

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

№ 1 (130)

январь

2012

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.
ВИТТИХ В. А.
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

Сергеев С. Ф. Мехатроника как конвергентная научно-практическая дисциплина . . . 2

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Краснодубец Л. А., Крамарь В. А. Проектирование адаптивных регуляторов для мехатронных систем . . . 7

Гайдук А. Р., Плаксиенко Е. А. Синтез автономных и связанных многомерных систем управления . . . 13

ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

Мозжечков В. А., Савин А. С. Математическая модель электропривода трубопроводной арматуры с червячным механизмом измерения крутящего момента . . . 21

Артеменко Ю. Н., Городецкий А. Е., Дорошенко М. С., Коновалов А. С., Кучмин А. Ю., Тарасова И. Л. Особенности выбора электроприводов зеркальной системы космических радиотелескопов . . . 26

СТАНОЧНОЕ И НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Коростелев В. Ф. Развитие металлообрабатывающей промышленности в Италии и в России . . . 32

Бурьян Ю. А., Сорокин В. Н., Капелюховский А. А. Система управления интенсивностью излучения скважинного гидродинамического генератора . . . 35

Брискин Е. С., Малолетов А. В., Лихобабин Д. О. Об управлении режимом работы скважинной штанговой насосной установки . . . 40

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Кузовлев Д. И., Тизик А. П., Тресков Ю. П. Декомпозиционный алгоритм для решения транспортной задачи с ограниченными пропускными способностями . . . 45

Гришина Т. Г. Вероятностное обоснование и принятие решений при управлении автоматизированным производством . . . 48

МЕТОДОЛОГИЯ И ФИЛОСОФИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Виттих В. А. Интерсубъективные системы как объекты постнеклассической науки . . . 53

Журнал в журнале

"УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА В АВИАКОСМИЧЕСКИХ И МОРСКИХ СИСТЕМАХ"

Дорожко В. М. Идентификация опасного развития бортовой качки судна в условиях ветроволнового воздействия . . . 57

Лебедев Г. Н., Ефимов А. А., Мирзоян Л. А. Метод маршрутизации облета неподвижных объектов при мониторинге наемной обстановки на основе динамического программирования . . . 63

Contents . . . 71

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

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

УДК 621.865.8; 382.049.77

С. Ф. Сергеев, д-р психол. наук, проф.,

ssfpost@mail.ru,

Санкт-Петербургский

государственный университет,

ОАО "Корпорация "Аэрокосмическое оборудование",

Санкт-Петербург

Мехатроника как конвергентная научно-практическая дисциплина*

Понятийный базис мехатроники рассматривается как результат действия социальной динамической самоорганизующейся системы, порождающей научно-практический дискурс, центрирующийся вокруг технико-технологических и научных представлений о проектировании управляемых технических систем. Показаны направления развития мехатроники, диктуемые конвергентным характером научно-технологической среды современного общества.

Ключевые слова: мехатроника, конвергенция, парадигма, самоорганизация, постклассическая наука

Настоящая статья является очередным и далеко не последним возвращением к теме определения мехатроники, ее предметной области, методологических и научных основ. Эта тема не исчерпала своей *актуальности*, несмотря на то, что она неоднократно поднималась на страницах научной периодической прессы, в том числе и настоящего журнала [1–6].

Дать определение научной дисциплине — значит определить ее границы или найти пределы, в рамках которых она не теряет специфики присущих ей предмета, объекта и методов. Это не столь пустая и бессмысленная задача, как может показаться на первый взгляд. Ее решение дает возможность оценить текущее состояние и тенденции развития области знания, сформировать ее научную и технологическую среду, а главное, понять, в каком направлении необходимо организовать селекцию и подготовку научных и инженерных кадров для будущей эффективной деятельности. Речь идет о создании питающей среды, позволяющей вырастить здоровое древо дисциплинарного знания, дополняющего общие и технологические знания человечества, создать систему их самовоспроизводства, умножения и сохранения. В этом заключается *практическая значимость* исследований понятийного строя научной дисциплины, ее методологических и междисциплинарных основ.

* Работа выполнена в рамках исследований, проводимых при поддержке РФФИ (грант № 12-08-00304-а).

Классические и постклассические представления о науке

Наука в ее классическом варианте представляет собой особый вид познавательной деятельности человека, направленный на получение, уточнение и распространение объективных, системно-организованных и обоснованных знаний о природе, обществе и мышлении [7]. Эта деятельность осуществляется социальными институтами, образующими систему образования и научную среду, включающую системы сбора и обработки научной информации, проведение экспериментальной и теоретической работы. Имеется особый круг лиц, желающих заниматься наукой через институт аспирантуры и докторантуры с жестким контролем научных продуктов с помощью процедур научной дискуссии и рецензирования. Каждая отрасль науки образует свою среду, в которой порождается дискурс данной дисциплины. Эта среда определенным образом организована и представляет собой особого рода коммуникативную систему. Смена среды ведет к изменениям в основаниях научного строя дисциплины и в ее дискурсивном поле. Все технические науки являются науками с динамическим изменением внутренней и внешней сред, что ведет к непрерывным изменениям их границ, предметного и объектного содержания, определяет стадию развития парадигмы данной науки [8].

В классической науке господствует классическая форма научной рациональности, в соответствии с которой знание рассматривается как форма истины, точное отражение объективных свойств природы и общества [9]. В постклассическом варианте знание относительно и связано с конструирующими свойствами человеческой психики и мозга, формирующими непротиворечивую картину мира, позволяющую обеспечивать выживаемость организма [10]. Общество, компонентом которого является наука, представляет собой следствие действия социальной коммуникации, ведущей себя как самоорганизующаяся система аутопоэтического типа [11]. В силу этого в постклассической науке системообразующим фактором является научная коммуникация, возникающая в среде научных сообществ и коллективов, порождающая научный дискурс той или иной дисциплины.

В. С. Стёпиным выделены два пути перестройки оснований науки: 1) за счет внутридисциплинарного развития знаний, включения в сферу исследования новых объектов, накопления парадоксов и проблем и 2) за счет междисциплинарных связей, переноса из одной науки в другую дисциплинарных онтологий, идеалов и норм исследования [9]. Второй путь открывает новое поле научных проблем, способствует рассмотрению явлений, которые до этого не попадали в сферу научного поиска кон-

кретной дисциплины. По мнению В. С. Стёпина, существуют основания говорить о единой общенаучной картине мира, предпосылками создания которой служат: переход науки к постнеклассической стадии, современные идеи глобального эволюционизма, концепции самоорганизации, позволяющие устранить традиционный разрыв как внутри естественных наук, так и между гуманитарными и естественными науками. Рассмотрим возможности применения к мехатронике классических и постклассических представлений о науке.

Проблемы определения понятийной области классической мехатроники

Традиционно мехатроника рассматривается как наука о компьютерном управлении в технических системах, как современная компьютерная парадигма развития технической кибернетики [5]. Считается, что это междисциплинарная отрасль научно-прикладного и инженерного знания, ориентированная на создание сложных технических систем [1]. В. А. Лопота и Е. И. Юревич видят в мехатронике "синтез электромеханики и микроэлектроники, объединенных общим управлением и оптимизированных по общесистемным критериям" [4], и пытаются отделить ее от робототехники, по классическим представлениям имеющей почти идентичную понятийную область, методы и принципы проектирования. Эти, в общем, справедливые с точки зрения инженера рассуждения, были вполне адекватны начальному периоду развития мехатроники, когда речь шла о простом инженерном объединении новых технологий, использующих известные физические принципы в рамках разработки конкретного продукта. Однако уже в них игнорировался сложный характер формирования понятийной области данной дисциплины, не учитывался ее нелинейный, самоорганизующийся характер. Это привело к редукции существующего многообразия определений к структурно-функциональным моделям и описаниям дисциплинарного строя мехатроники с акцентом, в зависимости от вкуса их авторов, на те или иные технические и технологические особенности мехатронного продукта.

В настоящее время наблюдается эволюция определений, связанная с изменением технико-технологической среды современного общества. Если в базовых определениях конца XX века доминировали аддитивные модели мехатроники, отражающие пересекающиеся поля дисциплин, к числу которых чаще всего относили механику и электронику, то в дальнейшем появились "компьютерное управление движением", кибернетика и информатика и "синергетическое взаимодействие". В современных дефинициях мехатроники наблюдается переход от компьютерного управления механическими процессами к управлению физическими процессами [5]. Наблюдаются и попытки повысить "интеллектуальность" мехатронных модулей и систем, используя понятие "интеллект" как системообразующий фактор. Каж-

дый автор определения считает своим долгом осветить свое видение развития мехатроники на примере тех или иных объектов, содержащих мехатронные модули и системы.

Так, например, А. М. Кориков пришел к выводу, что "мехатронные системы должны обладать новым качеством (искусственным интеллектом), порождаемым синергией механических, электронных и компьютерных частей и элементами искусственного интеллекта" [6]. Тогда мехатронные системы — это системы, обеспечивающие интеллектуальное управление механическим движением. Однако попытка автора вывести интеллект мехатронной системы из структуры искусственной системы как следствие "синергии", путем введения понятий интеллектуальности "в большом" и "малом", к сожалению, не совсем удалась ввиду механистического подхода к интеллекту как к антропоморфной функции технической системы. Понятия "сложная система" и "интеллектуальная система" в данном контексте не синонимичны. Это качественно разные понятия. Будучи наблюдаемым эмерджентным качеством сложной системы, ее искусственный интеллект не проявляется до момента окончания проектирования, а в реальной деятельности он может и не соответствовать ожидаемому уровню. Ведь интеллект — это форма оценки, интерпретация поведения системы наблюдателем, которую последний дает на основании внутренних, неведомых никому, критериев интеллектуальности. Кооперативные эффекты, определяющие целостность системы, и процессы организации системы из среднего хаоса в классических представлениях не учитываются, что и проявляется в понятийном поле мехатроники в форме редукции ее реальной сложности.

В классических определениях мехатроники не отмечена и специфика межсистемных отношений, порождаемых во взаимодействующих в мехатронных системах независимых подсистемах разной природы при получении общесистемного результата в процессе взаимодействия с рабочей средой. Среда понимается только как окружающие условия, место, в котором происходит функционирование мехатронной системы. Следует заметить, что среда, справедливо отделяемая от проектирования мехатронной системы посредством введения понятий "вход" и "выход" в простых мехатронных системах, приобретает определяющее значение при переходе к сложным системам, организующим свою деятельность в нетривиальных отношениях с другими системами и средами. Именно здесь появляется понятие "интеллектуального поведения" мехатронной системы. При этом механическая часть системы является открытой системой, а управляющая — закрытой, формирующей свой опыт на основе внутренних описаний. Возникает проблема межсистемных взаимодействий внутри и вне мехатронной системы. Такого класса задач нет в дисциплинарном поле классической мехатроники, и поэтому она сталкивается с серьезными проблемами при проектировании систем организованной сложности.

Основная цель мехатроники и робототехники на современном этапе их развития — "одушевление" технической системы, придание ей свойств живого разумного организма, решающего задачи целесообразного приспособления и поведения в среде. Однако эта задача принципиально не может быть решена в рамках классических инженерных представлений, основанных на различных формах материализма и психологических моделях бытового сознания, отражающего "субъект-объектные" отношения.

Классическая методология проектирования мехатронных систем базируется на традиционном инженерном разделении (декомпозиции) задач проектирования технической среды на фрагменты подсистем разной физической и технологической природы с последующей интеграцией их с помощью компьютерных технологий. Такой подход оправдал себя при проектировании простых открытых электромеханических систем, но малоэффективен при решении задач, возникающих при создании закрытых самоорганизующихся на основе собственного опыта систем с "разумным" поведением технической компоненты. Дело в том, что наблюдаемый в мехатронике переход от решения траекторных задач к реализации целенаправленного поведения мехатронной системы требует новых методологических схем, обеспечивающих работу с системами организованной сложности, включая глубокое знание механизмов самоорганизации и внедрение принципов, аналогичных принципам психической регуляции живых организмов. Это требует изменения технико-технологического и компонентного репертуара и состава элементной и структурной баз проектирования, включая конвергенцию мехатроники с другими развивающимися в последнее время дисциплинами, в том числе с нанотехнологиями [12], но не исчерпывается только этим.

