсий помехи, полезного $X(i\Delta t)$ и суммарного $g(i\Delta t)$ сигналов соответственно; $R_{XX}(\mu), R_{gg}(\mu)$ — оценки корреляционных функций полезного сигнала $X(i\Delta t)$ и суммарного сигнала $g(i\Delta t)$; m_ε, m_X, m_g — математические ожидания помехи $\varepsilon(i\Delta t)$, полезного и суммарного сигналов; $R_{X\varepsilon}(\mu = 0), r_{X\varepsilon}$ — взаимно корреляционная функция и коэффициент корреляции между полезным сигналом $X(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$.

Однако, когда наступает период скрытого зарождения АСП, условие (1) нарушается, т. е. [6,7]

$$\omega_{T_0} [g(i\Delta t)] \neq \omega_{T_1} [g(i\Delta t)], D_\varepsilon \neq 0, D_g \neq D_X;$$

$$R_{gg}(\mu) \neq R_{XX}(\mu); m_g \neq m_X, R_{X\varepsilon}(\mu = 0) \neq 0, r_{X\varepsilon} \neq 0.$$

В результате из-за нарушения равенства (1) статистические оценки сигнала $g(i\Delta t)$ определяются с некоторой погрешностью. По этой причине в течение периода времени T_1 в системах контроля затрудняется своевременное обнаружение начальной стадии зарождения АСП [8—11]. Затем в период времени T_2 АСП приобретают явно выраженную форму, и эти процессы регистрируются сейсмостанциями, в основном, при достижении АСП критического состояния, когда происходит землетрясение. По этой причине результаты мониторинга АСП оказываются запоздалыми. Следовательно, для регистрации этих процессов в период времени T_1 необходимо создание технологии и соответствующей системы, позволяющих уловить момент нарушения равенств (1).

В связи с этим очевидна необходимость создания технологий и систем получения сейсмоакустической информации от глубинных пластов земли и построение на ее основе сети станций мониторинга АСП [12, 13].

В статье рассматривается один из возможных вариантов решения этой задачи.

Технология мониторинга начала периода зарождения аномальных сейсмических процессов

Проведенные исследования показали, что при зарождении АСП в момент начала периода T_1 , в первую очередь, меняются оценки дисперсии помехи D_ε , взаимно корреляционной функции $R_{X\varepsilon}(\mu = 0)$, коэффициента корреляции $r_{X\varepsilon}$ между полезным сигналом $X(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$ [1, 8, 9]. Это связано с тем, что во время T_0 при нормальном состоянии сейсмических процессов помеха $\varepsilon(i\Delta t)$ возникает от случайных внешних факторов, не имеющих корреляцию с полезным сигналом. Однако во время T_1 при зарождении АСП помеха $\varepsilon(i\Delta t)$ формируется под влиянием происходящих процессов,

связанных с отклонением их от нормального состояния. Поэтому в течение времени T_1 между полезным сигналом $X(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$ возникает корреляция, и имеет место неравенство $R_{X\varepsilon}(\mu) \neq 0, r_{X\varepsilon} \neq 0$. В связи с этим рассмотрим один из возможных вариантов приближенного вычисления этих оценок. Для этого известное выражение

$$D_g = R_{gg}(\mu = 0) =$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(i\Delta t)g(i\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g^2(i\Delta t)$$

представим в виде

$$R_{gg}(\mu = 0) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [X(i\Delta t) + \varepsilon(i\Delta t)]^2.$$

Понятно, что, раскрывая скобку, получим

$$R_{gg}(\mu = 0) =$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X^2(i\Delta t) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 2[X(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t)] + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^2(i\Delta t).$$

Принимая обозначения

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X^2(i\Delta t) = R_{XX}(\mu = 0),$$

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 2[X(i\Delta t)\varepsilon(i\Delta t)] = 2R_{X\varepsilon}(\mu = 0),$$

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^2(i\Delta t) = R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu = 0) = D_\varepsilon,$$

получим

$$R_{gg}(\mu = 0) = R_{XX}(\mu = 0) + 2R_{X\varepsilon}(\mu = 0) + R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu = 0). (2)$$

Следовательно, приближенную оценку $R_{X\varepsilon}(\mu = 0)$ можно определить по выражению

$$2R_{X\varepsilon}(\mu = 0) = R_{gg}(\mu = 0) - R_{XX}(\mu = 0) - R_{\varepsilon\varepsilon}(\mu = 0). (3)$$

Из литературы [1, 4, 6] известно, что при выполнении равенства (1) и при соответствующем выборе шага дискретизации Δt можно считать справедливыми следующие приближенные равенства:

$$R_{gg}(\mu = 1) \approx R_{XX}(\mu = 1); \quad (4)$$

$$R_{gg}(\mu = 2) \approx R_{XX}(\mu = 2); R_{gg}(\mu = 3) \approx R_{XX}(\mu = 3);$$

$$\Delta R_{gg}(\mu = 1) = R_{gg}(\mu = 0) - R_{gg}(\mu = 1);$$

$$\Delta R_{XX}(\mu = 1) = R_{XX}(\mu = 0) - R_{XX}(\mu = 1);$$

$$\begin{aligned} \Delta R_{gg}(\mu = 2) &= R_{gg}(\mu = 1) - R_{gg}(\mu = 2) \approx \\ &\approx R_{XX}(\mu = 1) - R_{XX}(\mu = 2) = \Delta R_{XX}(\mu = 2); \\ \Delta R_{gg}(\mu = 3) &= R_{gg}(\mu = 2) - R_{gg}(\mu = 3) \approx \\ &\approx R_{XX}(\mu = 2) - R_{XX}(\mu = 3) = \Delta R_{XX}(\mu = 3); \\ \Delta R_{gg}(\mu = 2) &\approx \Delta R_{XX}(\mu = 2) \approx \Delta R_{XX}(\mu = 1); \\ \Delta R_{gg}(\mu = 3) &\approx \Delta R_{XX}(\mu = 3) \approx \Delta R_{XX}(\mu = 2). \end{aligned} \quad (5)$$

В силу равенств (4), (5) можно записать

$$\begin{aligned} R_{XX}(\mu = 0) &= R_{XX}(\mu = 1) + \Delta R_{XX}(\mu = 1); \\ R_{XX}(\mu = 0) &\approx R_{XX}(\mu = 1) + \Delta R_{XX}(\mu = 2). \end{aligned} \quad (6)$$

При этом с учетом выражений (3)—(6) можно получить:

$$\begin{aligned} R_{XX}(\mu = 0) &\approx R_{XX}(\mu = 1) + \Delta R_{XX}(\mu = 1) \approx \\ &\approx R_{gg}(\mu = 1) + [R_{gg}(\mu = 2) - R_{gg}(\mu = 3)]. \end{aligned}$$

Следовательно, выражение (2) можно представить в виде

$$\begin{aligned} R_{gg}(\mu = 0) &= R_{gg}(\mu = 1) + [R_{gg}(\mu = 2) - \\ &- R_{gg}(\mu = 3)] + 2R_{X\epsilon}(\mu = 0) + R_{\epsilon\epsilon}(\mu = 0). \end{aligned}$$

Известно, что дисперсии помехи можно определить по выражению

$$\begin{aligned} R_{gg}(\mu = 0) &= D_{\epsilon} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [g^2(i\Delta t) + \\ &+ \dot{g}(i\Delta t)\dot{g}(i+2)\Delta t - 2\dot{g}(i\Delta t)\dot{g}(i+1)\Delta t]. \end{aligned} \quad (7)$$

Таким образом выражение (3) можно привести к виду

$$\begin{aligned} R_{X\epsilon}(\mu = 0) &\approx \frac{1}{2} [R_{gg}(\mu = 0) - [R_{gg}(\mu = 1) + \\ &+ (R_{gg}(\mu = 2) - R_{gg}(\mu = 3))] - D_{\epsilon}]. \end{aligned} \quad (8)$$

Из выражения (7) по формуле

$$\begin{aligned} R_{X\epsilon\epsilon}^*(\mu = 0) &= \frac{1}{2} [R_{gg}(\mu = 0) - [R_{gg}(\mu = 1) + \\ &+ (R_{gg}(\mu = 2) - R_{gg}(\mu = 3))] \end{aligned} \quad (9)$$

можно определить значение помехоиндикатора $R_{X\epsilon\epsilon}^*(\mu = 0)$.

В выражениях (7)—(9) вычисление оценок $R_{gg}(\mu = 0)$, $R_{gg}(\mu = 1)$, $R_{gg}(\mu = 2)$ выполняется по традиционному алгоритму. Поэтому практическую реализацию формулы (8), (9) можно считать доступной, надежной и удобной. Естественно, что после определения $R_{XX}(\mu = 0)$, $R_{X\epsilon}(\mu = 0)$ и D_{ϵ} вычисле-

ние коэффициента корреляции $r_{X\epsilon}$ можно достаточно легко осуществить по формуле

$$r_{X\epsilon} \approx \frac{R_{X\epsilon}(\mu = 0)}{\sqrt{R_{XX}(\mu = 0)D_{\epsilon}}} = \frac{R_{X\epsilon}}{\sqrt{(D_g - D_{\epsilon})D_{\epsilon}}}. \quad (10)$$

Понятно, что при мониторинге зарождения АСП в период времени T_0 оценки дисперсии помехи $D_{\epsilon\epsilon}$ помехоиндикатора $R_{X\epsilon\epsilon}^*(\mu = 0)$, взаимно корреляционных функций, $R_{X\epsilon}(\mu = 0)$ и коэффициент корреляции $r_{X\epsilon}$ между полезным сигналом и помехой сейсмоакустического сигнала, получаемого на выходе гидрофона, установленного на устье скважины, будут близки к нулю. В период времени T_1 эти оценки будут отличны от нуля.

Интеллектуальная система получения сейсмоакустической информации от глубинных пластов земли и помехомониторинга АСП

Схема сейсмоакустической станции АСП приведена на рис. 1 (см. вторую сторону обложки). Для получения информации от глубинных (3...6 км) сейсмопроцессов в качестве канала связи используются консервированные нефтяные скважины. В блоке 2 по вышеуказанным технологиям анализируется сейсмоакустический сигнал, определяются соответствующие оценки. Блок 1 состоит из сейсмического и акустического (гидрофона) датчиков, которые устанавливаются на устье скважины глубиной 3...6 км. Блок 3 представляет собой стандартную сейсмоаппаратуру, позволяющую фиксировать и оценивать силу сейсмоколебаний. Блок 4 и сервер центра мониторинга выполняют функцию идентификации АСП с результатами регистрации землетрясений на станциях сейсмической службы [12—17].

На начальном этапе в блоке 2 по алгоритмам (7)—(10) определяются соответствующие оценки сейсмоакустических сигналов, полученных от гидрофонов блока 1. Эти сигналы передаются в сервер мониторинга, где они запоминаются. В течение длительного времени T_0 как в блоке 2, так и на сервере формируются и запоминаются указанные оценки. Одновременно с этим в течение времени T_0 также определяются оценки сигналов от наземной сейсмоаппаратуры 3 и аналогичным образом регистрируются. По истечении времени T_0 этот процесс продолжается пока текущие оценки сигналов, полученные от соответствующих датчиков, отличаются от предыдущих на величину, большую установленных пороговых уровней.

При этом соответствующая информация передается серверу центральной системы. Таким образом, в системе в начале периода T_1 по оценкам сейсмоакустических сигналов, полученным от вы-

ходов гидрофонов, установленных на устье стального ствола скважины, формируется информация о начале аномальных сейсмопроцессов. В то же время в начале периода T_2 (сильные сейсмоколебания) блок 3 улавливает соответствующий сигнал от стандартных наземных станций и определяет магнитуды сейсмоколебаний. Информация об этом также передается как в блок 4, так и на сервер, где определяется разность времени получения сигналов в блоках 2 и 3 соответственно. В блоке 4 и на сервере в процессе эксплуатации параллельно происходит обучение и идентификация АСП с использованием известных технологий распознавания, в том числе нейросетевых. После определенного этапа обучения на сервере и в блоке 4 определяется приближенное значение магнитуды и время регистрации землетрясения стандартными сейсмостанциями.

Результаты экспериментов по сейсмоакустическому мониторингу АСП на острове Песчаный Каспийского моря

Экспериментальный вариант сейсмоакустической станции (САС) с 01.07.2010 установлен на устье консервированной нефтяной скважины № 5 глубиной 3500 м. Скважина заполнена водой, и в связи с этим в качестве датчика использован гидрофон марки ВС 312. На рис. 2 (см. вторую сторону обложки) приведен внешний вид станции после установки. В последующем для ее защиты от солнца, ветра и других внешних факторов было построено помещение.

В состав станции входят следующие технические средства:

- системный блок PC Pentium IV;
- контроллер станции типа Micro PC фирмы Fastwel;
- сейсмический акселерометр CMG 5T фирмы GURALP LTD;
- гидрофон ВС 321 Зеленоград;
- усиливающие и нормирующие элементы;
- терминал MC35i фирмы Siemens, который образует Internet-канал по GPRS.

За время эксплуатации станции с 01.07.2010 по 15.01.2011 азербайджанскими сейсмостанциями были зарегистрированы следующие землетрясения*:

- 09.10.2010. Масаллы, 00:58:11 М: 3.5 d: 12 km;
- 11.10.2010. Ширван, 22:50:23 М: 3.9 d: 37 km;
- 17.10.2010. Имишли, 07:20:38 М: 3.4 d: 18 km;
- 20.11.2010. Море, 05:05:48—08:29:29 М: 3.5 d: 50 km;
- 25.11.2010. Баку. Сангачалы, 09:15:21 М: 3.04 d: 36 km.

На рис. 3, а—д приводятся результаты мониторинга АСП с помощью САС. Как видно из записей, оценки дисперсии помехи сейсмоакустического

сигнала, получаемые от выхода гидрофона, более чем за 5...10 ч до землетрясения резко увеличиваются. Это продолжается до окончания землетрясения. Отметим, что расстояние от САС до самых отдаленных землетрясений г. Масаллы составляет около 200 км.

На рис. 3, е приведена запись оценки взаимно корреляционной функции $R_{X\varepsilon}(\mu)$ между полезным сигналом $R_{X\varepsilon}(i\Delta t)$ и помехой $\varepsilon(i\Delta t)$ относительно землетрясений в Азербайджане (21.01.2011 в 1:58:54), в Грузии (23.01.2011 в 07:51:23.0), в Таджикистане (24.01.2011 в 06:45:29.0) и на границе с Турцией, Арменией и Ираном (3 землетрясения — 25.01.2011 в 03:56:12; в 04:02:32; в 07:40:04). Все графики опережают землетрясения на 2...5...7 часов. На рис. 3, ж приведена растянутая запись оценки взаимно корреляционной функции относительно землетрясения в Грузии (вблизи Кутаиси) от 23.01.2011. Время 07:51:23 за 5...6 часов до начала землетрясения было четко зафиксировано АСП. На графиках указано бакинское время.

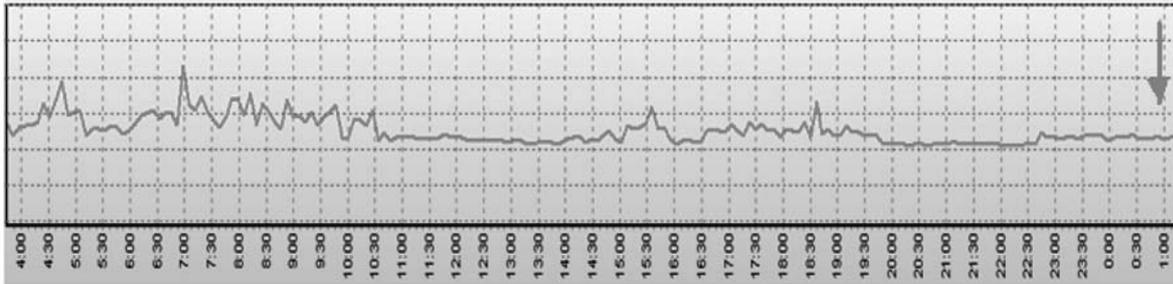
Анализ алгоритмов помехоанализа показывает, что только оценки помехи $\varepsilon(i\Delta t)$ надежно и достоверно выявляют начало зарождения аномальных сейсмических процессов.

Таким образом, первые результаты экспериментов показывают, что с помощью САС имеется возможность осуществить мониторинг в радиусе более, чем 150...200 км, а также за 2...10 часов до землетрясения. Из этих результатов следует, что разность времени зарождения АСП и времени его критического состояния, которое приводит к землетрясению, меняется в зависимости от места расположения очага землетрясения. На основании результатов также можно предположить, что сейсмоакустические волны при распространении от очага землетрясения в результате сопротивления некоторых пластов отражаются и меняются в горизонтальном направлении. Также можно предположить, что именно благодаря достаточной мощности эти волны могут преодолевать большие расстояния.

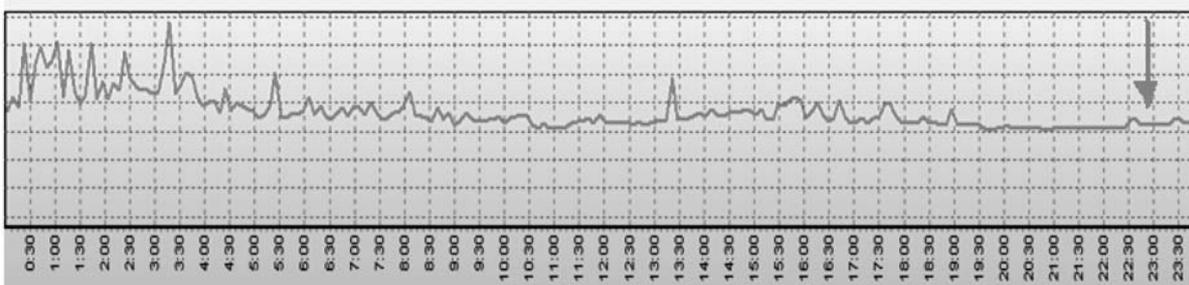
Эти экспериментальные результаты показывают целесообразность построения таких САС. С учетом этого в настоящее время завершается создание еще двух станций, которые планируется установить на скважине № 427 Ширваннефти и на одной из скважин Сиязаннефти. Очевидно, что с помощью трех САС можно определить направление очага землетрясения.

В дальнейшем путем интеграции этих САС с стандартными сейсмическими станциями возможно создание интеллектуальных систем, которые после определенного периода обучения будут иметь возможность осуществить краткосрочный прогноз землетрясений с достаточной надежностью.

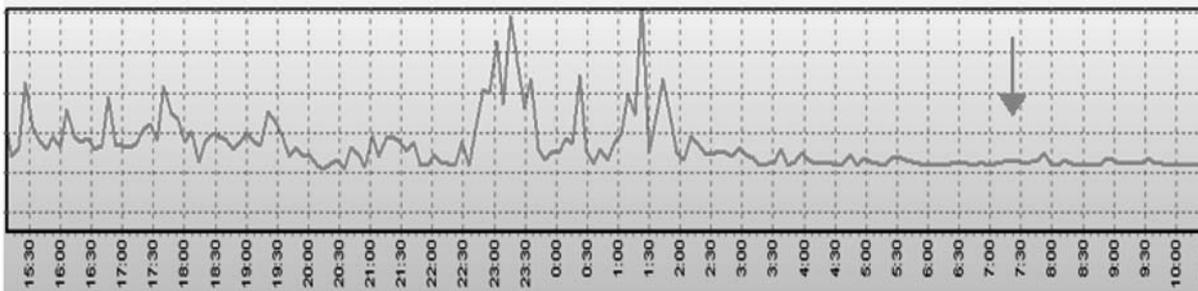
* М — магнитуда; d — расстояние.



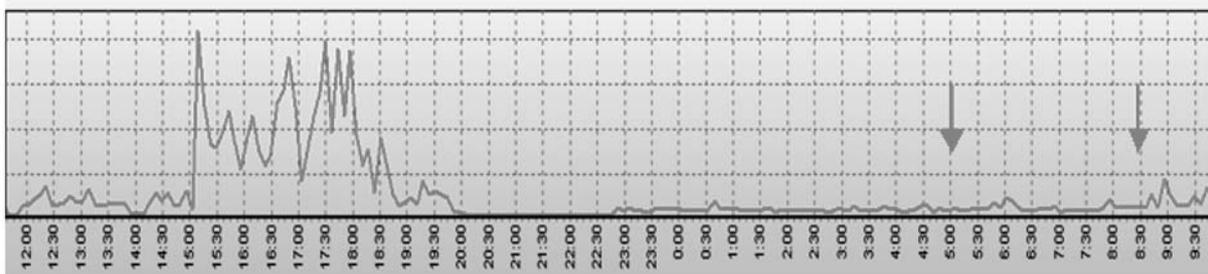
а) 08.10.2010. Масаллы 00:58:11 М:3.5 d:12 км; начало АСП примерно в 04:30 08.10.2010 г., землетрясение в 00:58:11 09.10.2010



б) 11.10.2010. Ширван 22:50:23 М:3.9 d:37 км; начало АСП примерно в 00:30 11.10.2010 г., землетрясение в 22:50:23 11.10.2010

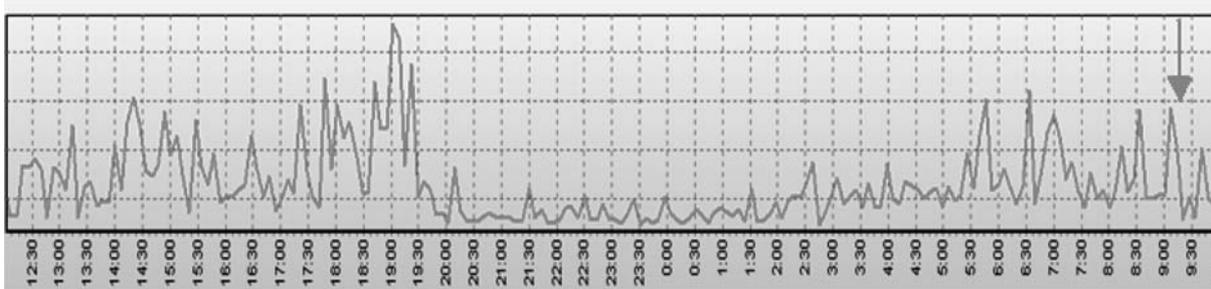


в) 16-17.10.2010. Имишли 07:20:38 М:3.4 d:18 км; начало АСП примерно в 15:30 16.10.2010 г., землетрясение в 07:20:38 17.10.2010

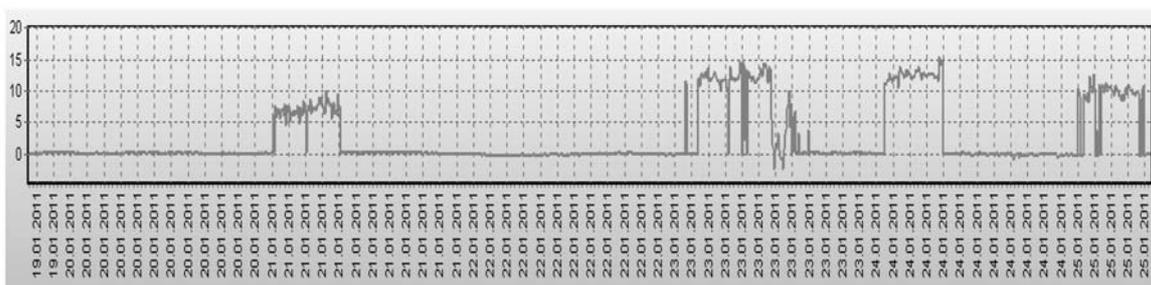


з) 19-20.11.2010. В море 05:05:48--08:29:29, 20.11.2010 М:3.5 d: 50 км; дисперсия помехи. Начало АСП примерно в 12:20 19.11.2010, два землетрясения в 05:05:48 и в 08:29:29 20.11.2010

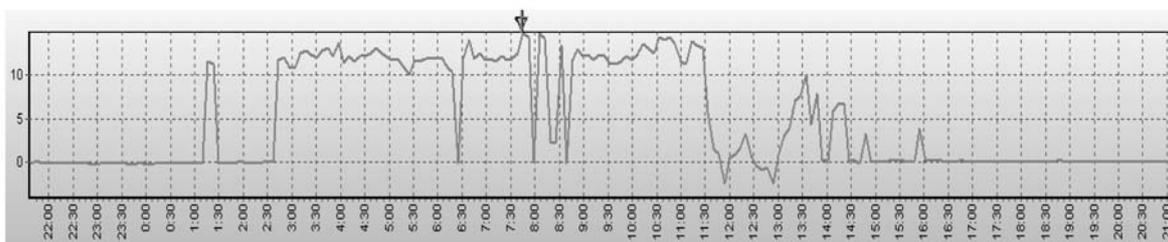
Рис. 3 (начало). Результаты мониторинга АСП с помощью САС (а–з): а–д — дисперсия помехи; е, ж — оценка взаимно корреляционной функции



д) 25.11.2010 г. Баку. Сангачалы 09:15:21 М: 3.04 d: 36 км;
начало АСП примерно в 12:10 24.11.2010,
землетрясение в 09:15:21 25.11.2010



е) Азербайджан (21.01.2011 в 01:58:54), Грузия (23.01.2011
в 07:51:23.0), Таджикистан (24.01.2011 в 06:45:29.0) и на границе Турции
с Ираном (три землетрясения 25.01.2011 в 03:56:12.; 04:02:32.; 07:40:04.)



ж) 23.01.2011 Грузия, вблизи Кутаиси 07:51:23 М: 4.5 d: 10 км;

Рис. 3 (продолжение). Результаты мониторинга АСП с помощью САС (д—ж):
а—д — дисперсия помехи; е, ж — оценка взаимно корреляционной функции

Заключение

Время опережения регистрации зарождения АСП сейсмоакустической станцией по сравнению со стандартной сейсмоаппаратурой обусловлено двумя факторами. Во-первых, маломощные сейсмоакустические волны, возникающие в начале зарождения аномальных сейсмопроцессов, через некоторые пласты распространяются в горизонтальном направлении в виде шума, который достигает стальных труб скважины на глубине более 3...6 км. Они преобразовываются в акустические сигналы и передаются со скоростью звука на поверхность земли, где улавливаются с помощью гидрофона блока 1 (см. рис. 1 на второй стороне обложки). В то же

время сейсмические волны от сейсмопроцессов ощущаются на поверхности Земли через определенный промежуток времени после достижения ими критического уровня. Поэтому они регистрируются сейсмоприемниками стандартной наземной аппаратуры заметно позже. Во-вторых, применение робастной помехотехнологии позволяет анализировать шумы, полученные от акустических датчиков, и фиксировать аномальные сейсмопроцессы в начале их зарождения, что обычно на значительное время опережает начало их выявления при применении традиционных технологий анализа сигналов. В результате благодаря этим двум факторам появляется возможность на основе получен-

ной сейсмоакустической информации опередить время индикации начала предстоящего землетрясения по сравнению со станциями сейсмслужбы. Это, в свою очередь, может дать возможность своевременного предупреждения населения об опасности возникновения сильного землетрясения.

Отметим, что система также может быть использована для мониторинга возможных испытаний больших и малых атомных бомб и других экспериментов, связанных с производством военной техники в масштабе регионов. Сеть таких систем позволит полностью контролировать проведение подобных испытаний и всевозможных военных маневров.

Результаты экспериментов с использованием САС на острове "Песчаный" показали, что за несколько часов до землетрясения с помощью оценок помехоиндикатора дисперсии помехи и коэффициента корреляции между помехой и полезным сигналом удастся выявить время начала аномальных сейсмических процессов в радиусе более 100...250 км. Однако для идентификации координат и магнитуды землетрясения необходимо создание еще двух аналогичных станций и их интеграция со стандартными сейсмостанциями.

Список литературы

1. Aliev T. Digital noise monitoring of defect origin, London, Springer-Verlag, 2007.
2. Aliev T. A., Aliev E. R. Interference Technology of Early Control of Defect Origin in Technical Objects. Proceedings of the 2007 Industrial Engineering Research Conference (Critical Role in a Flat World HE Annual Conference & Expo 2007, may 19-23, Nashville, Tenn. P. 682—687).
3. Descherevsky A. V., Sidorin A. Ya. Seasonal variations in natural processes and atmospheric precipitation // Ann. Geophys. February 2004. V. 47. № 1. P. 73—81.
4. Aliev T. A. Robust Technology with Analysis of Interference in Signal Processing, New York, Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2003.
5. Bendat J. S., Allan G. P. Random Data, Analysis & Measurement Procedures, Wiley-Interscience, 2000.
6. Aliev T. A., Abbasov A. M., Guluyev G. A., Rzayev A. H., Pashayev F. H. Positionally-binary and spectral indicators of micro-changes in technical conditions of objects of the control. Automatic Control and Computer Sciences, Allerton Press, Inc., New York. 2009. № 3.
7. Aliev T. A. Fundamentals of interference monitoring of the defect origin beginning. Automatic Control and Computer Sciences, Allerton Press, Inc., New York. 2006. № 5. P. 12—24.
8. Aliev T. A. Theoretical foundations of interference analysis of noisy signals. Automatic Control and Computer Sciences, Allerton Press, Inc., New York. 2004. V. 38. № 3. P. 18—27.
9. Aliev T. A., Musaeva N. F., Sattarova U. E. Robust technologies for calculating normalized correlation functions. Cybernetics and Systems Analysis, Springer New York. 2010. № 1. P. 153—166.
10. Aliev T. A., Abbasov A. M. Digital technology and the system of interference monitoring of the technical state of constructive objects, and the system of the signalling of abnormal seismic processes // Automatic Control and Computer Sciences, Allerton Press, Inc. 2005. № 6. P. 3—10.
11. Алиев Т. А., Аббасов А. М., Алиев Э. Р., Гулуев Г. А. Цифровая технология и система получения и анализа информации от глубинных пластов земли с целью помехомониторинга технического состояния социально-значимых объектов // Автоматика и вычислительная техника. 2007. № 2. С. 3—15.
12. Алиев Т. А., Ализаде А. М., Егирмишли Г. Д., Гулуев Г. А., Пашаев Ф. Г., Рзаев А. Г. Интеллектуальная сейсмоакустическая система мониторинга начала зарождения аномальных сейсмических процессов // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46, № 1. С. 27—41.
13. Aliev T. A. Method of forecasting the time of registration of underground oscillations by ground based seismic stations. Application for European and Asian patent No 200800859/26, Priority — April 14, 2008.
14. Aliev T. A., Alizada T. A., Abbasov A. A. Method for monitoring the beginning of anomalous seismic process. International Application No PCT/AZ2005/000006, Pub.No WO 2006/130933, International Filing Date — December 19, 2005.
15. Aliev T. A., Abbasov A. M., Aliev E. R., Guliyev G. A. Method for monitoring and forecasting earthquakes. European Asian patent No 011003. International Application No PCT/AZ2006/000000, Pub. No WO 2007/143799, International Filing Date — June 16, 2006.
16. Aliev T. A., Abbasov A. A., Aliev E. R., Guliyev G. A. Method for monitoring and forecasting earthquakes. International Application No PCT/AZ2006/000000 Pub.No WO 2007/143799, International Filing Date — June 16, 2006.
17. Алиев Т. А., Кадымов Р. М., Сыроваткина Е. С. Устройство для регистрации сейсмических сигналов на магнитную ленту. Авторское свидетельство № 1030752А, 23.07.83.

ИНФОРМАЦИЯ



С 6 по 9 июня 2011 г. в Москве в ЦВК «Экспоцентр» состоится
20-я Международная выставка
электрооборудования для энергетики, электротехники и электроники

«Электро-2011»,

а также 9-я специализированная выставка
энергосберегающих технологий и инноваций в электротехнике

«ЭлектроТехноЭкспо-2011».

На выставках будут представлены национальные экспозиции
Германии, Франции, Испании, Италии, России, Индии, Турции, Китая и др.

Подробная информация содержится на сайтах данных выставок: www.elektro-expo.ru и www.ete-expo.ru

Контактная информация:

Тел.: (499) 795-38-14 / 27-95, факс: (495) 609-41-68

E-mail: elektro@expocentr.ru, et@expocentr.ru

А. М. Вульфин, аспирант,
А. И. Фрид, д-р техн. наук, проф.,
Уфимский государственный
авиационный технический университет,
vulfin.alexey@gmail.com

Интеллектуальная автоматизированная система поддержки принятия решений для технологического комплекса приема—сдачи нефти

Решается задача выявления и распознавания технологических событий и состояний узла приема—сдачи нефти на основе анализа расходных параметров потоков и давления в узлах инженерной сети. Предложена методика построения нейросетевого модуля диагностики состояния объекта в рамках методологии Data Mining.

Ключевые слова: адаптивное предсказание, распределенная нейронная сеть с временной задержкой, метод обобщенного отношения правдоподобия, обнаружение сбоев

Введение

Значительные капиталовложения нефтяных компаний, направленные на создание систем автоматизации процессов нефтегазодобычи, позволили значительно упростить доступ к накапливаемым данным реального времени (РВ), вводимым вручную или автоматически собираемым на промыслах с помощью средств измерения и систем телемеханики [1]. Однако низкое качество (недоверенность) этих данных не позволяет непосредственно использовать их для контроля состояния, прогнозирования хода технологических процессов и планирования мероприятий, направленных на повышение эффективности нефтегазодобывающего производства. Для решения этих задач необходимо использовать модели объектов технологического комплекса нефтегазодобычи (ТКН) и специализированные модели данных, характеризующих их состояние, а также интеллектуальные автоматизированные системы поддержки принятия решений уровня технологического объекта (ИАС ППР).