Конвергентная формула мехатроники

В настоящее время технологический прогресс человечества связан с интенсивной конвергенцией ряда научных и технологических дисциплин, объединением их в научно-технологические комплексы, создающие базис для проектирования сложных систем. К ним относится и мехатроника. Под конвергенцией понимается взаимовлияние разных научных и практических дисциплин, приводящее к появлению и внедрению новых результатов, полезных для конвергирующих дисциплин. Впервые обратили внимание на конвергентный характер мехатроники Е. Д. Теряев, Н. Б. Филимонов и К. В. Петрин. В их работах сделан прогноз развития и описаны основные черты конвергенции мехатроники с нанотехнологиями [12, 13]. Вводится понятие *наномехатроники* как результата конвергенции мехатроники с нанотехнологиями. Правда, авторы не спешат объявлять результат конвергенции основой новой дисциплины, справедливо полагая, что "это не миф, а скорее всеобщая красивая мечта, хотя и вполне достижимая" [13].

Интенсивное развитие мехатроники связано с эволюцией управляемых физических систем, компьютерных технологий и технологий искусственного интеллекта. Это базовые уровни дисциплины, определяющие эффективность, управляемость и разумность мехатронных систем. Однако существуют и другие уровни конвергенции, основанные на мультипликативных эффектах интеграции интенсивно развивающихся отраслей знаний.

Особый интерес вызывает *NBIC* — конвергенция (по первым буквам областей: *N* — нано; *B* — био; *I* — инфо; *C* — когнито), отражающая взаимовлияние и взаимопроникновение информационных технологий, биотехнологий, нанотехнологий и когнитивной науки [14]. Термин введен в 2002 г. Михаилом Роко (*M. Roco*) и Уильямом Бейнбриджем (*W. Bainbridge*), в отчете *Converging Technologies for Improving Human Performance*, подготовленным в 2002 г. во Всемирном центре оценки технологий (*WTEC*) [15]. Данная форма конвергенции оказывает катализирующее действие на технологический арсенал многих научно-практических дисциплин, ведет к возникновению новых форм прикладных наук, главное содержание которых состоит в изучении межсистемных эффектов и эмерджентных свойств, появляющихся при междисциплинарном объединении систем разной физической и информационной природы [16].

К классу конвергентных дисциплин можно отнести и мехатронику в ее симбиозе с системами и технологиями искусственного интеллекта. В ней отражены результаты междисциплинарного синтеза, возникающего на стыке когнитивных наук (*C*), механики (*M*), микроэлектроники (*M*), нанотехнологий (*N*), информатики (*I*), биологии (*B*) и автоматки (*A*). Формула мехатроники как новой конвергентной дисциплины может быть выражена в аббревиатуре *АММ NBIC*, где комплекс *NBIC* является технологическим катализатором комплекса *АММ* (автоматика, механика, микроэлектроника), составляющего предметный базис мехатроники и формирующего ее границы.

Междисциплинарность в мехатронике предполагает взаимосогласованное использование образов, представлений, методов и моделей дисциплин естественнонаучного, технического, социогуманитарного и психологического профилей при решении задач проектирования и эксплуатации сложных технических систем и их элементов. Заметим, что это не простое заимствование технологий, а их модификация под нужды практики проектирования конкретных изделий.

Мехатроника в постклассическом представлении

Постклассические модели научного знания, в рамках которых действуют те или иные постклассические определения дисциплин, связаны с идеями относительности знания и нелинейно-динамическими подходами к функционированию сложных систем.

Рассмотрим определение мехатроники, учитывая ее конвергентный, междисциплинарный характер и изменение объекта проектирования с простых электромеханических управляемых компьютером модулей к самоорганизующимся системам, действующим в сложных окружающих средах, решающим задачу целенаправленного поведения [17].

Мехатроника — конвергентная наука о *межсистемных и средовых взаимодействиях и интегральных эффектах*, возникающих в сложных самоорганизующихся технических системах, действующих в природных, технических и социальных средах; об их появлении, использовании, планировании, эволюции и реализации в конечных продуктах технологиями инженерного и эргономического проектирования для достижения конечных целей системы [18].

В данном определении речь не идет об "искусственном интеллекте" и "интеллектуальном управлении" в мехатронной системе. Эти термины порождены инженерными интерпретациями бытовых психологических представлений о поведении сложных объектов. Они мало полезны в конкретном проектировании. Некорректность данных аналогий связана с тем, что технические кибернетические системы и живые организмы работают на разных системогенетических принципах. Первые из них — на основе реализации алгоритмического поведения, сколь угодно сложного, но заданного разработчиками системы, а вторые включают механизмы рефлексии сознания, обслуживающего биологическую целостность организма и личности в физическом и социальном мирах [19].

Использование термина "наделен искусственным интеллектом" по отношению к классическому мехатронному объекту не совсем корректно, так как интеллект является формой интерпретации наблюдателя, анализирующего поведение сложной системы в среде и наделяющего ее разумным поведением. При этом среда не отделена от системы и является одним из условий, фактором, определяющим направление адаптивной и преобразующей деятельности интеллектуальной системы [20]. Этого нет в классических мехатронных системах.

Все вышесказанное ограничивает использование классических общепсихологических понятий в мехатронике, несмотря на их чрезвычайную популярность в инженерной среде. Необходим переход к научным и научно-практическим интерпретациям и описаниям систем, реализующих когнитивное поведение. Когнитивные науки в комплексе *NBIC* могут быть весьма полезны при создании мехатронных и робототехнических систем. При этом следует заметить, что *психологическое, эргономическое и инженерно-психологическое* знание как база когнитивных наук совершенно не представлено в практике работы современных отечественных научно-исследовательских и проектно-конструкторских организаций. В них нет *подразделений, занимающихся проблемами человеческого фактора* при проектиро-

вании, вопросами юзабилити тестирования и проектирования новой техники, учетом опыта пользователя. В этих областях науки и технологии мы катастрофически отстаем от наших западных партнеров и конкурентов. Удивительно, но большинство работ по искусственному интеллекту по настоящее время ведутся на основе старых, давно изжитых в научной психологии концептов и схем.

Заметим, что мехатроника в своем развитии не перешла фазу эргатических систем. Мехатронные модули в большинстве своем служат в качестве элементов, обслуживающих человеко-машинные эргатические системы, в которых интегрирующим и придающим системе разумный характер актором является человек-оператор. В этом контексте представляется перспективной для развития мехатроники *конвергентная связка "мехатроника — эргатические системы"*.

Требуется более серьезное внимание к анализу отношений "субъект — объект с разумным поведением", возникающих в сложных видах деятельности.

В рамках постклассических представлений неконструктивно при эргономическом и инженерном обеспечении проектирования новых видов мехатронных систем классическое физическое понятие "среда", не учитывающее специфику процессов, возникающих и протекающих во внутреннем плане психики оператора в процессе решения учебной и/или профессиональной задачи. Алгоритмические модели, традиционно используемые при описании деятельности оператора, некорректны и малопродуктивны при управлении сложными эргатическими мехатронными системами, содержащими искусственные динамические среды [21].

Постклассические представления о науке как особом виде социальной организации, производящей знания, требуют нового понимания научных дисциплин как особого рода замкнутых систем, работающих по принципу самоорганизующихся самовоспроизводящихся систем, порождающих научный дискурс, составляющий понятийную и предметную область конкретной науки. Следствием такого взгляда на мехатронику является признание динамического и селективного характера функционирования ее дисциплинарного строя. Возникает необходимость представлений о наличии процессов *динамической селективной конвергенции*, образующих ее *конвергентное ядро*, звеньев и границы, очерчивающей понятийную область. Старые представления о конвергенции как о взаимном перетекании и простом использовании знаний из смежных дисциплин должны быть пересмотрены при анализе внутрисистемных взаимодействий в рамках ауто-позиса дисциплинарной области. Это новая задача, и она не может решаться классическими аддитивными способами. Недостаточно сказать, что понятийная область мехатроники порождается синтезом тех или иных дисциплин, путем простого механического объединения научных дискурсов конвергирующих дисциплин. Многообразие вызываемых

эффектов самоорганизации неизбежно приведет к возникновению дискурса определений мехатроники, каждое из которых будет носить временный, ситуативный характер. Важно не смешивать науку как место и способ порождения нового знания и технологий его использования с продуктами, появляющимися в результате использования научных знаний в практике.

Проблемы мехатроники на современном этапе развития

Основные проблемы мехатроники на настоящем этапе развития связаны с отставанием концептуально-гуманитарной компоненты проектирования, недостатком научных знаний и представлений из области психологии, биологии, нейрофизиологии. К числу нерешенных проблем следует отнести проблемы:

- субъективного регулирования;
- корректного переноса свойств биологической живой системы на технические системы;
- формализации систем организованной сложности;
- сочетания и интеграции знаний дисциплин гуманитарного и инженерного плана.

Выводы

1. Мехатроника является конвергентной научно-практической дисциплиной, аккумулирующей знания об управлении физическими системами для решения практических задач проектирования доступных на данном этапе развития техники и технологий.

2. Современный этап развития мехатроники характеризуется переходом к методам и технологиям работы с системами организованной сложности, что требует изменений в понятийном строе мехатроники, переходу к постклассической парадигме научного знания.

3. Сложные мехатронные системы, включенные в эргатические системы, проявляют свойства аутопоэтических единств и должны проектироваться с учетом возникающих эффектов самоорганизации.

4. Проектирование сложных мехатронных систем связано с проектированием самоорганизующихся сред, обеспечением условий их целостности и координации процессов структурного дрейфа и скоординированной деятельности с другими подсистемами.

5. Необходимо сконцентрировать внимание на разработке методов формализации самоорганизующихся систем.

6. Без исследований по искусственному и естественному интеллекту мехатроника может потерять источник развития, связанный с повышением интеллектуальности системы управления.

7. У мехатроники нет перспектив к развитию без ассимиляции знаний из когнитивных наук инженерной психологии и эргономики и их приложений.

8. Целесообразно в научно-исследовательских и проектировочных организациях создание подразделений для психологического и эргономического обеспечения проектирования мехатронных систем и робототехнических комплексов.

Список литературы

1. Подураев Ю. В. Принципы построения и современные тенденции развития мехатронных систем / Ю. В. Подураев, В. С. Кулешов // 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. Лопота В. А., Юревич Е. И. Закономерности развития мехатроники и робототехники // Защита и безопасность. 2008. № 2 (45).
5. Теряев Е. Д., Филимонов Н. Б., Петрин К. В. Мехатроника как компьютерная парадигма развития технической кибернетики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 6. С. 2—10.
6. Кориков А. М. Еще раз о мехатронике как науке // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 5. С. 2—8.
7. Наука. Материал из Википедии — свободной энциклопедии. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%F3%EA%E0>.
8. Кун Т. Структура научных революций. М.: Прогресс, 1977.
9. Степин В. С. Теоретическое знание. М.: Прогресс-Традиция, 2000.
10. Сергеев С. Ф. Обучающие и профессиональные иммерсивные среды. М.: Народное образование, 2009.
11. Луман Н. Социальные системы: Очерк общей теории. СПб.: Наука, 2007.
12. Теряев Е. Д., Филимонов Н. Б., Петрин К. В. Современный этап развития мехатроники и грядущая конвергенция с нанотехнологиями // Матер. 2-й Росс. мультikonф. по проблемам управления. Мехатроника, автоматизация, управление. С.-Петербург: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2008. С. 9—20.
13. Теряев Е. Д., Филимонов Н. Б. Наномехатроника: состояние, проблемы, перспективы // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 1. С. 2—14.
14. Дубровский Д. И. Междисциплинарные проблемы конвергенции нанотехнологий, биотехнологий, информационных и когнитивных технологий (NBIC) // Наука. Философия. Общество. Матер. V Российского философского конгресса. Т. 1. Новосибирск, 2009. С. 391—392.
15. Roco M., Bainbridge W. (eds). Converging Technologies for Improving Human Performance: Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science. Arlington, 2004.
16. Прайд В., Медведев Д. А. Феномен NBIC-конвергенции: Реальность и ожидания // Философские науки. 2008. № 1. С. 97—117.
17. Сергеев С. Ф. Психологические проблемы проектирования мехатронных сред эргатических систем // Матер. 2-й Всеросс. мультikonф. по проблемам управления. Мехатроника, автоматизация, управление. С.-Петербург: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2008. С. 287—290.
18. Сергеев С. Ф. Человеческий фактор в мехатронике: эргономические проблемы // Мехатроника, автоматизация, управление (МАУ-2009). Матер. Междунар. науч.-техн. конф. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. С. 172—175.
19. Сергеев С. Ф. Инженерно-психологическое проектирование сложных эрготехнических сред: методология и технология // Актуальные проблемы психологии труда, инженерной психологии и эргономики / Под ред. В. А. Бодрова, А. Л. Журавлева. Вып. 1. М.: Изд-во "Институт психологии РАН", 2009. С. 429—449.
20. Сергеев С. Ф. Постклассическая эргономика сложных сред: базовые понятия // Мехатроника, автоматизация, управление (МАУ-2010). Матер. науч.-техн. конф. СПб.: ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2010. С. 357—360.
21. Сергеев С. Ф. Эргономика иммерсивных сред: методология, теория, практика: дис. ... д-ра психол. наук: 19.00.03: защищена 7.04.10: утв. 28.01.11. СПб., 2010.