Объекты приема—сдачи нефти (ПСН) являются стратегически важными объектами ТКН, поскольку обеспечивают выполнение операций приема подготовленной нефти от нефтегазодобывающих подразделений нефтяной компании и их сдачу транспортирующей компании или непосредственно потребителю. Качество контроля состояния технологического комплекса ПСН непосредственно сказывается на качестве выполнения операций приема и сдачи нефти, поэтому некачественный контроль параметров состояния объектов ПСН

может приводить к существенным потерям при ненадлежащем его выполнении.

Целью работы является повышение эффективности систем учета принимаемой и отпускаемой нефти, а также оперативности анализа состояния объектов ПСН с вытекающими отсюда возможностями контроля и управления в нормальных и критических ситуациях.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- сформулировать требования к имитационным моделям технологического комплекса ПСН на основе натуральных данных для совершенствования процесса учета принимаемой и сдаваемой нефти;
- разработать модель распознавания ситуаций, возникающих на объектах ПСН, на основе нейросетевой обработки временных рядов, характеризующих технологический процесс;
- выполнить проектирование и разработку программного комплекса согласно стандартам POSC (Petrotechnical Open Software Corporation) и в рамках методологии Data Mining, реализующего полученные модели и функции в виде ИАС ППР режима реального времени для оператора технологического объекта.

Для решения поставленных задач предлагается использовать:

- 1) распределенную нейронную сеть прямого распространения с задержкой по времени как нелинейный фильтр нестационарной среды;
- 2) расширенный метод обобщенного отношения правдоподобия для адаптивной пороговой сегментации;
- 3) модифицированный алгоритм формирования групп классов для кластеризации и классификации сегментов.

Проблема разработки интеллектуальных автоматизированных систем в нефтегазовой отрасли

В нефтегазовой отрасли (НГО) автоматизированные системы различных организационных уровней, функционирующие в условиях неполноты и противоречивости входной информации, должны быть интеллектуальными. Поступающую от технологических объектов информацию они должны дополнять данными, формируемыми на основе опыта, накопленного как непосредственно во взаимодействии с объектом, так и опосредованно — через общение с экспертами и специалистами НГО [1, 2].

Разрабатываемая ИАС ППР решает задачи автоматизации технологического объекта и относится к нижнему уровню иерархии корпоративных информационных систем предприятия.

Характеристики объекта автоматизации. Объектом автоматизации является технологический комплекс ПСН, оснащенный локальными АСУ ТП,

которые соединены между собой с помощью системы сбора и передачи данных и вместе образуют единый автоматизированный технологический комплекс.

Одной из основных функций технологического комплекса ПСН является контроль выполнения учетных операций [1]. Разрабатываемая ИАС ППР функционирует на уровне, где осуществляется просмотр и анализ информации, поступающей с узлов-доноров и приемосдаточных пунктов (ПСП), и предназначена для упрощения анализа параметров работы технологического узла.

На основании совокупности накопленных данных и протоколов анализа состояния узла формируется технологическая легенда, далее используемая для построения нейросетевой системы выявления и распознавания технологических событий.

Основным аналитическим средством контроля и диагностики состояния инженерной сети является сведение балансов многокомпонентных потоков по отдельным узлам и участкам сети на основе анализа выборок параметров состояния, путем проверки условия баланса [1–5].

Анализ расходных параметров потоков и давления в узлах сети лежит в основе построения системы распознавания технологических событий и является базовой составляющей описываемой ИАС ППР [3, 4].

Характеристики процессов в узлах сети объекта ПСН. Расходные параметры потоков и давление в узлах сети представляют собой нестационарные технологические процессы, поскольку характеризуются:

- переменными условиями работы аппаратуры, когда параметры среды резко меняются (распространение волны давления) [3];
- длительным временем работы аппаратуры, когда динамические характеристики системы меняются, и один и тот же вход вызывает различные реакции системы [3, 4].

По характеру смены одного квазистационарного участка другим временные ряды, описывающие рассматриваемые технологические процессы, являются рядами с дрейфовой динамикой [5].

Модель нейросетевой ИАС ППР в рамках методологии Data Mining. В качестве критерия достоверности контроля и диагностики состояния объекта ПСН может рассматриваться подтверждение на последующих интервалах анализа тех решений о причинах нарушения баланса, которые были приняты на предыдущих интервалах.

Для применения современных методов диагностики к реальной инженерной сети требуется адаптировать эти методы к реальным условиям, а именно:

- отфильтровать и верифицировать исходные данные;

- набрать статистику изменений параметров в отдельных узлах сети;
- зафиксировать прецеденты нарушений баланса потоков в этих узлах;
- разработать диагностические правила для распознавания различных ситуаций нарушения баланса в узлах инженерной сети и сформулировать рекомендации по применению правил диагностики в этих ситуациях (определить границы их применимости) и т. д. [1, 2].

Одной из основных проблем при исследовании временных рядов, описывающих технологические объекты, является зашумление полезного сигнала. К таким сигналам возможно применение технологии Data Mining [6].

Разработка ИАС ППР на основе нейросетевой обработки временных рядов, характеризующих технологические процессы узла ПСН

Сегментации нестационарных временных рядов для выделения ситуаций, возникающих на объектах ПСН. Технологическая система может быть охарактеризована через коэффициенты ее динамической модели, передаточной функции или связанных с ней параметров. Технологические сигналы, будучи проявлением динамических систем, являются нестационарными, и их статистические характеристики на протяжении всего времени или, по крайней мере, на протяжении времени наблюдения существенно меняются [7–10].

В ходе обзора существующих подходов к адаптивной сегментации нестационарных временных рядов как ключевого этапа методологии Data Mining был выявлен ряд недостатков [4], для преодоления которых предложено использовать:

- распределенную нейронную сеть прямого распространения с задержкой по времени (time lagged feedforward network, TLFN) для построения модели квазистационарного сегмента;
- метод обобщенного отношения правдоподобия для адаптивной пороговой сегментации;
- модифицированный алгоритм формирования групп классов (АФГК) для кластеризации и классификации сегментов.

Это позволяет объединить несколько этапов анализа в рамках методологии Data Mining.

Распределенная TLFN как предсказательное звено в методе обобщенного отношения правдоподобия. Конструкция распределенной сети прямого распространения с задержкой по времени (TLFN) основывается на применении нейронного фильтра с несколькими входами в качестве пространственно-временной модели нейрона. Это объясняет их способность работать в нестационарной среде [11].

Непрерывное обучение, основанное на градиентном спуске, осуществляется медленно из-за доверия к мгновенным оценкам градиентов. Несвязный расширенный фильтр Калмана и алгоритм DEKF (Decoupled extended Kalman filter) для распределенной TLFN позволяют существенно облегчить вычисления и ускорить процесс обучения [11, 12].

Метод обобщенного отношения правдоподобия (ООП) [8, 9] использует опорное окно, которое постоянно увеличивается в размерах до тех пор, пока не будет отмечена новая граница. В качестве тестового окна используется скользящее окно с постоянной длительностью. Для расчета ошибки предсказания используется нелинейный фильтр на основе распределенной TLFN.

Преимуществом расширяющегося опорного окна является то, что оно содержит максимальное количество информации, доступной от начала нового сегмента до текущего момента времени. Определяются три различных набора данных: расширяющееся опорное окно, скользящее тестовое окно и объединенное окно, сформированное путем конкатенации двух первых. Затем с использованием ошибки предсказания распределенной TLFN вычисляется мера расстояния для этих трех наборов данных.

В [8] показано, что ООП является мерой статистического сходства опорного и тестового наборов данных. Расстояние ООП является также мерой потери информации, происходящей в случае, если никакие границы сегмента не установлены в соответствии с положением тестового окна.

Алгоритм адаптивной сегментации нестационарных временных рядов с помощью распределенной TLFN и расширенного метода обобщенного отношения правдоподобия является расширенной версией [10] (рис. 1).

1. Инициализация:

а) помещение опорного окна длиной m_0 в начало исследуемого временного ряда;

б) создание распределенной TLFN с $inpU$, $hidU$, $outU$ нейронами в, соответственно, входном, скрытом и выходном слоях. Случайная инициализация весов сети;

с) разбиение участка временного ряда $s(1:m)$ на образцы обучающего множества длиной $inpU$ с шагом k ;

д) обучение распределенной TLFN с помощью алгоритма DEKF-BPTT* в течение τ эпох.

*DEKF-BPTT (Decouplet Extended Kalman Filter with Backpropagation Trough Time — расширенный несвязный фильтр Калмана и алгоритм обратного распространения).

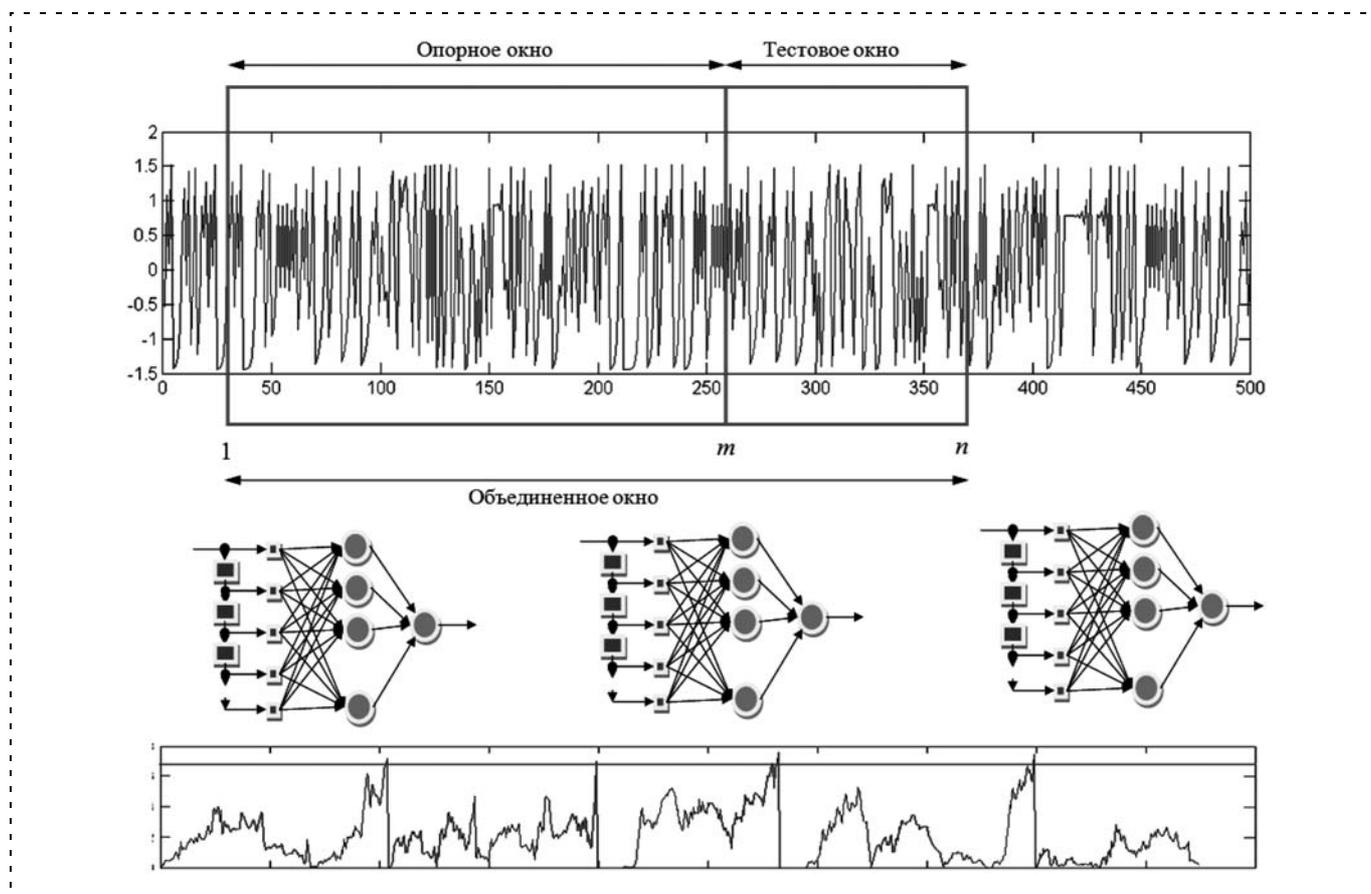


Рис. 1. Процесс выделения квазистационарного сегмента с помощью нелинейного фильтра, описываемого распределенной TLFN

2. Анализ тестового окна:

- а) рассчитывается обобщенная квадратичная ошибка (ОКО) предсказания для опорного окна;
- б) участок временного ряда $s(m : n)$ длиной d подается на вход распределенной TLFN в целях оценки ошибки предсказания ОКО;
- с) рассчитывается ОКО предсказания для объединенного окна;
- д) определяются значения максимальной логарифмической оценки правдоподобия $H(1 : n)$, $H(1 : m - 1)$ и $H(m : n)$ для соответствующих окон.

3. Пороговое сравнение полученной оценки расстояния ООП $d(n)$:

- а) если $d(n) < Th_1$, то
 - i) тестовое окно присоединяется к расширяемому опорному;
 - ii) распределенная TLFN дообучается на новых образцах тестового окна;
 - iii) осуществляется сдвиг тестового окна и выполняется переход к п. 2;
- б) если $d(n) > Th_1$, то
 - i) устанавливается граница сегмента, выполняется переход к п. 1.

В реальном применении желательно получать излишнюю сегментацию временного ряда, так как последующее применение процедуры кластеризации позволит объединить смежные сегменты со сходными характеристиками.

Модифицированный алгоритм формирования групп классов для кластерного анализа сегментированных временных рядов. Предположение о мгновенном переключении между различными типами динамики лежит в основе большинства пороговых методов сегментации [5, 8]. На участке дрейфа между двумя соседними квазистационарными сегментами

предполагается одновременное сосуществование нескольких типов динамики. Исходный алгоритм построения иерархических нейросетевых классификаторов описан в [5]. Ниже представлен модифицированный АФГК.

Пусть число выходных нейронов в многослойном перцептроне (МСП) равно начальному числу получившихся участков. Определяется минимальный размер сегмента (МРС). Методика тренировки МСП:

- 1) обучение МСП с помощью стандартного метода обратного распространения ошибки в течение T эпох;

- 2) анализ статистики ответов МСП на тренировочном наборе. Рассматривается множество активностей нейронов выходного слоя $O_j(S_i), j = 1, \dots, K$ на предъявление примера $S_i (i = 1, \dots, N)$ как оценка вероятности принадлежности данного примера к каждому из K классов;

- 3) оценка функции распределения вероятностей принадлежности примера S к каждому из K классов путем усреднения ответов НС по окну анализа длины W :

$$P_j = \sum \frac{O_j(S_i)}{W}, i = 1, \dots, W, j = 1, \dots, K,$$

где суммирование ведется по всем примерам S_i , попадающим в окно анализа, а $O_j(S_i)$ — множество активностей j нейронов выходного слоя на предъявление примера S_i ; классы m , для которых выполняется условие

$$P_m < \frac{P_{win}}{v}, P_{win} = \operatorname{argmax}(P_j), j = 1, \dots, K,$$

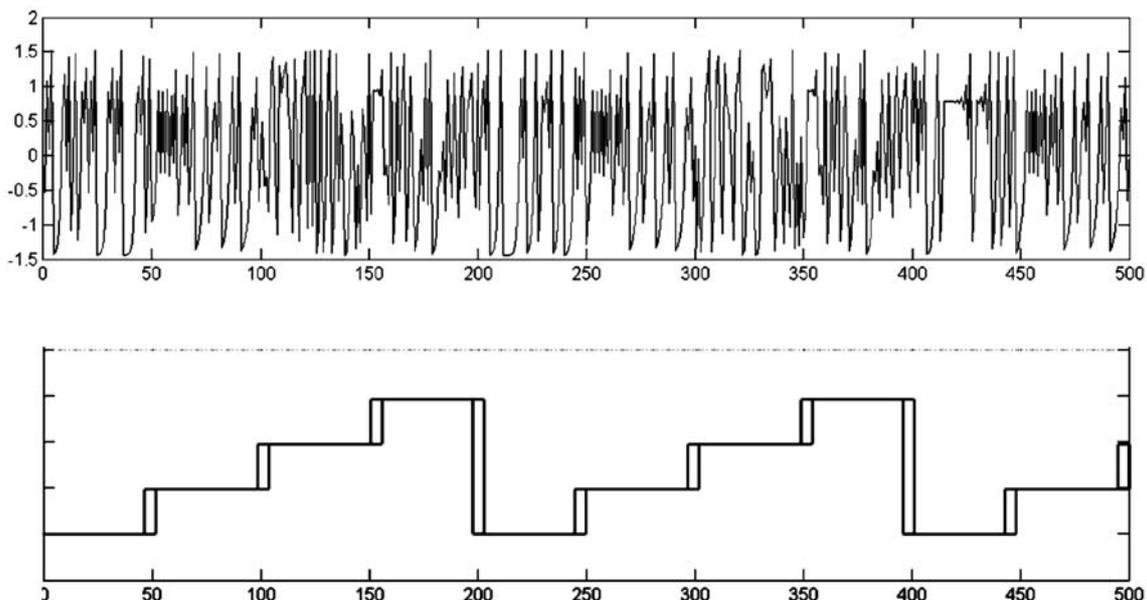


Рис. 2. Пример сегментации псевдохаотического временного ряда с помощью TLFN-DEKF-BPTT-GLR-АФГК

где ν — коэффициент отношения выходного значения нейрона-победителя к выходному значению нейрона m , будем считать незначимыми, и оценку функции распределения вероятности для таких нейронов примем равной нулю, $P_m = 0$. Сумму вероятностей для оставшихся классов необходимо перенормировать на 1. Полученный вектор P_m используется как желаемый ответ для примера S ;

4) после окончания анализа голосования временной ряд разбивается на новые сегменты в соответствии с измененной принадлежностью к классам. Если число образцов в каком-либо однородном сегменте меньше, чем МРС, то такой сегмент присоединяется к сегменту, расположенному левее;

5) в результате границы сегментов, изначально расположенные равномерно, могут быть передвинуты. После формирования нового разбиения на сегменты тренировка продолжается;

б) последовательность операций "тренировка—голосование—модификация сегментов" повторяется, пока разбиение временного ряда не перестанет изменяться. Итоговое число классов, на которые был разбит временной ряд, определяется лишь по окончании тренировки МСП.

В результате работы модифицированного АФГК участки временного ряда с близкой динамикой оказываются отнесенными к одному и тому же классу, а весь временной ряд разбивается на классы с указанием типа динамики (рис. 2).

Оценка работоспособности нейросетевой системы выявления и идентификации технологических событий на узле ПСН

Для анализа были использованы данные об изменении параметров узла учета нефти системы измерения и контроля качества нефти (СИКН) [3] за

период продолжительностью в 9 дней. На узле СИКН каждые 5 с замеряется давление на выходе узла и расход нефти по пяти измерительным линиям. Для дальнейшего анализа использован временной ряд, описывающий давление на выходе узла. Общая длина ряда составляет 155520 отсчетов.

На этапе предобработки исходный временной ряд был очищен от шумов и подвергнут сегментации [3] с помощью TLFN(ДЕКФ-ВРТТ)-ООП (распределенная TLFN и модифицированный метод ООП).

Так как метод TLFN(ДЕКФ-ВРТТ)-ООП-АФГК включает помимо сегментации временного ряда этапы кластеризации-классификации согласно методологии Data Mining, то не требуется использования дополнительных шагов и процедур.

Предобработка и сегментация исходного временного ряда. Исходный технологический временной ряд, описывающий давление на выходе узла ПСН, приводится к нулевому среднему и единичному среднеквадратическому отклонению. Далее создается и обучается распределенная TLFN следующей архитектуры: 5 входных нейронов, 25 нейронов в скрытом слое и 1 выходной нейрон. Обучение проводится согласно описанному выше алгоритму. В результате временной ряд разбивается на 35 сегментов.

Кластеризация и классификация событий временного ряда с помощью АФГК. Согласно модифицированному алгоритму АФГК проводилась тренировка нейросетевой структуры следующего вида: МСП с 5 нейронами во входном слое, 20 нейронами в скрытом слое и 230 выходными нейронами (по числу выделенных TLFN сегментов). Каждые 50 эпох осуществлялась процедура объединения классов. Для сравнения в таблице приведены результаты обработки технологического ряда, полученные в [4].

Метод		Количество выделенных сегментов/классов	Коэффициент классификации подвижным окном известных событий, %	Коэффициент классификации подвижным окном смеси известных и неизвестных событий, %	Примечание
Сегментация Унификация сегментов Кластеризация Классификация	AP-ООП wavelet-разложение и AP-модель. Fuzzy c-means НСК BOOST1	548/19	78,7	61,9	Число классов определялось после процедуры кластеризации
Сегментация Унификация сегментов Кластеризация Классификация	ИНК	471/20	82	69	МСП: число нейронов по слоям 5-20-256, типов динамик 20, шаг анализа 200, скорость обучения 0,01 момент 0,5
Сегментация Унификация сегментов Кластеризация Классификация	TLFN(ДЕКФ-ВРТТ) АФГК	230/29	87	73	TLFN: число нейронов 5-25-1, МСП: число нейронов по слоям 5-20-52/230, типов динамик 29, шаг анализа 50, скорость обучения 0,01 момент 0,5

Обсуждение нейросетевых систем выявления и идентификации технологических событий на узле ПСН в рамках ИАС ППР НГО

Распределенные TLFN применимы в нестационарных средах для оценки квазистационарных сегментов, порожденных не только линейными авторегрессионными моделями.

Алгоритмы пороговой сегментации позволяют относить участки дрейфа только к одному классу, что "смазывает" границы смежных сегментов и задерживает сигнализацию о смене типа динамики, а также появляются хаотические перескоки от класса к классу на коротком временном интервале.

Анализ временных рядов с помощью однородных нейросетевых структур более предпочтителен, чем поэтапное построение многоуровневой системы обработки, что видно из таблицы.

Нейросетевая модель TLFN(ДЕКФ-ВРТТ)-АФГК функционирует в рамках методологии Data Mining, что позволяет осуществлять наиболее эффективный анализ технологических временных рядов в целях диагностики состояния узла ПСН и поддержки принятия решений оператором. TLFN(ДЕКФ-ВРТТ)-АФГК объединяет сразу несколько этапов обработки данных в рамках единой нейросетевой парадигмы и использует адаптированные базовые алгоритмы обучения НС.

Иерархический нейросетевой алгоритм классификации обладает следующими свойствами:

- сокращение вычислительной стоимости решения задачи классификации;
- обеспечение оптимального выбора признаков, используемых нейросетью для классификации данных;
- универсальность алгоритма, т. е. применимость его к возможно более широкому кругу задач.

Выводы

В работе сформулированы требования к имитационным моделям технологического комплекса ПСН на основе натурных данных, что позволило усовершенствовать процесс учета принимаемой и сдаваемой нефти.

Разработана модель распознавания ситуаций, возникающих на объектах ПСН, на основе нейросетевой обработки временных рядов, сочетающая в себе нелинейный фильтр на основе распределенной сети TLFN в совокупности с расширенным методом оценки ООП и модифицированный иерархический нейросетевой классификатор, что позволило повысить достоверность их описания.

Спроектирован и реализован программный комплекс согласно стандартам POSC и в рамках методологии Data Mining, реализующий разработанные модели и функции в виде ИАС ППР режи-

ма реального времени для оператора технологического объекта.

Протестирована работоспособность программного комплекса на имеющихся исторических данных реальной задачи распознавания ситуаций на узле ПСН. Показана эффективность данного подхода применительно к задачам ИАС нижнего уровня по сравнению с существующими, так как разработанная система позволяет:

- увеличить число классов выявляемых событий на 30 % путем введения субклассов, описывающих участки смены типа динамических параметров квазистационарных сегментов;
- преодолеть ограничение принятия гипотезы (условной) стационарности процесса второго рода;
- получить количественное описание и характеристики технологических событий, как то: временные границы приходящих событий и квазистационарных сегментов, тип и параметры динамики таких сегментов;
- увеличить на 11 % число выявляемых технологических событий.

Приведенные выше результаты позволяют повысить эффективности систем учета принимаемой и отпускаемой нефти, а также оперативность анализа состояния объектов ПСН.

Список литературы

1. Зозуля Ю. И. Интеллектуальные нейросистемы. М.: Радиотехника, 2003. С. 14—51.
2. Зозуля Ю. И. Анализ баланса потоков жидкости в узлах инженерной сети на основе ее нейросетевой модели // VI Всеросс. конф. "Нейрокомпьютеры и их применение". 2000. С. 53—55.
3. Вульфин А. М., Гиниятуллин В. М., Фрид А. И. Нейросетевая модель выявления и распознавания технологических ситуаций в рамках методологии Data Mining // Научная сессия МИФИ-2010. XII Всеросс. науч.-техн. конф. "Нейроинформатика-2010". Сб. научн. тр. В 2-х ч. Ч. 1. М.: МИФИ, 2010. С. 75—84.
4. Vulfin A. M., Giniyatullin V. M., Frid A. I. Neuralbase Model for Detection and Recognition of Technological Situations within the Scope of Data Mining // StrategyOptical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2010. Vol. 19. N 3. P. 207—212.
5. Орлов Ю. Разработка и исследование алгоритмов построения иерархических нейросетевых комплексов для классификации данных физических измерений. Дисс. на соискание ученой степени д-ра физ.-мат. наук, 2003. С. 23.
6. Барсегян А. А., Куприянов М. С., Степаненко В. В. Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. С. 67—93.
7. Basseville M., Benveniste A. Sequential segmentation of non-stationary digital signals using spectral analysis // Information Sciences. 1983. № 29. С. 57—73.
8. Рангайян Р. Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход: Пер. с англ. под ред. А. Немирко. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. С. 278—381.
9. Bodenstein G., Schneider W., Malsburg C. Computerized EEG pattern classification by adaptive segmentation and probability-density-function classification. Description of the method // Computers in biology and medicine. 1985. № 15. С. 297—313.
10. Willsky A., Jones H. A generalized likelihood ratio approach to the detection and estimation of jumps in linear systems // IEEE Transactions on Automatic Control. 1976. №21. С. 108—112.
11. Хайкин С. Нейронные сети, полный курс. М.: Вильямс, 2008. С. 809—828, 960—968.
12. Haykin S. Adaptive Filter Theory // Prentice Hall, 1995. P. 338—701.

Г. Н. Лебедев, д-р техн. наук, проф.,
Московский авиационный институт
(государственный технический университет),

И. Е. Кузнецов, канд. геогр. наук, докторант,
vaiumet@mail.ru,

В. В. Михайлов, д-р техн. наук, проф.,
начальник 1-го факультета,
mvv987@pochta.ru,

Военный авиационный инженерный университет
г. Воронеж,

М. Г. Матвеев, д-р техн. наук, проф.,
Воронежский государственный университет,
mgmatveev@yandex.ru

Оптимальное управление качеством радиометеорологических измерений

Предлагается методика оптимального управления качеством радиометеорологических измерений, основанная на методах стохастической фильтрации и позволяющая компенсировать воздействие на получаемую радиолокационную информацию случайных ошибок измерений, что существенно повышает эффективность проведения радиолокационной разведки погоды.

Ключевые слова: управление, радиолокационные измерения, качество, метеобъект

Введение

Радиометеорологические измерения являются основным источником информации о возникновении и развитии опасных явлений погоды (грозы, града, шквала, ливневого дождя, обледенения воздушных судов и наземных сооружений и т. д.) представляющих опасность не только для технических средств, но и для жизни и здоровья людей.

Известно [1], что такие измерения сопровождаются существенными ошибками, обусловленными следующими причинами: изменчивостью микрофизических характеристик метеобъекта в пространстве и во времени; искажением диаграммы направленности антенны; техническими особенностями радиолокационной станции; случайными факторами, влияющими на ослабление радиолокационного сигнала в атмосфере.

В настоящее время радиолокационные измерения проводятся с использованием автоматизированных управляющих вычислительных комплексов "АКСОПРИ" и "Метеоячейка", в которых используются алгоритмы распознавания опасных явлений погоды (ОЯП), основанные на данных о профиле

радиолокационной отражаемости. Вместе с тем, при последовательном проведении измерений радиолокационных характеристик метеобъекта и получении профиля отражаемости возникает эффект накопления ошибок. В отдельных районах замерить профиль просто не представляется возможным из-за сложной радиолокационной обстановки. Эти факты снижают качество распознавания ОЯП по радиолокационным данным.

В работе предлагается методика оптимального управления качеством радиометеорологических измерений, основанная на методах стохастической фильтрации и позволяющая компенсировать воздействие на получаемую радиолокационную информацию случайных ошибок измерений, а также осуществлять восстановление профиля отражаемости в недоступных для измерения районах.

Постановка задачи оптимального управления качеством радиометеорологических измерений

Сформулируем в общем виде задачу управления качеством радиометеорологических измерений. Будем вести рассуждение для случая замеров, проводимых дискретно в пространстве и времени.

Пусть непосредственному измерению доступна векторная (в общем случае) случайная последовательность $Y(\xi_v)$ ($v = 1, 2, \dots$), являющаяся детерминированной функцией вектора радиолокационных характеристик облака (или какого-либо иного метеобъекта) $X(\xi_v)$ и случайной ошибки измерений радиолокационной станцией $N(\xi_v)$. В качестве $X(\xi_v)$ могут выступать любые признаки распознавания, являющиеся по своей природе случайными величинами, например, измеряемая в моменты времени t_1, \dots, t_n радиолокационная отражаемость Z на каком-либо уровне H или измерение Z по высоте в фиксированный момент времени.

Представим метеобъект линейной динамической системой с аддитивной стохастической составляющей, характеризуемой фазовым вектором $X(\xi_v)$. Это означает, что изменение среднего значения признака распознавания X от момента ξ_{v-1} к моменту ξ_v можно описать линейным уравнением. Пусть, кроме того, измеряемая величина Y также является линейной комбинацией фазового вектора $X(\xi_v)$ и случайной ошибки измерений $N(\xi_v)$. Тогда процедуру измерений вектора радиолокационных характеристик $X(\xi_v)$ можно представить в виде классических уравнений состояния и наблюдения [2]:

$$X(\xi_v) = B(\xi_v)X(\xi_{v-1}) + N_0(\xi_v); \quad (1)$$

$$Y(\xi_v) = A(\xi_v)X(\xi_v) + N(\xi_v), \quad \forall v = \overline{1, n}. \quad (2)$$

Следовательно, матрица $B(\xi_v)$ в уравнении состояния (1) характеризует динамику вектора X . Случайная величина $N_0(\xi_v)$ описывает флуктуацию признака X , обусловленную случайными изменениями микрофизических характеристик метеобъекта в момент ξ_v . Она целиком определяется физическим состоянием атмосферы в области измерения, т. е. зависит от ее типа, стадии развития, интенсивности протекающих процессов и т. д. В дальнейшем будем предполагать, что величина $N_0(\xi_v)$ распределена нормально с нулевым средним и имеет матрицу ковариации $\Sigma_0(\xi_v)$.

Матрица $A(\xi_v)$ в уравнении наблюдения (2) показывает, каким образом X преобразуется в непосредственно измеренную величину Y , а $N(\xi_v)$ представляет собой случайную величину, характеризующую ошибку измерения.

Задача состоит в том, чтобы располагая необходимыми априорными сведениями о функциях $A(\xi_v)$, $B(\xi_v)$, $N_0(\xi_v)$, $N(\xi_v)$, а также доступной непосредственному наблюдению реализацией случайной последовательности $Y(\xi_v)$ для каждого ξ_v получить оптимальную по критерию минимума среднеквадратической ошибки оценку $\hat{X}(\xi_v)$ вектора радиолокационных характеристик метеобъекта $X(\xi_v)$, т. е. $\langle [X(\xi_v) - \hat{X}(\xi_v)]^2 \rangle \rightarrow \min$.

Модель процесса управления качеством радиометеорологических измерений на основе фильтра Калмана

Уравнения фильтрации Калмана измерений радиолокационных характеристик метеобъекта имеют следующий вид:

$$\hat{X}_v = B_v \hat{X}_{v-1} + R_v^2 A_v^T \Sigma_v^{-1} (Y_v); \quad (3)$$

$$R_{v\exists}^2 = (I - R_{v\exists}^2 A_v^T (A_v R_{v\exists}^2 A_v^T + \Sigma_v)^{-1} A_v) R_{v\exists}^2, \quad \forall v = 1, \dots \quad (4)$$

Здесь I — единичная матрица; R_v^2 — ковариационная матрица получаемой оптимальной оценки, характеризующая величину ошибки фильтрации; $R_{v\exists}^2$ — ее экстраполированное значение, определяемое выражением

$$R_{v\exists}^2 = B_v R_{v-1}^2 B_v^T + \Sigma_{0v}. \quad (5)$$

Таким образом, уравнения (3)—(5) дают формальное решение задачи управления качеством радиометеорологических измерений путем их фильтрации.

Рассмотрим задачу реализации процедуры фильтрации Калмана применительно к измерению конкретной радиолокационной характеристики метеобъекта (облака), а именно, вертикального профиля его отражаемости $Z(H)$, поскольку эта величина является наиболее информативным параметром при распознавании опасных явлений погоды радиолокационным методом.

Согласно сказанному выше, опишем облако как линейную динамико-стохастическую систему со случайно изменяющимся в пространстве фазовым вектором Z_v — радиолокационной отражаемостью на высоте H_v .

Функция $Z(H)$ — вид вертикального профиля радиолокационной отражаемости, является относительно стабильной характеристикой состояния как конвективных облаков, так и неконвективных [4]. Поэтому существует возможность интерпретировать проводимые измерения как стационарные во времени, последовательные замеры величины Z на различных высотах H . При этом шаг по высоте $\Delta H = H_v - H_{v-1}$ необходимо брать большим радиуса пространственной корреляции микрофизических характеристик для облачных систем соответствующего типа, поскольку при использовании уравнений фильтрации в форме (3)—(5) необходимым условием является отсутствие статистической связи между величинами X_1, \dots, X_v, \dots

Методика определения радиолокационной отражаемости с помощью современных метеорологических радиолокационных станций (МРЛС) позволяет принять, что величина Z измеряется на станции непосредственно.

Таким образом, в уравнении наблюдения (2) можем положить $A_v \equiv I$. Учитывая тот факт, что фазовый вектор метеобъекта Z_v одномерен, уравнения фильтра (3)—(5) можно свести к двум, соответствующим случаю измерения вертикального профиля радиолокационной отражаемости облачной системы $Z(H)$:

$$\hat{Z}_v = \beta_v \hat{Z}_{v-1} + \frac{R_v^2}{\sigma_v^2} [\tilde{Z}_v - \beta_v \hat{Z}_{v-1}]; \quad (6)$$

$$\frac{1}{R_v^2} = \frac{1}{\beta_v^2 R_{v-1}^2 + \sigma_{0v}^2} + \frac{1}{\sigma_v^2}. \quad (7)$$

Таким образом, оптимальная оценка радиолокационной отражаемости \hat{Z}_v на высоте H_v формируется как сумма экстраполированной оценки $\hat{Z}_{v\exists} = \beta_v \hat{Z}_{v-1}$ и поправки к ней. При этом $\hat{Z}_{v\exists}$ представляет собой произведение оптимальной оценки

на уровне H_{v-1} и переходного множителя β_v , аналогичного по смыслу функции $B(\xi_v)$ в (1). Очевидно, что β_v зависит от типа облачной системы, условий образования, стадии развития и т. д. Параметром β_v определяется точность описания состояния метеорообъекта, что непосредственно влияет на качество фильтрации через соответствующее изменение величины σ_{0v}^2 . Второе слагаемое в уравнении (6) представляет собой разность между значениями экстраполированной оценки $\hat{Z}_{v\ominus}$ и фактически измеренной отражаемости \tilde{Z}_v , умноженную на весовой коэффициент, который задается отношением дисперсии R_v^2 формируемой оценки \hat{Z}_v к дисперсии σ_v^2 случайной ошибки измерения МРЛС величины Z .

Выражение для R_v^2 задается уравнением (7), из которого следует, что ошибка оценивания зависит от ошибки на предыдущем шаге, а также от характеристик радиолокационной станции и меры флуктуации измеряемой величины Z . Данная мера определяется дисперсией флуктуации отражаемости σ_{0v}^2 , на уровне H_v .

Ясно, что величина σ_{0v}^2 непосредственно зависит от точности описания вертикального профиля $Z(H)$, т. е. от задания множителя β_v . Более точное априорное описание метеорообъекта формально ведет к уменьшению величины σ_{0v}^2 и, следовательно, к уменьшению дисперсий оценок R_v^2 и росту качества фильтрации. Реально снизить меру флуктуации модели удастся при дополнительном учете нерадиолокационной информации о физике образования и развития метеорообъекта.

Практическая реализация процесса управления качеством радиометеорологических измерений

Для практической реализации фильтра надо задать характеристики, т. е. функции β_v , σ_{0v}^2 , описать точность измерений отражаемости радиолокационной станцией функцией σ_v^2 и сформировать начальные условия \hat{Z}_0 , R_v^2 .

Для нахождения вида множителя β_v воспользуемся выражением для вертикального профиля радиолокационной отражаемости облачных систем произвольного типа [1]

$$Z(H) = Z_{\max} \cdot 10^{f(H)}, \quad (8)$$

где $f(H)$ — полином 3-й степени с эмпирическими коэффициентами; Z_{\max} — максимальное значение отражаемости.

Поскольку измерения проводятся дискретно с шагом ΔH , значение которого выбирается исходя из условия отсутствия пространственной корреляции радиолокационной отражаемости по высоте, то (8) можем переписать в виде

$$Z(H_{v+1}) = Z(H_v) \cdot 10^{g(H_v, \Delta H)}, \quad (9)$$

где

$$g(H_v, \Delta H) = a(3H_v^2\Delta H + 3H_v\Delta H^2 + \Delta H^3) + b(2H_v\Delta H + \Delta H^2) + c\Delta H. \quad (10)$$

Значения коэффициентов a , b , c , а также другие характеристики метеорообъекта для различных вертикальных профилей радиолокационной отражаемости облачных систем, полученные по материалам экспериментальных наблюдений, представлены в таблице.

Известно [2, 3], что алгоритм фильтрации Калмана обладает вычислительной устойчивостью к

Статистические радиолокационные характеристики метеорообъектов

Уровень зондирования, км	Тип облачной системы								
	Кучево-дождевая с грозой			Кучево-дождевая с ливнем			Слоисто-дождевая		
	Z_v	σ_{0v}	σ_{0v}^2	Z_v	σ_{0v}	σ_{0v}^2	Z_v	σ_{0v}	σ_{0v}^2
1...2	2,6	0	0	2,0	0,66	0,44	0,98	0,45	0,21
2...4	2,68	0,31	0,09	1,17	0,29	0,09	1,29	0,57	0,33
4...6	2,22	0,29	0,08	0,29	0,46	0,21	0,73	0,51	0,25
6...8	1,53	0,41	0,16	-0,35	0,44	0,19	0,41	0,36	0,13
8...10	0,63	0,35	0,13	—	—	—	—	—	—
H_{\max}	8,35	0,72	0,51	5,33	0,52	0,27	5,11	0,99	0,99
Коэффициенты аппроксимирующего уравнения (10)	$a = -0,0036$ $b = 0,1023$ $c = 0,5499$			$a = -0,0228$ $b = 0,3817$ $c = 1,8037$			$a = -0,0061$ $b = 0,0792$ $c = 0,1087$		

ошибкам в начальных данных. Учитывая небольшие значения коэффициентов вариации величины Z у основания облака (см. таблицу), можем заключить, что с достаточной степенью точности в качестве начальных данных можем использовать модельные характеристики, относящиеся к "нулевому" уровню высоты — $Z(H_0)$. Определяя для конкретной аппаратуры возможную среднеквадратическую ошибку измерения Z , будем иметь все необходимые данные для синтеза фильтра.

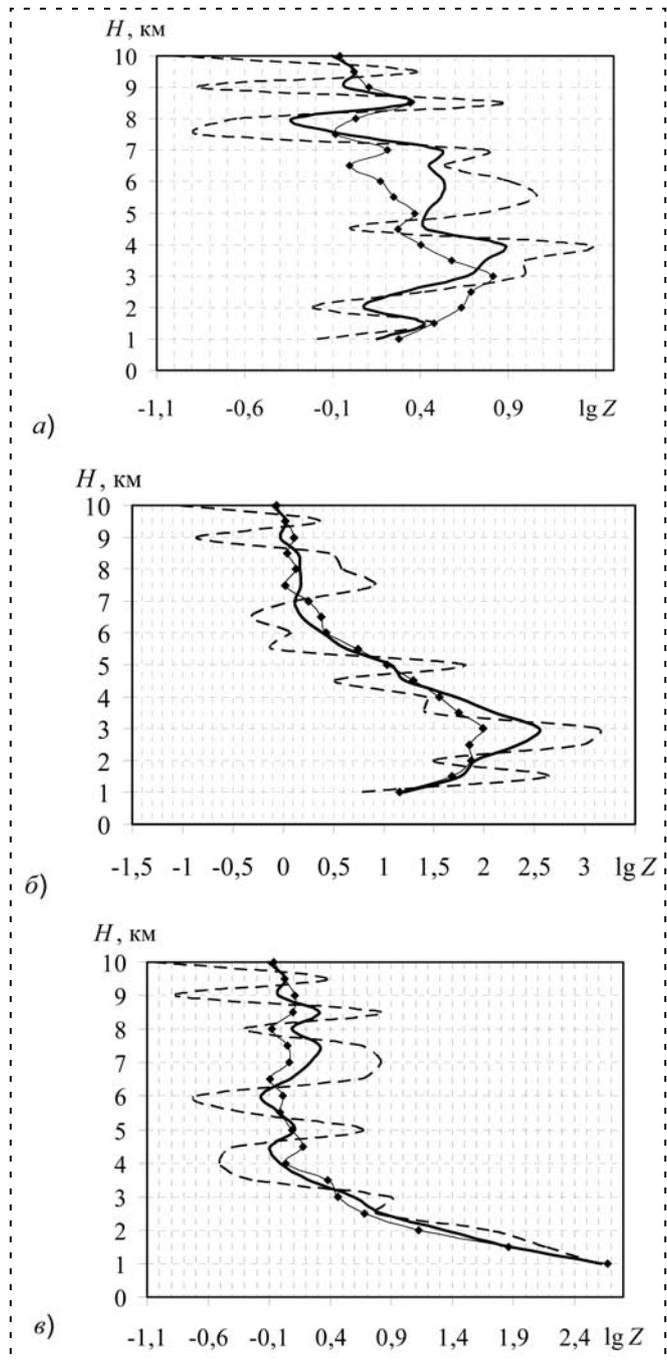


Рис. 1. Реализации профилей радиолокационной отражаемости: - - - - измеренный профиль; — — — — полученный профиль; ◆ — ◆ — реальный профиль; а — для кучево-дождевой облачности с ливнем; б — для кучево-дождевой облачности с грозой; в — для слоисто-дождевой облачности

Таким образом, оптимальное управление качеством радиометеорологических наблюдений путем фильтрации измерений вертикального профиля радиолокационной отражаемости $Z(H)$ предусматривает выполнение следующих операций.

1. По имеющимся с прошлого шага информации о величине R_{v-1}^2 и априорным сведениям о $\beta_v, \sigma_{0v}^2, \sigma_v^2$ определяется дисперсия оптимальной оценки R_v на данной высоте зондирования облака H .

2. Вычисляется "коэффициент усиления" $\frac{R_v^2}{\sigma_v^2}$.

3. По имеющейся с прошлого шага оценке \hat{Z}_{v-1} проводится экстраполяция радиолокационной отражаемости облака на следующий уровень $\hat{Z}_{vэ} = \beta_v \hat{Z}_{v-1}$.

4. Замеряется радиолокационная отражаемость на высоте уровня зондирования \tilde{Z}_v . При невозможности проведения замера радиолокационной отражаемости используется значение, интерполированное с предыдущего уровня.

5. На основании полученных значений величин $\hat{Z}_{vэ}, \tilde{Z}_v, \frac{R_v^2}{\sigma_v^2}$ вычисляется оптимальная оценка \hat{Z}_v .

При постоянстве технических характеристик МРЛС качество процедуры фильтрации будет зависеть только от точности априорного описания метеорологического объекта. Поэтому характеристикой эффективности оптимального управления будет являться зависимость дисперсий оценок R_v^2 от характеристик станции — σ_v^2 .

С этой целью в работе была исследована зависимость $R_v^2(\sigma_v)$ для облаков различного типа и для различных высот зондирования H_v .

В качестве примера на рис. 1 приведены результаты отдельных численных экспериментов по фильтрации измерений профилей $Z(H)$ облаков различного типа. Результатом проведения серии экспериментов явились расчеты оценок дисперсий \tilde{R}_v^2 по формуле

$$\tilde{R}_v^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{Z}_{iv} - Z_v)^2, \quad (11)$$

где Z_v — фактическое значение радиолокационной отражаемости на уровне H_v ; \hat{Z}_{iv} — оценка радио-

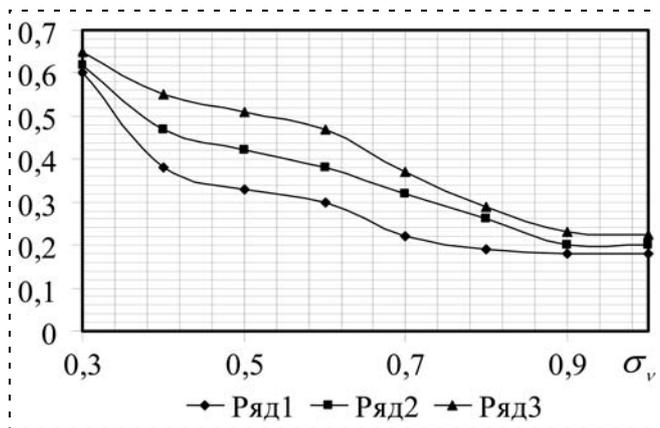


Рис. 2. Зависимость ошибки фильтрации R_v^2 / σ_v^2 от ошибок измерения σ_v радиолокационной отражаемости Z :

ряд 1 — для кучево-дождевой облачности с ливнем;
 ряд 2 — для кучево-дождевой облачности с грозой;
 ряд 3 — для слоисто-дождевой облачности

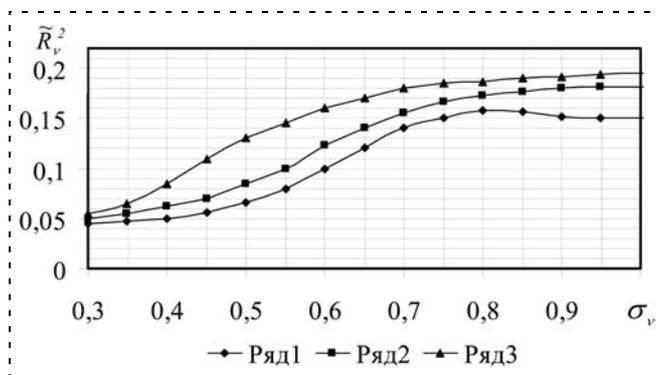


Рис. 3. Зависимость ошибки фильтрации \tilde{R}_v^2 от ошибок измерения σ_v радиолокационной отражаемости Z :

ряд 1 — для кучево-дождевой облачности с ливнем;
 ряд 2 — для кучево-дождевой облачности с грозой;
 ряд 3 — для слоисто-дождевой облачности

локационной отражаемости, полученная при использовании процедуры фильтрации в i -м испытании.

Разработанная процедура оптимального управления качеством радиометеорологических измерений

на основе фильтрации профилей отражаемости $Z(H)$ обладает устойчивостью к росту случайных ошибок радиолокационной станции, характеризуемых ве-

личиной $\frac{R_v^2}{\sigma_v^2}$. Так, величина \tilde{R}_v^2 стабилизируется на

уровне 0,2; 0,18; 0,15 для слоисто-дождевой облачности, кучево-дождевой облачности с грозой и ливнем соответственно (рис. 2, 3).

В случае роста ошибок измерения σ_v без использования процедуры фильтрации величина \tilde{R}_v^2 неограниченно возрастает пропорционально квадрату величины σ_v . Стабилизация значений ошибок разработанной процедуры происходит при $\sigma_v = 0,7 \dots 0,8$ для уровней с различными флуктуациями отражаемости. Участкам "стабилизации" предшествует относительно быстрый рост \tilde{R}_v^2 . Эти зоны характеризуются тем, что абсолютные значения величин σ_v и σ_{0v} сравнимы между собой.

Характеристики точности процедуры оптимального управления радиометеорологическими измерениями для уровня высоты, характеризуемого минимальными флуктуациями модели, превосходят характеристики для уровня с максимальными флуктуациями. Следовательно, уменьшение величин σ_{0v} ведет к росту качества проводимых измерений $Z(H)$.

Список литературы

1. **Руководство** по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5 / РД 52.04.320-91. С.-Петербург: Гидрометеиздат, 1993.
2. **Браммер К., Зиффлинг Г.** Фильтр Калмана—Бьюси: Пер. с англ. / Под ред. И. Е. Казакова. М.: Наука, 1982.
3. **Сейдж Э., Меле Дж.** Теория оценивания и ее применение в связи и управлении: Пер. с англ. / Под ред. Б. Р. Левина. М.: Связь, 1976.
4. **Атмосфера.** Справочник / Под ред. Ю. С. Седунова. Л.: Гидрометеиздат, 1991.

ИНФОРМАЦИЯ

IMTF
2011

С 25 по 27 октября 2011 г. в Москве
 в МВЦ «Крокус Экспо» состоится

Международный Форум Измерений и Технологий (IMTF 2011)

Форум состоит из трех основных разделов:

Датчики и Измерения, Контрольно-измерительное оборудование и Микротехнологии.

В рамках Форума пройдет семинар

«Инновации, Промышленность, Финансы».

Подробная информация содержится на сайте форума: www.imtf-expo.ru

Контактная информация: Тел.: (495) 980-95-42

E-mail: kma@forexpo.ru — Максим, irina@forexpo.ru — Ирина

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 604.93

Ю. В. Подураев,
д-р техн. наук, проф., проректор, зав. кафедрой,
МГТУ "СТАНКИН",
poduraev@stankin.ru

Компьютерная свертка видеоизображений в робототехнике: поиск решений в композициях древнерусской иконографии

Рассматривается подход к построению компьютерных видеоизображений для мобильных робототехнических и мехатронных систем, в которых управление ведется на базе телеинформации, поступающей от совокупности подвижных и внешних видеокамер. Суть подхода заключается в комбинировании фрагментов нескольких видеографических изображений, полученных от телевизионных камер, в единый графический образ. Подход ориентирован на актуальные задачи анализа состояния и синтеза управления интеллектуальными роботами в дистанционном и автоматическом режимах в средах со сложной пространственной структурой.

Предлагаемые решения и разработанные компьютерные методы основаны на аналогиях с подходами и графическими приемами пространственного и геометрического строения композиций древнерусской иконографии.

Ключевые слова: интеллектуальная робототехника, мобильные роботы, компьютерные видеоизображения, композиции древнерусской иконографии

Введение

Данная статья написана на основе доклада с аналогичным названием, с которым автор планировал (но, к сожалению, не смог) выступить на пленарном заседании 7-й научно-технической конференции "Мехатроника, автоматизация, управление" (МАУ-2010) в Санкт-Петербурге. Поэтому в статье сохранена как структура доклада, так и конспективный стиль изложения материала, принятый для презентаций.

Актуальность и проблематика соединения компьютерных видеоизображений в робототехнике

Компьютерная видеографика широко применяется как при дистанционном телеуправлении роботами для организации обратной видеосвязи для человека-оператора, так и в интеллектуальных роботах в режимах обучения (например, при использовании

методов управления на основе нейронных сетей либо нечеткой логики). Видеопотоки данных о состоянии робота и объектов внешней среды также используются при автоматической генерации управляющим компьютером программы действий робота при его работе в автономном режиме (рис. 1).

Отметим, что в отечественной робототехнике с начальных этапов ее развития бионический подход применялся при проектировании и конструировании роботов, особенно их сенсорных и исполнительных устройств [9—10]. В последние годы разработан целый ряд перспективных методов управления робототехническими и мехатронными системами на основе интеллектуальных технологий обработки знаний [11]. Фундаментальной базой построения структур и законов управления в таких системах (с использованием нейросетевых и нечетких методов, лингвистических правил, экспертных систем и т. п.) служат знания об алгоритмах обработки информации и целенаправленного действия в аналогичных ситуациях человека или групп людей. Особенно актуален такой подход для supervisory управления поведением роботов, действующих в неопределенной внешней среде, на этапах обучения и планирования движений. Повышение информативности при визуальном восприятии сцены человеком-оператором либо при визуальном анализе компьютером верх-

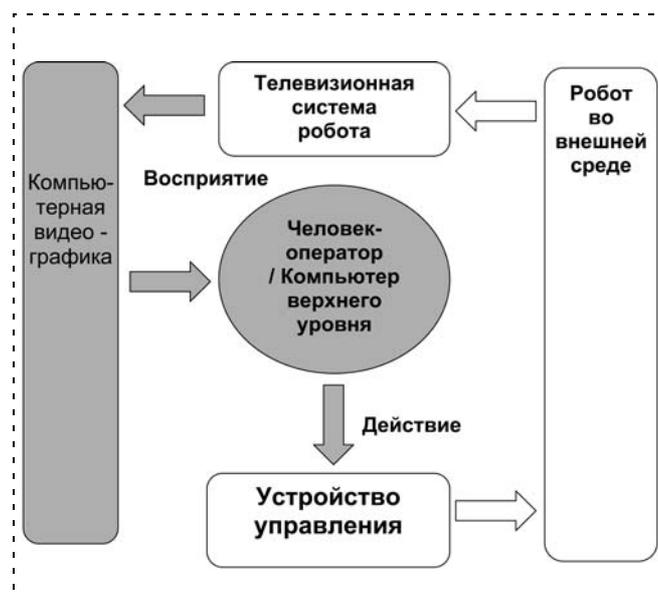


Рис. 1

него уровня в автоматических системах позволяет существенно снизить число ошибок при программировании и управлении роботами.

Важно, что рассматриваемая проблема актуальна при разработке и эксплуатации современных роботов и робототехнических систем для различных областей применения. В первую очередь следует выделить роботы для специальных и экстремальных сред, задачи мобильного патрулирования и транспортирования, которые выполняются в заранее определенных условиях.

Так, отметим характерную цитату из публикации на Интернет-сайте Lenta.ru под заголовком "Американцы не справляются с боевыми роботами" [12]:

"...Большинство боевых роботов, используемых армией США в Ираке, получают повреждения не в результате атак и взрывов, а из-за ошибок операторов, сообщает Strategy Page. По состоянию на 2007 год в Ираке находилось максимальное число таких машин, около 2 тысяч. И лишь 20 процентов выведенных из строя получили повреждения из-за действий боевиков... Но значительно чаще роботы ломаются из-за неправильного использования... Частые поломки вынудили командование американского контингента в Ираке создать так называемый "госпиталь для роботов", "лечение" в котором проходили до 400 машин в неделю" (рис. 2).

Можно выделить целый ряд факторов, вызывающих серьезные ошибки операторов (например, работа с грузами чрезмерной массы, временные задержки при передаче команд, проблема координации действий между человеком и роботом и т. д.). Одной из наиболее значимых причин является неадекватность зрительного восприятия человеком оператором реального состояния внешней среды, а также фактического движения робота и объектов



Рис. 2

работ. По данным психологов именно через визуальный канал поступает около 90 % сенсорной информации, воспринимаемой глазом человека, причем скорость передачи данных для сетчатки глаза составляет более 10 Мбит в секунду.

Новые возможности систем технического зрения, появившиеся в последние годы, позволяют проектировать робототехнические и мехатронные системы нового поколения. Их новые свойства обусловлены тем, что сенсорные и исполнительные компоненты не просто взаимодействуют, но неразрывно объединяются друг с другом в информационно-управляющие модули. Создание указанных систем стало возможным благодаря приложению новых компьютерных технологий к задачам анализа визуальной информации, принятия решений и синтеза управления функциональными движениями в их взаимосвязи.

Телевизионные системы современных роботов состоят из совокупности подвижных камер (выносных, обзорных, операционных и т. п.), которые могут как располагаться на корпусе робота и его рабочем органе, так и перемещаться телеманипуляторами. Это позволяет визуализировать на экране дисплея состояние робота и объектов внешней среды, используя представление зрительной информации с различных направлений и углов зрения.

Современные роботы, оснащенные системами технического зрения, которые состоят из нескольких телекамер, показаны на рис. 2—4. Приведенные модели роботов предназначены для выполнения роботизированных операций в заранее неопределенной или динамически изменяющейся внешней среде (боевой обстановке, при проведении взрывотехнических и антитеррористических операций, демонтажа и сборки изделий в атомной промышленности). Эффективное функционирование интеллектуальных мехатронных систем и роботов именно в средах такого типа является их основным предназначением.

Мобильный робототехнический комплекс класса "Варан" (рис. 3) предназначен для дистанционного проведения визуальной разведки, поиска и диагностирования взрывоопасных предметов; дистанционного обезвреживания взрывного устройства, загрузки в специальные контейнеры для эвакуации, а также выполнения транспортных и технологических операций. Основными конкурентными преимуществами комплекса "Варан" являются ценовые параметры, возможность изменения комплектации поставки, а также надежность работы в тяжелых условиях эксплуатации [14]. На борту робота "Варан" могут располагаться от 4 до 6 цветных, либо черно-белых телевизионных камер.

На рис. 4 представлен робототехнический комплекс демонтажа (РТК-М), разработанный в Мос-

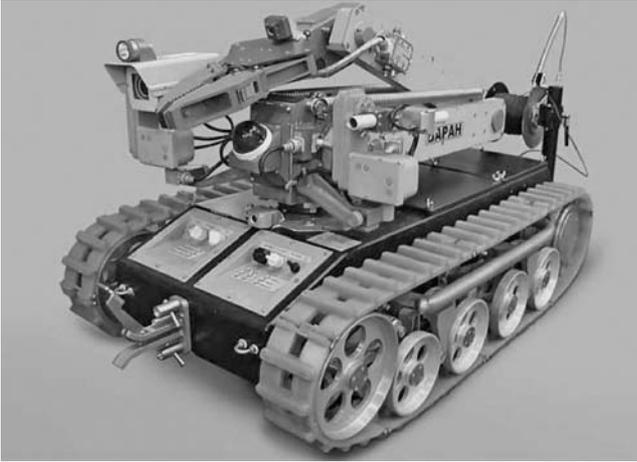


Рис. 3

ковском филиале АТЦ СПб ИТУЦР. Комплекс РТК-М предназначен для проведения демонтажных работ и специальных мероприятий, в средах в условиях радиационного излучения [13]. Робототехнический комплекс оснащен шестистепенным манипулятором, измерительными устройствами и рабочими органами.

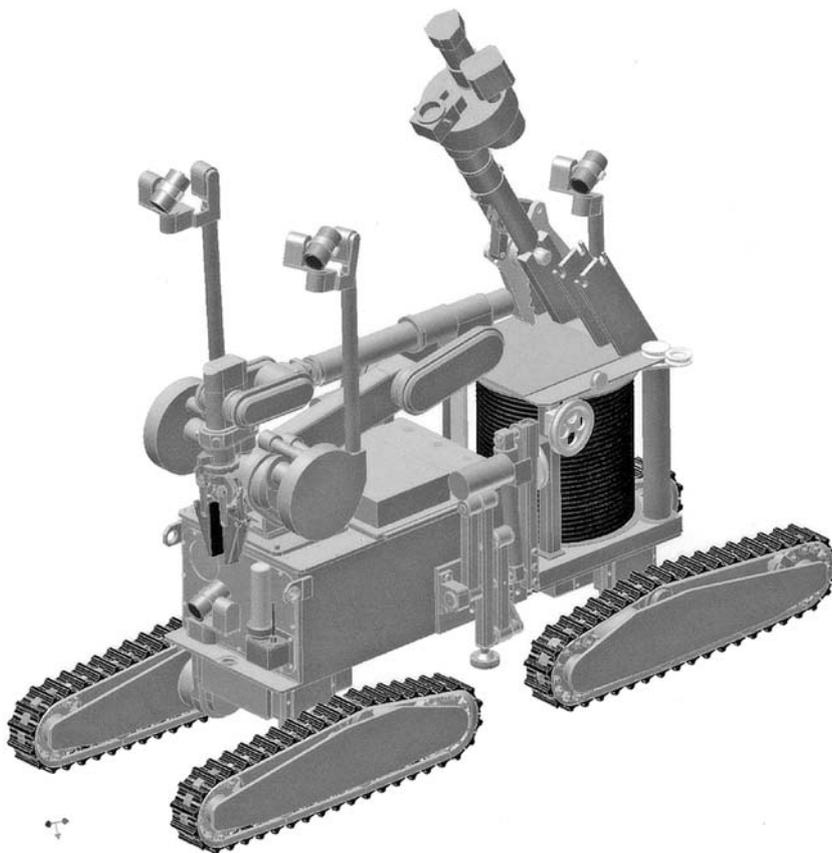


Рис. 4

Для выполнения дистанционных работ по демонтажу и для доставки подвижного аппарата в зону проведения работ необходимо применение нескольких телевизионных камер. Телекамеры устанавливаются как на подвижном модуле РТК-М, так и на вспомогательных робототехнических средствах, либо на внешних статических опорах. Для ориентации телекамер используются мехатронные поворотные устройства, рабочий манипулятор, а также дополнительные телевизионные манипуляторы.

На борту подвижного модуля РТК-М размещаются пять телевизионных камер: две — на телевизионных манипуляторах по левому и правому бортам, по одной — на переднем и заднем фронте робота и дополнительная камера — на кисти рабочего манипулятора. При перемещении вперед камера переднего фронта является курсовой, телекамеры на телевизионных манипуляторах используются для обзора комплекса и для обзора гусеничных модулей левого и правого борта. Камера заднего фронта используется как курсовая при движении робота назад и при маневрировании, а также для слежения за укладкой кабеля. При выполнении операций рабочим манипулятором и смене инструмента камеры на телевизионных манипуляторах используются как курсовая и обзорная пара. Таким образом, установка телевизионных манипуляторов позволила минимизировать

число телевизионных камер и в то же время дать оператору необходимый и достаточный обзор для сложных операций.

Таким образом, практика проектирования и применения современных робототехнических и мехатронных систем выдвинула ряд новых требований к компоновке телевизионных устройств и построению компьютерных систем визуализации изображений. К числу современных требований, в первую очередь, можно отнести:

- оснащение РТК совокупностью телекамер (курсowych, операционных, внешних), располагаемых в различных координатных базах: на борту робота, технологическом манипуляторе или рабочем органе, телеманипуляторах и мехатронных модулях, других статических или подвижных носителях и т. д.;
- построение динамических видеоизображений, позволяющих визуализировать состояние робота и его основных частей, объектов работ и внешних предметов, ко-

- торые находятся во взаимосвязанном движении в пространстве и во времени;
- отображение видеоинформации в реальном масштабе времени в процессе выполнения мобильных роботизированных операций;
 - использование различных координатных базисов для позиционирования телевизионных камер (как подвижных, так и базовых координат) для быстрой реконфигурации изображения и исключения мертвых зон;
 - программирование движений роботов в пространстве и во времени; задание линейных и ориентирующих перемещений, опорных точек и типов траекторий, определение координат и форм объектов работ;
 - повышение информативности поступающей видеоинформации путем использования психофизиологических особенностей пространственного восприятия движений интеллектуальной системой "Глаз—Мозг" человека.

Однако существующие системы компьютерной обработки видеоинформации в робототехнике обладают рядом недостатков и ограничений и предназначены, как правило, для задач управления низкого уровня. Считается, что интеллект оператора столь высок, что он может анализировать и принимать решения (причем в реальном времени) на основе полного потока видеоинформации, без какой-либо его предварительной обработки. На экране дисплея видеоинформация обычно представляется в матричной форме, когда каждое окно содержит изображение с отдельной камеры в ее координатном базисе. По сути, системы компьютерной визуализации в робототехнике копируют охранные системы видеонаблюдения либо проекционное машиностроительное черчение. Из практики использования РТК известно, что оператор может работать с шестью телевизионными изображениями параллельно, но обычно ограничивается анализом лишь двух фрагментов.

Компьютерная свертка видеоизображений — это интеллектуальная информационная технология комбинирования видеографических изображений и структурирования данных, полученных от нескольких телевизионных и видеокамер робота, в целостное компьютерное изображение. Целью компьютерной свертки изображений является повышение информативности (смысловой части) получаемой зрительной информации для задач анализа состояния и синтеза целенаправленного управления в робототехнике и мехатронике.

Отметим, что набор информационно-управляющих функций, выполняемых человеком-оператором, определяется его статусом в иерархии системы управления роботом. В настоящее время, в зависимости от

вида человеко-машинного интерфейса и функционала пульта управления, используются четыре варианта управления — от командного способа до устройств высшего уровня. Метод компьютерной свертки для комплексирования изображений представляется наиболее перспективным при проектировании автономной робототехники, оснащенной развитыми сенсорными системами, которые встроены в бортовые системы управления робота.

Слияние фрагментов в единые образы в композициях древнерусской иконографии

В классических работах показано, что древнерусскую иконографию отличают необычность пространственной геометрии и знаковость графических образов, даже "странности" в перспективных и геометрических построениях [1—3]. Но каким образом выдающиеся мастера-иконописцы сочетают "иррациональность" композиционных и графических иконописных приемов с гармоничностью и естественностью восприятия древнерусской иконографии даже человеком, привыкшим к современному живописному искусству?