УДК 62-50

Л. А. Краснодубец, д-р техн. наук, зав. кафедрой,
В. А. Крамарь, канд. техн. наук, доц.,
lakrasno@gmail.com,
Украина, Севастопольский национальный
технический университет

Проектирование адаптивных регуляторов для мехатронных систем

Методы новой технологии проектирования непрерывных систем управления движением, построенные на использовании концепций обратных задач динамики в сочетании с оптимизацией по энергетическим критериям распространяются на мехатронные системы. При этом аналитическая минимизация по локальному квадратическому критерию заменяется численной процедурой, позволяющей получить конечно-разностное уравнение для искомого управления, придающего мехатронной системе адаптивные свойства. Исследован процесс адаптации в системе с цифровым регулятором и получены условия его устойчивости. Приведены основные соотношения для синтеза параметров адаптивного цифрового регулятора. Методом моделирования выполнен сравнительный анализ динамических характеристик двух мехатронных систем: с адаптивным и традиционными (П- и ПИ-) регуляторами.

Ключевые слова: мехатронная система, энергетический критерий, адаптация, локальная оптимизация, закон управления, цифровой регулятор, синтез, анализ, моделирование

*Петру Дмитриевичу Крутько
замечательному человеку, прекрас-
ному инженеру и видному ученому
посвящается*

Введение

Мехатроника как "наука о компьютерном управлении в технических системах" [1] успешно развивается благодаря совершенствованию компьютерных технологий и алгоритмического обеспечения цифровых регуляторов, играющих центральную роль в современных системах автоматизации и управления. Поскольку процессы управления в таких системах связаны с изменением энергии, то представляется естественным искать новые подходы к разработке алгоритмов управления динамическими объектами на основе энергетических критериев. В связи с этим следует отметить цикл работ П. Д. Крутько, главные результаты которых окончательно сформулированы им в виде "новых технологий аналитического проектирования алгоритмического обеспечения систем управления движением" [2]. Эти технологии,

основанные на применении концепции обратных задач динамики в сочетании с оптимизацией по локальным квадратическим критериям, имеющим физический смысл механической энергии, позволяют аналитическим путем конструировать законы управления для непрерывных регуляторов на основе минимизации кинетической энергии или энергии ускорения. Системы управления с такими регуляторами обладают слабой чувствительностью к параметрическим и координатным возмущениям.

Мехатронные системы по определению строятся на основе компьютерных технологий, поэтому вместо аналитического метода оптимизации, который используется для конструирования аналогового адаптивного регулятора, целесообразно применить численные методы оптимизации. Решению этой задачи посвящена данная статья.

Постановка задачи

Пусть объект описывается дифференциальным уравнением

$$\ddot{n} + a_1 \dot{n} + a_0 n = b_0 u; t = 0, n(0) = n_0, \dot{n}(0) = \dot{n}_0, (1)$$

где n — управляемая переменная; u — управляющая функция; a_1 , a_0 и b_0 — параметры.

Ставится задача — найти дискретный закон управления для цифрового регулятора, обрабатывающего данные обратных связей с периодом дискретности T и формирующего сигнал управления в виде ступенчатой функции

$$u(n, \dot{n}, t) = u(kT) \\ \text{при } kT \leq t < (k+1)T, k = 0, 1, 2, \dots, (2)$$

который обеспечит перевод объекта управления из начального состояния (1) в заданное стационарное состояние равновесия $n(t) = \bar{n} = \text{const}$, $\dot{n}(t) = 0$. При этом требуется, чтобы процесс $n(t) \rightarrow \bar{n}$; $\dot{n}(t) \rightarrow 0$, характеризующий выход объекта в замкнутой системе управления, проходил в малой окрестности эталонного процесса $n^*(t) \rightarrow \bar{n}$; $\dot{n}^*(t) \rightarrow 0$, формируемого эталонной моделью, описываемой дифференциальным уравнением

$$\ddot{n}^* + \alpha_1 \dot{n}^* + \alpha_0 n^* = \alpha_0 \bar{n}, \alpha_0, \alpha_1 = \text{const} > 0 (3)$$

с соответствующими начальными условиями. Параметры α_0 и α_1 следует выбирать исходя из желаемых динамических свойств проектируемой системы. Степень приближения процессов в управляемой системе и в эталонной модели удобно оценивать

значением функции качества [2], играющего роль локального критерия оптимальности

$$G(u) = \frac{1}{2} [\dot{n}^*(t) - \ddot{n}(t, u)]^2, t \geq 0, \quad (4)$$

где $G(u)$ представляет собой нормированное по массе значение энергии ускорения [3], вычисляемой в окрестности траектории движения эталонной модели. Чем меньше величина $G(u)$, тем в большей степени процессы в системе приближаются к процессам в эталонной модели. Функция качества (3) при такой постановке служит одновременно и критерием управления, и целевым условием адаптации. При этом в роли физически реализуемого аргумента целевой функции выступает текущее значение функции управления.

Конструирование дискретного закона управления

Поставленная выше задача аналитического решения не имеет. Поэтому воспользуемся численной процедурой минимизации критерия (4). Наиболее распространенным численным методом оптимизации критериев вида (4) является простой градиентный метод, алгоритм которого при сохранении принятых в [4] обозначений имеет следующий вид:

$$x^{i+1} = x^i - \alpha \frac{\partial F(x^i)}{\partial x}, i = 0, 1, 2, \dots, \alpha = \text{const}. \quad (5)$$

Выбор простого градиентного метода обусловлен простотой его реализации на вычислительных устройствах. Пусть алгоритм (5) реализуется на базе микроконтроллера, работающего с периодом дискретности T . В таком случае управляющий сигнал на выходе контроллера будет представляться в виде ступенчатой функции (2), сохраняющей свое значение постоянным в течение всего периода T . С учетом этого соотношение (5) можно переписать в виде конечно-разностного уравнения

$$u[(k+1)T] = u(kT) - \lambda \frac{\partial G(u)}{\partial u}, k = 0, 1, 2, \dots, \quad \text{при } u = u(kT) \text{ и } \lambda = \text{const}, \quad (6)$$

определяющего итерационную процедуру вычисления оптимального управления u_{opt} по критерию (4). Параметр λ в (6) определяет размер шага, который остается постоянным в течение всей итерационной процедуры. Его можно рассматривать как коэффициент, определяющий устойчивость и скорость сходимости итерационного процесса при вычислении оптимального управления u_{opt} .

Так как решение уравнения (6) определяет искомое управление $u(kT)$ для $k = 0, 1, 2, \dots$, то его будем рассматривать как уравнение регулятора. Отметим, что успешное решение этого уравнения зависит от

возможности вычисления производной $\frac{\partial G(u)}{\partial u}$ и правильного выбора параметра λ .

Для вычисления производной $\frac{\partial G(u)}{\partial u}$ поступим следующим образом. Принимая во внимание (3), перепишем выражение для функции качества (4) следующим образом:

$$G(u) = \frac{1}{2} [-\alpha_1 \dot{n}^* - \alpha_0 \ddot{n}^* + \alpha_0 \bar{n} - \ddot{n}(u)]^2, \quad (7)$$

где $u = u(kT)$ при $kT \leq t < (k+1)T$, $k = 0, 1, 2, \dots$. Дифференцируя обе части (7) с учетом (1) по u , найдем выражение для производной

$$\frac{\partial G(u)}{\partial u} = \{\alpha_0[\bar{n} - n^*] - \alpha_1 \dot{n}^* - \ddot{n}(u)\}(-b_0), \quad (8)$$

где $u(t) = u(kT)$ при $kT \leq t < (k+1)T$, $k = 0, 1, 2, \dots$

Из (8) следует, что для вычисления искомой производной требуются информация о текущем состоянии эталонной модели и второй производной управляемой координаты системы при $kT \leq t < (k+1)T$, $k = 0, 1, 2, \dots$, а также параметры эталонной модели α_1, α_0 и единственный относящийся к объекту управления параметр b_0 . Таким образом, вычисление производной (8) на каждом шаге итерационного процесса не вызывает затруднений.

Подставляя (8) в правую часть (6) и учитывая (3), можно получить рекуррентное соотношение в форме конечно-разностного уравнения

$$u[(k+1)T] = u(kT) + \lambda b_0 [\alpha_0(\bar{n} - n^*) - \alpha_1 \dot{n}^* - \ddot{n}], \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Заменяя в полученном уравнении переменные эталонной модели n^* и \dot{n}^* соответствующими переменными n и \dot{n} , характеризующими выход управляемого объекта, перепишем его следующим образом:

$$u[(k+1)T] = u(kT) + \lambda b_0 [\alpha_0(\bar{n} - n) - \alpha_1 \dot{n} - \ddot{n}], \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (9)$$

Принятая замена переменных соответствует замыканию системы обратными связями по выходной координате и ее производной. Наличие в (9) второй производной \ddot{n} со знаком минус свидетельствует о необходимости введения еще одной отрицательной обратной связи по ускорению управляемой координаты. Таким образом, ступенчатый управляющий сигнал вычисляется на основе информации о текущем состоянии непрерывного объекта управления, которое характеризуется координатой выхода, ее скоростью и ускорением.

Далее введем обозначение, определяющее информационную функцию

$$\theta(t) = \alpha_0[\bar{n} - n(t)] - \alpha_1 \dot{n}(t) - \ddot{n}(t). \quad (10)$$

В таком случае уравнение (9) преобразуется следующим образом:

$$u[(k + 1)T] = u(kT) + K\theta(t), \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Принимая во внимание, что информация от измерителей поступает в микроконтроллер дискретно во времени и в цифровой форме, выражение (10) можно преобразовать к виду

$$\theta(kT) = \alpha_0[\bar{n} - n(kT)] - \alpha_1 \dot{n}(kT) - \ddot{n}(kT), \quad kT \leq t < (k + 1)T, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (11)$$

где $\bar{n} = \text{const}$ играет роль задающего воздействия.

Окончательно дискретный закон адаптивного управления непрерывным объектом (1) имеет вид

$$u[(k + 1)T] = u(kT) + K\theta(kT), \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (12)$$

где $K = \lambda b_0$ — коэффициент усиления.

Начальные условия для конечно-разностного уравнения (12) определяются при $k = 0$ начальным значением информационной функции (11) и начальным значением управляющей функции $u(0) = u_0$.

Анализ уравнения (1) показывает, что изменение какого-либо из параметров объекта a_0, a_1, b_0 (или всех вместе), а также влияние внешних возмущений приводит к отклонению текущего ускорения \ddot{n} от ускорения \ddot{n}^* , задаваемого эталонной моделью. В таком случае в соответствии с локальным критерием (4) оптимизации с помощью рекуррентной процедуры (12) цифровой регулятор обеспечит адаптацию управления для новых условий функционирования системы. При этом адаптация является результатом текущей численной минимизации, выполняемой в реальном времени. Поскольку целевой функционал такой оптимизации выбран одновременно и как критерий управления объектом, и как целевое условие адаптации, то закон управления (12) можно назвать законом прямого адаптивного управления.

Структурная схема цифрового регулятора, реализующего сконструированный дискретный закон адаптивного управления в форме (12), приведена на рис. 1.

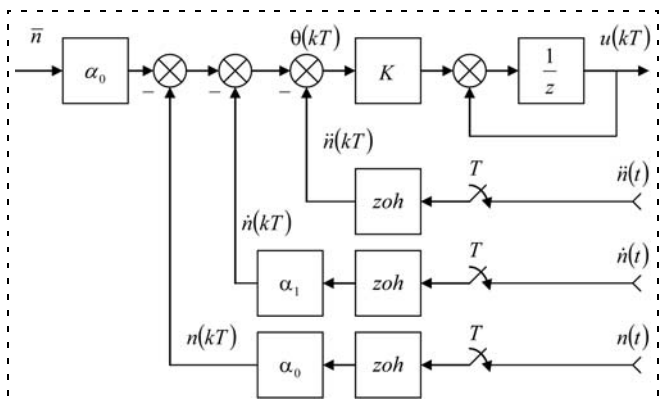


Рис. 1. Структурная схема цифрового адаптивного регулятора

Здесь блоки zoh , соединенные с ключами, замыкающимися с периодом T , выполняют функцию экстраполятора нулевого порядка (фиксатора), а блок $\frac{1}{z}$ осуществляет задержку управляющего сигнала на время T . Следует отметить, что структура проектируемого регулятора заранее не определена и находится по уравнению для закона управления после того, как оно получено.