В этом разделе мы рассмотрим некоторые подходы к построению композиций в древнерусской иконографии на ряде примеров иконописи и летописных миниатюр XVI века [4, 5]. Времена правления Ивана Грозного на Руси, по мнению специалистов, стали веком расцвета московской школы иконописи. Именно в этот период (70—80 годы XVI века) создан Лицевой летописный свод, тома которого содержат сотни миниатюр с описаниями по русской истории, которые написаны миниатюристами по древним канонам иконной и фресковой живописи.

По мере изучения данных примеров возникают — по мнению автора — удивительные аналогии и ассоциации, дающие основания для поиска решений пространственно-графических задач в связи с поставленными выше научно-техническими проблемами. Безусловно, автор не ставит перед собой цель превратить графические методы и композиционные приемы средневековых русских мастеров в рабочий инструмент для построения компьютерных видеоизображений в робототехнике. Речь идет не более, чем о подборе и первичном анализе возможных подходов, причем только в рамках выбранной темы, связанной с объединением фрагментов изображений в единый графический образ.

Проведенный анализ показал, что для раскрытия главного замысла в иконах и миниатюрах многие сложные композиции строятся путем слияния нескольких фрагментов в единый образ (рис. 5—8, см. третью и четвертую сторону обложки, и рис. 9). Подчеркнем, что речь пойдет о целостных изобра-

жениях, но не ряде клейм, которые расположены обычно по периметру житийных икон.

Мы будем различать четыре вида композиций, которые строятся за счет комбинирования двух и более составляющих частей путем:

- ♦ использования графического масштабирования;
- ♦ сочетания в изображении нескольких пространственных слоев;
- ♦ графического слияния фрагментов, разнесенных как в пространстве, так и во времени;
- ♦ построения целостного изображения методом сплетения фрагментов, полученных для разноцентренных осей зрения.

В наиболее сложных композициях возможно сочетание указанных видов комбинирования фрагментов.

Во всех перечисленных вариантах сопряжение нескольких частей требует построения композиционных границ, которые должны — с одной стороны — отделять, а с другой — сопрягать графические фрагменты. Построение таких границ является сложной творческой задачей, гармоничное решение которой формируется особыми композиционными, графическими и геометрическими приемами.

Обратим внимание, что исходные фрагменты нередко отличаются разноцентренностью и разнонаправленностью осей зрения и направлений освещенности, а также могут иметь разное перспективное построение. Также характерно, что составляющие части могут соответствовать различным временным фазам, что позволяет графически представить, например, летописное событие как связанный временной процесс.

В качестве иллюстрации комбинирования в единое изображение фрагментов с переменным графическим масштабированием рассмотрим миниатюру Лицевого Летописного Свода "Св. Александр Невский ранит в лицо Биргера на Невской битве" (рис. 5). Обратим внимание, что центральная зона изображения специально увеличена по сравнению с периферией миниатюры, причем к числу увеличенных элементов можно отнести не только очевидно главную фигуру князя Александра на боевом коне, но и двукратную длину его меча.

Применение метода масштабирования позволило миниатюристу даже показать столь точный факт, что Святой Александр наносит поражающий удар шведскому противнику именно в глаз. При этом для изображения данной детали не потребовалась иконная доска большего формата. Также отличительным свойством данной и аналогичных композиций иконографии является гладкое (без видимых глазу разрывов) графическое сопряжение увеличенных областей с остальными частями миниатюры. Пользуясь современной телевизионной терминологией, можно

сказать, что здесь иконописец стремится получить целостное изображение битвы, исключая эффект "картинка в картинке", с помощью различных коэффициентов графического масштабирования для ключевых и вспомогательных фрагментов.

Второй метод построения композиции, который основан на сочетании в одном изображении двух и более пространственных слоев, очень распространен в композициях древнерусской иконографии (рис. 6—8). Это обусловлено тем, что изображаемые действия часто происходят внутри храмов и сооружений, под сводами палат или других архитектурных строений.

На рис. 6 представлена миниатюра, повествующая о том, как прп. Стефан — старший брат прп. Сергия — приводит к нему на воспитание своего сына Иоанна — в будущем Святителя Феодора Ростовского. Действие происходит внутри храма, но одновременно мы видим на изображении и внешний вид Троице-Сергиевой Лавры, с куполами и звонницей. Таким образом, в композиции графически слиты два пространственных слоя, которые состоят из обзорных и локальных фрагментов (в научно-технической терминологии часто используется также термин "операционные фрагменты"). При этом локальный слой, который очевидно является сюжетной доминантой изображения, выдвинут на передний план миниатюры.

Композиционной границей между двумя пространственными слоями является фигурная арка с двумя колоннами. Интересно обратить внимание на подход иконописца к формированию вида пространственных поверхностей на плоском изображении. Мы видим две различные по форме цилиндрические поверхности, расположенные в непосредственной близости от границы слоев: это выпуклая наружная поверхность храма и вогнутая внутренняя стена строения. Вид кривизны поверхностей определяется по разной форме светотеней в ряде окон, которые симметрично расположены относительно центральной оси миниатюры. Подобный метод задания желаемого вида 3D-поверхностей на 2D-изображениях по форме светотеней на специально выбранных для этого конструктивах (окнах, арках, объемных предметах и т. п.) достаточно часто применяется в иконографии.

С геометрической точки зрения удивительно, но пограничные сопряжения не только не нарушают, но, напротив, усиливают гармоничное и реальное зрительное восприятие композиции летописной миниатюры.

Для многих композиций иконографии, особенно в исторических миниатюрах, перед иконописцем стоит проблема графического слияния фрагментов, разделенных не только в пространстве, но и во вре-

мени. Так, в левом верхнем углу на рассматриваемой миниатюре (рис. 6) можно увидеть фрагмент, где показан прп. Стефан и его сын в пути из Москвы в Сергиев Посад. Конечно, этот эпизод логически связан, но предшествует по времени центральному действию сюжета.

Более сложная композиция характеризует миниатюру жития прп. Сергия из собрания Троице-Сергиевой Лавры (рис. 7). На этой миниатюре можно выделить два основных фрагмента, которые затем "интегрированы" во времени. Первый фрагмент — это наставление прп. Сергия Радонежского иконописцам прп. А. Рублеву с его сподвижником. И второй фрагмент — процесс росписи иконостаса Успенского Собора Лавры иконописцами. В качестве пространственно-временной границы выбраны ворота храма, которые являются в сознании человека символом движения во времени, но при этом статичны в пространстве.

Наиболее сложным и интересным в иконографии представляется соединение в общую композицию нескольких фрагментов, полученных для разноцентренных осей зрения. Глубоко анализируя характерные приемы обратной перспективы, о. П. Флоренский отмечает разноцентренность в средневековой иконописи, когда "рисунок строится так, как если бы на разные части его глаз смотрел, меняя свое место" [1].

Рассмотрим пространственное строение житийной миниатюры прп. Александра Спасского, игумена Андроникова монастыря в Москве. На данной миниатюре можно выделить три пространственных фрагмента с разноцентренными осями зрения, показанные на рисунке стрелками.

Фронтальной оси зрения (ось 1) соответствуют внутренняя стена Собора с главным Образом Спасителя, под которым расположено центральное окно. Обратим внимание, что окно сохранит круглую форму только при взгляде, направленном строго перпендикулярно к стене. По данной оси зрения написана также наружная стена Собора, причем вид поверхности стены задан с помощью форм светотеней на окнах (аналогично цилиндрическим поверхностям на миниатюре, рассмотренной на рис. 6).

Вторая точка зрения расположена справа от плоскости изображения, поэтому положим, что данная ось направлена по оси зрения правого глаза человека. Этой оси зрения соответствует пространственное положение двух фрагментов на миниатюре: красное здание с аркой и нижним рядом из трех окон, а также окно под крышей правого строения (оба фрагмента показаны на рис. 8 на левых выносках). Отметим, что указанные фрагменты размещены на противоположных сторонах миниатюры. Назовем

вторую ось "Осью Игумена", так настоятель обители вышел к монахам из главного (красного) дома.

Третий центр зрения находится слева от плоскости миниатюры и фактически направлен по оси левого глаза человека. Для этой оси зрения, которую назовем "Осью Монахов", можно выделить на изображении также два основных фрагмента: нижние своды центральной и правой арок, а также отверстия под ступенями лестницы, по которой спустились монахи (правые выноски на рис. 8).

Для композиционного соединения указанных фрагментов, полученных для разноцентренных направлений зрения, необходим срединный объект (или, возможно, объекты) для сплетения заданных осей зрения в пространстве целостной миниатюры. В дальнейшем будем называть объединяющие графические объекты медиаторами композиции. На светло-коричневом фоне центральной полосы миниатюры, где пересекаются указанные три оси зрения, иконописцем помещен Посох Игумена (рис. 9). Если внимательно, не отрываясь, смотреть на изображение, переводя взгляд между соседними осями, то можно увидеть, как плоскость посоха "изменяет" свою ориентацию в пространстве, следуя за направлением зрения. Другими словами, посох сопрягает в рассматриваемой композиции три пространственных фрагмента, выполняя, следовательно, функции объекта-медиатора для разноцентренных точек зрения.

Безусловно, построить объект-медиатор обычными геометрическими способами практически невозможно. Одна из возможных гипотез данного зрительного феномена состоит в том, что композиции древнерусской иконографии основаны на

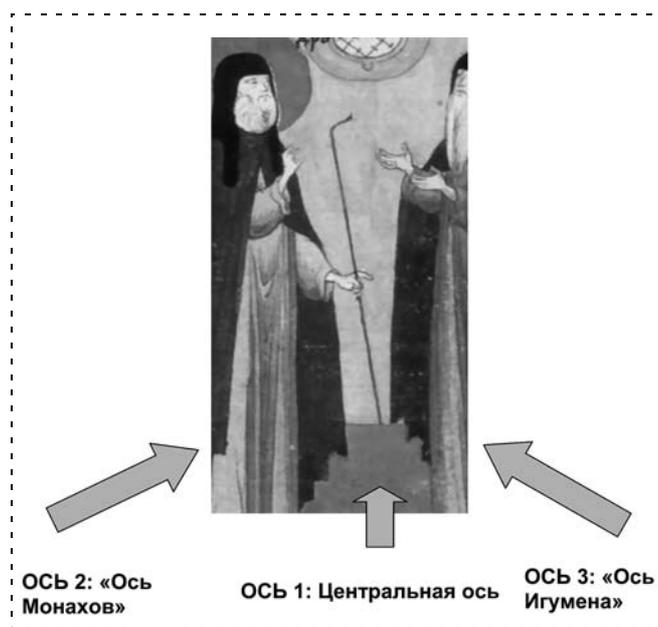


Рис. 9

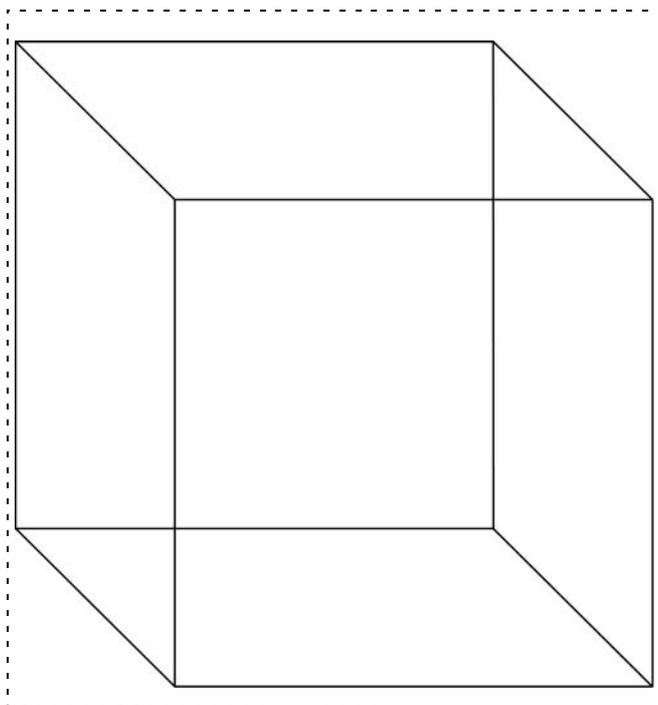


Рис. 10

глубинном понимании мастерами-иконописцами уже в средние века особенностей психофизиологической системы визуального восприятия.

В наше время выявление закономерностей психофизиологической системы "Глаз—Мозг" человека является сравнительно новым междисциплинарным достижением науки, выполненным на стыке столь обособленных ранее областей, как теория информации и офтальмология, психология и компьютерные технологии [6—8]. Проведенные исследования доказали, что информационно-интеллектуальные механизмы восприятия определяются не только свойствами оптического зрительного пути, но и в существенной степени являются следствием интеллектуальной обработки визуальной информации мозгом человека.

В качестве базового примера во многих книгах часто приводится "куб Некера" (1832 г.) — фигура, передняя плоскость которого однозначно не определяется мозгом (рис. 10). Этот куб иногда называют "реверсивной" фигурой, так как при длительном рассматривании у нее "мерцают" передняя и задняя грани. Отметим, что Посох Игумена — как медиатор — решает пространственную задачу слияния уже трех разнонаправленных осей зрения, причем зрительный эффект достигается удивительно лаконичным и элегантным графическим методом с помощью только двух присоединенных отрезков. Но, конечно, речь может идти лишь о гипотезе. Ведь со столь давних времен, когда были написаны древнерусские иконы и летописные миниатюры Лицевого Свода, минуло уже более 400 лет.

Метод компьютерной свертки выделения фрагментов изображения в видеографике для мобильных роботов

Современные видеокамеры обладают разрешением, которое во много раз превышает возможности современных мониторов телевизоров. Поэтому при отображении на дисплее полученного изображения его необходимо уменьшать, но при этом теряется точность и детальность отображения существенных для данной операции элементов.

Предложенный метод позволяет выделять на полном изображении интересующие операционные фрагменты, создавая "эффект приближающей линзы" для тех из них, которые получены от выбранных телекамер робота [15]. В современных фотоаппаратах увеличение центральной части кадра часто называется "цифровой ZOOM". Таким образом, на экране одновременно находятся полное изображение, позволяющее оценивать обстановку, и увеличенное изображение, позволяющее подробно анализировать состояние и поведение интересующего объекта (рис. 11). Для достижения этой цели выбран подход переменного графического масштабирования отдельных зон, применяемый в иконографии (см. рис. 5).

Отличительной особенностью метода является гладкое сопряжение увеличенной области и оригинального изображения с помощью разработанных и реализованных цифровых алгоритмов. Преимущество данных алгоритмов состоит в сохранении целостного восприятия изображения и исключении разрывов между фрагментами с разным коэффициентом увеличения с помощью цифровой обработки и свертки видеокадров.

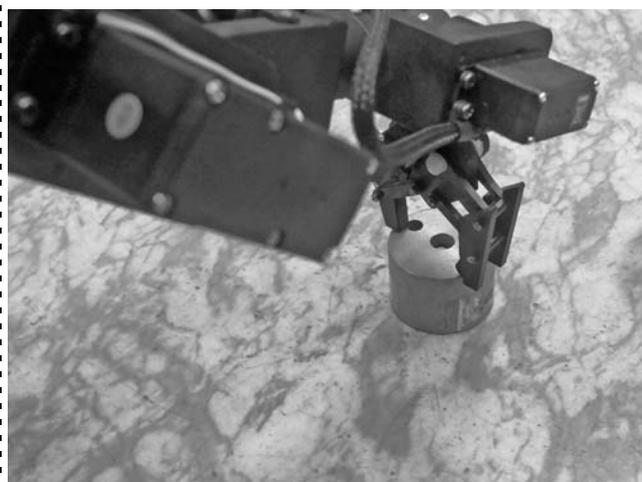


Рис. 11

Список литературы

1. **Флоренский П. А.** Обратная перспектива // Имена: Сочинения. М.: ЭКСМО, 2008. 896 с.
2. **Флоренский П. А.** Иконостас. М.: АСТ, 2005. 203 с.
3. **Раушенбах Б. В.** Пространственные построения в древнерусской живописи. М.: Наука, 1975. 183 с.
4. **Новый** сводный иконописный подлинник. Иконописная школа при Московской Духовной Академии. М.: АНО "Центр Информационных Технологий" МДА, 2008.
5. **Лицевой** летописный свод XVI века. Русская летописная история. М.: ООО "Фирма "АКТЕОН", 2009.
6. **Вавилов С. И.** Глаз и Солнце. О свете, солнце и зрении. 10-е изд. М.: Наука, 1981. 128 с.
7. **Марр Д.** Зрение. Информационный подход к изучению представления и обработки зрительных образов: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1987. 400 с.
8. **Хьюбел Д.** Глаз, мозг, зрение: Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 239 с.

9. **Попов Е. П., Верещагин А. Ф., Зенкевич С. Л.** Манипуляционные роботы. Динамика и алгоритмы. М.: Наука, 1978. 400 с.
10. **Дистанционно-управляемые** роботы и манипуляторы / Под ред. В. С. Кулешова. М.: Машиностроение, 1986. 328 с.
11. **Интеллектуальные** системы автоматического управления / Под ред. И. М. Макарова, В. М. Лохина. М.: Физматлит, 2001.
12. **Американцы** не справляются с боевыми роботами. Интернет-публикация (www.Lenta.Ru от 05.12.2008).
13. **Бондарь Д. В., Кураев Е. В., Подураев Ю. П.** Компонировка технического зрения на робототехническом комплексе для проведения демонтажных работ // Тр. междунар. науч.-техн. конф. "Мехатроника. Автоматизация. Управление" (МАУ-2009). С. 307—308.
14. URL: <http://www.minpromtorg.gov.ru/special/expo/projects/10/0>.
15. **Подураев Ю. В., Балашов В. С., Громов Б. А.** Метод выделения фрагментов изображения видеореаграфии для мобильных роботов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010614675 от 16.07.2010.

УДК 621.397.331

М. Т. Алиев, канд. техн. наук, доц.,
Т. С. Буканова, аспирант,
Марийский государственный
технический университет,
bukanova_tc@yandex.ru

Метод формирования изображения в режиме реального времени

Представлен метод формирования изображения с использованием прямоугольного растра и нелинейного квантования яркости, который позволяет оптимизировать процесс обработки передаваемой информации. Результаты имитационного моделирования получены с использованием пакета прикладного программного обеспечения MATLAB и применены при разработке инструментальных средств обработки изображения.

Ключевые слова: система технического зрения, режим реального времени, дискретизация изображения, квантование изображения, зрительный анализатор, формирование изображения

Введение

Более 80 % информации об окружающей среде человек получает с помощью зрительного анализатора, который обеспечивает связь с непрерывно меняющимся внешним миром.

Зрительный анализатор представляет собой совокупность структур, воспринимающих световую энергию в видимом диапазоне электромагнитного излучения, формирующих зрительные образы, которые играют важнейшую роль в человеческом восприятии информации.

Современному миру все чаще требуется создание прикладных программ и систем технического зрения, которые наделены схожими функциями.

Теоретический анализ

Для реализации прикладных программ обработки изображения требуется наличие ресурсоемких и высокопроизводительных вычислительных систем, традиционно реализуемых на основе ЭВМ. С использованием прикладных программ решается широкий круг задач, таких как сжатие изображений, улучшение визуального качества (восстановление интересующих участков) путем устранения шумов, "смазов", искажений вследствие неблагоприятных условий съема информации, инструментальных погрешностей и других негативных факторов. Однако такие системы не могут обеспечить требуемые потребительские свойства, например, точность, мобильность и обработку изображений в режиме реального времени.

В свою очередь, системы технического зрения основаны на использовании оптической сенсорной техники бесконтактного действия. Данные системы обеспечивают автоматическое восприятие и переработку изображения в режиме реального времени и решают широкий круг задач в области медицинской диагностики, в производственном контроле при определении характеристик материалов, бесконтактной дефектоскопии, микроскопии, лазерной технике, правоохранительной деятельности, радиолокации, биологических и астрономических наблюдениях.

Процесс проектирования систем технического зрения включает ряд этапов: регистрацию изображения, его математический анализ и получение после этого некоторых качественных выводов об объекте исследования.

В литературе описано значительное число нейросетевых методов распознавания образов, основным преимуществом которых является взаимосвязь эле-

ментов, функционирующих параллельно, за счет чего существенно повышается эффективность решения задачи, особенно в обработке изображений [1–4]. Для решения многих задач необходимо определить структуру нейронной сети и алгоритм обучения. Целью обучения нейронной сети является поиск оптимальных значений весовых коэффициентов всех переменных. Если выбраны множество обучающих примеров и способ вычисления функции ошибки, тогда обучение нейронной сети превращается в задачу многомерной оптимизации [3]. Данные методы являются трудоемкими, требующими сложных вычислительных процессов, что является существенным недостатком нейронной сети.

Целью данной работы является разработка метода формирования изображения для оптимизации процесса обработки передаваемой информации и его реализация в системе технического зрения.

Метод формирования изображения

Первая функция, выполняемая системой формирования изображения, состоит в том, чтобы собрать поступающую энергию и сфокусировать ее на плоскости изображения. Совмещенная с этой плоскостью чувствительная матрица генерирует набор выходных сигналов, каждый из которых пропорционален интегралу световой энергии, принятой соответствующим сенсором. Тот факт, что регистрация двумерного сигнала осуществляется дискретно расположенными в пространстве сенсорами, обеспечивает пространственную дискретизацию сигнала [5].

Двумерный характер изображения по сравнению с обычными сигналами дает дополнительные возможности для оптимизации цифрового представления в целях сокращения объема получаемых цифровых данных. В подавляющем большинстве случаев на практике применяют дискретизацию, основанную на использовании прямоугольного растра, и равномерное квантование яркости. При использовании прямоугольного растра в окончательном виде цифровое изображение обычно представляет собой матрицу, строки и столбцы которой соответствуют строкам и столбцам изображения. Это связано с простотой выполнения соответствующих операций и относительно небольшими преимуществами при использовании оптимальных преобразований.

Применение равномерного квантования яркости не является наилучшим решением, если значения яркости большинства отсчетов изображения сгруппированы в темной области. В данном случае при построении квантователя целесообразно осуществлять динамическое сжатие диапазона следующим образом: в яркой области следует квантовать реже, а в темной области — чаще. Данный способ позво-

ляет уменьшить ошибку и соответствует яркостной кривой чувствительности человеческого глаза.

Наиболее часто в задачах распознавания образов рассматриваются монохромные изображения, что дает возможность рассматривать изображение как функцию на плоскости, которую можно представить в виде матрицы.

Рассмотрим точечное множество на плоскости, в котором яркость, прозрачность и оптическая плотность является функциями. Тогда формально изображение можно описать двумерной функцией $f(x, y)$, где x и y — координаты на плоскости, определяющей яркость изображения в точке (x, y) [5, 6]. Множество же всех возможных функций $f(x, y)$ на плоскости есть модель множества всех изображений.

Диапазон яркостей изображения можно задавать в виде $L_{\min} \leq l \leq L_{\max}$, где L_{\min} , L_{\max} — минимальная и максимальная яркость изображения соответственно.

На числовой оси на интервале $[0, 1]$ значение $l = 0$ соответствует уровню черного, $l = 1$ — уровню белого, а все промежуточные значения в этом интервале соответствуют некоторым оттенкам серого при изменении от черного до белого [5].

Промежуточные значения в соответствии с принятыми границами заданного интервала при дискретизации и квантовании изображения на координатной плоскости с использованием прямоугольного растра можно представить в виде

$$a_{i,j} = L_{\min} + Q_n,$$

где n — уровень квантования; Q_n — коэффициент квантования значений яркости с нелинейным преобразованием сигнала.

Коэффициент квантования значений яркости с нелинейным преобразованием сигнала описывается следующим уравнением:

$$Q_n = Q_{n-1} + q_n f(I).$$

где $f(I)$ — функция нелинейного преобразования аналогового сигнала; q_n — коэффициент увеличения или уменьшения текущего значения яркости изображения в некотором интервале в сравнении с предыдущим значением.

Данный коэффициент определяется следующими условиями:

$$q_n = \begin{cases} 1 & \text{при } l_n > l_{n-1}; \\ -1 & \text{при } l_n < l_{n-1}; \\ 0 & \text{при } l_n = l_{n-1}. \end{cases}$$

При использовании матрицы сенсоров по всей прямоугольной области цифровое изображение представляется в виде матрицы, строки и столбцы

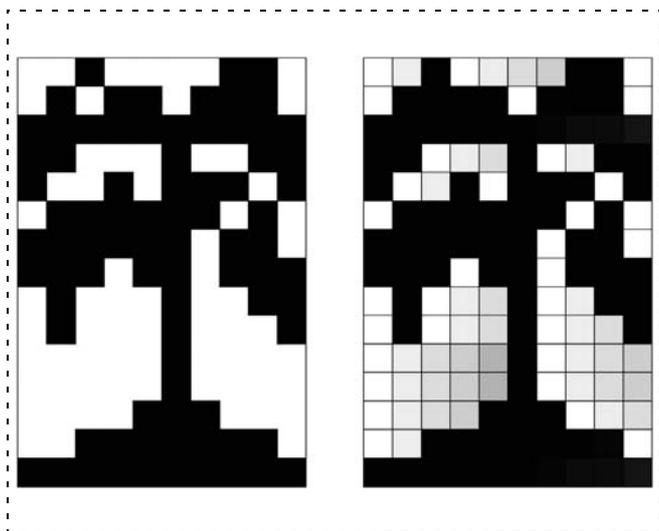


Рис. 1. Исходное (слева) и восстановленное (справа) изображение

которой соответствуют строкам и столбцам изображения:

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} a_{0,0} & a_{0,1} & \dots & a_{0,m-1} \\ a_{1,0} & a_{1,1} & \dots & a_{1,m-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n-1,0} & a_{n-1,1} & \dots & a_{n-1,m-1} \end{bmatrix}$$

Имитационная модель формирования изображения с использованием предложенного метода построена с использованием пакета прикладного программного обеспечения MATLAB, результаты имитационного моделирования приведены на рис. 1.

Устройство для формирования изображения

Интенсивное развитие цифровых методов повлияло на все отрасли техники передачи и хранения информации в силу присущих цифровым системам преимуществ в помехозащищенности, возможности исправления ошибок, гибкости при коммутации сообщений, постоянно понижающейся стоимости и увеличивающейся надежности. Такая параллельность развития цифровой техники и расширение области применения изображений привела к естественному результату, а именно к интенсивным исследованиям в области передачи и записи изображений цифровыми методами.

Типовая структура системы технического зрения бесконтактного действия, представленная на рис. 2, включает в себя объект, оптическую систему, предназначенную для приема и создания изображения объекта, анализатор изображения, включающий устройство обработки информации.

Устройство обработки информации обычно представляет собой совокупность аналоговых или аналого-цифровых преобразователей, встроенных микропроцессоров или отдельно расположенных компьютеров, снабженных специально разработанными программами. Конструктивно управляющее устройство может быть совмещено с устройством обработки информации.

Для реализации предложенного метода формирования изображения разработан и изготовлен опытный экземпляр устройства, структурная схема которого представлена на рис. 3.

Разработанное устройство включает в себя следующие блоки: первичных преобразователей; цифровой обработки сигналов; хранения данных; памяти; цифроаналоговых преобразователей.

Устройство работает следующим образом. Оптическая система фокусирует изображение на матричном первичном преобразователе и передает ин-

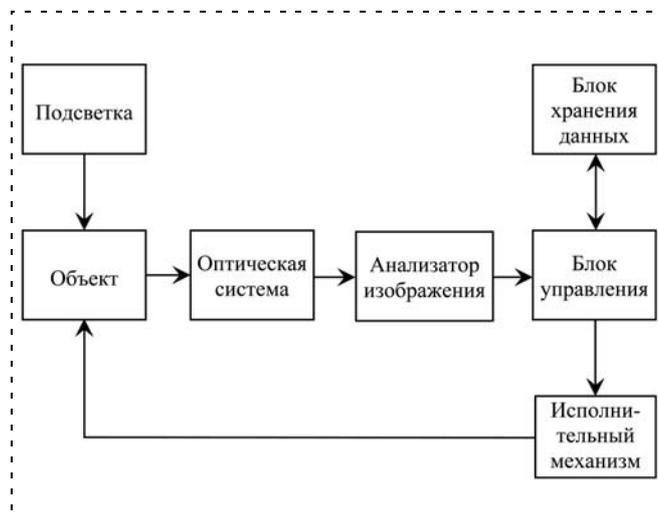


Рис. 2. Типовая структура системы технического зрения бесконтактного действия

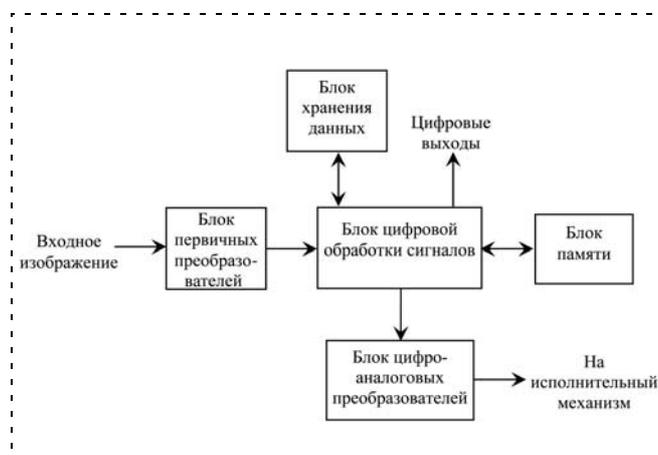


Рис. 3. Структурная схема устройства формирования изображения

формацию на аналого-цифровой преобразователь, который реализован в блоке цифровой обработки сигналов.

Далее блок цифровой обработки сигналов формирует изображение по предложенному методу и сохраняет данные в блоке памяти для дальнейшего хранения, обработки и передачи информации по интерфейсу связи с ЭВМ.

Вывод

Полученные результаты позволяют повысить точность формирования изображения, плавно выделить контуры изображения с добавлением оттенков серого, что делает изображение более четким и естественным. Данный метод позволяет не применять сложный математический аппарат при дискретизации и квантовании непрерывных изображений. Разработанное устройство обладает своими уникаль-

ными динамическими и управляющими характеристиками и может решать поставленные задачи управления оборудованием в режиме реального времени.

Список литературы

1. **Petrou M.** Learning in Pattern Recognition // Lecture Notes in Artificial Intelligence — Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition. 1999. P. 1—12.
2. **Jacobsen X., Zscherpel U. and Perner P.** A Comparison between Neural Networks and Decision Trees // Lecture Notes in Artificial Intelligence — Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition. 1999. P. 144—158.
3. **Круглов В. В., Борисов В. В.** Искусственные нейронные сети. Теория и практика. 2-е изд., стереотип. М.: Горячая линия-Телеком, 2002. 382 с.
4. **Оссовский С.** Нейронные сети для обработки информации / С. Оссовский.: Пер. с польского И. Д. Рудинского. М.: Финансы и статистика, 2002. 344 с.
5. **Гонсалес Р., Вудс Р.** Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
6. **Методы компьютерной обработки изображений** / Под ред. В. А. Соифера. 2-е изд., испр. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 784 с.

ИНФОРМАЦИЯ

3—8 октября 2011 г.
в пос. Дивноморское Геленджикского района Краснодарского края состоится

4-я Всероссийская мультikonференция ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ (МКПУ—2011)

Председатель Президиума мультikonференции
академик РАН В. Г. Пешехонов

Состав мультikonференции

- ♦ **Локальная научно-техническая конференция**
"ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И УПРАВЛЕНИЕ" (ИИУ-2011)
Председатель программного комитета конференции — академик РАН С. Н. Васильев
- ♦ **Локальная научно-техническая конференция**
"МЕХАТРОНИКА И ЭРГАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ" (МЭС-2011)
Председатель программного комитета конференции — член-корреспондент РАН Е. Д. Теряев
- ♦ **Локальная научно-техническая конференция**
"УПРАВЛЕНИЕ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКИХ И МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМАХ"
(УРСИМС-2011)
Сопредседатели программного комитета конференции:
член-корреспондент РАН И. А. Каляев, член-корреспондент РАН Р. М. Юсупов

Подробная информация о мультikonференции и условиях участия в ней размещается на сайте: <http://www.mvs.tsure.ru>

УДК 621.01+629.3.05

В. М. Герасун, д-р техн. наук, проф.,

А. Ф. Рогачёв, д-р техн. наук, проф.,

И. А. Несмиянов, канд. техн. наук, доц.

Волгоградская государственная
сельскохозяйственная академия,

ivan_nesmiyanov@mail.ru,

В. Е. Павловский, д-р физ.-мат. наук, проф.,

Институт прикладной математики
им. М. В. Келдыша РАН, г. Москва

Синтез манипулятора для мобильного робота на гусеничном шасси

Предложен манипулятор на основе пространственного исполнительного механизма в качестве приборонесущего оборудования для мобильного информационного робота. В результате геометрического синтеза получены оптимальные параметры манипулятора для работы на гусеничном шасси.

Ключевые слова: манипулятор, мобильный робот, геометрический синтез

Введение

Манипуляторы на основе пространственных механизмов платформенного типа обладают повышенной жесткостью, способны обеспечить достаточно высокие динамические характеристики при относительно небольшой металлоемкости. На базе таких пространственных механизмов в Волгоградской государственной сельскохозяйственной академии разработан ряд манипуляторов, особенностями которых являются: большая зона обслуживания, возможность агрегатирования с различными энергетическими модулями, широкий набор вариантов крепления грузозахватного устройства [1].

Манипулятор на основе пространственного механизма (рис. 1) может использоваться для позиционирования инструмента, датчиков, приборов на мобильном информационном роботе на гусеничном шасси, разработанном в ИПМ им. М. В. Келдыша РАН [2] для поиска подземных электрических и коммуникационных кабелей, магистралей тепло- и водоснабжения, схемы прокладки которых утрачены. Другое актуальное направление использования мобильного информационного робота с манипулятором-триподом — это обследование состояния заброшенных ирригационных каналов сельскохозяйственных угодий и других мелиоративных сооружений



Рис. 1. Манипулятор на основе пространственного механизма в виде трипода на самоходном колесном шасси

на предмет обрушений, провалов, заиления, наличия зарослей кустарников в целях последующего планирования восстановительных работ.

Для подавляющего большинства подобных пространственных механизмов число внутренних входов $n_{ц}$ (исполнительных цилиндров) равно числу степеней подвижности W , от которых зависит максимальное число одновременных управляющих воздействий на манипулятор [3]. Для данного пространственного манипулятора степень подвижности относительно платформы и, соответственно, число независимых обобщенных координат $q = n_{ц} = W = 4$, пятая степень подвижности реализуется перемещением шасси.

Геометрический синтез манипулятора по крайним положениям

Геометрические размеры звеньев определяются из условия реализации требуемого движения, а в частности, требуемой зоны действия, исходя из геометрических параметров мобильной платформы.

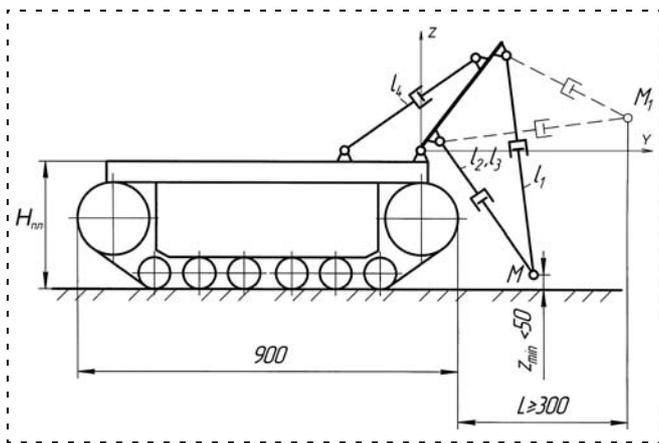


Рис. 2. Схема манипулятора на основе пространственного исполнительного механизма на базе мобильного гусеничного робота (вид сбоку)

За основные геометрические ограничения синтеза манипулятора на основе пространственного механизма примем:

- нижнюю точку зоны действия схвата (рис. 2) относительно поверхности $z_{\min} < 50$ мм;
- максимальный вылет схвата от передней кромки робота $L_{\max} > 300$ мм;
- угол сектора зоны действия в горизонтальной плоскости $\Theta \geq 90^\circ$ (рис. 3);
- сторону основания пирамиды исполнительного механизма $\alpha < 500$ мм (обусловлено габаритными размерами робота).

Наибольшее значение угла сектора Θ будет в случае, когда ΔAMB параллелен плоскости XOY (рис. 3) и когда длина цилиндра l_2 будет минимальной, а l_3 — максимальной в крайнем левом положении, и наоборот, l_2 будет максимальной, а l_3 — минимальной в крайнем правом положении. Так как механизм симметричен относительно оси OY , то достаточно рассмотреть его движение при постоянной минимальной длине цилиндра l_2 и изменении только l_3 .

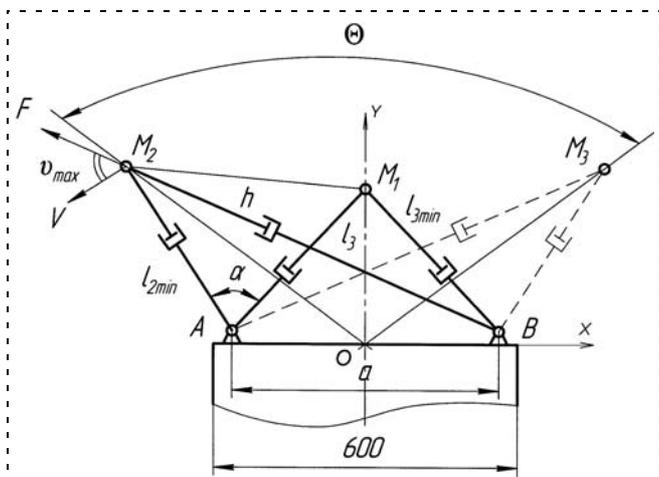


Рис. 3. Расчетная схема манипулятора к кинематическому синтезу (вид сверху)

Приняв указанные выше допущения ($\Delta AMB \parallel XOY$ и $l_2 = \text{const}$), получим плоскую замещающую схему с качающимся цилиндром l_3 и коромыслом l_2 . Тогда при переходе из одного крайнего положения AM_1B в другое AM_2B длина цилиндра l_3 изменяется от $l_{3\min}$ до $l_{3\max}$, поворачивая цилиндр l_2 на угол α . Удлинение цилиндра обозначим $h = l_{3\max} - l_{3\min}$, отношение длины цилиндра к ходу штока есть коэффициент удлинения цилиндра $k = l_3/h$. Для гидроцилиндров погрузочных машин $k = 1,4 \dots 3$, но предполагая использовать электроцилиндры (актуаторы), в дальнейшем примем диапазон изменения $k = 1 \dots 2$.

Следует учитывать, что работоспособность механизма и его коэффициент полезного действия во многом зависят от угла давления ν — угла между осью цилиндра и вектором скорости точки приложения силы. Допускаемый угол давления в рычажных механизмах, как правило, не должен превышать $[\nu] = 60^\circ$. Оптимальная по габаритным размерам схема механизма будет при условии $\nu_{\max} = [\nu]$, и вместе с тем, чем меньше $[\nu]$, тем меньше трение в шарнирах.

Из уравнения векторного контура получаем

$$(k+1)^2 h^2 - 4l_{2\min} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) (k+1) \cos\left([\nu] - \frac{\alpha}{2}\right) h + 4l_{2\min}^2 \sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) - l_{3\min}^2 = 0, \quad (1)$$

решением которого является

$$h = -\frac{b}{2} + \sqrt{\frac{b^2}{4} - c}; \quad (2)$$

$$b = -4l_{2\min}(k+1) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos\left([\nu] - \frac{\alpha}{2}\right) / (2k+1);$$

$$c = 4l_{2\min}^2 \sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) / (2k+1).$$

Угол поворота цилиндра α зависит от угла сектора зоны действия схвата Θ и предельного угла давления $[\nu]$ (рис. 4):

$$\alpha = \frac{\Theta + [\nu] - \pi/6}{2}. \quad (3)$$

После определения решения уравнения (1) находим максимальное удлинение цилиндра $l_{3\max}$ и длину стойки a :

$$l_{3\max} = kh; \quad (4)$$

$$a = \sqrt{l_{2\min}^2 + (l_{3\min} + h)^2 - 2l_{2\min}(l_{3\min} + h) \sin[\nu]}. \quad (5)$$

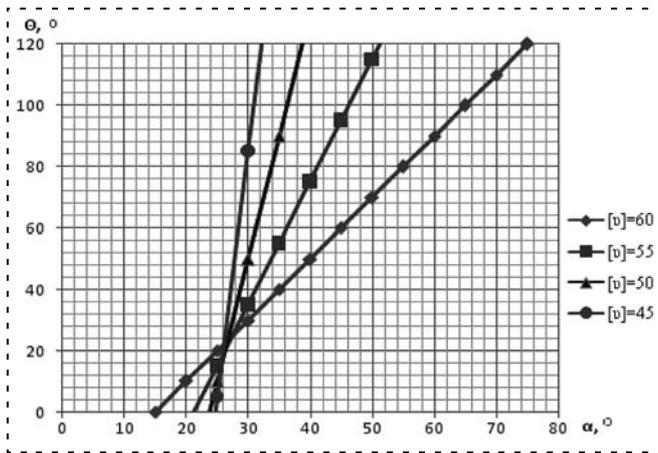


Рис. 4. Зависимость угла зоны действия Θ от угла поворота цилиндров α при различных предельных углах давления $[\nu]$

Определив удлинение h цилиндра l_3 и межосевое расстояние a , принимаем одинаковыми размеры всех цилиндров и одинаковыми межосевые расстояния основания пирамиды в целях симметричности пространственного механизма манипулятора. Основываясь на симметричности манипулятора и предполагая, что высота крепления нижних шарниров основания пирамиды пространственного механизма манипулятора от поверхности равна высоте платформы робота, получим условие

$$\sqrt{l_2^2 - a^2/4} > (H_{\text{пл}} - z_{M_{\text{min}}}),$$

Оптимальные результаты синтеза при $k = 1,7$ и обеспечении угла сектора зоны действия $\Theta = 100^\circ$

l_i , мм	330	340	350	360	370	380	390	400
a , мм	287,44	296,15	304,86	313,57	322,28	331	339,7	348,41
L_{max} , мм	303,61	312,81	322	331,21	340,41	349,61	358,81	368

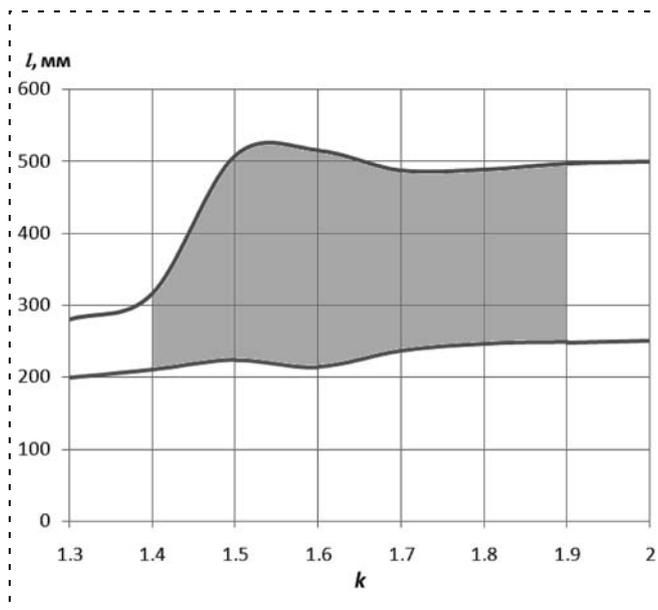


Рис. 5. Область допустимых значений l в зависимости от k из условия обеспечения необходимой зоны действия

из которого определяются минимальные значения длин цилиндров l_2 и l_3 . Параметры цилиндра l_4 определяются по зависимостям, аналогичным выражениям (1)–(5). Исходя из всех ранее найденных параметров определяется максимальный вылет схвата от кромки платформы робота

$$L_{\text{max}} = \sqrt{l_{1\text{max}}^2 - 3a^2/16}.$$

Результаты синтеза

Определение параметров манипулятора по заданным ограничениям проводили на ЭВМ, в результате расчетов были получены зависимости длин цилиндров l_i и межосевых расстояний a от коэффициента удлинения k (рис. 5, 6). Ряд оптимальных основных параметров манипулятора у мобильного робота, удовлетворяющих всем ранее принятым ограничениям, приведены в таблице.

При угле сектора зоны действия $\Theta = 100^\circ$ и $k = 1,7$ межосевое расстояние между точками крепления цилиндров на платформе и максимальный вылет схвата от кромки робота определяются как

$$a = 0,876l_i; L_{\text{max}} = 0,92l_i.$$

Однако полученные в результате синтеза параметры манипулятора могут отличаться от реальной

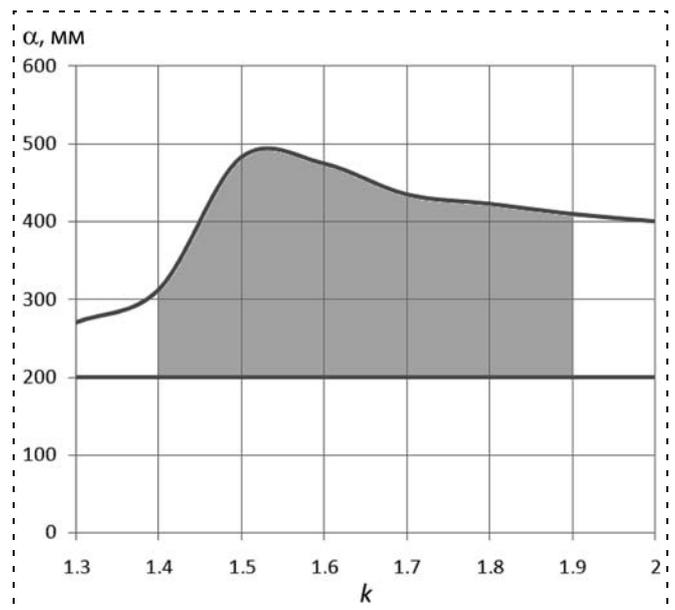


Рис. 6. Область допустимых значений α в зависимости от k из условия обеспечения необходимой зоны действия

конструкции, так как в зависимости от грузоподъемности манипулятора возможно увеличение диаметра исполнительных цилиндров, что, в свою очередь, повлечет небольшое уменьшение зоны действия.

Список литературы

1. Герасун В. М., Рогачёв А. Ф., Несмиянов И. А. Опыт использования пространственных механизмов в кинематических цепях манипуляторов. Экстремальная робототехника // Тр. XXI

Междунар. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург: Политехника-сервис, 2010. С. 169—172.

2. Павловский В. Е., Евграфов В. В., Забегаев А. Н., Калинин А. В., Павловский В. В., Петровская Н. В. Мобильный информационный робот на гусеничном шасси. Экстремальная робототехника // Тр. XXI Междунар. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург: Политехника-сервис, 2010. С. 103—108.

3. Герасун В. М., Несмиянов И. А. Системы управления манипуляторами на основе пространственных исполнительных механизмов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 2. С. 24—28.

УДК 331. 101. 1 (075.8)

В. Ф. Головин, канд. техн. наук, доц.,
М. В. Архипов, ассистент,
В. В. Журавлев, ассистент,
Московский государственный
индустриальный университет,
medicalrobot@mail.ru

Эргатические и биотехнические системы управления в медицинской робототехнике

Предлагается расширение понятий эргономики и биотехнического управления в связи с тем, что робототехника активно внедряется в медицину. Приведены примеры биотехнических систем, в которые, помимо робота и оператора, вводится еще один человек — пациент. Описывается схема взаимодействия трех компонентов системы — оператора-врача, робота и пациента. Рассмотрены два варианта эксплуатации медицинского робота — в клинике под руководством врача и индивидуальное домашнее использование. Отмечается, что трехкомпонентное взаимодействие существует не только в медицинской робототехнике, но и возникает в задачах машиностроения.

Ключевые слова: медицинская робототехника, эргономика, биотехническое управление, автоматический режим, автоматизированный режим, человек-оператор, диагностика, пациент

По определению эргономика устанавливает соответствие труда человека его физиологическим и психическим возможностям, обеспечивает наиболее эффективную работу, которая не создает угрозы для здоровья человека и выполняется при минимальных затратах биологических ресурсов. Основным объектом исследования эргономики как науки является система "человек—машина—среда". В традиционных технических задачах среда, с которой взаимодействует машина, как правило, неактивная и небиологическая. Примером может быть мобильный робот, инспектирующий и ремонтирующий трубопроводы канализации. Эргатическая система управления этим роботом может управлять им в командном, следящем, интерактивном режимах, наблюдая за перемещениями. Это — определенное в работе [1] био-

техническое управление (рис. 1). Компонент "био" в таком управлении определяется физиологическими и психическими особенностями человека-оператора, которые проектировщик учитывает в человеко-машинных комплексах.

Развитие микротехнологий позволяет уменьшить габаритные размеры робота до размеров, позволяющих использовать их в полостях и сосудах человека. В малоинвазивной внутрисосудистой робототехнике [2] усиливается требование обеспечения безопасности. Однако это не является новым условием — аналогичное требования повышенной надежности предъявляется, например, к техническим трубопроводам в ядерных установках.

Принципиально новым же является учет психофизиологических свойств пациента, в которых отражается состояние пациента, эффективность медицинской процедуры, ее прогресс. В традиционной технической эргатической системе учитываются психофизиологические особенности человека-оператора, и задача состоит в том, чтобы учесть их, оптимально повышая эффективность системы. Теперь необходимо учитывать также психофизиологические особенности пациента.

Если физиологические параметры состояния пациента измеримы, возникает возможность рационально управлять ими, например, поддерживая в диапазоне нормы. Для микрососудистого робота управляемыми параметрами физиологического состояния могут быть: частота сердечных сокращений, артериальное давление.

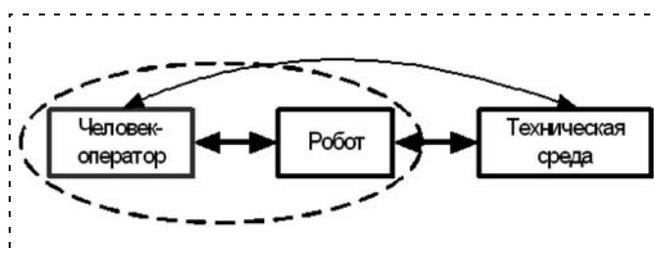


Рис. 1. Биотехническое управление роботом, взаимодействующим с технической средой

Примером биотехнической системы с управлением по физиологическим параметрам пациента может быть робот Da Vinci. Робот позволяет дистанционно проводить лапароскопические операции в режиме копирования роботом движений удаленного от пациента хирурга. Ряд физиологических параметров состояния пациента передается на монитор хирурга. Хирург может учитывать эти параметры (в режиме полуавтоматического управления), а может на некоторых этапах операции переключать управление этими параметрами на автоматическое.

Другим примером биотехнической системы с управлением по физиологическим параметрам может быть система спортсмен—велотренажер [3]. Система поддерживает устанавливаемую для тренирующегося спортсмена частоту сердечных сокращений. Моментный нагрузитель изменяет нагрузку на ноги спортсмена и командует ритмом вращения педалей велотренажера так, чтобы достигнуть и поддерживать не вредную для здоровья спортсмена частоту сердечных сокращений.

Типичным примером биотехнической системы с управлением по физиологическим параметрам также может быть робототехническая система для механотерапии [4]. Существующие механотерапевтические средства выполняют предписанные механические воздействия на пациента (массаж, движения конечностей в суставах, постизометрическая релаксация, мобилизация), объективно не оценивая терапевтический эффект. Но во время серии сеансов или в течение одного сеанса механотерапии можно наблюдать изменения ряда физиологических параметров пациента, оценивать эффективность терапии и изменять план процедур, т. е. управлять механотерапией. Одними из наиболее информативных физиологических параметров состояния пациента являются мышечный тонус и электрокожное сопротивление [5]. Эти параметры, несмотря на помехи со стороны психики пациента, откликаются на механотерапевтические воздействия и в сторону релаксации, и в сторону мобилизации пациента.

В рассмотренных примерах медицинской робототехники активными выступают три компонента: оператор-врач, робот, пациент. Возможная схема взаимодействия между этими компонентами при выполнении роботом механотерапии представлена на рис. 2, где показаны возможные связи между компонентами:

1) командное управление роботом со стороны врача подразумевает изменение режимов и параметров процедуры, в том числе по предложению робота, работающего в режиме консультанта;

2) диагностика состояния пациента врачом по данным системы робота, измеряющей текущие значения состояния пациента;

3, 4) использование врачом данных, полученных в предыдущих сеансах, и пополнение базы знаний (система Медсофт);

5) мануальное исполнение процедуры врачом;

6) вербальная связь пациента с врачом;

7) установка прикладных программ и данных в робот перед процедурой;

8) передача роботом новых данных о пациенте в базу знаний;

9) биологическая обратная связь через органы чувств пациента;

10) биотехническая обратная связь по биомедицинским переменным пациента;

11) силовая обратная связь по механическим характеристикам пациента;

12) механическое воздействие робота на пациента.

Рассмотрим два случая эксплуатации робота: в клинике под руководством врача и индивидуальное домашнее использование под руководством пациента.

В первом случае робот определенное время может работать в автоматическом режиме, предупреждая врача о возможных отклонениях и отводя руку в случае появления сигналов опасности. Врач может, отведя руку робота, работать мануально самостоятельно. В некоторых приемах врач может мануально работать параллельно с роботом. В этих случаях появляются дополнительные требования к безопасности врача. Если пациент чувствует дискомфорт или хочет изменить процедуру, он советуется с врачом, и врач принимает решение.

В случае домашнего использования робота автоматический режим включает и выключает пациент.

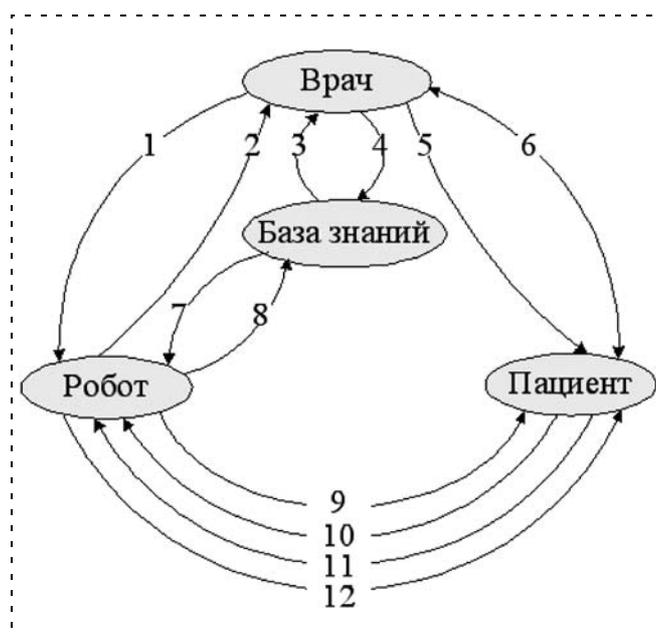


Рис. 2. Схема взаимодействия между компонентами системы оператор-врач, робот, пациент

Робот выступает как консультант для пациента, и право изменять процедуру принадлежит пациенту. Врач, находящийся в клинике, может предоставить консультацию через сеть Интернет. Также пациент может наблюдать на мониторе изменение параметров, наиболее информативно отражающих его психофизиологическое состояние и прогресс. Эта возможность обеспечивается биологической обратной связью.

Воздействие на управление со стороны психики и физиологии может быть как положительным, например, в случае биологических обратных связей, так и отрицательным — в случае помех. Действительно, на измеряемые и используемые для управления физиологические параметры состояния пациента могут накладываться проявления психики и других произвольных физиологических функций. Поэтому для управления необходимо выбирать измеримые физиологические параметры, в которых проявляется в большей степени управляющее воздействие, чем помехи.

Возникает вопрос, к какому классу отнести этот вид управления. Применительно к биообъектам известны следующие виды управления:

- *биоуправление* — управление, которое изменяет психофизиологическое состояние человека без участия технических средств. Такое управление осуществляет, например, вестибулярный аппарат, системы, поддерживающие температуру, давление, частоту сердечных сокращений человека. Естественные обратные связи образуются афферентными рефлекторными дугами и замыкают рефлекторные кольца эфферентными дугами [6];
- *биотехническое* — управление, в котором принимают участие технические компоненты. Примером являются не только упомянутые в робототехнике системы командного, следящего и интерактивного управления, но и системы искусственной вентиляции легких, вспомогательного кровообращения, системы с биологической обратной связью.

Однако указанные виды управления не присущи трехкомпонентным системам с управлением по физиологическим параметрам состояния. В трехкомпонентных системах с роботом взаимодействуют два человека: врач и пациент, и их взаимодействие значительно сложнее. Чтобы не вносить новую терминологию, можно управление для данных систем называть управлением биотехнической системой.

Новые отношения между роботом и человеком возникают не только в медицинской робототехнике. В неструктурируемых средах и экстремальных ситуациях робот должен быть не "тупым", а интеллектуальным помощником человека. Существуют задачи равноправного взаимодействия робота и сборщика на конвейере, когда во внеплановых ситуациях сборщик не только управляет роботом, но и подстраивается под его работу, обеспечивая и дружелюбный интерфейс, и собственную безопасность.

Список литературы

1. Попов Е. П., Письменный Г. В. Основы робототехники, М.: Высшая школа, 1990.
2. Саврасов Г. В., Гаврюшин С. С., Нарайкин О. С., Ющенко А. С., Поспелов В. И. Мини-робототехническая система для внутрисосудистых операций и диагностики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 7.
3. Ван Цзыси. Разработка и исследование биотехнической системы регулирования частоты сердечных сокращений для коррекции функционального состояния человека: Дис. кандидата технических наук, спец. 05.11.17. М.: 2002. 226 с.
4. Головин В. Ф. Мехатронная система для манипуляции на мягких тканях // Мехатроника, автоматизация, управление. 2002, № 7. С. 31—42.
5. Архипов М. В., Головин В. Ф. Биотехническое управление робототехнической системой для механотерапии на основе информации об электрокожном сопротивлении // Матер. 7-й науч.-техн. конференции "Мехатроника, автоматизация, управление". СПб, 2010. С. 56—59.
6. Анохин П. К. Очерки по физиологии функциональных систем. М.: 1975. 448 с.
7. Разумов А. Н., Головин В. Ф. Расширение функций эргономики в медицинской робототехнике // Матер. 7-й науч.-техн. конф. "Мехатроника, автоматизация, управление". СПб., 2010. С. 321—324.

ИНФОРМАЦИЯ

С 3 по 8 октября 2011 г. в пос. Дивноморское Геленджикского района в рамках
4-й Всероссийской мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2011)

состоится научно-техническая конференция

"МЕХАТРОНИКА И ЭРГАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ" (МЭС-2011)

Научные направления конференции:

- ♦ АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ В МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМАХ
- ♦ АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИНФОРМАТИЗАЦИЯ ЭРГАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
- ♦ ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
- ♦ ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ МЕХАТРОННЫЕ И ЭРГАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Дополнительные материалы по конференции МАУ-2011
см. на сайте журнала "Мехатроника, автоматизация, управление"



ЖУРНАЛ В ЖУРНАЛЕ



Управление и информатика в авиакосмических и морских системах



Главный редактор:

ЛЕБЕДЕВ Г. Н.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСЕЕВ В. В.
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.
ТЕРЯЕВ Е. Д.
ФИЛИМОНОВ Н. Б.
ШИРЯЕВ В. И.
ШКОЛИН В. П.

Редакция:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.
ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.
ЧУГУНОВА А. В.

СОДЕРЖАНИЕ

Дорожко В. М.

Идентификация снижения сопротивляемости морского судна к динамическому воздействию ветровой нагрузки 58

Севрюк А. Н.

Автоматическая классификация кластеризованных измерительных аномалий на борту АНПА 64

Бегичев Ю. И., Пономаренко А. В., Котицын Л. О., Сильвестров М. М., Чернышов В. А.

Концепция построения учебно-тренировочных средств для эргономического сопровождения разработки и создания эргатического информационно-управляющего комплекса многоцелевых беспилотных летательных аппаратов 71

В. М. Дорожко, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,
Институт автоматики и процессов управления
ДВО РАН, г. Владивосток,
bendor@iacp.dvo.ru

Идентификация снижения сопротивляемости морского судна к динамическому воздействию ветровой нагрузки

Методом вычислительной гидродинамики выполнено моделирование бортовой качки поперечного сечения рыболовного судна (контур) на морском волнении. Установлено, что максимум модуля угловой скорости, сопровождающийся в процессе подъема контура на вершину волны нарастанием крена в сторону движения волн, является идентификационным признаком снижения сопротивляемости морского судна к динамическому воздействию ветровой нагрузки. В численном эксперименте показана возможность опрокидывания контура под действием шквалистого ветра.

Ключевые слова: морское судно, идентификационный признак, качка на морском волнении, шквалистый ветер, опрокидывание судна

Введение

Одной из важнейших задач морских перевозок является обеспечение безопасности морского транспорта. Среди морских катастроф наиболее опасными являются случаи опрокидывания судов. Ежегодно по разным типам судов совершается от 1 до 6 % опрокидываний [1] от общего числа морских происшествий. При этом утрачиваются огромные материальные ресурсы, наносится непоправимый экологический урон морской среде и, что самое важное, теряются человеческие жизни. По этой причине не ослабевают интерес к исследованию сопротивляемости судов к ветровому воздействию [2–4].

Воздействие на судно внешних сил и моментов, обусловленных волнением и ветром, вызывает его угловые отклонения от положения равновесия. При этом конструкция судна, количество и положение перевозимого груза должны обеспечивать устойчивость судна, которая характеризуется способностью судна иметь равновесное положение, устойчивое в отношении угловых отклонений [5]. Отмечается [2], что наибольшее ухудшение устойчивости судна проявляется на вершине волны, когда создаются условия потери управляемости, в результате чего судно под действием волн выстраивается боком (лагом) к волне. Среди различных типов качки наиболее серьезные последствия для устойчивости имеет бортовая качка судна, расположенного лагом к волне, приводящая к опрокидыванию судна как при наличии ветрового воздействия, так и без него.

Для описания качки судов на волнении используются различные подходы [1, 6, 8], в отношении которых можно отметить, что в силу приближенного аналитического описания реальных процессов они не позволяют воспроизвести во времени точную картину качки судна на волнении. По этой причине не известны идентификационные признаки, позволяющие в реальном времени судить о неблагоприятных моментах, в течение которых у судна, испытывающего бортовую качку на волнении, снижается сопротивляемость к динамическому воздействию ветровой нагрузки.

Данное исследование посвящено поиску и обоснованию идентификационного признака снижения судном на волнении сопротивляемости к динамическому воздействию ветровой нагрузки, который может быть использован как в системах управления движением судов, так и непосредственно судоводителями для автоматизации процесса диагностики сопротивляемости судов к ветровому воздействию непосредственно в процессе эксплуатации судна, и направлено на предупреждение морских катастроф, что обуславливает актуальность предлагаемых исследований.

Постановка задачи и основные модельные представления

Суть задачи состоит в том, что на основе численного решения уравнений движения 2D-модели, представляющей собой поперечное сечение полномасштабного судна (контур), на волнении выполняется совместный анализ временных диаграмм угловой, горизонтальной и вертикальной качки, а также сил и момента сил указанных видов качки. Обоснование корреляции между указанными процессами позволит принять максимум модуля угловой скорости, сопровождающийся нарастанием крена в сторону движения волн в процессе подъема контура на вершину волны, в качестве идентификационного признака снижения сопротивляемости морского судна к динамическому воздействию ветровой нагрузки.

Прежде всего рассмотрим возможности, предоставляемые существующими представлениями о качке судов на волнении. Приближенный метод решения гидромеханической задачи нелинейной качки конечной амплитуды [6], основанный на параметрических разложениях в ряды по малым параметрам, описывает поперечную качку судна в виде системы взаимосвязанных колебаний судна: угловых (бортовая качка) и линейных (горизонтальная и вертикальная качка). Указанный метод решения не может непосредственно применяться для получения точного решения, описывающего качку судна, соот-

ветственно и для выработки идентификационного признака снижения судном на волнении сопротивляемости к динамическому воздействию ветровой нагрузки. Причиной этому является отсутствие в настоящее время для судна, испытывающего качку, временных зависимостей элементов уравнений, таких как присоединенные массы, коэффициенты демпфирования и их производные по времени, плечо момента сил плавучести, возвращающих судно в равновесное состояние, площадь плоскости, ограниченной ватерлинией, расстояние от центра тяжести судна до плоскости ватерлинии и др. В иностранной литературе [1, 7, 8] при анализе опрокидывания судов бортовая качка представляется аналитическими выражениями без взаимосвязи с другими видами поперечной качки (вертикальной и горизонтальной), что вносит принципиальные ограничения на возможность разработки идентификационного признака снижения сопротивляемости судна на волнении к динамическому воздействию ветровой нагрузки.

В связи с этим для изучения движения судна на волнении принято решение обратиться к методу вычислительной гидродинамики (CFD — *Computational Fluid Dynamics*) [9], применение которого в данной задаче позволяет моделировать численными методами движение судна на волнении при одновременной регистрации параметров его движения.

Для формального описания модели выберем две правые коллинеарные системы координат: неподвижную — $o\xi\eta\zeta$ и подвижную — $oxyz$, полусвязанную с судном таким образом, что курс судна совпадает с направлением оси ox , а его центр тяжести всегда находится в начале координат подвижной системы. В стартовый момент времени обе системы совпадают. Поскольку решение пространственной задачи движения требует значительных вычислительных ресурсов, обратимся к методу моделирования на основе плоских сечений судна [10]. Для этого выберем поперечное сечение судна (контур) в плоскости oyz . Придадим контуру массоинерционные характеристики поперечного сечения толщиной в один метр. Расчетную область сформируем в плоскости $o\eta\zeta$, ось $o\eta$ которой лежит на условной поверхности спокойной воды (при отсутствии волн) и совпадает с направлением распространения волны. Под воздействием волн контур совершает угловые колебания (качку) относительно своего центра тяжести и одновременно испытывает периодические линейные горизонтальные и вертикальные перемещения.