Исследование процесса адаптации

Исследуем влияние параметра K , входящего в уравнение (12), на итерационный процесс приближения текущего управления $u(kT)$ к его оптимальному значению u_{opt} в процессе работы системы. Для этой цели введем функцию

$$\tilde{u}(kT) = u(kT) - u_{opt}, \quad (13)$$

характеризующую отклонение текущего значения управляющей функции от ее требуемого оптимального по критерию (4) значения. Искомое оптимальное значение u_{opt} найдем из уравнения, полученного приравнением (8) к нулю с учетом (1) и выполненной замены n^* и \dot{n}^* на n и \dot{n} соответственно. Имеем

$$\frac{\partial G(u)}{\partial u} = \{ \alpha_0[\bar{n} - n] - \alpha_1 \dot{n} + a_1 \dot{n} + a_0 n - b_0 u \} (-b_0) = 0,$$

откуда следует

$$u_{opt} = \frac{1}{b_0} \varphi(t), \quad (14)$$

где

$$\varphi(t) = \alpha_0[\bar{n} - n] - \alpha_1 \dot{n} + a_1 \dot{n} + a_0 n. \quad (15)$$

Далее информационную функцию (10) представим с учетом (15) в виде

$$\theta(t) = \varphi(t) - b_0 u(kT)$$

и подставим полученный результат в (11). Имеем

$$u[(k + 1)T] = u(kT) + K\varphi(t) - Kb_0 u(kT), \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Перепишем последнее уравнение, принимая во внимание (15), в виде

$$u[(k + 1)T] = u(kT) + Kb_0 u_{opt} - Kb_0 u(kT), \quad k = 0, 1, 2, \dots,$$

и, вычитая из обеих частей последнего результата u_{opt} , получим с учетом (13)

$$\tilde{u}[(k + 1)T] = (1 - Kb_0) \tilde{u}(kT), \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (16)$$

Однородное конечно-разностное уравнение (16) характеризует динамику процесса адаптации $u(kT) \rightarrow u_{opt}$ текущего значения функции управления к ее новому оптимуму, величина которого определяется в соответствии с критерием (4) новыми условиями функционирования, вызванными параметрическими или координатными возмущениями, повлиявшими на изменение ускорения \ddot{y} управляемой координаты в соответствии с уравнением (1). При $\tilde{y}(kT) = 0$ функция управления достигает своего оптимального значения $u(kT) = u_{opt}$. Из уравнения (12) следует, что качество процесса адаптации определяется выбором параметра $K = \lambda b_0$ — коэффициента усиления адаптивного регулятора.

Параметр K найдем из условия устойчивости решения однородного конечно-разностного уравнения (16). Выражение для искомого решения определяется дискретным аналогом формулы Коши—Лагранжа, которая в случае однородного уравнения имеет вид

$$\tilde{y}(NT) = (1 - Kb_0)^N \tilde{y}_0, \quad \text{где } \tilde{y}(0) = \tilde{y}_0, N = 0, 1, 2, \dots \quad (17)$$

Необходимое и достаточное условие асимптотической устойчивости решения уравнения (16) следует из (17) и имеет вид

$$|1 - Kb_0| < 1 \text{ или } 0 < K < 2/b_0. \quad (18)$$

Таким образом, при выборе K из условия (18) обеспечивается асимптотическая устойчивость процесса адаптации управляющей функции, которая находится в результате решения конечно-разностного уравнения (12).

Синтез параметров адаптивного регулятора

Расчет параметров α_0 и α_1 цифрового регулятора, реализующего закон управления (12) и обеспечивающего желаемое качество переходных процессов, может выполняться с помощью эталонной модели различными методами, рассмотренными в [2] и [5]. При этом необходимо задавать время t_p и вид переходной характеристики проектируемой мехатронной системы. Выбор коэффициента усиления K должен проводиться из условий асимптотической устойчивости процесса адаптации по формуле (18). Период дискретизации T следует выбирать с учетом времени, необходимого для формирования цифровых значений информационной функции и вычисления на этой основе цифровых значений управляющей функции. Можно воспользоваться неравенством Смита [6] $T \leq \tau_{\min}/15$, где τ_{\min} — минимальная постоянная времени. В качестве примера выполним синтез цифрового регулятора для управления скоростью двигателя постоянного тока в мехатронной системе, рассмотренной в [7] и представ-

ляющей собой двухконтурную скоростную систему постоянного тока с регуляторами в каждом из контуров. Будем предполагать, что для объекта управления существуют датчики, позволяющие измерять его выходную координату — угловую скорость вала ротора вместе с ее производной. Для измерения второй производной, входящей в выражение для информационной функции (11), применим реальное дифференцирующее звено с постоянной времени T_d . В таком случае адаптивный цифровой регулятор, изображенный на рис. 1, образует вместе с объектом управления трехконтурную скоростную систему постоянного тока.

Для решения поставленной задачи, прежде всего, запишем уравнение для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением в форме (1), которое при сохранении обозначений, принятых в [7], примет вид

$$\ddot{\omega} + a_1 \dot{\omega} + a_0 \omega = b_0 u_{я}, \quad (19)$$

где ω — угловая скорость; $u_{я}$ — напряжение в якорной цепи;

$$a_0 = \frac{k_1 k_2 k_E}{T_{я}}; a_1 = \frac{1}{T_{я}}; b_0 = \frac{k_1 k_2}{T_{я}}.$$

Параметры двигателя мощностью 0,45 кВт соответствуют приведенным в [7]:

$$k_1 = 1,72 \text{ 1/Ом}, k_2 = 0,72 \text{ 1/А} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2, \\ k_E = 0,34 \text{ В} \cdot \text{с}, T_{я} = 0,043 \text{ с}. \quad (20)$$

В таком случае параметры модели (19) получат следующие значения:

$$a_0 = 9,73; a_1 = 23,25; b_0 = 28,63. \quad (21)$$

Выберем эталонную модель в виде (3) и зададим время желаемой переходной характеристики проектируемой мехатронной системы $t_p = 0,04$ с при значении перерегулирования $\sigma \leq 5\%$. При этом, если определить постоянную времени τ_p , приблизительно характеризующую динамику проектируемой мехатронной системы, имеющей второй порядок, и декремент затухания ξ , то искомые параметры адаптивного регулятора (которые одновременно являются и параметрами эталонной модели) можно рассчитать по формулам

$$\alpha_0 = \frac{1}{\tau_p}, \alpha_1 = 2\xi \frac{1}{\tau_p}, \text{ где } \tau_p \approx t_p/\gamma, \quad (22)$$

$\gamma \in (3; 7)$ — некоторое число из промежутка (3, 7).

Выбор $\xi = 0,707$ обеспечивает процесс переходной характеристики эталонной модели с перерегулированием $\sigma \leq 5\%$, а при $\xi \geq 1$ перерегулирование будет отсутствовать.

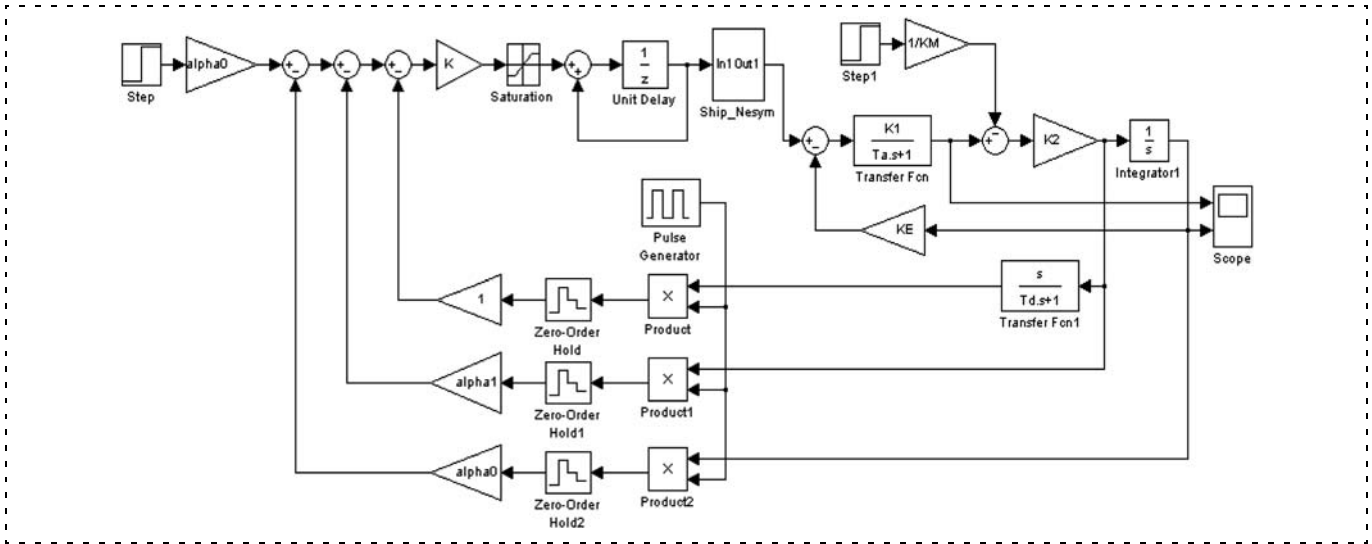


Рис. 2. Схема моделирования системы управления скоростью двигателя постоянного тока с цифровым адаптивным регулятором

Таким образом, для синтеза цифрового регулятора, придающего системе с непрерывным объектом (1) адаптивные свойства, достаточно задать два показателя качества — время и вид переходной характеристики (с перерегулированием или без перерегулирования). При этом в расчетах используется всего один параметр, характеризующий объект управления, — коэффициент передачи b_0 , который определяется после приведения модели объекта к виду (1).

При технической реализации адаптивного регулятора важно обеспечить первоочередное вычисление информационной функции перед расчетом функции управления. Настройка мехатронной системы управления осуществляется выбором только одного регулировочного параметра — коэффициента усиления K , значения которого должны удовлетворять неравенству (18).

Моделирование

На рис. 2 изображена структурная схема моделирования мехатронной системы управления скоростью двигателя постоянного тока с параметрами (20). При этом параметры регулятора, рассчитанные по формулам (22), получили следующие значения: $\alpha_0 = 30\ 625$; $\alpha_1 = 247$ при $\xi = 0,707$.

Выбранный в ходе моделирования коэффициент усиления адаптивного регулятора $K = 2,4 \cdot 10^{-4}$ удовлетворяет неравенству (18), которое с учетом (21) принимает вид $0 < K < 0,07$.

Постоянная времени T_D цепи дифференцирования выбрана из соотношения $T_D = \tau_p/5$, а период дис-

кретности принят равным $T = 100$ мкс. В модель включены также широтно-импульсный преобразователь (ШИМ), приведенный в [7], и нелинейный элемент, ограничивающий максимальное напряжение в якорной цепи в пределах $+110 \dots -110$ В. При моделировании предусмотрено подключение при $t = 0,06$ с возмущающего воздействия — момента нагрузки.

Результаты моделирования проиллюстрированы графиками переходных характеристик. На рис. 3 сравниваются динамические характеристики двух цифровых скоростных систем постоянного тока, спроектированных для одинаковых условий работы с одностипным двигателем постоянного тока с ШИМ:

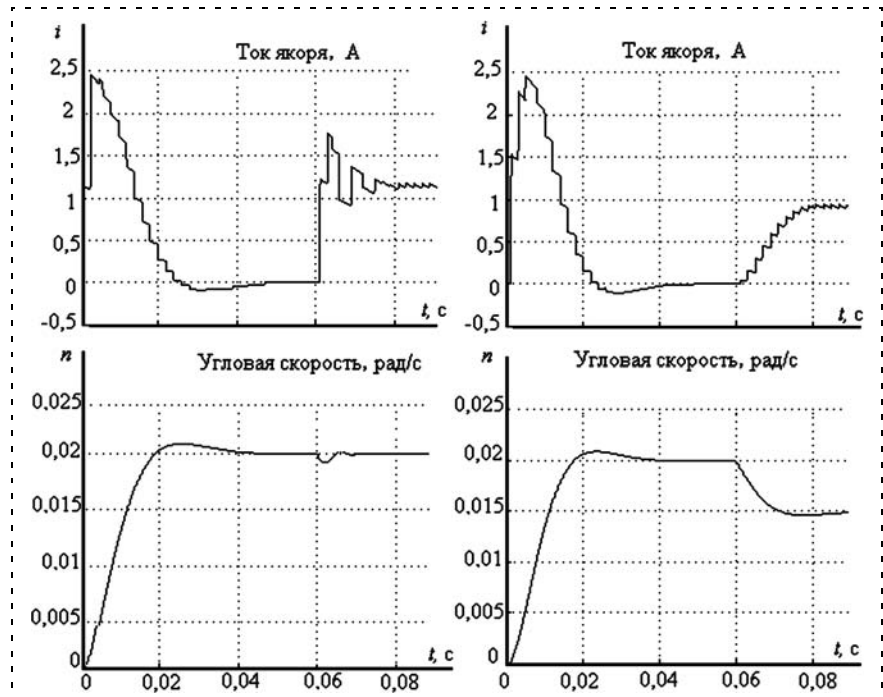


Рис. 3. Графики переходных характеристик в адаптивной системе (слева) и в двухконтурной скоростной системе постоянного тока (справа)

Заключение

Развитие методов проектирования систем управления движением, основанных на применении концепций обратных задач динамики и локальной оптимизации, сформулированных и детально проработанных П. Д. Крутько для непрерывных систем, в направлении их применения для проектирования мехатронных систем позволит с помощью общей методологии создавать принципиально новые типы цифровых управляющих устройств. Простые по структуре и в настройке такие устройства способны приспособиваться к динамическим объектам различных робототехнических систем, придавая им чрезвычайно важные свойства робастности.