В основу CFD-метода положены Reynolds-averaged-Navier-Stokes-уравнения неразрывности не-

сжимаемой жидкости и сохранения импульса [9], которые могут быть записаны в тензорном виде:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0; \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right] + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{u'_i u'_j}); \quad (2)$$

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = -\rho \frac{2}{3} k \delta_{ij} + \mu_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (3)$$

где $i, j, l = \overline{1, 2}$; x_1, x_2 — соответствующие декартовы координаты в абсолютной системе $o\eta\zeta$; u_1, u_2 — соответствующие им мелкомасштабные осреднения значений абсолютной скорости потока жидкости; u'_1, u'_2 — флуктуации абсолютной скорости, ответственные за диссипацию энергии; μ и ρ — вязкость и плотность жидкости, соответственно; p — давление; $\rho \overline{u'_i u'_j}$ — напряжения Рейнольдса, полученные осреднением флуктуационных компонент скорости.

Для вычисления напряжений Рейнольдса применялась известная модель турбулентности $k-\varepsilon$, RNG (*renormalization group mathematical technique*) [11], которая позволяет получать расчетные величины, близкие к их экспериментальным значениям [12]. В связи с этим уравнения (1)–(3) дополняются [9] уравнениями в тензорном виде транспорта турбулентной кинетической энергии (k) и скорости диссипации турбулентной энергии (ε), а также выражением эффективной турбулентной вязкости (μ_{eff}):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) &= \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) &= \\ &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_b) - C_{2\varepsilon}' \rho \frac{\varepsilon^2}{k}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\mu_{\text{eff}} = \mu \tilde{\nu}, \quad d \left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon \mu}} \right) = 1,72 \frac{\tilde{\nu}}{\sqrt{\tilde{\nu}^3 + 99}} d\tilde{\nu}, \quad (6)$$

$$\text{где } C'_{2\varepsilon} = C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/4,38)}{1 + 0,012\eta^3},$$

$$\eta = k\varepsilon \sqrt{\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)}, C_{1\varepsilon} = 1,42; C_{2\varepsilon} = 1,68;$$

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}; G_b = -\frac{9,81}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T_b} \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T_b}{\partial x_i}; t - \text{время};$$

T_b — температура; Pr_t — турбулентное число Прандтля; α_k и α_ε — инверсные числа Прандтля для k и ε

соответственно; $\mu_t = 0,09\rho k^2/\varepsilon$; $Y_M = 2\rho\varepsilon \frac{k}{c^2}$; c — скорость звука в жидкости.

Решение системы уравнений (1)—(6) выполнено численным способом на полномасштабной модели контура, свободно плавающего на взволнованной поверхности воды в 2D-сеточной модели прямоугольного канала, сформированной в плоскости $o\eta\zeta$.

Обратимся к выражению [5] спектральной плотности амплитуд морского волнения (спектр Пирсона—Московица)

$$S = 4,998\pi D_\zeta/\sigma_m x^{-5} \exp(-1,25x^{-4}), \quad (7)$$

где $x = \sigma/\sigma_m$; σ — угловая частота волнения; σ_m — угловая частота максимума спектра; D_ζ — дисперсия амплитуд волн. Разобьем диапазон частот $[\sigma_{\min}, \sigma_{\max}]$ спектра на N поддиапазонов. В каждом (i -м) поддиапазоне определим амплитуду волны [13] $r_i = \sqrt{2S_i \Delta\sigma_i}$, S_i — среднее значение спектральной плотности, $\Delta\sigma_i$ — частотную ширину и σ_i — среднюю частоту волнения. Используя полученные амплитудно-частотные дискретные значения морского волнения, зададим граничные условия на входе канала в виде вектора переменной скорости потока, горизонтальная (v_η) и вертикальная (v_ζ) компоненты которой определяются выражениями [14]

$$v_\eta = \sum_{i=1}^N \frac{gk_i r_i}{\sigma_i} \frac{\cosh[k_i(\zeta + H)]}{\cosh(k_i H)} \cos(k_i \eta_{in} - \sigma_i t + \varphi_i); \quad (8)$$

$$v_\zeta = \sum_{i=1}^N \frac{gk_i r_i}{\sigma_i} \frac{\sinh[k_i(\zeta + H)]}{\cosh(k_i H)} \cos(k_i \eta_{in} - \sigma_i t + \varphi_i); \quad (9)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения; H — глубина воды в канале; η_{in} — координата входной границы канала; $k_i = \sigma_i^2/g$ — волновое число; φ_i — дискретные значения фазы, выбираемые из случайного равномерного распределения на интервале $[-\pi, \pi]$.

Для определения граничных условий на контуре применена модель 6DOF (*six degree of freedom*) [15]. В данной 2D-задаче из шести реализуются три степени свободы указанной модели: бортовая качка, горизонтальные и вертикальные смещения контура. При этом на каждом временном шаге вычисляются F_η , F_ζ — $o\eta$ - и $o\zeta$ -компоненты вектора силы, приложенной к центру тяжести контура; M_θ — вектор момента сил, приложенных к контуру, относительно оси ox , проходящей через его центр тяжести; η_g , $\dot{\eta}_g$, $\ddot{\eta}_g$ и ζ_g , $\dot{\zeta}_g$, $\ddot{\zeta}_g$ — линейные $o\eta$ - и $o\zeta$ -компоненты векторов смещения, скорости и ускорения центра тяжести контура соответственно; θ_g , $\dot{\theta}_g$, $\ddot{\theta}_g$ — угол качки, угловая скорость и ускорение вращения контура относительно оси ox соответственно; число точек над переменными означает номер производной по времени. В равновесном положении вертикальная ось симметрии контура совпадает с осью $o\zeta$. При этом угол θ_g отклонения вертикальной оси симметрии контура от оси $o\zeta$ регистрируется как положительный при крене контура на правый борт (при вращении контура относительно оси ox по часовой стрелке). На основе полученных значений указанных сил и момента сил с учетом массы, геометрии, положения центра тяжести, момента инерции контура на каждом временном шаге вычислений определяются линейные и угловые перемещения и вычисляется новое положение контура.

В процессе качки геометрический центр подводной части судна перемещается по кривой, центр кривизны которой называется метacentром [5]. Тогда расстояние от положения метacentра до центра тяжести судна носит название метacentрической высоты; далее будут приведены выражения для вычисления начальных поперечных значений метacentра (m_0) и метacentрической высоты (h_0) контура, находящегося в равновесии на спокойной воде. В процессе качки контур совершает вращательные колебания относительно оси ox , проходящей через его центр тяжести.

На первом этапе выполнено численное моделирование качки контура на морском волнении. В определенные моменты времени, соответствующие подъему контура на вершину волны, контур подвергался на непродолжительное время динамическому воздействию ветровой нагрузки (в данной задаче — шквалистому ветру, действующему в течение короткого времени [5] и совпадающему с направлением бега волны).

На втором этапе в целях выявления влияния начальной поперечной метacentрической высоты (далее — метacentрическая высота), периодов волн и собственных колебаний контура на формирование

идентификационного признака проведено численное моделирование качки контура на регулярном волнении для двух различных значений h_0 . При этом для каждой метацентрической высоты вычисления многократно повторялись по сетке чисел, представляющих собой матрицу Z , элементами которой являются пары чисел τ_σ, τ_θ — дискретные значения периодов бегущих регулярных волн и собственных бортовых колебаний контура соответственно.

На основе анализа результатов численного моделирования качки контура на морском и регулярном волнении выполнялся поиск идентификационного признака снижения судном сопротивляемости к динамическому воздействию ветровой нагрузки.

Численные результаты и их обсуждение

Для численного моделирования выбран контур (поперечное сечение рыболовного судна) со следующими характеристиками: $B = 9,0$ м — ширина; $T = 3,5$ м — осадка; $H = 5$ м — высота борта контура; $H_w = 2$ м — высота надстроек; $M = 27\,683$ кг — масса; $V = 28,683$ м³ — объем погруженной части контура, соответствующий его массе; $L = 1$ м — условная толщина контура; $C_0 = 1,94$ м — расстояние от нижней точки контура (от киля) до геометрического центра подводной части контура, находящегося в состоянии равновесия. Расстояние от киля до начального поперечного метацентра контура вычислено по формуле [5] $m_0 = C_0 + LB^3/12V$ и составило 4,13 м. Конкретное значение начальной поперечной метацентрической высоты (h_0) обеспечивается заданием положения центра (G) тяжести контура на расстоянии [5] $G = m_0 - h_0$ от киля. Тогда выбранным величинам $h_0 = 0,5$ м и $h_0 = 1,0$ м соответствуют $G_1 = 3,63$ м и $G_2 = 3,13$ м.

Канал представляет собой прямоугольник длиной 300 м и высотой 140 м, глубина жидкости 70 м, $\eta_{in} = -150$ м. Расчетная область сформирована в виде прямоугольной сетки с элементами размером $0,3 \times 0,3$ м, разбивающими весь канал, за исключением его центральной области, в которой пространство вокруг контура заполнено треугольными сеточными элементами аналогичного размера, перестраиваемыми после каждого временного шага вычислений для обеспечения перемещения контура в соответствии с вычислительными процедурами 6DOF-модели. Шаг дискретизации времени в процессе численного моделирования качки принят равным 0,002 с, а на интервалах воздействия шквалистого ветра — 0,0002 с.

Для численного моделирования качки на морском волнении в 5,5 баллов заданы следующие параметры спектра (7): $D_\zeta = 0,76$ м²; $\sigma_m = 0,65$ с⁻¹; $\sigma_{\min} = 0,406$ с⁻¹; $\sigma_{\max} = 2,093$ с⁻¹. Число поддиапазонов спектра [2] (N) выбрано равным 15.

Для численного моделирования на регулярном волнении заданы (элементы матрицы Z) периоды волн $\tau_\sigma = 5; 5,5; \dots; 7$ с и собственных колебаний контура $\tau_\theta = 3; 4; \dots; 7$ с на спокойной воде. Обеспечение идентичности волнения при изменении периода волны выполнено за счет сохранения неизменной ее крутизны, равной 0,068 в данной задаче и определяемой как отношение удвоенной амплитуды волны ($2r$) к ее длине (λ): $2r/\lambda = 0,068 = \frac{4\pi r}{g\tau_\sigma^2}$, путем

вычисления для каждого значения τ_σ соответствующего значения амплитуды r . Периоды собственных колебаний контура обеспечиваются назначением соответствующих моментов инерции [16] контура

относительно оси ox : $I_x = \frac{gh_0 M \tau_\theta^2}{(2\pi)^2 (1 + k_\theta)}$, где $k_\theta = 0,3$ —

коэффициент присоединенного момента инерции, вычисленный на основе данных, полученных CFD-методом, о периоде качки для рассматриваемого контура при совершении им свободных бортовых колебаний на спокойной воде.

Численное моделирование качки на морском волнении для подтверждения репрезентативности идентификационного признака повторялось многократно, а на регулярном волнении проводилось

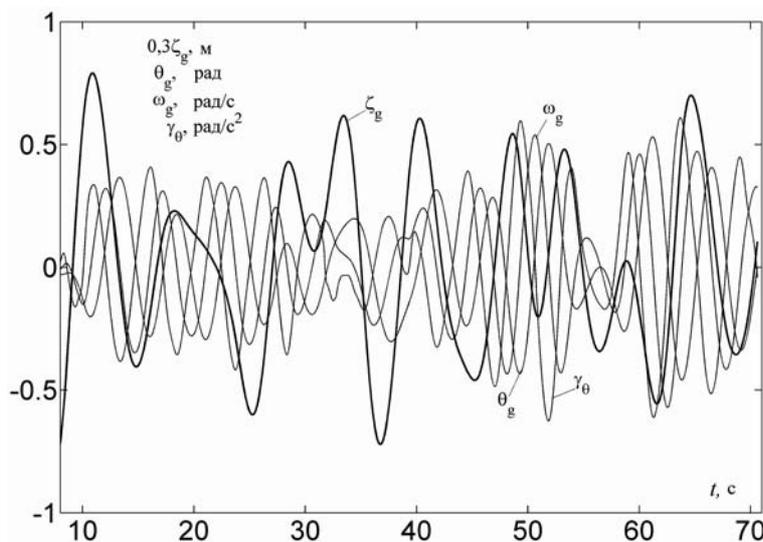


Рис. 1. Фрагмент диаграмм качки контура на морском волнении в 5,5 баллов: ζ_g — вертикальное смещение, θ_g — угол отклонения вертикальной оси симметрии контура от оси oz , $\omega_g = \dot{\theta}_g$ — угловая скорость качки, $\gamma_\theta = M_\theta/I_x$ — нормированный к моменту инерции момент сил, приложенных к контуру

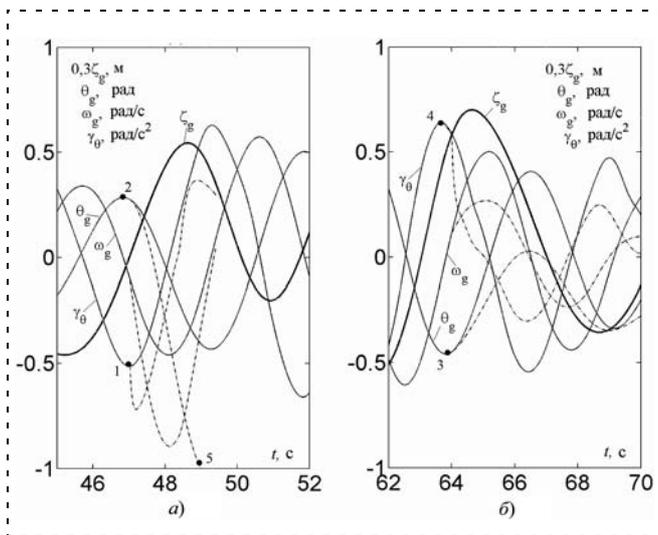


Рис. 2. Диаграммы качки контура, сопровождающейся при подъеме контура на вершину волны нарастанием крена (θ_g):
 а — в сторону движения волн и б — навстречу движению волн

для каждого сочетания значений τ_σ , τ_θ . Результаты вычислений формировались в виде двухминутных массивов дискретных значений переменных: t , η_g , $\dot{\eta}_g$, $\ddot{\eta}_g$, ζ_g , $\dot{\zeta}_g$, $\ddot{\zeta}_g$, θ_g , $\omega = \dot{\theta}_g$, $\ddot{\theta}_g$, F_η , F_ζ и $\gamma_\theta = M_\theta/I_x$.

Случайный характер качки контура на морском волнении обуславливает хаотичные фазовые соотношения между указанными переменными, которые, однако, как будет далее показано, имеют определенную закономерность. На рис. 1 представлены диаграммы основных переменных, описывающих качку контура.

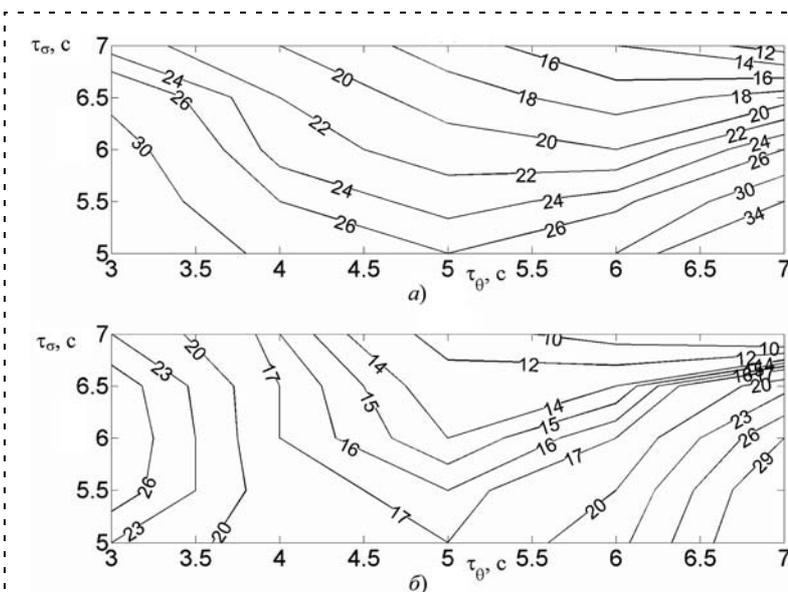


Рис. 3. Линии равного уровня максимальных значений угловой скорости ($^\circ/\text{с}$) в процессе выхода контура на вершину волны, сопровождающиеся нарастанием крена в сторону распространения регулярной волны:
 а — $h_0 = 0,5$ м; б — $h_0 = 1,0$ м

Из всего многообразия случайных фазовых соотношений можно выделить две устойчивые ситуации, отличающиеся противоположными свойствами: снижением (рис. 2, а) и повышением (рис. 2, б) сопротивляемости контура к динамическому воздействию ветровой нагрузки. Для случая, представленного на рис. 2, а, характерно в процессе подъема контура на вершину волны формирование максимума модуля угловой скорости ($|\omega_g|$) и, соответственно, кинетической энергии вращения ($I_x \omega^2/2$). Этот процесс, вызванный максимальным значением модуля момента сил (точка 1), сопровождается нарастанием крена (от точки 2) контура в сторону движения волн. Приложение к надводной части борта и надстройкам аэродинамических сил шквалистого ветра, совпадающего с направлением движения волн, приведет к росту суммарного момента сил (от волнения и ветра) и, как следствие, к увеличению угловой скорости крена в сторону движения волн и опрокидыванию контура за счет набранной кинетической энергии вращения. Для случая, представленного на рис. 2, б, также характерно в процессе подъема контура на вершину волны формирование максимума модуля угловой скорости и, соответственно, кинетической энергии вращения.

Однако этот процесс, вызванный моментом сил (точка 4), сопровождается нарастанием крена (от точки 3) контура навстречу движению волн. В этом случае воздействие шквалистого ветра в процессе подъема контура на вершину волны приведет к уменьшению суммарного момента сил (от волнения и ветра), вращающих контур, за счет противона-

правленного момента аэродинамических сил. В итоге тормозящее действие аэродинамических сил выразится в уменьшении угловой скорости и кинетической энергии вращения и, как следствие, приведет к снижению амплитуды качки. На рис. 2 для наглядности выполнено совмещение диаграмм: для качки без воздействия ветра и для случаев, когда в моменты времени $t = 47$ с (рис. 2, а) и $t = 64$ с (рис. 2, б) контур подвергался воздействию шквалистого ветра со скоростью 30 м/с [17] в течение 3 с; диаграммы качки контура после ветрового воздействия показаны штриховыми линиями. Воздействие шквалистого ветра при начавшемся нарастании крена (начиная с точки 2, рис. 2, а) в сторону движения волн увеличивает момент сил и приводит к опрокидыванию контура (точка 5) при достижении предельного угла [18] $\theta_g = 50^\circ$. Аналогичное воздействие на контур шквалистого ветра (рис. 2, б) при начавшемся нарастании

крена (начиная с точки 3) навстречу движению волн уменьшает суммарный момент сил, что вызывает торможение и, как следствие, — уменьшение амплитуды качки.

При качке на регулярном волнении за счет ее нелинейного характера и искажения волнения дифракционной компонентой (отражением волн от контура) [5] также складываются различные фазовые соотношения угла и угловой скорости крена, приводящие, в том числе, к снижению сопротивляемости контура к динамическому воздействию ветровой нагрузки. Указанные ситуации также идентифицируются во время подъема контура на вершину волны формированием максимума модуля угловой скорости, сопровождающегося нарастанием крена контура в сторону распространения волны.

Результаты моделирования на регулярном волнении представлены на рис. 3, из которых следует, что увеличение периодов регулярных волн (τ_{σ}) и собственных колебаний (τ_{θ}) контура, момента инерции (I_x) и метацентрической высоты (η_0), приводит к уменьшению модуля угловой скорости. В свою очередь, снижение модуля угловой скорости приводит к уменьшению кинетической энергии вращения контура, что способствует увеличению его сопротивляемости к воздействию шквалистого ветра при нарастании крена контура в сторону движения волны.

Таким образом, максимум модуля угловой скорости, сопровождающийся нарастанием крена в сторону движения волны в процессе подъема судна на вершину волны, можно применять в качестве идентификационного признака снижения сопротивляемости морского судна к динамическому воздействию ветровой нагрузки. При этом максимум модуля угловой скорости коррелируется со степенью снижения сопротивляемости судна к воздействию шквалистого ветра.

Заключение

Результаты исследований позволяют дифференцировать по типам устойчивости к динамическому воздействию ветровой нагрузки состояния судов, поднимающихся на вершину волны, как устойчивое или склонное к опрокидыванию под действием шквалистого ветра. Численное моделирование показывает, что значительное число случаев (до 20 %) подъема судна на вершины морских волн характеризуется снижением сопротивляемости к воздейст-

вию шквалистого ветра. В качестве рекомендаций по увеличению сопротивляемости судна к динамическому воздействию ветровой нагрузки можно рекомендовать увеличение начальной поперечной метацентрической высоты, момента инерции массы судна путем пространственного распределения груза, а также организацию на судне автоматизированного непрерывного контроля за текущими значениями и фазовыми соотношениями угла и угловой скорости крена. В случае увеличения частоты идентификации снижения сопротивляемости к динамическому воздействию ветровой нагрузки следует добиваться уменьшения амплитуды бортовой качки или увеличения периода воздействия волн на судно путем выбора соответствующего курса движения.

Список литературы

1. **Buca M. P., Senjanovic I.** Nonlinear Ship Rolling and Capsizing // Brodogadnja. 2006. Vol. 57. N 4. P. 321—331.
2. **Нечаев Ю. И.** Моделирование устойчивости на волнении. Современные тенденции. Л.: Судостроение, 1980.
3. **Haddara M. R., Soares C. G.** Wing load on marine structures // Marine Structures. 1999. N 12. P. 199—209.
4. **Kobylnski L.** Stability of ships risk assessment due hazards created by forces of the sea // Archives of civil and mechanical engineering. 2008. Vol. 8. N 1. P. 37—45.
5. **Справочник по теории корабля: В трех томах. Т. 2 /** Под ред. Я. И. Войткунского. Л.: Судостроение, 1985.
6. **Луговский В. В.** Гидродинамика нелинейной качки судов. Л.: Судостроение, 1980.
7. **Jia-Yang Gu.** Nonlinear rolling motion of ship in random beam seas // Journal of Marine Science and Technology. 2004. Vol. 12. N 4. P. 273—279.
8. **Surendran S., Lee S. K., Venkata Ramana Reddy J., Gyoungwoo Lee.** Non-linear roll dynamics of a Ro-Ro ship in waves // Ocean Engineering. 2005. N 32. P. 1818—1828.
9. **Роуч П.** Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980.
10. **Семенова В. Ю.** Расчет нелинейной поперечной качки судна, расположенного лагом к регулярному волнению // Судостроение. 2003. № 4. С. 10—13.
11. **Yakhot V., Orszag S. A.** Renormalization Group Analysis of Turbulence: Basic Theory // Journal of Scientific Computing. 1986. Vol. 1. N 1. P. 1—51.
12. **Hsu K. L., Chen Y. J., Chau S. W., Chien H. P.** Ship Flow Computation of DTMB 5415 // CFD Workshop Tokyo 2005. Tokyo. Japan. March 9—11.
13. **Hua J., Wang W.** Roll Motion of a RoRo-Ship in Irregular Following Waves // Journal of Marine Science and Technology. 2001. Vol. 9. N 1. P. 38—44.
14. **Repalle T., Thiagarajan K., Morris-Thomas M.** CFD simulation of wave run-up on a spar cylinder // 16th Australasian Fluid Mechanics Conference. 2007. Australia, Gold Coast, Crown Plaza. 2—7 December.
15. **FLUENT user's guide.** USA, Lebanon. Fluent. Inc. 2006.
16. **Семенов-Тян-Шанский В. В., Благовещенский С. Н., Холодилин А. Н.** Качка корабля. Л.: Судостроение, 1969.
17. **Ogawa Y., Umeda N., Paroka D., etc.** Prediction Methods for Capsizing under Dead Ship Condition and Obtained Safety Level // 6th Osaka Colloquium on Seakeeping and Stability of Ship. Japan, Osaka, 2008. N 3. P. 285—297.
18. **Правила классификации и постройки морских судов.** С.-Пб.: Российский морской регистр судоходства, 2008.

А. Н. Севрюк, мл. науч. сотр.,
Институт проблем морских технологий
Дальневосточного отделения
Российской академии наук, г. Владивосток
sevryuk@marine.febras.ru

Автоматическая классификация кластеризованных измерительных аномалий на борту АНПА

Описана система классификации измерительных аномалий произвольной размерности. Описаны методы, позволяющие классифицировать измерительные аномалии на борту автономного необитаемого подводного аппарата в реальном масштабе времени. Рассмотрены приложения методов, позволяющие классифицировать обособленные объекты на фотоизображениях.

Ключевые слова: измерительные аномалии, кластерный анализ, классификация, идентификация, системы реального времени, автономные подводные роботы

Введение

При исследовании дна подводным роботом большую роль играет возможность обнаружения объектов внешней среды, имеющих определенный потенциал для исследования. Такими объектами (объектами локализации) могут быть крупные элементы рельефа, скопления гидробионта, аномалии физических полей, искусственные объекты, данные о которых могут быть получены от системы технического зрения подводного аппарата. Выявленные объекты, положение которых статично, могут быть использованы в качестве ориентиров либо как объекты для отдельных исследований.

Вопросам локализации подводных объектов и измерительных аномалий водной среды в ИПМТ ДВО РАН уделяется большое внимание. Этим вопросам посвящено множество работ, в том числе [2]. Многие работы предлагают эффективные решения частных задач локализации, направленных на изыскание определенных видов измерительных аномалий: трубопроводов, кабелей, источников загрязнений. Среди решений частных задач локализации можно отметить зарубежный опыт, отраженный в работе [3]. Данная статья описывает классификационную методику, которая позволит решать задачи классификации локализованных измерительных аномалий любой природы. Приводятся результаты апробации метода с использованием фотоизображений, полученных телесис-

темой автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА).

Обнаружение потенциально интересных объектов исследований включает две подзадачи: обнаружение измерительных аномалий (локализации) и их идентификация. Описанные задачи решаются последовательно. В подводной робототехнике применение данного подхода позволит значительно упростить поиск миноподобных объектов, ведение учета популяций и ряд других задач, связанных с мониторингом акваторий. Данная статья посвящена вопросам оптимизации процесса идентификации измерительных аномалий по скорости обработки данных.

1. Определение кластера и процессов кластеризации

Обособленная совокупность измерений или кластер [2] обладает своими уникальными характеристиками. Набор характеристик, используемый при формировании таких совокупностей, различен и зависит от конкретного метода кластеризации. Представляя кластер совокупностью точек в пространстве E_n , для каждой группы можно выделить следующие значимые признаки: наличие осевых центральных моментов (центров масс, моментов инерции); наличие краевых точек кластера; количественная мера числа точек кластера.

Исходя из особенностей функционирования АНПА в условиях неизвестной местности [4] для построения кластеров используется метод топологического анализа измеряемых величин, который основан на следующих предположениях: объекты (отображаемые на гидролокаторах бокового обзора или в ином пространственно-параметрическом контексте) имеют размер более одной точки и образуют группы точек в некоторой области пространства; для каждой группы евклидово расстояние между точками в группе меньше, чем аналогичное между точками из соседних групп.

Суть предварительного формирования кластеров состоит в том, что точки, лежащие в определенной области пространства (подпространство точек), сопоставляются с отдельным кластером. Точки при-



Фрагмент фотоизображения



Метод предварительного формирования кластеров



Кластеризация по точкам

Рис. 1. Кластеризация объекта методом Mean Shift

писываются кластеру, если их компоненты лежат в границах диапазона ячейки. Номер ячейки вычисляется из компонент точки, что позволяет построить множество предварительных кластеров за один проход по множеству точек исследуемой области. Разбиение не оказывает существенного влияния на характеристики методов кластеризации, но существенно уменьшает ресурсную емкость их реализации. На рис. 1 приведены примеры кластеризации методом Mean Shift с использованием описанного метода и без него. В первом случае существенно сократилось время анализа и уменьшился расход памяти. Предварительные кластеры обведены рамками.

Независимо от метода построения измерительных аномалий отдельной практически значимой задачей является их классификация. Рассмотрим эту задачу более подробно.

2. Цели и задачи классификационного анализа на борту АНПА

Идентификация измерительных аномалий при использовании подводной техники обладает большим практическим потенциалом в решении следующих задач: подсчет популяций гидробионтов; идентификация загрязнений окружающей среды; идентификация и отслеживание навигационных ориентиров и опасных объектов. Цель автоматической классификации измерительных аномалий состоит в том, чтобы решать описанные выше задачи в режиме автономного функционирования АНПА, т. е. с минимальным участием со стороны оператора или при полном его отсутствии.

При этом классификационный анализ должен отвечать следующим требованиям: минимально возможная ресурсная емкость операций по построению и классификации измерительных аномалий на множестве измерений; возможность коррекции правил классификации аномалий

3. Система классификационного анализа

В настоящее время в ИПМТ ДВО РАН разработана система классификационного анализа, позволяющая идентифицировать измерительные аномалии разной степени топологической размерности в реальном масштабе времени. Это делает возможным ее применение непосредственно на борту АНПА.

Система реализована в виде разделяемого объекта ОСРВ QNX на основе метода предварительного формирования кластеров и содержит следующие основные процедуры и функции:

- функция генерации структуры, содержащей информацию о поле первичных кластеров. Входные переменные задают разрешающую способность

и область пространства заданной мерности, для которой создаются первичные кластеры;

- процедура формирования кластеров с помощью сеточного разбиения;
- процедура генерализации, которая на основе списка кластеров создает список, объединяющий кластеры, расстояние между которыми не превышает значения порога;
- процедура построения классов, формирующая их на основе размерности кластеров, меры значимости числа точек в кластерах при их сравнении, списка кластеров и информации о пространстве кластеризации.

Основная группа процедур и функций инициализирует рабочую область идентификации объектов, составляя первичные кластеры и объединяя их до определенного состояния. Некоторые процедуры могут повторяться итеративно в зависимости от числа измерений, взятых в изображении, и желаемой степени группировки кластеров. Последняя процедура классифицирует совокупности точек. Примерами классов при исследовании подводных объектов могут быть морские звезды, камни, протяженные объекты и другие аномалии, обладающие уникальными признаками.

3.1. Требования к классификационному анализу, реализованные системой идентификации

Важным аспектом классификации является построение базы эталонов. Основные направления решения задачи классификации — это построение эталонной базы на основе списка известных эталонов и постепенное накопление эталонов по степени близости. Класс может содержать один или несколько кластеров (сформированных объектов). Если изначально множество классов пусто, то первый из обнаруженных объектов формирует первый класс; если следующий обнаруженный объект близок к существующему классу, он также входит в него, в противном случае формирует собственный класс, в котором является единственным эталоном. Все последующие объекты сравниваются с эталонами классов и пополняют те из них, к эталонам которых они более всего близки, иначе создаются новые классы.

Способ накопления эталонов более предпочтителен, ввиду условий функционирования АНПА, поскольку заранее неизвестно, какие объекты робот обнаружит. Более того, данный способ предполагает минимальное участие со стороны оператора, которое ограничивается заданием параметра, определяющего максимальную степень различия, достаточную для формирования нового класса.

Каждый кластер — это геометрическая конструкция, состоящая из измерений, отраженных в не-

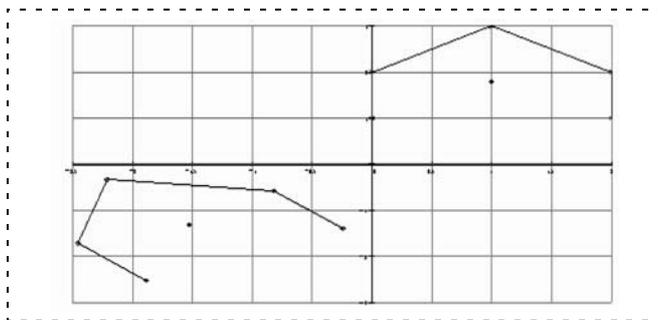


Рис. 2. Элементарные преобразования в евклидовом пространстве $E2$

котором n -мерном евклидовом пространстве. По законам евклидовой геометрии для идентичных систем (одинаковых геометрических конструкций) характерно равенство углов и сторон, которое остается неизменным при выполнении с объектами элементарных преобразований (поворота и параллельного переноса). При этом также сохраняются расстояния от точек до центров масс фигур. На рис. 2 показан пример элементарных преобразований, выполненных над двумерным объектом, который состоит из пяти точек на плоскости, расположенных в I четверти плоскости. Центр масс объекта показан кружком. Выполняя элементарные преобразования над исходным объектом, мы получаем идентичный описанному объект, расположенный в III четверти плоскости.

Поскольку порядок принадлежности отдельных измерений к объектам произвольный, для идентификации одинаковых объектов необходимы аддитивные критерии, учитывающие взаимное влияния точек, входящих в объект. В настоящее время в системе идентификации реализованы критерии идентификации, удовлетворяющие вышеизложенным требованиям. Рассмотрим их более подробно.

3.2. Критерий радиальной оценки

Критерием радиальной оценки является среднее расстояние от центра масс до точек геометрической конструкции, образованной измерениями, которое можно вычислить, используя соотношение

$$J = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \sqrt{\sum_{j=1}^k (\mathbf{C}(\mathbf{x})_j - \mathbf{x}_{i,j})^2}, \quad (1)$$

где r — число точек геометрической конструкции; k — размерность евклидова пространства; \mathbf{x} — вектор, содержащий измерения в r точках k -мерной конструкции; $\mathbf{C}(\mathbf{x})$ — функция, возвращающая вектор, содержащий значения координат центра масс геометрической конструкции.

Сложность вычисления функционала (1) составляет kr , где r — число точек геометрической кон-

струкции, k — размерность евклидова пространства. Уменьшить сложность вычислений до k можно путем приведения (1) к рекуррентному виду, опираясь на определение кластеров и теорию существования единственности. Согласно этой теории и свойствам оператора суммирования возможны замены:

$$\begin{aligned} J &= \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \sqrt{\sum_{j=1}^k (\mathbf{C}(\mathbf{x})_j - \mathbf{x}_{i,j})^2} = \\ &= \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \sqrt{\sum_{j=1}^k \left(\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \mathbf{x}_{i,j} - \mathbf{x}_{i,j} \right)^2} \cong \\ &\cong \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^k \left(\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \mathbf{x}_{i,j} - \mathbf{x}_{i,j} \right)^2; \\ J &\cong \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^k \left(\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \mathbf{x}_{i,j} - \mathbf{x}_{i,j} \right)^2 = \\ &= \sum_{j=1}^k \left(\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \left(\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \mathbf{x}_{i,j} - \mathbf{x}_{i,j} \right)^2 \right); \quad (2) \\ J &\cong \sum_{j=1}^k \left(\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \left(\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \mathbf{x}_{i,j} - \mathbf{x}_{i,j} \right)^2 \right) = \\ &= \sum_{j=1}^k (\mathbf{C}(\mathbf{x}^2)_j - (\mathbf{C}(\mathbf{x}))_j^2), \end{aligned}$$

где k — размерность евклидова пространства; \mathbf{x} — вектор, содержащий измерения в точках k -мерной конструкции; $\mathbf{C}(\mathbf{x})$ — функция, возвращающая вектор, содержащий значения координат центра масс геометрической конструкции

Поскольку кластер является системой равновесных точек, то координаты центра его масс определяются как вектор, компоненты которого — это средние значения координат всех измерений, входящих в кластер. Выражение под знаком суммы по j эквивалентно дисперсии величины, распределенной равномерно. Исходя из свойств дисперсии выразим ее через математическое ожидание и в результате получим (2). Выражения под знаком суммы в формуле (2) можно вычислить в процессе формирования кластера, таким образом, (2) — это рекуррентный эквивалент (1). Соотношения (1) и (2) показывают, что для подобных геометрических объектов средние расстояния будут соотноситься в соответствии с коэффициентом подобия. Иными словами, если существуют два объекта, один из которых в n раз больше другого, т. е. каждая из соответствующих сторон одного объекта в n раз больше тех же сторон другого и при этом углы между этими сторонами равны, то их средние расстояния от

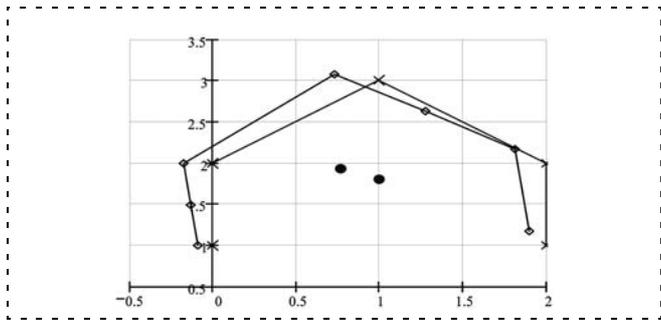


Рис. 3. Фигуры с одинаковым периметром

центров масс до точек объекта будут различаться в n раз. В случае растяжения (сжатия) объекта по осям критерии (1) и (2) будут изменяться нелинейно. Устойчивость критерия (2) достаточно высока, и для одинаковых объектов вероятность правильной идентификации составляет сто процентов (рис. 3). Однако следует отметить тот факт, что в реальных условиях следует ввести значения допусков на уровне до 25 %, вычисленных как относительная погрешность отношения между функционалами (2) для исследуемых объектов.

Необходимость введения допусков связана с тем, что в объектах, которые можно считать одинаковыми, ввиду внешних факторов может содержаться разное число измерений. Пример таких объектов показан на рис. 3. В случае изменения числа точек объекта меняется положение его центра масс и значения функционалов (1) и (2). Однако, если точки будут лежать в рамках одного периметра, относительные изменения будут не слишком велики.

Погрешности удобнее всего вычислять, пользуясь формулой

$$w(r, p) = \begin{cases} \frac{p}{r} & \text{при } (r \neq 0 \text{ и } p \leq r); \\ 1 & \text{при } (p = 0 \text{ или } r = 0); \\ \frac{r}{p} & \text{при } (p \neq 0 \text{ и } r \leq p), \end{cases} \quad (3)$$

где r и p — неотрицательные числа; при $|r - p| < 1$ расчет (3) вести для $r = r + 1$; $p = p + 1$.

Исходя из соотношений (1) и (2) для одинаковых объектов сумма погрешностей числа точек в объектах $w(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2)$ и среднего геометрического расстояния $w(\mathbf{j}_1, \mathbf{j}_2)$ должна быть наименьшей, а сходство наибольшим:

$$\{w(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2) + w(\mathbf{j}_1, \mathbf{j}_2)\} \rightarrow 0; \quad (4)$$

$$\{(1 - w(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2)) \cdot (1 - w(\mathbf{j}_1, \mathbf{j}_2))\} \rightarrow 1; \quad (5)$$

где \mathbf{p} — вектор, содержащий число точек сравниваемых объектов; \mathbf{j} — вектор, содержащий значение критерия идентификации для сравниваемых объектов.

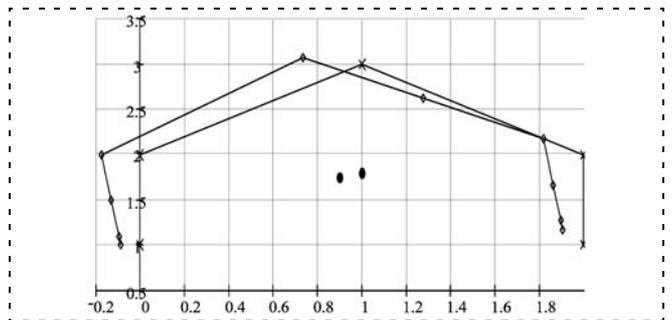


Рис. 4. Проверка адекватности критерия

При анализе сходств и различий объектов будет полезно исключать из оценки относительную погрешность числа измерений $w(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2)$, если она достаточно высока, поскольку погрешность средних расстояний от центров масс до точек объектов будет более адекватной оценкой различий. Это достаточно хорошо видно из примера, показанного на рис. 4. Для кластеров на рис. 4 степень схождения, определяемая с использованием (4) и (5), даже несколько выше, чем определенная с использованием тех же формул для объектов на рис. 3, и составляет 91,96 % (при погрешности в 8,0441 %). В свою очередь, погрешность числа измерений составляет 50 %, уменьшая сходство вдвое.

3.3. Морфометрические инерциальные критерии

При вычислении морфометрических признаков используются понятия механики твердого тела [6]. На основании вспомогательных величин можно вычислить эксцентриситет $e(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ и ориентацию объекта в плоскости XOY , которая определяется как угол между максимальной осью инерции объекта и осью OX (9):

$$u(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i \right) \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \mathbf{y}_k - \mathbf{y}_i \right) \right); \quad (6)$$

$$C(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sqrt{(u(\mathbf{x}, \mathbf{x}) - u(\mathbf{y}, \mathbf{y}))^2 + (2u(\mathbf{x}, \mathbf{y}))^2}; \quad (7)$$

$$e(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sqrt{1 - \frac{u(\mathbf{x}, \mathbf{x}) + u(\mathbf{y}, \mathbf{y}) - C(\mathbf{x}, \mathbf{y})}{u(\mathbf{x}, \mathbf{x}) + u(\mathbf{y}, \mathbf{y}) + C(\mathbf{x}, \mathbf{y})}}; \quad (8)$$

$$O(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \begin{cases} \operatorname{atg} \left(\frac{u(\mathbf{y}, \mathbf{y}) - u(\mathbf{x}, \mathbf{x}) + C(\mathbf{x}, \mathbf{y})}{2u(\mathbf{x}, \mathbf{y})} \right) & \text{при } u(\mathbf{x}, \mathbf{x}) < u(\mathbf{y}, \mathbf{y}); \\ \operatorname{atg} \left(\frac{2u(\mathbf{x}, \mathbf{y})}{u(\mathbf{x}, \mathbf{x}) - u(\mathbf{y}, \mathbf{y}) + C(\mathbf{x}, \mathbf{y})} \right) & \text{при } u(\mathbf{y}, \mathbf{y}) < u(\mathbf{x}, \mathbf{x}), \end{cases} \quad (9)$$

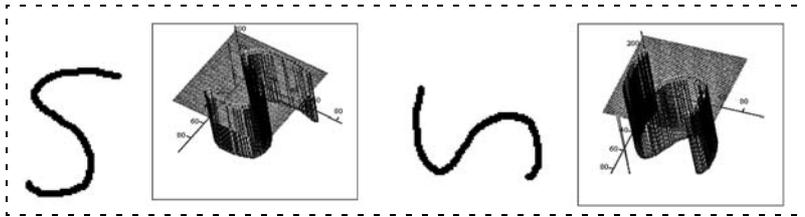


Рис. 5. Трехмерные объекты

где n — число измерений (точек объекта) в плоскости XOY ; \mathbf{x} — вектор, содержащий значения измерений объекта по оси OX в плоскости XOY ; \mathbf{y} — вектор, содержащий значения измерений объекта по оси OY в плоскости XOY .

Вычислить ориентацию можно по формуле (9). Следует отметить, что критерий (8), как и (2), чувствителен к числу измерений и в реальных условиях должен использоваться с допусками. Угол (9) не во всех случаях равен углу поворота исходного объекта в системе координат. Однако разность между значениями (9) для разных объектов определяет угол между этими объектами в плоскости. Если идентифицируемые объекты представлены в виде объемных или гиперобъемных фигур (имеют параметрическую размерность больше двух), приведенные выше морфометрические признаки можно использовать одним из следующих способов:

- рассматривать множество сечений объекта плоскостями базиса, определяя меру сходства объектов на основе близости средних значений эксцентриситетов фигур по всем плоскостям;
- преобразовывать гиперобъемные фигуры в линии второго порядка и анализировать сходство полученных метафигур.

Рассмотрим более подробно каждый способ с оценкой его комбинаторной сложности. На рис. 5 представлены трехмерные объекты, на основе морфометрических признаков их можно считать идентичными.

Рассматривая основные сечения объекта, допустим, что оси его базиса пронумерованы, начиная с единицы, тогда значения признаков для разных сечений трехмерного объекта можно представить матрицами

$$\begin{bmatrix} (1\ 2) & 0,515 & 0 \\ (1\ 3) & 0,918 & 86,991 \\ (2\ 3) & 0,939 & 89,237 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} (1\ 2) & 0,515 & 90 \\ (1\ 3) & 0,939 & -89,237 \\ (2\ 3) & 0,918 & 86,991 \end{bmatrix}$$

В первом столбце матриц указаны номера осей базиса, образующих плоскость, во втором и третьем — значения критериев (8) и (9), значения (9) указаны в градусах. Как видно из рис. 5 и матриц, объект был повернут на 90° вокруг оси 3. Использование (8) и (9) при анализе основных сечений дает

возможность детальной идентификации поворотов объекта в пространстве. В качестве экспресс-оценки можно использовать среднее значение критерия (8) для всех сечений; так, для объекта на рис. 5 оно равно 0,791.

С ростом топологической размерности пространства число сечений растет в арифметической прогрессии и число операций по идентификации можно найти по формуле

$$Sc(k, n) = nk(k - 1), \quad (10)$$

где k — топологическая размерность объекта; n — число точек, входящих в объект.

В случае преобразования пространственной фигуры в плоскость число операций может быть сокращено. Представляя исходный объект в виде ряда, члены которого — расстояния от центра масс объекта до каждой точки данного объекта, преобразуем его следующим образом:

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{r}_i(2 + \cos r_i); \mathbf{y}_i = \mathbf{r}_i(2 + \sin r_i), \quad i = 1, \dots, n, \quad (11)$$

где \mathbf{r} — вектор расстояний от точек объекта до его центра масс; n — число точек, входящих в объект.

В результате преобразований (11) коэффициент (9) сохраняется постоянным для объектов, включающих одинаковое число измерений. Значения (8) и (9) для преобразованных объектов рис. 5 представимы матрицами, равными

$$[(1\ 2) \ 0,917 \ 45,04].$$

Результат преобразования объектов изображен на рис. 6 (оригинальный объект — рамки, повернутый — кресты). Пространственное преобразование исключает возможность оценки изменения ориентации, но в ряде случаев обладает меньшей комбинаторной сложностью операций по идентификации:

$$B(n) = 4n, \quad (12)$$

где n — число точек, входящих в объект.

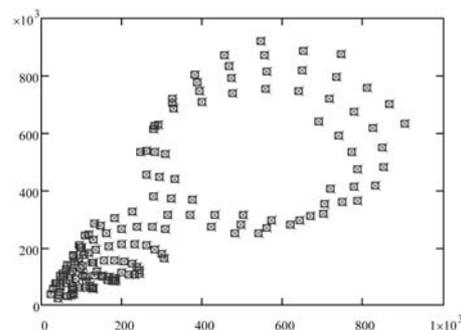


Рис. 6. Объемные объекты, преобразованные в плоские фигуры

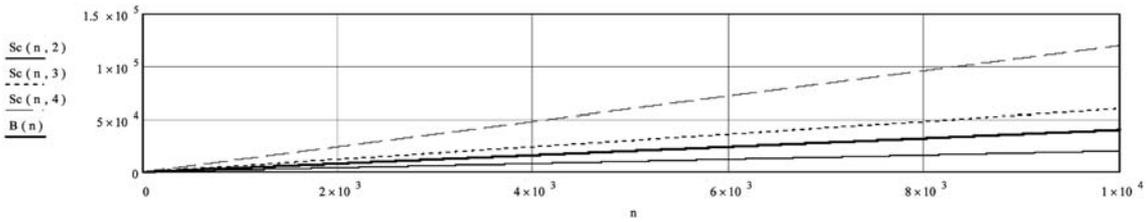


Рис. 7. Сложность преобразований

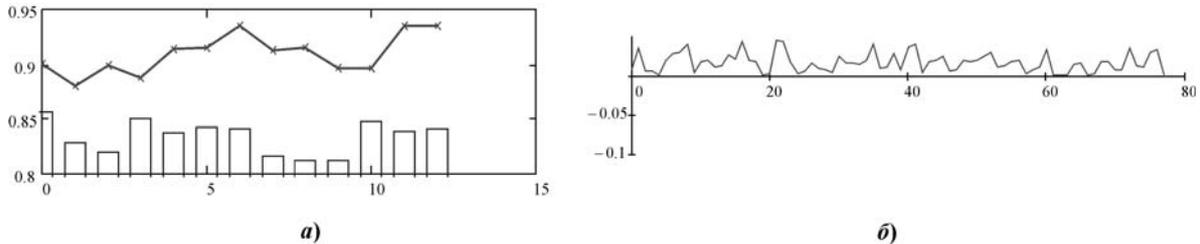


Рис. 8. Взаимосвязь оценки (8) для преобразованных и реальных объектов:

a — значение (8) для группы объектов с учетом (столбики) и без учета преобразования (11) (точки); *б* — абсолютная разность меры сходства преобразованных и реальных объектов

На рис. 7 видно, что для объектов с параметрической размерностью выше двух использование преобразования в плоскость наиболее целесообразно при проведении экспресс-оценки не только с точки зрения комбинаторики, но и в силу взаимной корреляции (8) для преобразованных и неизмененных объектов. Для доказательства последнего утверждения обратимся к рис. 8. На рис. 8, *a* изображены графики оценки (8) для 13 кластеров, выделенных на рис. 1. Мера сходства объектов определяется модулем разности оценки различных объектов. При этом абсолютная разность мер сходства с учетом преобразования и без него не превосходит значения 0,05 (рис. 8, *б*).

4. Результаты классификации с использованием радиальной оценки и инерциальных критериев

Проведение классификации кластеров на основе (5) для изображения на рис. 1 дает результаты, показанные на рис. 9. Из рис. 9 видно, что группировка происходит по принципу структурной схожести объектов (см. формулу (1)), где для некоторых участков естественных образований в один класс могут быть сгруппированы соседние элементы изображения (геометрически близкие). Иными словами, звезды попадают в один класс независимо от их местоположения на фотографии. Следует отметить различия кластеризации и построение классов объектов, поскольку в первом случае кластеры при слиянии меняют свои исходные состояния (меняются центры масс и среднее расстоя-

ние от центра масс до точек геометрической конструкции), а при классификации класс остается набором однородных элементов. На основе изображений рис. 9 можно сделать вывод, что структурно похожие объекты могут быть близки геометрически не во всех случаях, что подтверждает инвариантность (1) и (2) к элементарным преобразованиям в *n*-мерном евклидовом пространстве.

Морфометрические инерциальные критерии (8) и (9) на том же наборе данных показывают более высокую точность идентификации (рис. 10) позволяют детально обозначить характер преобразований

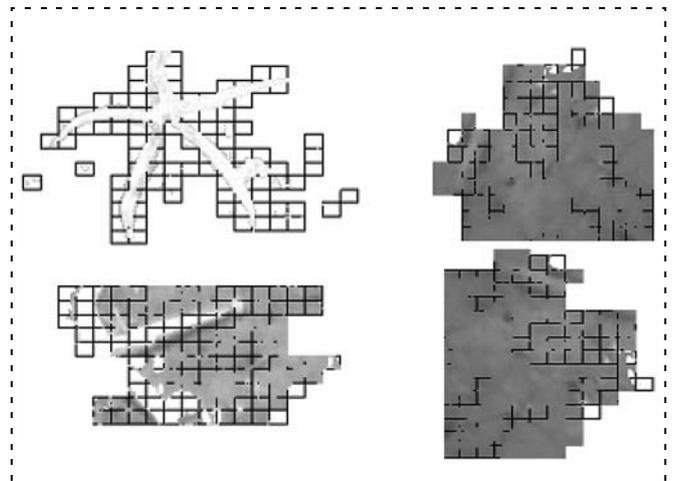


Рис. 9. Класс однородных объектов фотоизображения, похожих на крупную морскую звезду, классификация по критерию (2)

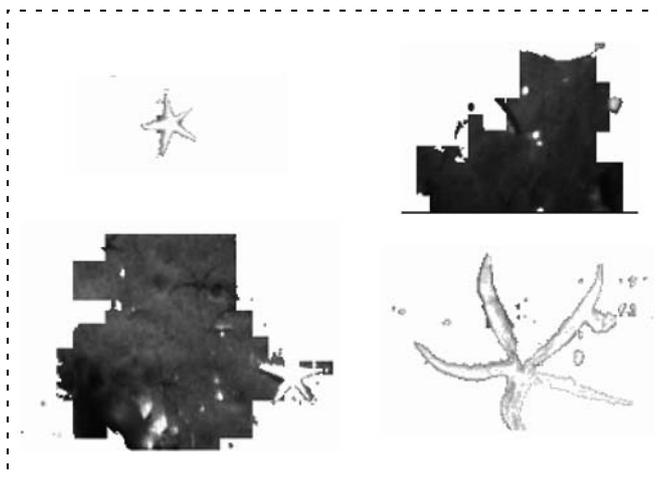


Рис. 10. Класс однородных объектов фотоизображения, похожих на морскую звезду, классификация по критерию (8)

и демонстрируют инвариантность к растяжению. Однако обладают значительно большей сложностью. Нужно учитывать, что (8) и (9) являются функциями (1) и (2) и наследуют их обобщающий характер.

Очевидно, что проведение кластерного анализа на основе (5) может не дать адекватного результата из-за общности критерия. Так, на рис. 9 и 10 видно, что в один класс со звездами попадают пятна, которые внешне не имеют с ними ничего общего, но обладают сходной оценкой.

Заключение

Описана классификационная методика, которая позволяет решать задачи классификации локализованных измерительных аномалий любой природы за счет того, что приведенные метрики не зависят от параметрической размерности измерений и их групп. Приводятся результаты апробации метода с использованием исключительно фотоизображений, поскольку данный вид информации отличается легкостью восприятия, позволяет качественно оценить результат классификации и предполагает легкий способ коррекции эталонов для повышения качества автоматической классификации. Важно отметить, что автоматическая кластеризация и классификация аномалий методически и функционально не меняются при изменении топологической размерности данных.

Реализация основных функций кластеризации выполнена в виде разделенного объекта с поддержкой структурных типов. Модуль реализован как набор инструментальных функций для выполнения задач кластерного анализа и насчитывает несколько пользовательских функций. В их числе функции для построения дерева классов как с коррекцией эталонов, так и без них.

Поскольку кластерный анализ (в том числе классификация подводных объектов) предполагает аккумуляцию данных для дальнейшей оценки, сбор данных можно проводить как в оперативном, так и в апостериорном режиме. Ввиду того, что анализ данных занимает гораздо меньшее время, чем их сбор, то для снижения нагрузки на бортовую вычислительную сеть АНПА, а также в целях обеспечения независимого расположения модулей, использующих функции кластеризации, возможно получение исходных данных средствами унифицированного функционального интерфейса (УФИ), более подробное описание которого можно найти в [5].

Следует отметить, что приведенные критерии не являются полными, поскольку не способны однозначно идентифицировать пространственные аномалии ввиду своей общности. Однако они в достаточной степени удовлетворяют требованиям автоматического классификационного анализа, позволяя оптимально решать его задачи, прежде всего по времени выполнения.

Список литературы

1. Журавлев Ю. И., Рязанов В. В., Сенько О. В. Распознавание. Математические методы. Программная система. Практические применения. М.: Фазис, 2006.
2. Инзарцев А. В., Павин А. М. Организация движения АНПА вдоль одномерных протяженных объектов на основе комплексирования информации телевизионной системы и электромагнитного искателя // Матер. науч.-техн. конф. "Технические проблемы освоения мирового океана", Владивосток, 2–5 октября 2005 г.
3. Ciany C. M., Zurawski W. C., Dobeck G. J., Weilert D. R. Real-Time Performance of Fusion Algorithms for Computer Aided Detection and Classification of Bottom Mines in the Littoral Environment. OCEANS'03. P. 1119–1125.
4. Автономные необитаемые подводные аппараты // Под общ. ред. акад. М. Д. Агеева. Владивосток: Дальнаука, 2000.
5. Инзарцев А. В., Севрюк А. Н. Механизмы повышения эффективности функционирования СУБД реального времени в системе управления АНПА // Матер. междунар. науч.-техн. конф. "Технические проблемы освоения мирового океана", Владивосток, 2–5 октября 2007 г. С. 77–82.
6. URL: <http://matlab.exponenta.ru/imageprocess/book3/14/imfeature.php>

Ю. И. Бегичев, канд. техн. наук, доц., нач. отдела,
ЗАО РАА "Спец. техника",

А. В. Пономаренко, д-р техн. наук, нач. отделения,
ОАО РСК "МиГ",

Л. О. Котицын, нач. лаборатории,

М. М. Сильвестров,

д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр.,

В. А. Чернышов,

д-р техн. наук, генеральный директор,
ФГУП "НИИ авиационного оборудования",

IASO@inbox.ru

Концепция построения учебно-тренировочных средств для эргономического сопровождения разработки и создания эргатического информационно-управляющего комплекса многоцелевых беспилотных летательных аппаратов

Обсуждается актуальная проблема создания учебно-тренировочных средств многоцелевых беспилотных летательных аппаратов. Дается обоснование концепции построения интерактивного учебно-тренировочного комплекса многоцелевых беспилотных летательных аппаратов и унифицированного диалогового моделирующего стенда-тренажера, предназначенных для исследований, создания и эргономического сопровождения жизненного цикла эргатического информационно-управляющего комплекса многоцелевых беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: интерактивный учебно-тренировочный комплекс, диалоговый моделирующий стенд-тренажер, эргатический информационно-управляющий комплекс, эргатический интерфейс, информационная командно-лидерная индикация, мнемокадр, образ цели управления

Усложнение военной авиационной техники в результате разработки интегрированных бортовых комплексов пилотируемых самолетов и многоцелевых беспилотных летательных аппаратов, а также в связи с автоматизацией и механизацией процессов обслуживания и эксплуатации перспективных авиационных комплексов существенным образом изменяет характер труда летчиков и инженерно-технического персонала по освоению и эксплуатации комплексов. На более ранней стадии развития как военной, так и гражданской авиации, когда авиатехника по своему составу и возлагаемым на нее функциям была сравнительно несложной, системы "летчик—самолет" и "обслуживающий персонал—самолет" рассматривались отдельно. Сейчас человек-оператор и техника в авиации образуют единую человеко-машинную (эргатическую) сис-

тему. Эффективная работа авиационных комплексов и безопасность полетов несравненно в большей степени, чем ранее, зависят от качества функционирования таких систем.

Полное освоение и повышение эффективности применения сложных образцов авиационной техники, таких как эргатические информационно-управляющие комплексы многоцелевых беспилотных летательных аппаратов, возможно только при обеспечении высокого уровня обучения и тренировок инженерно-технического и летного персонала.

Принятие в эксплуатацию новейшей техники не может улучшить ее использование, если этот процесс не будет сопровождаться умной, квалифицированной системой подготовки, повышением специальных знаний и их использованием с учетом специфики эргатических информационно-управляющих комплексов наряду со спецификой индивидуальных и психологических свойств обучаемых.

Для решения задач инженерно-психологических исследований при разработке эргатических информационно-управляющих комплексов беспилотных летательных аппаратов и обеспечения профессиональной подготовки летного и инженерно-технического состава в интересах эффективной и надежной эксплуатации создаваемых многоцелевых беспилотных летательных аппаратов необходимо создавать учебно-тренировочные комплексы нового поколения [1].

Под учебно-тренировочным комплексом понимается совокупность информационно и технически взаимосвязанных программно-аппаратных средств обучения и тренажа, объединенных единым дидактическим замыслом, методологией профессиональной подготовки и перспективными задачами совершенствования авиационного комплекса в интересах повышения эффективности профессиональной подготовки авиационных специалистов, снижения финансово-экономических затрат на их подготовку, а также создание интерактивных учебно-тренировочных комплексов (ИУТК).

Обоснование концепции построения интерактивного учебно-тренировочного комплекса многоцелевых беспилотных летательных аппаратов

Эффективность системно-комплексного применения ИУТК для исследований, обучения, тренировки и формирования профессионального мастерства авиаперсонала достигается путем:

- обеспечения многоуровневого взаимодействия компонентов комплекса;
- реализации принципа разделения труда между специалистами при решении частных, специальных задач;
- обеспечения комплексной задачи функционирования партнеров как единого оператора, а также

функционирования при гибком перераспределении лидерства и вспомогательных функций между партнерами в зависимости от конкретной задачи и хода ее решения;

- обеспечения совместного анализа и синтеза информации с адаптацией к индивидуальным особенностям партнера, принимающего решение, а также формирования адекватной модели ситуации, используемой при принятии решения;
- обработки и представления оператору и инструктору информации об отклонениях результатов деятельности от "эталонных" значений деятельности и процессе решения целевых задач с учетом психологических факторов сложности;
- автоматизации планирования сложности тренировочных упражнений в зависимости от уровня усвоения навыков.

Важнейшим условием эффективного применения ИУТК для профессиональной подготовки авиационных специалистов является создание методического обеспечения, отвечающего интеллектуальному уровню построения учебно-тренировочных систем комплекса.

В соответствии с вышеизложенным разработана и обоснована концепция построения ИУТК [1], которая содержит следующие основные положения:

1) учебно-тренировочный комплекс для обучения, тренажа, формирования профессионального

мастерства экипажа и технического состава, а также для эргономического сопровождения жизненного цикла авиационных комплексов создается как единая информационно-технологическая среда обучения, тренажа и эргономического сопровождения жизненного цикла интегрированных комплексов, содержащая в своем составе унифицированный диалоговый моделирующий стенд-тренажер, интерактивную автоматизированную систему обучения, тренажеры унифицированного ряда, автоматизированное рабочее место инструктора-методиста с модулем эталонного управления маневрированием, систему оценки качества деятельности операторов, резервов внимания и нервно-эмоционального напряжения, автоматизированную систему управления групповым взаимодействием, автоматизированную систему управления тренировкой, рабочее место оператора-эргономиста (рис. 1);

2) построение комплекса основывается на принципах обеспечения унификации, модульности, реконфигурации, высокой мотивации обучения и организации рационального взаимодействия основных систем комплекса в интересах повышения эффективности обучения и тренажа летного и инженерно-технического состава, а также снижения экономических затрат на обучение, приобретение профессионального мастерства и эргономическое сопровождение авиационного комплекса;

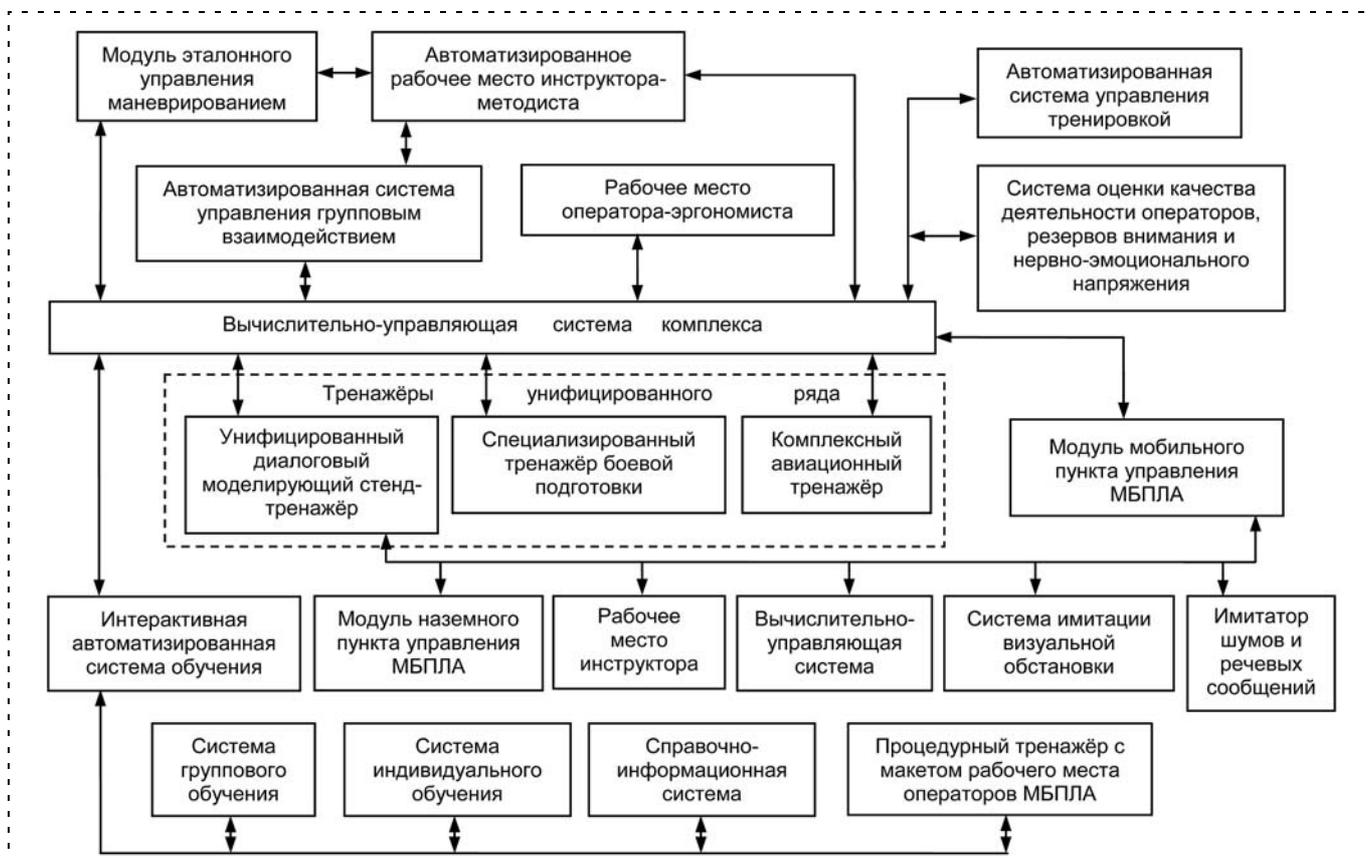


Рис. 1. Структура интерактивного учебно-тренировочного комплекса многоцелевых беспилотных летательных аппаратов

3) структурный состав интерактивной автоматизированной системы обучения и унифицированного диалогового моделирующего стенда-тренажера операторов базируется на ограниченном использовании штатного бортового оборудования летательного аппарата (ЛА) и многоцелевого беспилотного летательного аппарата (МБПЛА) или имитирующих его приборов, применении имитаторов бортовых систем в виде программных модулей, воспроизводящих динамику и логику функционирования систем на режимах пилотирования и применения МБПЛА, имитаторов информационно-управляющего поля кабины и рабочих мест операторов в виде ЖК-мониторов, на которых формируются информационные кадры многофункциональных экранных и электромеханических индикаторов, мнемокадры общесамолетной индикации и изображения отдельных пультов управления;

4) в интересах исследований и отработки эргатического информационно-управляющего комплекса МБПЛА, снижения затрат на профессиональную подготовку и повышения эффективности подготовки операторов наземного пункта управления с эргатическим интерфейсом для контроля и управления общесамолетным оборудованием многоцелевого беспилотного авиационного комплекса целесообразно создание унифицированного диалогового моделирующего стенда-тренажера (УДМСТ);

5) разработанный моделирующий стенд-тренажер содержит: модуль наземного пункта управления; модуль мобильного пункта управления; рабочее место инструктора; вычислительно-управляющую систему на базе компьютеров типа Pentium с мониторами с экранами от 9" до 21" и средствами сопряжения с модулем наземного пункта управления и мобильного пункта управления; систему имитации внешней обстановки.