Список литературы

1. Теряев Е. Д., Петрин К. В., Филимонов Н. Б. Мехатроника как компьютерная парадигма развития технической кибернетики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 6. С. 2—10.
2. Крутько П. Д. Новые технологии аналитического проектирования алгоритмического обеспечения систем управления движением // Управление, автоматизация и окружающая среда. Матер. междунар. науч.-техн. конф. (г. Севастополь, 8—13 сентября 2008). Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2008. С. 4—24.
3. Крутько П. Д. Симметрия и обратные задачи динамики управляемых систем // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1996. № 6. С. 17—46.
4. Батков А. М. Методы оптимизации в статистических задачах управления. М.: Машиностроение, 1974.
5. Краснодарец Л. А. Терминальное управление в морских наблюдательных системах с подвижными платформами сбора данных // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2008. № 2. С. 141—153.
6. Смит Д. М. Математическое и цифровое моделирование для инженеров и исследователей. М.: Машиностроение, 1980.
7. Герман-Галкин С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: КОРОНА-Век, 2008.

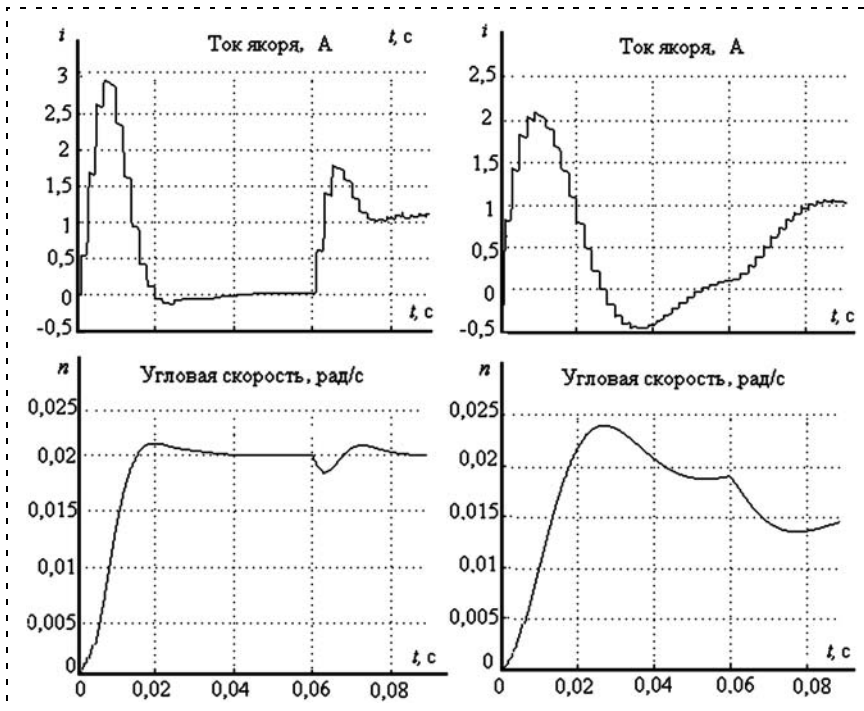


Рис. 4. Графики переходных характеристик в адаптивной системе (слева) и в двухконтурной скоростной системе постоянного тока (справа) при увеличенной в два раза постоянной времени двигателя T_y

адаптивной и двухконтурной с двумя традиционными регуляторами П- и ПИ-типа. Здесь на графиках показаны электрические процессы в якорных цепях и механические процессы, связанные с движением роторов управляемых двигателей. На рис. 4 приведены переходные характеристики двух сравниваемых систем при двукратном увеличении постоянной времени якорной цепи T_y двигателя — объекта управления.

Как следует из приведенных графиков, в мехатронной системе с адаптивным регулятором отсутствуют статические ошибки по управляющему и возмущающему воздействиям, а также заметно проявляются робастные свойства при параметрических и координатных возмущениях.

ИНФОРМАЦИЯ



с 13 по 16 марта 2012 г. состоится

XIV конференция молодых ученых «Навигация и управление движением» (XIV КМУ2012)

Тематика конференции

- Интегрированные и спутниковые системы навигации
- Теория и системы управления
- Обработка информации в навигационных системах
- Электронные и электромеханические устройства систем навигации и управления
- Интеллектуальные системы навигации и управления
- Гироскопические системы
- Чувствительные элементы систем навигации и управления
- Микромеханические датчики, системы и технологии
- Навигация и управление движением
- Информационные технологии на предприятиях навигационного приборостроения
- Новые образовательные технологии в области навигации и управления

Подробную информацию о конференции см. сайте:
<http://www.elektropribor.spb.ru/cnf/kmu14/rindex.php>

А. Р. Гайдук, д-р техн. наук, проф.,
gaiduk_2003@mail.ru,

Технологический институт

Южного федерального университета, г. Таганрог,

Е. А. Плаксиенко, канд. техн. наук, доц.,
Таганрогский институт управления и экономики

Синтез автономных и связанных многомерных систем управления

Показана возможность точного решения задачи декомпозиции многомерного управляемого объекта на ряд одномерных независимых каналов. На основе управления по выходу и воздействиям предложен метод синтеза физически реализуемых многомерных систем автоматического управления как автономных в смысле И. Н. Вознесенского, так и связанных с учетом требований к качеству процессов управления.

Ключевые слова: многомерный объект, стабилизируемость, декомпозиция, синтез, управление, автономное, связанное, устойчивость

Введение

Задачей управления многомерным объектом является либо независимое (автономное), либо связанное (согласованное) изменение его управляемых переменных, а также парирование внешних возмущений в соответствии с целью управления. Задача автономного управления многомерными объектами впервые была поставлена еще И. Н. Вознесенским [1] и в дальнейшем рассматривалась в многочисленных публикациях ([2–5] и др.) Для решения задачи синтеза как автономных, так и связанных многомерных систем применяли практически все известные в теории управления подходы: управление по отклонению с дополнительными обратными связями; методы оптимизации в частотной и во временной областях; геометрический подход и др. В целом эти методы осложнены либо необходимостью априорного выбора структуры регуляторов и дополнительных связей, либо физически нереализуемыми решениями, либо трудно проверяемыми условиями разрешимости.

Эти сложности традиционных методов стимулируют разработку новых подходов к синтезу многомерных систем автоматического управления (МСАУ) [6–10]. К ним относится, в частности, интенсивно развиваемый в работах В. Н. Букова, В. Н. Рябченко и других авторов подход, называемый "вложением систем" или "технологией вложения" [7, 8, 9]. Этот подход позволяет аналитически решить многие задачи теории систем. Однако он предполагает использование нового для теории управления математического аппарата и погружение решаемой задачи в некоторую более общую задачу высокой размер-

ности. При этом находится все семейство возможных решений рассматриваемой задачи, что приводит к необходимости дополнительных критериев выбора искомого решения из полученного множества. Отметим также сложность учета условий физической реализуемости устройства управления и необходимость задания ряда вспомогательных матриц, не обусловленных целью управления.

В работе [10] также предлагается новая процедура синтеза автономных МСАУ на основе некоторой "периодической структуры", которая аппроксимирует обратную передаточную матрицу объекта по управлению. Последовательное соединение объекта и этой структуры, имеющей конечное число ячеек, приводит к декомпозиции системы на ряд автономных каналов, но только в узком частотном диапазоне. Для его расширения предлагается включать низкочастотных фильтров, что позволяет искать законы управления для каждого одномерного канала в отдельности.

Фактически, указанная сложная конструкция (довольно высокого порядка) — "периодическая структура + низкочастотные фильтры" дает приближенное решение задачи декомпозиции многомерного объекта. Однако, если объект является стабилизируемым и число его независимых управлений не меньше числа управляемых переменных, то задача его декомпозиции всегда имеет физически реализуемое и *точное* решение [6]. Это решение можно получить, если использовать не обратную, а *присоединенную матрицу* передаточной матрицы объекта по управлению.

Ниже приводится постановка задачи синтеза МСАУ при наличии возмущений и показывается возможность точного решения задачи декомпозиции многосвязного объекта. Излагается методика синтеза или автономной, или связанной системы управления более низкого порядка, чем в [6]. Дан численный пример синтеза предложенным методом связанной МСАУ для того же объекта, что и в работе [10], но при наличии возмущения.

Постановка задачи

Рассмотрим многомерный объект, уравнения которого имеют вид

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{b}_1 f_1, \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x}, \quad (1)$$

где $\mathbf{x} \in R^n$ — вектор состояния; $\mathbf{u} \in R^q$ — вектор управлений; $\mathbf{y} \in R^q$ — вектор управляемых и измеряемых переменных, $q \geq 2$; $f_1 = f_1(t)$ — измеряемое скалярное возмущение; $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{b}_1$ — числовые матрицы и вектор соответствующих размерностей.

Следуя [6, 11, 12], примем, что многомерное устройство управления (формирующая часть регулятора) описывается уравнениями

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{R}\mathbf{z} + \mathbf{Q}\mathbf{g} - \mathbf{L}\mathbf{y} + \tilde{\mathbf{q}}_1 f_1; \quad (2)$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{K}\mathbf{z} + \bar{\mathbf{Q}}\mathbf{g} - \bar{\mathbf{L}}\mathbf{y} + \bar{\mathbf{q}}_1 f_1, \quad (3)$$

где $\mathbf{z} \in R^r$ — вектор состояния; $\mathbf{g} \in R^q$ — вектор задающих воздействий; $\mathbf{R}, \mathbf{Q}, \mathbf{L}, \mathbf{K}, \bar{\mathbf{Q}}, \bar{\mathbf{L}}$ и $\bar{\mathbf{q}}_1, \tilde{\mathbf{q}}_1$ — числовые матрицы и векторы соответствующих размерностей. Значение r , а также все коэффициенты в (2), (3) должны быть найдены в процессе решения задачи синтеза МСАУ. Отметим, что уравнения (2), (3) описывают управление по выходу и воздействиям.

Уравнения "вход—выход" замкнутой системы (1)—(3) можно представить в виде

$$y_i(p) = W_{i1}(p)g_1 + \dots + W_{iq}(p)g_q + W_{if}(p)f_1, \quad (4)$$

$$i = \overline{1, q},$$

где $W_{ij}(p)$ — передаточная функция канала $g_j \rightarrow y_i$, а $W_{if}(p)$ — передаточная функция канала $f_1 \rightarrow y_i$, $i, j = \overline{1, q}$, замкнутой системы.

Предположим также, что в соответствии с требованиями к динамике синтезируемой системы в строго левой части комплексной плоскости выделена область Ω — область допустимого расположения корней характеристического полинома системы (1)—(3). Если все корни некоторого полинома $N(p)$ принадлежат области Ω , то будем записывать $N(p) \in \Omega$ или $N_\Omega(p)$, а в противном случае $N(p) \notin \Omega$ или $N_{\bar{\Omega}}(p)$.

Поставим задачу определения размерности r вектора \mathbf{z} и значений всех коэффициентов в (2), (3) так, чтобы корни характеристического полинома $D(p)$ системы (1)—(3) располагались в области Ω , т. е.

$$D(p) \in \Omega, \quad (5)$$

а ее передаточные функции $W_{ij}(p)$ удовлетворяли условиям:

а) при автономном управлении

$$W_{ii}(p) = W_{ii}^*(p), W_{ij}(p) \equiv 0, i \neq j, i, j = \overline{1, q}; \quad (6)$$

б) при связном управлении

$$W_{ij}(p) = W_{ij}^*(p), i, j = \overline{1, q}. \quad (7)$$

Здесь $W_{ij}^*(p)$ — желаемые передаточные функции, сформированные с учетом указанных ниже

условий разрешимости, а также требований к качеству синтезируемой системы (1)—(3).

В установившемся режиме по отношению к задающим воздействиям $g_i, i = \overline{1, q}$, и возмущению f_1 в зависимости от свойств объекта (1) и располагаемой информации должны быть обеспечены: либо абсолютная, либо селективная инвариантность, либо астатизм некоторого порядка.

Определяемую соотношениями (1)—(6) задачу синтеза будем называть *задачей автономного управления* или *задачей И. Н. Вознесенского*. Соответственно, соотношения (1)—(5), (7) определяют задачу связного управления, при котором обеспечиваются согласованные в необходимой (и возможной) степени изменения управляемых переменных. Методы формирования желаемых передаточных функций по требованиям к качеству синтезируемой системы в настоящее время хорошо известны. Поэтому для решения обеих задач достаточно указать соответствующие условия разрешимости и методы обеспечения равенств (6) или (7) при условии (5).

Динамическая декомпозиция многомерных объектов

Покажем сначала возможность синтеза реализуемого многомерного устройства управления (МУУ), обеспечивающего декомпозицию объекта (1), и укажем условия его существования. С этой целью перейдем в уравнениях (1) к операторной форме и, исключая вектор состояния \mathbf{x} , найдем передаточные матрицы объекта

$$\mathbf{W}_{yu}(p) = A^{-1}(p)\mathbf{B}(p), \mathbf{W}_{yf}(p) = A^{-1}(p)\mathbf{b}_1(p), \quad (8)$$

где $A(p)$ — характеристический полином, а $\mathbf{B}(p) = [B_{ij}(p)]$ и $\mathbf{b}_1(p) = [b_{i1}(p)]$ — полиномиальные $(q \times q)$ -матрица и $(q \times 1)$ -вектор, определяемые выражениями

$$A(p) = \det(p\mathbf{E} - \mathbf{A}), \mathbf{B}(p) = \mathbf{C}\text{adj}(p\mathbf{E} - \mathbf{A})\mathbf{B}, \quad (9)$$

$$\mathbf{b}_1(p) = \mathbf{C}\text{adj}(p\mathbf{E} - \mathbf{A})\mathbf{b}_1.$$

Здесь $\text{adj}(\cdot)$ — присоединенная матрица [13], \mathbf{E} — единичная $(n \times n)$ -матрица.

Примем, что в уравнении (1) $\mathbf{u} = \mathbf{u}_{\text{СК}} + \mathbf{u}_{\text{СТО}}$, где $\mathbf{u}_{\text{СК}}$ — составляющая, с помощью которой обеспечивается устойчивость, качество и требуемая связность системы управления, а $\mathbf{u}_{\text{СТО}}$ — стабилизирующее управление, предназначенное для обеспечения устойчивости собственно объекта. Поэтому, если заданный объект (1) удовлетворяет условию

$$A(p) \in \Omega, \quad (10)$$

то управление $\mathbf{u}_{\text{СТО}} \equiv 0$. Для обеспечения условия (10) обычно используются обратные связи либо по выходу, либо по переменным состояния, либо по их оценкам. Методы синтеза таких управлений хорошо известны [3—5] и здесь не рассматриваются.

В дальнейшем предполагается, что объект (1) удовлетворяет условию (10).

Переходя к синтезу управления \mathbf{u} , обеспечивающего декомпозицию объекта (1), по матрице $\mathbf{B}(p)$ или по $\mathbf{W}_{yu}(p)$ (8) определим полином $B_{yu}(p)$ и матрицу $\mathbf{\Pi}_{yu}(p)$:

$$B_{yu}(p) = A^{1-q}(p)\det\mathbf{B}(p) = A(p)\det\mathbf{W}_{yu}(p); \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{\Pi}_{yu}(p) &= A^{2-q}(p)\text{adj}\mathbf{B}(p) = \\ &= A(p)\text{adj}\mathbf{W}_{yu}(p) = [P_{ij}(p)]. \end{aligned} \quad (12)$$

Отметим, что если объект задан не уравнениями (1), а передаточными матрицами (8), то общий знаменатель скалярных передаточных функций $W_{ij}(p)$ матриц $\mathbf{W}_{yu}(p)$ и $\mathbf{W}_{yf}(p)$ может отличаться от характеристического полинома заданного объекта. Это происходит за счет сокращения общих множителей полинома $A(p)$ и полиномов $B_{ij}(p)$ матрицы $\mathbf{B}(p)$ или полинома $B_{yu}(p)$. Поэтому задание объекта только передаточными матрицами, в общем случае, является некорректным. Если же заведомо известно, что все корни характеристического полинома объекта располагаются в допустимой области Ω , то его задание передаточными матрицами является вполне допустимым.

Имея в виду полиномиальную матрицу $\mathbf{\Pi}_{yu}(p)$ (12), определим величины

$$\zeta_j = \max_{i \in \overline{1, q}} [\deg P_{ij}(p)], \quad j = \overline{1, q}, \quad (13)$$

и введем диагональную матрицу $\mathbf{R}_d(p) = \text{diag}\{R_{d1}(p), R_{d2}(p), \dots, R_{dq}(p)\}$, где $R_{dj}(p) \in \Omega$ — некоторые полиномы степени $r_j = \zeta_j + \mu_{yy}^*$, а $\mu_{yy}^* \geq 0$ — допустимое по условиям физической реализуемости устройства управления значение его относительного порядка (относительной степени) [11, 12]. Рассмотрим устройство управления, уравнение которого имеет вид

$$\mathbf{u}_{\text{дк}} = \mathbf{\Pi}_{yu}(p)\mathbf{R}_d^{-1}(p)\boldsymbol{\zeta}, \quad (14)$$

где $\boldsymbol{\zeta}$ — q -вектор новых управлений. Это устройство, очевидно, является физически реализуемым, так как его относительный порядок $\mu_{yy} = \min_{i, j \in \overline{1, q}} \{\deg R_{dj}(p) - \deg P_{ij}\} \geq \mu_{yy}^*$.

Обычно управления u_1, u_2, \dots, u_q объекта (1) являются независимыми, поэтому выполняются условия (равноценные)

$$\det\mathbf{B}(p) \neq 0, \quad \det\mathbf{W}_{yu}(p) \neq 0. \quad (15)$$

Следующая лемма устанавливает, что матрица $\mathbf{\Pi}_{yu}(p)$ и МУУ (14) являются декомпозирующими для объекта (1), (8).

Лемма. Если выполнены условия (10) и (15), а в уравнении (14) матрица $\mathbf{\Pi}_{yu}(p)$ определена равенством (12), то обеспечивается устойчивость и независимость друг от друга каналов $\zeta_i \rightarrow y_i, i = \overline{1, q}$, соединения МУУ (14) и многосвязного объекта (1) с передаточными матрицами (8). ■

Доказательство. По определению передаточных матриц (8) уравнение "вход—выход" объекта (1) можно записать следующим образом: $A(p)\mathbf{y} = \mathbf{B}(p)\mathbf{u} + \mathbf{b}_1(p)f_1$. Подставим в это уравнение управление $\mathbf{u} = \mathbf{u}_{\text{дк}}$ из (14) и учтем определение матрицы $\mathbf{\Pi}_{yu}(p)$ (12). В результате получим

$$\begin{aligned} A(p)\mathbf{y} &= \mathbf{B}(p)\mathbf{\Pi}_{yu}(p)\mathbf{R}_d^{-1}(p)\boldsymbol{\zeta} + \mathbf{b}_1(p)f_1 = \\ &= A^{2-q}(p)\mathbf{B}(p)\text{adj}\mathbf{B}(p)\mathbf{R}_d^{-1}(p)\boldsymbol{\zeta} + \mathbf{b}_1(p)f_1. \end{aligned} \quad (16)$$

Как известно, если определитель ($n \times n$)-матрицы \mathbf{N} не равен нулю, то имеет место равенство $\mathbf{N} \cdot \text{adj}\mathbf{N} = \mathbf{E}\det\mathbf{N} \neq \mathbf{0}$ [13]. Поэтому с учетом неравенства (15) и вытекающего из выражения (11) равенства $\det\mathbf{B}(p) = A^{q-1}(p)B_{yu}(p)$ уравнение (16) можно представить в виде

$$A(p)\mathbf{y} = A(p)B_{yu}(p)\mathbf{R}_d^{-1}(p)\boldsymbol{\zeta} + \mathbf{b}_1(p)f_1$$

или, учитывая диагональность матрицы $\mathbf{R}_d^{-1}(p)$,

$$\begin{aligned} R_{di}(p)A(p)y_i &= A(p)B_{yu}(p)\zeta_i + R_{di}(p)B_{i1}(p)f_1, \\ i &= \overline{1, q}. \end{aligned} \quad (17)$$

Так как выполнено (10), а все $R_{di}(p) \in \Omega$, то соединение МУУ (14) + объект (1), (8) является устойчивым. Отсюда следуют утверждения леммы. *Лемма доказана.*

Подчеркнем, что именно из выражений (11) и (17) вытекает необходимость условий (10) и (15), которые, фактически, являются условиями существования декомпозирующего управления (14) для многомерных объектов типа (1). Однако это управление, как правило, не обеспечивает желаемого качества МСАУ.

Управление по выходу и воздействиям

Переходя к синтезу управления $\mathbf{u} = \mathbf{u}_{\text{СК}}$, обеспечивающего выполнение условий (6) или (7), будем, как и выше, считать условия (10) и (15) выполненными. Принимая во внимание утверждения леммы, положим в (14) вектор $\boldsymbol{\zeta}$ равным управлению по выходу и воздействиям [11, 12]. В результате придем к уравнению "вход—выход" искомого МУУ (2), (3):

$$\mathbf{u} = \mathbf{\Pi}_{yu}(p)\mathbf{R}^{-1}(p)[\mathbf{Q}(p)\mathbf{g} - \mathbf{L}(p)\mathbf{y} + \tilde{\mathbf{q}}_1(p)f_1], \quad (18)$$

где $\mathbf{R}(p)$, $\mathbf{L}(p)$ — диагональные $(q \times q)$ -матрицы; а $\mathbf{Q}(p)$ — $(q \times q)$ -матрица и $\tilde{\mathbf{q}}_1(p)$ — q -вектор. Диагональными элементами матриц $\mathbf{R}(p)$ и $\mathbf{L}(p)$ являются полиномы $R_i(p)$ и $L_i(p)$; элементами матрицы $\mathbf{Q}(p)$ и вектора $\tilde{\mathbf{q}}_1(p)$ — полиномы $Q_{ij}(p)$ и $\tilde{Q}_{i1}(p)$, $i, j = \overline{1, q}$.

Отметим, что применение управления по выходу и воздействиям обусловлено тем, что при этом управлении, в отличие от управления по отклонению, часть нулей желаемых передаточных функций могут назначаться произвольно, но с учетом назначенных полюсов и требуемых показателей качества замкнутой системы [6, 11, 12]. Это обеспечивает значительно более широкие возможности обеспечения требуемого качества системы управления по сравнению с управлением по отклонению [14], в частности, с использованием стандартных передаточных функций.

Для определения полиномов уравнения (18) сначала проводится факторизация полинома $B_{yu}(p)$ относительно области Ω , т. е. находится представление

$$B_{yu}(p) = B_{\Omega}(p) B_{\overline{\Omega}}(p). \quad (19)$$

Здесь $B_{\Omega}(p)$ — нормированный полином или единица, а $B_{\overline{\Omega}}(p) = B_{\Omega}^{-1} B_{yu}(p)$ — соответствующий полином или константа.