Основными положениями концептуальных основ построения моделирующего стенда-тренажера для эргономического сопровождения жизненного цикла эргатического интерфейса контроля и управления общеобъектным оборудованием МБПЛА являются:

- опережающая разработка программно-аппаратных средств на этапе создания соответствующего диалогового моделирующего стенда, являющегося экспериментальным образцом соответствующего тренажера к моменту испытаний МБПЛА;
- модульный принцип построения программно-аппаратных средств;
- развитие унифицированного математического обеспечения;
- формирование базы данных и алгоритмов имитации динамики и кинематики полета;

- разработка модуля автоматизированного синтеза контуров управления для формирования желаемых (эталонных) характеристик процесса управления;
- рациональное комплексирование штатного бортового оборудования, имитирующих устройств и программных модулей для имитации динамики и логики функционирования бортовых систем и формирования информационно-управляющего поля в виде мнемокадров экранных индикаторов и сигнальных табло на видеомониторах;
- совершенствование методического обеспечения с использованием модулей "эталонного" маневрирования, интеллектуальной поддержки операторов, "электронного инструктора" и обучающей организующей системы;
- обеспечение возможности гибкого варьирования характеристиками модели БПЛА, составом и видом представления информации о состоянии управляемого процесса, отображением образа цели управления, способами решения задач;
- использование унифицированной технологии построения вычислительной управляющей системы;

6) в соответствии с концепцией сопровождения жизненного цикла перспективного авиационного комплекса в ИУТК используются тренажеры унифицированного ряда, обладающие гибкой структурой, возможностью параллельной работы отдельных подсистем и каналов, что позволяет легко перестраивать их под различные задачи и осуществлять подготовку специалистов новых или модернизируемых систем и использовать их в качестве стендов полунатурного и имитационного моделирования бортовых комплексов, а также для первоначального освоения экипажем информационно-управляющего поля наземного и воздушного пункта управления МБПЛА и логики работы с бортовым комплексом перед началом испытаний. При этом с учетом унифицируемости значительная часть программно-алгоритмических модулей может служить основой для опережающей разработки тренажеров (в том числе комплексных), поставляемых в войска одновременно с перспективными авиационными комплексами;

7) функционирование учебно-тренировочного комплекса обеспечивает обучение и тренаж летного и инженерно-технического состава перспективного авиационного комплекса (ПАК) для:

- индивидуальной подготовки, проводимой для одного из членов экипажа ПАК;
- тренажерной подготовки в составе экипажа;
- групповой (тактической) тренажерной подготовки, проводимой в составе групп тактического назначения;

8) обучение и тренаж в ИУТК проводятся с использованием современных методик и технических средств при интерактивном взаимодействии обу-

чаемых, инструктора и автоматизированных обучающих систем, обеспечивающих повышение эффективности обучения и мотивации деятельности обучаемого. Создание автоматизированной системы управления тренировкой в системе "инструктор—тренажер—обучаемый" позволяет автоматизировать практическое применение методик подготовки на авиационных тренажерах, обеспечить выявление индивидуальных особенностей обучаемого и построение рациональной стратегии обучения.

В состав автоматизированной системы управления тренировкой входят следующие основные подсистемы:

- система оценки действий операторов;
- система диагностики причин невыполнения задания на УТК или причин снижения оценки;
- система прогнозирования уровня обученности;
- система принятия и реализации решений по изменению программы обучения.

9) методология интерактивного обучения и тренажа, построенная на принципах формирования повышенной мотивации творческого решения профессиональных задач, обеспечивается системой путем:

- создания условий диалога обучаемого с ИУТК;
- гибкого варьирования характеристиками ЛА, составом и видом представления информации о состоянии управляемого процесса, способами решения задач при обучении;
- выдачи на информационное поле в соответствии с методикой обучения информации о рациональных управляющих воздействиях (управляющих сигналах) и рациональных алгоритмах деятельности и формирования образа цели управления и специального применения МБПЛА;
- создания возможности повторения или изменения способа деятельности с любого момента;
- формирования корректной оценки качества деятельности;
- воспроизведения управляемого процесса на информационном поле в натуральном масштабе времени по данным тренировочного полета (по результатам выполненного тренировочного упражнения);
- создания возможности перехода в любой момент тренировочного упражнения на "эталонное" автоматизированное управление процессом эксплуатации ЛА.

Интерактивное обучение осуществляется с помощью обучающих и контролирующих программ по системам и оборудованию беспилотного летательного аппарата, которые разрабатываются по всему теоретическому курсу для любой категории обучаемых с учетом уровня их профессиональной подготовки.

Освоение обучаемым информационно-управляющего поля и рациональной структуры деятельности экипажа на динамических режимах полета и применения МБПЛА осуществляется с использованием обучающей информации, формируемой моделью "эталонного оператора-летчика" (электронным инструктором) и выдаваемой на видеомониторы в виде заданных сигналов управления, отрабатываемых контурами автоматического управления или обучающимся в командном (директорном) режиме управления, в виде текстовых сообщений о заданных воздействиях летчика на командные органы управления, в виде графического представления лидерной информации и наглядной информации о состоянии процесса управления.

Многоуровневая система исследования, обучения, тренажа и эргономического сопровождения жизненного цикла перспективных авиационных комплексов на базе интерактивного учебно-тренировочного комплекса обеспечивает следующие шесть уровней ее применения.

На *первом уровне* создается моделирующий стенд для инженерно-психологических исследований и моделирования процессов управления беспилотным летательным аппаратом, формируется концепция построения эргатического информационно-управляющего комплекса многоцелевых беспилотных летательных аппаратов, отрабатываются его структура и характеристики.

На *втором уровне* создается средство формирования наиболее важных индивидуальных свойств личности и психических функций, определяющих профессионально важные качества летной деятельности с использованием индивидуальных средств обучения на базе персональных ЭВМ.

На *третьем уровне* используются специализированные тренажеры, формирующие надежность действий при решении пилотажно-навигационных, тактических задач и успешность профессиональной деятельности на фоне воздействия отрицательных факторов полета и измененного психофизиологического состояния.

На *четвертом уровне* применяется комплексный тренажер для отработки профессионализма и автоматизированной оценки уровня готовности к конкретному полетному заданию.

На *пятом уровне* для решения многофункциональных задач подготовки летного и инженерно-технического состава на этапах обучения, тренировки и формирования профессионального мастерства применяется интерактивный учебно-тренировочный комплекс.

На *шестом уровне* интерактивный учебно-тренировочный комплекс используется для освоения и тренажа летной эксплуатации модернизируемых систем интегрированного бортового комплекса и

для эргономического сопровождения жизненного цикла авиационного комплекса и проведения исследований по совершенствованию методов обучения и обоснованию принципов дальнейшего развития авиационных комплексов ФА.

Освоение обучаемым информационно-управляющего поля и рациональной структуры деятельности экипажа на динамических режимах полета и применения МБПЛА проводится с использованием обучающей информации, формируемой моделью "эталонного оператора-летчика" (электронным инструктором) и выдаваемой на видеомониторы в виде заданных сигналов управления, обрабатываемых контурами автоматического управления или обучающимся в командном (директорном) режиме управления, в виде текстовых сообщений о заданных воздействиях летчика на командные органы управления, в виде графического представления лидерной информации и наглядной информации о состоянии процесса управления.

Формирование и исследование информационных кадров многофункциональных индикаторов эргатического информационно-управляющего комплекса МБПЛА

Разработаны и исследованы на диалоговом моделирующем стенде-тренажере информационные кадры рабочих мест операторов пункта дистанционного управления МБПЛА, которые дают возможность одновременно видеть главные пилотажные параметры, внешнюю обстановку и опасные состояния траекторного маневрирования и позволяют оператору-летчику формировать адекватные управляющие воздействия при полетах на режимах высокоточного маневрирования в маловысотном полете над сложным рельефом местности, захода на посадку и посадки на необорудованное место посадки в сложных условиях и обеспечить управление групповым взаимодействием МБПЛА и оперативный маневр применением МБПЛА, а также позволяют контролировать исправность и правильность функционирования бортовых комплексов (обнаруживать сбой в алгоритмическом и программном обеспечении) на протяжении всего этапа применения МБПЛА.

Управление полетом БПЛА при посадке осуществляется оператором-летчиком с использованием органов командного управления наземного пункта управления МБПЛА и органов управления режимами системы дистанционного управления. Информацию о процессе посадки оператор-летчик получает от многофункциональных индикаторов и мнемокадра коллиматорного отображения информации о наземной обстановке, поступающей от телекамеры, размещенной на МБПЛА.

Режим формирования параметров взлетно-посадочной полосы (ВПП) и виртуальной глиссады с использованием коллиматорного отображения информации в автономном режиме используется для выбора точки посадки на заранее неизвестный аэродром (при вынужденной посадке). Включение этого режима выполняется в условиях визуальной видимости местности. В центре экрана многофункционального индикатора появляется прицельная марка, отображающая положение линии визирования. С помощью кноппеля летчик перемещает ее по экрану до визуального совмещения с началом выбранного для посадки участка местности.

Координаты линии визирования (метки) рассчитываются в гиросtabilизированной горизонтированной по крену и тангажу системе координат относительно строительной оси БПЛА. Тем самым обеспечивается фильтрация собственных движений (колебаний) БПЛА и обеспечивается удобство управления меткой. По окончании целеуказания оператор-летчик нажимает кнопку "привязка", давая тем самым команду вычислителю системы самолетовождения на расчет координат ВПП и автономной глиссады.

При невозможности выполнения захода на посадку с прямой без выхода за ограничения модуль самолетовождения строит маневр для вывода в точку третьего (четвертого) разворота. Далее процесс корректировки целеуказания повторяется аналогичным образом.

Использование электронной индикации цифровой карты местности позволяет повысить качество управления группой МБПЛА, а также избежать потерь при выполнении заданий над сложными участками местности.

На рис. 2 представлен пилотажный информационный кадр многоцелевого беспилотного вертолета (МБПВ).

На пилотажном информационном кадре МБПВ используется новый вид авиагоризонта, сформированный по принципу "вид дистанционно-управляемого вертолета с другого вертолета, находящегося сзади на одной и той же высоте и скорости" и связанного с земной системой координат, оси которой определяются вектором путевой скорости и местной вертикалью. Символы дистанционно-управляемого вертолета и "лидера" представляются в виде треугольников, каждый из которых символизирует "летающее крыло". Символ дистанционно-управляемого вертолета содержит также символ шасси в виде двух небольших равносторонних треугольников на основании символа "летающего крыла" (вблизи середины основания).

Символ дистанционно-управляемого вертолета меняет свою конфигурацию в зависимости от изменения угла тангажа и угла скольжения и пово-

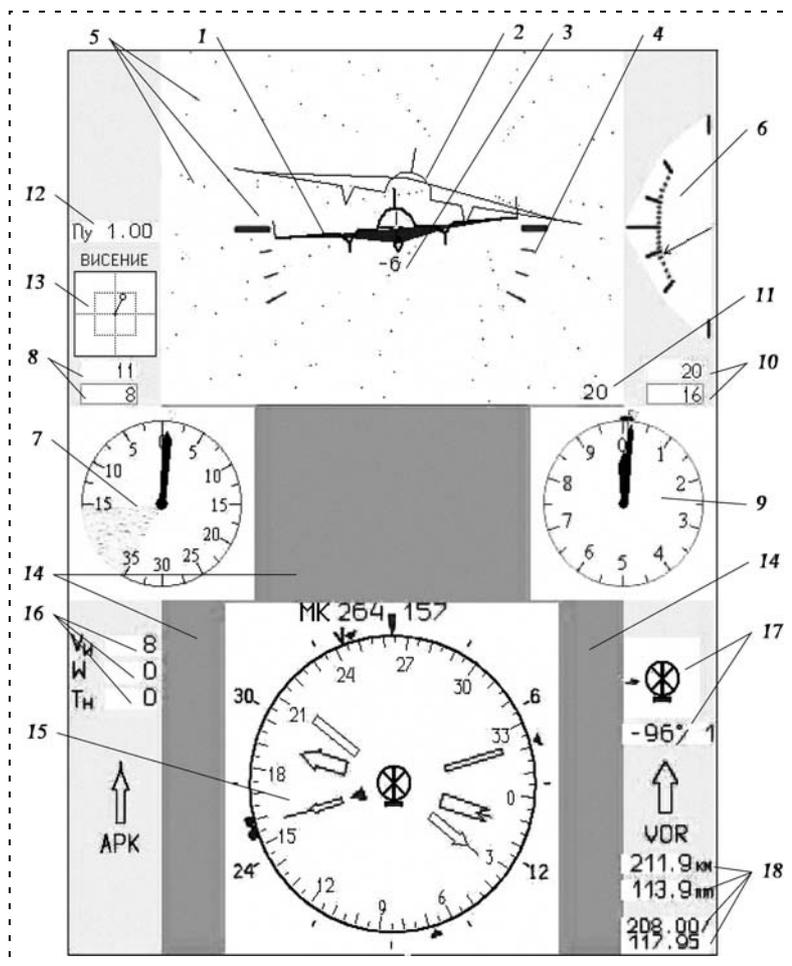


Рис. 2. Мнемокадр с командно-лидерной индикацией для режимов траекторного управления МБПВ, висения, захода на посадку и посадки:
 1 — символ летательного аппарата; 2 — символ образа цели управления — "лидера"; 3 — счетчик тангажа; 4 — шкала крена; 5 — символы имитации кристаллической решетки; 6 — вариометр; 7 — индикатор скорости полета; 8 — счетчики заданной и текущей скорости; 9 — высотомер; 10 — счетчики заданной и барометрической высоты; 11 — счетчик радиовысоты; 12 — счетчик вертикальной перегрузки; 13 — индикатор висения; 14 — индикация расстояния до земли; 15 — пилотажно-навигационный прибор; 16 — счетчики скорости и наземной температуры; 17 — индикатор параметров ветра; 18 — счетчики параметров VOR

рачивается относительно центра экрана в зависимости от фактического угла крена. Символ "лидера" несет информацию о заданных параметрах по принципу "делай как я" и информацию о критических состояниях путем изменения конфигурации, требующей снижения критических состояний и мигания соответствующих элементов лидерного изображения.

Лидерный треугольник в режиме автоматизированного управления меняет форму в зависимости от заданных углов тангажа и скольжения, поворачивается в зависимости от отклонения заданного крена, перемещается по экрану в зависимости от отклонения по высоте и бокового отклонения от заданной траектории, а величина треугольника меняется в зависимости от отклонения скорости полета от заданной. Если скорость полета меньше задан-

ной, то "лидер" уходит вперед и его видимые размеры становятся меньше.

Информационная командно-лидерная индикация в режиме "свободного пилотажа" (ручного управления) имеет одно изображение управляемого объекта. При этом символ лидерного объекта находится как бы под символом управляемого объекта до тех пор, пока "свободный пилотаж" осуществляется в пределах ограничений, установленных для данного БПЛА. При выходе параметров полета БПЛА за пределы ограничений символ лидерного объекта появляется на информационном поле, указывая, какими должны быть действия по вводу управляемого объекта в пределы ограничений и привлекая внимание оператора-летчика миганием.

Информационная командно-лидерная индикация, предложенная сотрудниками УВЗ им. Н. И. Камова (в настоящее время — ОАО "Камов") И. А. Эрлихом, Н. П. Бездетновым и Э. А. Петросяном, доработана и исследована с участием летчиков-испытателей и операторов.

Экспериментальные данные по управлению вертолетом показали, что при сравнительной оценке предложенной информационной командно-лидерной индикации (ИКЛИ) и штатной приборной доски явное преимущество остается за разработанной новой индикацией. По отзывам летчиков, участвовавших в инженерно-психологических экспериментах, основными преимуществами ИКЛИ перед штатными приборами являются:

- сосредоточение всей пилотажной информации на одном экране с достаточно простым определением пространственного положения ЛА и его пилотированием по авиагоризонту, использующему принцип "вид дистанционно-управляемого вертолета с другого вертолета, находящегося сзади на одной и той же высоте и летящего с той же скоростью";
- предъявление летчику наглядной лидерной информации о заданных параметрах движения по символу лидерного объекта, аналогичному символу управляемого объекта, с использованием принципа "делай как я", что облегчает формирование у летчика образа цели по наблюдаемому изображению лидера;
- сосредоточение информации о критическом состоянии в лидерном изображении и наличие в нем командной информации о направлении парирования опасных отклонений, что повышает безопасность полета.

Для обеспечения возможности и безопасности пилотирования в сложных метеоусловиях на экране авиагоризонта была синтезирована модель полета в виртуальном звездном пространстве, в нормальной земной системе координат, привязанной к месту посадки или к месту проведения работ. Визуализация этой модели полета была реализована следующим образом. В виртуальном пространстве, в узлах регулярной решетки размещены светящиеся точки, размер и яркость которых изменяются пропорционально расстоянию от соответствующей точки до глаза оператора. Линейные перемещения внутри решетки сопровождаются взаимным смещением светящихся узлов друг относительно друга, угловые же смещения представляют собой синхронное перемещение узлов по экрану либо их вращение относительно линии визирования. При этом достаточно четко дифференцируются совместные линейные и угловые перемещения.

Для индикации модели полета в виртуальном звездном пространстве на экране монитора разра-

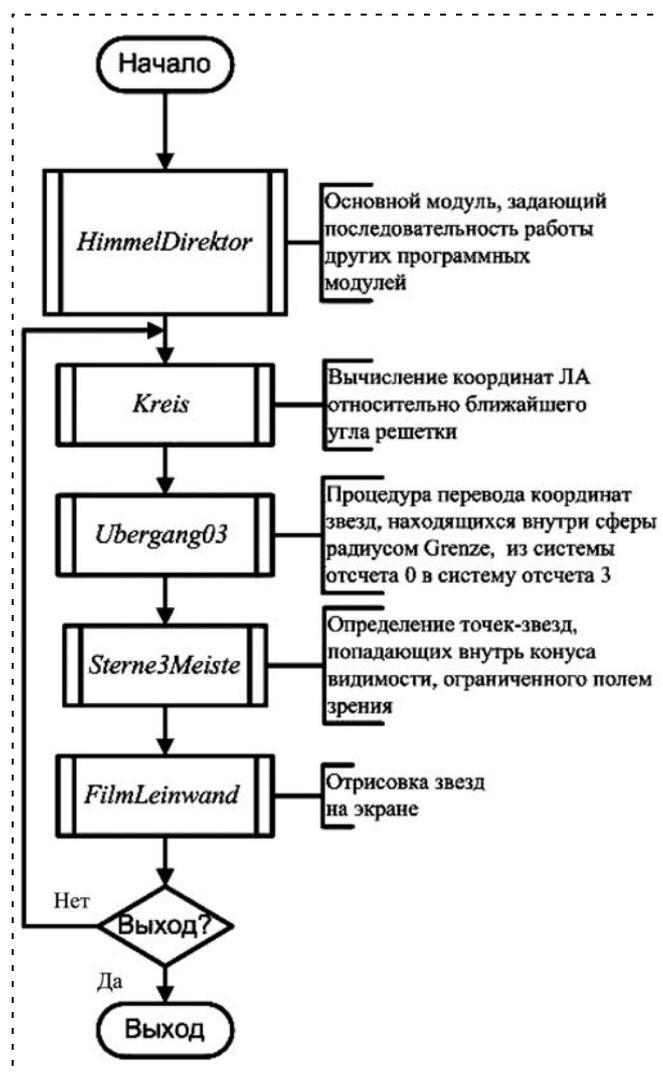


Рис. 3. Общая схема алгоритма "Виртуальное небо"

ботаны алгоритм и программа "Виртуальное небо" (рис. 3).

Экспериментальные исследования показали, что при использовании такого вида индикации у пилотов восстанавливалось ощущение окружающего пространства, образ полета оставался устойчивым, снижалось психологическое напряжение, повышались показатели качества деятельности при выполнении режимов висения и посадки в сложных метеоусловиях. Данный кадр успешно прошел эргономические испытания на диалоговом моделирующем стенде и рекомендован к применению в перспективных эргатических комплексах управления пилотируемыми и беспилотными летательными аппаратами.

* * *

Таким образом, разработана концепция построения интерактивного учебно-тренировочного комплекса для инженерно-психологических исследований, обучения, тренажа, формирования профессионального мастерства авиационного персонала МБПЛА, а также для системного эргономического сопровождения создания эргатических информационно-управляющих комплексов МБПЛА. Предложенная концепция обладает гибкой структурой и обеспечивает возможность параллельной работы отдельных подсистем и каналов на основе технической, программной и информационной совместимости автоматизированных средств обучения и тренажеров унифицированного ряда с использованием программно-аппаратных средств, базирующихся на принципах модульности, унификации и реконфигурации.

Список литературы

1. Пономаренко А. В., Василец В. М., Наумов А. И. и др. Интеллектуальные интерактивные учебно-тренировочные комплексы. М.: Филиал Воениздата, 2006. 260 с.
2. Сильвестров М. М., Бегичев Ю. И., Варочко А. Г. и др. Эргатические интегрированные комплексы летательных аппаратов / Под ред. М. М. Сильвестрова. М.: Филиал Воениздата, 2007, 510 с.
3. Буков В. Н., Сильвестров М. М., Бегичев Ю. И. Принципы и архитектура эргатических интегрированных комплексов управления беспилотными летательными аппаратами. Человеческий фактор в авиации и космонавтике: подготовка кадров: Сб. научных трудов / Под ред. А. А. Меденкова. М.: Полет, 2008. С. 6—13.
4. Сильвестров М. М., Чернышов В. А. Современная методология и концептуальные основы построения эргатического интегрированного комплекса управления многоцелевого маневренного самолета // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 7. С. 53—62.
5. Сильвестров М. М., Котицын Л. О., Ползик В. П., Бегичев Ю. И. Концепция дистанционного управления беспилотным вертолетом // Человеческий фактор в авиации и космонавтике: потенциал и ресурсы: Сб. научных трудов / Под ред. А. А. Меденкова. М.: Полет, 2010. С. 111—122.

IS&IT'11

Официальный сайт конгресса
<http://icai.tsure.ru>

Международный конгресс по интеллектуальным системам и информационным технологиям

2-9 сентября 2011 года.

Россия, Черноморское побережье,
Геленджик-Дивноморское

Основные даты:

Прием заявок до 10.04.11 г.
Прием текстов докладов до 15.05.11 г.
Финальная версия до 01.06.11 г.
Регистрация участников с 02.09.11 г.
Начало заседаний с 03.09.10 г.

Организаторы конгресса:

- Министерство образования и науки РФ;
- Российская Академия наук;
- Российская Академия естественных наук;
- Академия инженерных наук имени А.М. Прохорова
- Южный федеральный университет
- Технологический институт ЮФУ (ТТИ ЮФУ);
- Администрация г. Таганрога;
- Российская ассоциация искусственного интеллекта (РАИИ).

Председатель программного комитета:

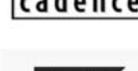
В.М. Курейчик (Россия, Таганрог),
заместители председателя:
Вагин В.Н. (Россия, Москва),
Еремеев А.П. (Россия, Москва)

Тематика конгресса:

- Биоинформатика;
- Интеллектуальные САПР, CASE-, CALS-технологии;
- Интеллектуальные системы в менеджменте;
- Информационная безопасность;
- Знания;
- Когнитивное моделирование;
- Многоагентные системы и принятие решений;
- Мягкие вычисления и нечеткие модели;
- Нейрокомпьютеры;
- Перспективные информационные технологии;
- Прикладные интеллектуальные системы;
- Проблемы образования;
- Синергетика и моделирование сложных систем;
- Эволюционное моделирование, генетические и квантовые алгоритмы;
- Экспертные системы.

Председатель организационного комитета:

В.Г. Захаревич (Россия, Ростов-на-Дону),
заместитель председателя:
В.В. Курейчик (Россия, Таганрог)

Организаторы**Партнеры и спонсоры:****Мероприятия, проводимые в рамках конгресса:**

- Международная научно-техническая конференция по интеллектуальным системам AIS'11
- Международная научно-техническая конференция по интеллектуальным САПР CAD-2011
- Молодежная научно-техническая конференция <Интеллектуальные системы-2011>
- Международная конференция "Математическое моделирование природных и технических систем"
- Международная конференция FRUCT
- Тур программы У.М.Н.И.К.
- Круглые столы по проблемам интеллектуальных систем и информационных технологий
- Ярмарка-выставка программных продуктов

Регистрация проводится на сайте конгресса

<http://icai.tsure.ru/step1.asp?lang=ru>

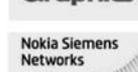
Заявки на участие следует направлять по адресу ivr@tsure.ru, litv@tsure.ru.

Адрес оргкомитета:

IS&IT'10, проф. В.В. Курейчику, ТТИ ЮФУ. 44, пер. Некрасовский, г. Таганрог, 347928, РФ
E-mail: vkur@tsure.ru, nev@tsure.ru, kur@tsure.ru, ivr@tsure.ru
Телефоны: 8634-37-16-51, 8634-39-32-60, 8634-38-34-51 Факс: 8634-31-14-87

Autodesk

NOKIA



CONTENTS

- Korikov A. V.** Once Again of Mechatronics as a Science 2
The paper considers the object and purpose of the study of mechatronics in view of its interdisciplinary nature, analyzes the differences between mechatronic systems (MS) and conventional systems, estimates of MS IQ, MS intellectuality "in small" and "at large", the relationship of MS intelligence with its variety.
Keywords: mechatronics, mechatronic system, IQ, intellectuality, variety
- Filimonov A. B., Filimonov N. B.** Dynamic Correction of Regulation Processes by Method of Linear-Square Optimization 9
The new method of regulation based on the preliminary correction of dynamic of regulation object according to the given standard model is suggested. The problem of correction is solved by method of linear-square optimization where optimized integral square criteria are used for degree of deviation of transient characteristics of corrected object from their standard values.
Keywords: the problem of synthesis of regulation system, dynamic quality of regulation processes, standard model of dynamic of object, formalism of linear-square optimization
- Kim D. P.** Determination of the Desired Transfer Function in Control Systems Synthesis by Algebraic Method . 15
The paper deals with the investigation of standard normalized transfer functions used when determining the desired transfer functions. The possibility of using one or other normalized transfer function depending on the number of zeroes of the transfer function to be synthesized is considered.
Keywords: desired transfer function, normalized transfer function (NTF), binomial (oscillating, geometric, arithmetic) NTF, setting time, overshooting
- Aliev T. A., Abbasov A. M., Alizadeh A. A., Etirmishli G. D., Guluev G. A., Pashaev F. G.** Intellectual Monitoring of Abnormal Seismic Process at the Gum Island of Caspian Sea with Use Robust Strays'es Technology 22
One of the possible variants of solving the task of monitoring of abnormal seismic processes is considered. The system where seismoacoustic information is received from depth layers of the ground is received by acoustic sensors (hydrophones) placed in mouth of suspend oil well. Continuous analyze of received seismoacoustic information is realized in server of monitoring center by robust noise technology. Technical characteristics of the system and some experimental dates which prove reliability and trustworthiness of results of monitoring are shown.
Keywords: seismoacoustic monitoring system, noise, abnormal seismic processes, short-term forecast
- Vulfin A. M., Frid A. I.** Automatic Intelligent Decision Support System for the Technological Complex Node of Oil Reception-Delivery Object 29
The article considers the problem of detection and recognition of technological events and oil reception-delivery object states on the base of consumables flow parameters analysis and the outlet pressure on nodes of the engineering network. Development of the neural network module of the object condition diagnosing within the scope of Data Mining strategy is described.
Keywords: the extended generalized likelihood ratio, the distributed time lagged feed-forward network, malfunction detection, adaptive prediction
- Lebedev G. N., Kuznetsov I. E., Mikhailov V. V., Matveev M. G.** Optimum Control of Quality of Radio Meteorological Measurements 35
The technique of optimum control of quality of the radio meteorological measurements is offered, based on methods of a stochastic filtration and allowing to compensate influence on the received radar-tracking information of random errors of measurements that essentially raises efficiency of carrying out of radar-tracking investigation of weather.
Keywords: management, radar-tracking measurements, quality, meteoobject
- Poduraev Yu. V.** Computer Folding of Video Images in Robotics: Search for Decisions in Compositions of Old-Russian Iconography 40
The problem of computer analysis and integral convolution of several video images given from moving cameras of mobile robot is discussed. The proposed approach is devoted to intelligent robotic and mechatronic systems with automated and remote control regimes operated in undetermined environment. The computer approach is based on geometric methods and graphical transmissions of old-Russian icons and miniatures.
Keywords: intelligent robotic and mechatronic systems, mobile robots, computer video images, compositions of old-russian iconography

- Aliev M. T., Bukanova T. S.** Method of Formation of the Image in the Mode of Real Time 47
The method of formation of the image with use of a rectangular raster and nonlinear quantization of brightness which allows to optimise process of processing of the transferred information is presented.
Results of imitating modelling are received with use of a package of applied software MATLAB and applied by working out of tool means of processing of the image
Keywords: system of technical sight, Mode of real time, Image digitization, Image quantization, the visual analyzer, Image formation
- Gerasun V. M., Rogachev A. F., Nesmiyanov I. A., Pavlovsky V. E.** Synthesis of Manipulator for Mobile Robot on Crawler Chassis 51
The manipulator based on spatial actuator as devices bearing equipment for mobile information robot has been proposed. As a result of the geometric synthesis the optimum parameters have been obtained for the robot arm on crawler chassis.
Keywords: manipulator, mobile robot, geometric synthesis
- Golovin V. F., Arkhipov M. V., Zhuravlev V. V.** Ergative and Biotechnical Control Systems in Medical Robotics . 54
In the article the expansion of ergonomics and biotechnical control concepts is suggested because robotics actively introducing in medicine. The examples of biotechnical systems, where besides robot and operator one more human — patient — is placed, are given. The three components interaction scheme of system "physician—operator—robot—patient" is described. The two variants of robot operation is considered — in clinics under physician control and individual home usage. It is noted that three-component interaction exists not only in medical robotics, but arising in manufacturing tasks.
Keywords: medical robotics, ergonomics, biotechnical control, automotive routine, operator, patient
- Dorozhko V. M.** Identification of Decrease in Resistibility of the Ocean Vessel to Dynamic Influence of a Wind Loading 58
Computational fluid dynamics was used at modeling of a contour (fishing-boat cross-section) roll on sea waves. It has been found, that a maximum of the module of the angular speed, escorted in the course of contour lifting on a wave top by heel increase towards movement of waves, is an identification sign of decrease in resistibility of an ocean vessel to dynamic influence of a wind loading. In numerical experiment possibility of contour capsizing under the influence of a squally wind is shown.
Keywords: an ocean vessel, an identification sign, a roll, squally wind, vessel capsizing
- Sevryuk A. N.** Automatic Classification of the Clustered Measuring Anomalies for AUV Onboard Processing . . . 64
The system of classification of measuring anomalies of any dimension is described in the article. Methods allowing are described to classify measuring anomalies onboard of the autonomous underwater vehicle (AUV) in real time. Work results appendices of methods allowing to classify the isolated objects on a photo images.
Keywords: measuring anomalies, data clustering, classification, identification, real-time systems, autonomous underwater robots
- Begichev Yu. I., Ponomarenko A. V., Kotitsyn L. O., Silvestrov M. M., Chernyshov V. A.** The Concept of Building an Learn-Training Systems for Ergonomic Accompanied by Development and Design an Ergatic Monitoring and Control System of Unmanned Aircraft 71
The article spotlights the actual problem of creating an learn-training systems of unmanned aircraft. Substantiated the concept of building an interactive learn-training system of multi-purpose unmanned air vehicles and uniformed interactive simulator for development, design and accompanied by life circle of ergatic information-management system of unmanned aircraft.
Keywords: interactive learn-training system, interactive simulator, ergatic information-management system, ergatic interface, information command-leading indication, mnemonic frame, image of control object

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5397**, тел./факс: **(499) 269-5510**

Дизайнер *Т. Н. Погорелова.*

Технический редактор *Е. В. Конова.* Корректор *М. Г. Джавадян.*

Сдано в набор 04.03.2011. Подписано в печать 14.04.11. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 9,8. Уч.-изд. л. 10,85. Заказ 284. 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"

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика". 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, 15