Пусть $G_i(p)$ и $F_1(p)$ — $K(p)$ -изображения воздействия $g_i(t)$ и возмущения $f_1(t)$ [11, 12]. Если $K(p)$ -изображения этих воздействий не известны, то $G_i(p) = p^{v_{gi}}$ и $F_1(p) = p^{v_{f1}}$, где v_{gi} , v_{f1} — желаемые порядки астатизма каналов $g_i \rightarrow y_i$ и $f_1 \rightarrow y_i$ к задающему воздействию $g_i(t)$ и возмущению $f_1(t)$, $i = \overline{1, q}$. Пусть также полиномы

$$\begin{aligned} \Phi_i(p) &= \text{НОК}\{F_1(p)G_i(p)\}, \\ R_i(p) &= \Phi_i(p)B_{\Omega}(p)\tilde{R}_i(p), \quad i = \overline{1, q}, \end{aligned} \quad (20)$$

где НОК — наименьшее общее кратное; $\tilde{R}_i(p)$ — вспомогательный полином более низкой степени, чем $R_i(p)$. Полиномы $\tilde{R}_i(p)$ и $L_i(p)$ определяются путем решения [12] полиномиальных уравнений

$$\tilde{D}_i(p) = \Phi_i(p)\tilde{R}_i(p) + B_{\overline{\Omega}}(p)L_i(p), \quad (21)$$

где

$$\begin{aligned} \deg \tilde{D}_i(p) &\geq \xi_i + \max\{\deg \Phi_i(p) - 1; \\ \max_{j \in [1, q]} [\deg Q_{ij}(p)]\} + \mu_{yy}^* - \deg B_{\Omega}(p), \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \deg \tilde{R}_i(p) &= \deg \tilde{D}_i(p) - \deg \Phi_i(p); \\ \deg L_i(p) &= \deg \Phi_i(p) - 1, \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \deg \tilde{Q}_{i1}(p) &\leq \deg \tilde{D}_i(p) + \deg B_{\Omega}(p) - \zeta_i - \mu_{yy}^*, \\ i &= \overline{1, q}. \end{aligned} \quad (24)$$

Полиномы $\tilde{D}_i(p) \in \Omega$, $Q_{ij}(p)$ и $\tilde{Q}_{i1}(p)$ назначаются исходя из требуемых свойств прямых и перекрестных каналов синтезируемой системы.

Из уравнений "вход—выход" замкнутой системы (1), (18) с учетом соотношений (8), (9), (11), (12), (19) и (20) следует, что условие абсолютной инвариантности управляемой переменной y_i по отношению к измеряемому возмущению f_1 можно представить в виде

$$\begin{aligned} [A(p)B_{\overline{\Omega}}(p)\tilde{Q}_{i1}(p) + \Phi_i(p)\tilde{R}_i(p)B_{1i}(p)] &\equiv 0, \\ i &= \overline{1, q}. \end{aligned} \quad (25)$$

Поэтому, если выбором полинома $\tilde{Q}_{i1}(p)$ вектора $\tilde{\mathbf{q}}_1(p)$ из уравнения МУУ (18) при условиях (20)—(24) и $F_1(p) = 1$ можно обеспечить выполнение условия (25), по крайней мере, при некоторых $i \in [1, q]$, то можно синтезировать систему, переменные y_i которой будут абсолютно (практически до малой величины ε) инвариантными к возмущению f_1 . Однако в большинстве практических случаев равенство (25) выполнить не удастся. Поэтому полиномы $\tilde{Q}_{i1}(p)$ в (18) целесообразнее полагать равными нулю, т. е. $\tilde{Q}_{i1}(p) \equiv 0$, а соответствующие полиномы $\Phi_i(p)$ выбирать в соответствии с (20) при условии, что полином $F_1(p)$ выбран как описано выше.

Теорема. Если выполнены условия (10), (15), соотношения (19)—(24) и условие

$$\text{НОД}\{B_{\overline{\Omega}}(p), \Phi_i(p)\} = \text{const}, \quad i = \overline{1, q}, \quad (26)$$

то управление (18) является физически реализуемым, а передаточные функции $W_{ij}(p)$ каналов $g_j \rightarrow y_i$ из уравнения (4) замкнутой системы (1), (18) имеют вид

$$W_{ij}(p) = \frac{Q_{ij}(p)B_{\overline{\Omega}}(p)}{\tilde{D}_i(p)}, \quad i, j \in \overline{1, q}, \quad (27)$$

при этом всем коэффициентам полиномов $Q_{ij}(p)$ и $\tilde{D}_i(p)$ можно назначать произвольные значения. При $Q_{ii}(p) = L_i(p)$ канал $g_i \rightarrow y_i$ по отношению к воздействию g_i является либо селективно инвариантным, либо астатическим порядка ν_{g_i} , $i \in \overline{1, q}$.

Если выполнено условие (25), то переменная y_i является абсолютно инвариантной к возмущению f_1 .

Если же при некоторых $i^* \in \overline{1, q}$ полиномы $\tilde{Q}_{i^*1}(p) \equiv 0$, то при условии (20) канал $f_{i^*} \rightarrow y_{i^*}$ системы (1), (18) по отношению к возмущению f_1 является либо селективно инвариантным, либо имеет порядок астатизма ν_{f_1} . ■

Доказательство теоремы проводится аналогично доказательству леммы. Для этого достаточно из уравнений "вход—выход" $A(p)\mathbf{u} = \mathbf{B}(p)\mathbf{u} + \mathbf{b}_1(p)f_1$ объекта и МУУ (18) исключить вектор \mathbf{u} и учесть равенства (11), (12), (19)—(21), условия инвариантности, астатизма, а также условия разрешимости полиномиальных уравнений (21) [12].

Отметим, что характеристический полином замкнутой системы (1), (18) имеет вид

$$D(p) = A(p)B_{\Omega}^q(p) \prod_{i=1}^q \tilde{D}_i(p).$$

Отсюда, в частности, следует выполнение условия (5).

Приведем также следствие из теоремы, которое дает решение задачи И. Н. Вознесенского (1)—(6).

Следствие. Если полиномы $Q_{ij}(p)$, $\tilde{D}_i(p)$, $R_i(p)$ и $L_i(p)$ найдены из условий равенства передаточных матриц $\mathbf{W}_{ij}(p)$ (27) и $\mathbf{W}_{ij}^*(p)$ (6), то уравнение (18) определяет автономное управление, при котором выполняются условия (5), (6). ■

Справедливость утверждения следствия вытекает непосредственно из равенства (27). При этом матрица $\mathbf{Q}(p)$ является диагональной.

Если полиномы $Q_{ij}(p)$, $\tilde{D}_i(p)$, $R_i(p)$ и $L_i(p)$ найдены из условий равенства передаточных матриц $\mathbf{W}_{ij}(p)$ (27) и $\mathbf{W}_{ij}^*(p)$ (7), то теорема определяет решение задачи синтеза связного управления (1)—(5), (7). При этом матрица $\mathbf{Q}(p)$ в (18), как правило, не является диагональной.

Отметим, что для формирования желаемых передаточных функций $W_{ij}^*(p)$ как автономных, так и связных астатических МСАУ очень удобно применять хорошо известные стандартные передаточные функции [11, 12].

В некоторых случаях при реализации МУУ (18) его уравнения целесообразно представить следующим образом:

$$\mathbf{u} = \mathbf{\Pi}_{yu}(p)\mathbf{R}_1^{-1}(p)\boldsymbol{\varsigma}; \quad (28)$$

$$\boldsymbol{\varsigma} = \mathbf{R}_2^{-1}(p)[\mathbf{Q}(p)\mathbf{g} - \mathbf{L}(p)\mathbf{y} + \tilde{\mathbf{q}}_1(p)f_1]. \quad (29)$$

В этом случае в неравенстве (22) величина μ_{yy}^* заменяется на $2\mu_{yy}^*$, а каждый из полиномов $R_i(p)$ матрицы $\mathbf{R}(p)$ представляется в виде произведения $R_i(p) = R_{1i}(p)R_{2i}(p)$. Степени полиномов $R_{1i}(p)$, $R_{2i}(p)$ диагональных матриц $\mathbf{R}_1(p)$, $\mathbf{R}_2(p)$ выбираются по условиям физической реализуемости каждого блока (28), (29), т. е.

$$\deg R_{1i}(p) = \zeta_i + \mu_{yy}^*,$$

$$\deg R_{2i}(p) = \deg[\tilde{D}_i(p)B_{\Omega}(p)] - \deg R_{1i}(p),$$

$$i = \overline{1, q}. \quad (30)$$

Окончательно структура и параметры устройства управления (2), (3) определяются в процессе перехода от его уравнений "вход—выход" (18) или (28), (29) к уравнениям в переменных состояния. При этом целесообразно применять соотношения перехода к уравнениям в канонической наблюдаемой форме несмотря на то, что при этом может повышаться порядок системы [15].

Пример синтеза МСАУ

Синтезируем связную МСАУ для объекта, который рассматривался в работе [10], но при наличии возмущения. В соответствии с указанной работой объект управления полностью описывается передаточной матрицей

$$\mathbf{W}_{yu}(p) =$$

$$= A_1^{-1}(p) \begin{bmatrix} 3,4(0,4p+1) & 6,8(0,55p+1) \\ 0,18(1,13p+1) & 0,9(1,1p+1) \end{bmatrix}, \quad (31)$$

где $A_1(p) = 0,38p^2 + 1,1p + 1$. Будем предполагать, что на этот объект действует и возмущение f_1 , причем $\mathbf{W}_{yf}(p) = A_1^{-1}(p)[0,03 \ 0,004]^T$.

Найдем для данного объекта (31) устройство управления (2), (3), при котором замкнутая система будет астатической первого порядка ко всем внешним воздействиям; переходные функции $h_{11}(t)$ и $h_{22}(t)$ ее сепаратных каналов $g_1 \rightarrow y_1$ и $g_2 \rightarrow y_2$ не будут иметь перерегулирования, а их длительности соответственно равны $t_{p1} = 0,4$ с и $t_{p2} = 0,8$ с. Переходные функции перекрестных каналов: $h_{12}(t) = 0,7h_{11}(t)$,

а $h_{21}(t) \equiv 0$. Область Ω определяется условием $\text{Re } p_i \leq -0,7$, а $\mu_{yy}^* = 0$; измеряются векторы $\mathbf{\varepsilon} = \mathbf{g} - \mathbf{y}$ и \mathbf{y} .

Решение. В данном случае определитель $\det \mathbf{W}_{yu}(p) = 4,0562B^\circ(p)/A(p)$, где $B^\circ(p) = (p + 3,4055)(p + 0,9205) \neq 0$, а $A(p) = (p^2 + 2,89474p + 2,63158)^2$. Так как по условию заданные матрицы $\mathbf{W}_{yu}(p)$ и $\mathbf{W}_{yf}(p)$ описывают заданный объект полностью, то полином $A(p)$ является его характеристическим полиномом, а соответствующая матрица $\mathbf{B}(p)$ из первого выражения (8) имеет вид

$$\mathbf{B}(p) = \frac{1}{0,38^2} \begin{bmatrix} 3,4(0,4p+1)A_1(p) & 6,8(0,55p+1)A_1(p) \\ 0,18(1,13p+1)A_1(p) & 0,9(1,1p+1)A_1(p) \end{bmatrix}.$$

Реальные части корней полинома $A(p)$: $\text{Re } p_{1,2} = -1,4474$. Таким образом, условия (10) и (15) выполняются, и задача имеет решение. По формуле (12) находим соответствующую декомпозирующую матрицу

$$\mathbf{\Pi}_{yu}(p) = \frac{1}{0,38^2} \times \begin{bmatrix} 0,9(1,1p+1)A_1(p) & -6,8(0,55p+1)A_1(p) \\ -0,18(1,13p+1)A_1(p) & 3,4(0,4p+1)A_1(p) \end{bmatrix}. \quad (32)$$

Следовательно, по (13) величины $\zeta_1 = \zeta_2 = 3$, а полином $B_{yu}(p) = 4,056B^\circ(p)$, причем $B_{yu}(p) \in \Omega$. Поэтому полином $B_\Omega(p)$ в выражении (19) можно принять равным $B^\circ(p)$, т. е. $B_\Omega(p) = B^\circ(p)$, $\text{deg } B_\Omega(p) = 2$, а $B_{\bar{\Omega}}(p) = 4,056$.

Учитывая требование астатизма МСАУ, примем в (18) вектор $\tilde{\mathbf{q}}_1(p) \equiv 0$, а в (20) положим $G_1(p) = G_2(p) = F_1(p) = p$, т. е. $\Phi_1(p) = \Phi_2(p) = p$. Как известно, для обеспечения астатизма первого порядка в числителях передаточных функций $W_{ii}^*(p)$ достаточно иметь по одному коэффициенту, поэтому $Q_{11}(p) = \theta_{10}$, $Q_{22}(p) = \theta_{20}$. Аналогично, для обеспечения заданных переходных функций $h_{12}(t) = 0,7h_{11}(t)$ и $h_{21}(t) \equiv 0$ перекрестных каналов достаточно принять $Q_{12}(p) = \theta_{12} \neq 0$,

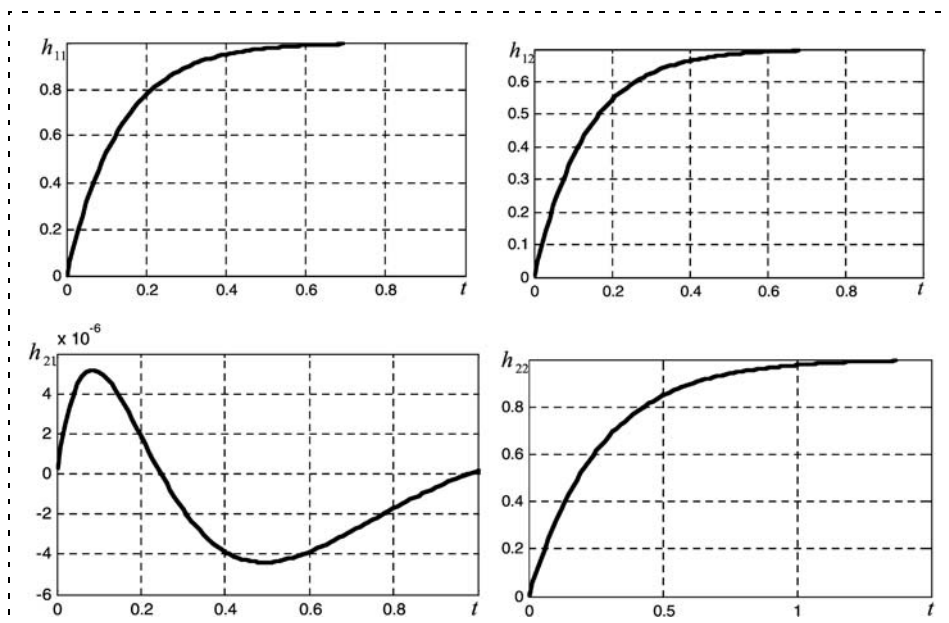
а $Q_{21}(p) = \theta_{21} = 0$, т. е. $\text{deg } Q_{ij}(p) = 0$, $i, j = 1, 2$. Тогда по условию (22) $\text{deg } \tilde{D}_i(p) \geq 1$.

Требования к замкнутой системе будут удовлетворены, если принять желаемые передаточные функции следующего вида: $W_{11}^*(p) = 7,5/(p + 7,5)$, $W_{12}^*(p) = 5,25/(p + 7,5)$, $W_{21}^*(p) \equiv 0$, $W_{22}^*(p) = 3,75/(p + 3,75)$. При этом по (23) находим $\text{deg } \tilde{R}_i(p) = 0$, $\text{deg } L_i(p) = 0$ или $\tilde{R}_i(p) = \rho_{i0}$, $L_i(p) = \lambda_{i0}$, $i = 1, 2$. Полагая $\rho_{i0} = 1$ и приравнявая $W_{ij}(p)$ принятым функциям $W_{ij}^*(p)$, $i, j = 1, 2$, придем к следующим полиномиальным и алгебраическим уравнениям: $p + 7,5 = p + 4,056 \lambda_{10}$, $p + 3,75 = p + 4,056 \lambda_{20}$, $7,5 = 4,056 \theta_{10}$, $5,25 = 4,056 \theta_{12}$, $3,75 = 4,056 \theta_{20}$. Отсюда находим: $\theta_{10} = \lambda_{10} = 1,84912$, $\theta_{12} = 1,29439$, $\theta_{20} = \lambda_{20} = 0,92456$, а по (20) — полиномы $R_1(p) = R_2(p) = pB_\Omega(p) = p^3 + 4,326p^2 + 3,135p$.

Подставляя найденные полиномы и матрицу $\mathbf{\Pi}_{yu}(p)$ (32) в уравнение (18) и заменяя вектор \mathbf{g} по формуле $\mathbf{g} = \mathbf{\varepsilon} + \mathbf{y}$, придем к векторно-матричному уравнению "вход—выход" искомого устройства управления:

$$\mathbf{u} = \frac{1}{pB^\circ(p)} \mathbf{\Pi}_{yu}(p) \left(\begin{bmatrix} 1,8491 & 0 \\ 0 & 0,9246 \end{bmatrix} \mathbf{\varepsilon} + \begin{bmatrix} 1,2944 \\ 0 \end{bmatrix} y_2 \right). \quad (33)$$

Переходные функции замкнутой системы (31)—(33), полученные путем ее моделирования в среде MATLAB, приведены на рисунке. Как видно, по-



Переходные функции многомерной системы

казатели качества замкнутой системы (31), (33) соответствуют заданным. Устройство управления (33) является многомерным, а его относительный порядок равен нулю, что соответствует условиям задачи. Нетрудно убедиться, что замкнутая система является астатической к возмущению f_1 , а если элемент $\theta_{12} = 1,2944$ взять равным нулю, то система с достаточной точностью будет автономной в смысле И. П. Вознесенского.

Для реализации найденного МУУ (33), (32) необходимо, прежде всего, найти соответствующие уравнения в переменных состояния. Рассмотрим два способа получения этих уравнений. Первый состоит в применении "минимальной реализации" [15], которую удобно находить помощью MATLAB. С этой целью, перемножив полиномы в уравнении (33) с учетом обозначения (32), запишем его следующим образом:

$$\mathbf{u} = \frac{1}{v1} \begin{bmatrix} v11 & v12 & v13 \\ v21 & v22 & v23 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ y_2 \end{bmatrix}, \quad (34)$$

где $v11 = [4,1874 \ 15,5991 \ 23,3797 \ 11,5249]$,
 $v12 = [-5,7278 \ -30,0601 \ -54,0935 \ -35,4731]$,
 $v13 = [3,3722 \ 12,8275 \ 17,7487 \ 8,0676]$,
 $v21 = [-0,9897 \ -3,741 \ -5,1401 \ -2,305]$,
 $v22 = [2,1663 \ 13,2863 \ 27,6467 \ 20,1568]$,
 $v23 = [-0,6928 \ -2,6187 \ -3,5981 \ -1,6135]$,
 $v1 = [1 \ 4,326 \ 3,135 \ 0]$.

Далее в среде MATLAB введем полиномы v_{ij} и $v1$, а затем команды:

```
w = [tf(v11, v1) tf(v12, v1) tf(v13, v1);
      tf(v21, v1) tf(v22, v1) tf(v23, v1)];
sys = ss(w);
MSYS = MINREAL(sys, 0.00001).
```

В результате получим систему уравнений в переменных состояния следующего вида:

$$\dot{\mathbf{z}} = \begin{bmatrix} -4,15 & 0,9189 & -0,1731 & -1,066 \\ -0,2849 & -0,08568 & 0,06926 & -0,0155 \\ -0,2942 & 0,5026 & -0,2509 & -0,2452 \\ 2,225 & 0,5668 & -0,4851 & -0,1607 \end{bmatrix} \mathbf{z} + \begin{bmatrix} -0,9844 & -0,1607 & -0,689 \\ -0,6278 & 3,468 & -0,4395 \\ 0,7608 & -0,6739 & 0,5326 \\ -1,529 & 6,588 & -1,070 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ y_2 \end{bmatrix}, \quad (35)$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} 3,865 & -0,1855 & 0,3975 & -0,5691 \\ -0,5456 & 0,2054 & 1,415 & 0,6175 \end{bmatrix} \mathbf{z} + \begin{bmatrix} 4,187 & -5,728 & 3,372 \\ -0,9897 & 2,166 & -0,6928 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ y_2 \end{bmatrix}. \quad (36)$$

В соответствии с уравнениями (35), (36) порядок МУУ равен четырем, т. е. значительно ниже, чем порядок регулятора, построенного в работе [10].

Обратим внимание читателя, что уравнения (35), (36) содержат 42 ненулевых и неединичных коэффициента, которые необходимо воспроизвести и настроить в реальном МУУ. Появление столь большого числа ненулевых и неединичных коэффициентов обусловлено именно тем, что (35), (36) — это уравнения "минимальной реализации".

Для наглядности этого утверждения покажем, что МУУ (33) можно реализовать со значительно меньшим числом настраиваемых коэффициентов, хотя его порядок при этом будет выше. С этой целью, следуя работе [15, с. 127], примем, что искомого МУУ состоит из двух блоков, каждый из которых имеет по одному выходу и по три входа. Затем выделим целые части передаточных функций в выражении (33) и перейдем к соответствующим уравнениям в переменных состояния с применением соотношений канонической наблюдаемой формы. В результате получим

$$\dot{\mathbf{z}}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -3,135 \\ 0 & 1 & -4,326 \end{bmatrix} \mathbf{z}_1 + \begin{bmatrix} 11,5249 & -35,4731 \\ 10,2522 & -36,1368 \\ -2,5156 & -5,2816 \end{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon} + \begin{bmatrix} 8,0676 \\ 7,1769 \\ -1,7606 \end{bmatrix} y_2; \quad (37)$$

$$\dot{\mathbf{z}}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -3,135 \\ 0 & 1 & -4,326 \end{bmatrix} \mathbf{z}_2 + \begin{bmatrix} -2,305 & 20,1568 \\ -2,0374 & 20,8553 \\ 0,5404 & 3,9149 \end{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon} + \begin{bmatrix} -1,6135 \\ -1,4262 \\ 0,3784 \end{bmatrix} y_2; \quad (38)$$

$$u_1 = [0 \ 0 \ 1] \mathbf{z}_1 + [4,8174 \ -5,7278] \boldsymbol{\varepsilon} + 3,3722 y_2; \quad (39)$$

$$u_2 = [0 \ 0 \ 1] \mathbf{z}_2 + [-0,9897 \ 2,6163] \boldsymbol{\varepsilon} - 0,6928 y_2; \quad (40)$$

$$\mathbf{u} = [u_1 \ u_2]^T.$$

Легко видеть, что уравнения этого варианта МУУ (33) содержат лишь 28 коэффициентов, под-

лежащих настройке, хотя его порядок равен шести. Таким образом, при реализации МУУ следует принимать во внимание не только его порядок, но и способ перехода от уравнений "вход—выход" к уравнениям в переменных состояния, так как именно последние определяют конструктивные особенности устройств управления проектируемых систем.

Отметим, что первые уравнения $\dot{z}_{11} = 11,5249\varepsilon_1 - 35,4731\varepsilon_2 + 8,0676y_2$ и $\dot{z}_{12} = -2,305\varepsilon_1 + 20,1568\varepsilon_2 - 1,6135y_2$ в системах (37), (38) являются "спектральными моделями" постоянных воздействий, $K(p)$ -изображения которых равны p [11, 12]. Спектральные модели в структуре данного МУУ необходимы для обеспечения астатизма и параметрической грубости этого свойства синтезируемой системы. В МУУ (37)—(40) эти модели реализуются структурно, в то время как при использовании "минимальной реализации" — параметрически. Поэтому свойство астатизма МСАУ с МУУ (35), (36) не обладает параметрической грубостью, т. е. при отклонении значений параметров этого МУУ от расчетных значений система теряет свойство астатизма.

Аналогичным образом, но с учетом особенностей, отмеченных в работе [12], находится и управление многомерными объектами, полином $B_{yu}(p)$ (11) модели которых имеет нули вне области Ω , т. е. в тех случаях, когда в (19) полином $B_{\bar{\Omega}}(p) \neq \text{const}$.

Заключение

В статье показано, что задача декомпозиции многомерного объекта имеет *точное решение*, если объект является устойчивым или стабилизируемым, и число независимых управлений не меньше числа управляемых переменных. Предложен метод синтеза МСАУ с управлением по выходу и воздействиям, который является полностью аналитическим и может применяться при проектировании систем управления достаточно устойчивыми или стабилизируемыми многомерными объектами. Он позволяет обеспечивать либо автономное, либо связанное управление при весьма слабых условиях

разрешимости задачи синтеза. Устройство управления является многомерным с управлением по выходу и воздействиям. Его применение позволяет удовлетворить более широкому кругу требований к качеству системы, по сравнению с управлением по отклонению. Если структура устройства управления содержит явные спектральные модели внешних воздействий, то ее свойства астатизма или селективной инвариантности к этим воздействиям являются грубыми к большинству (кроме "спектрозадающих") параметров системы.

Список литературы

1. Вознесенский И. Н. О регулировании машин с большим числом регулируемых параметров // *АиТ*. 1938. № 4. С. 12—25; № 5. С. 16—34.
2. Янушевский Р. Т. Теория линейных оптимальных многомерных систем управления. М.: Наука, 1973.
3. Уонэм М. Линейные многомерные системы управления: Геометрический подход. М.: Наука, 1980.
4. Шевяков А. А. Системы автоматического управления авиационными воздушно-реактивными установками. М.: Машиностроение, 1992.
5. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник. Т. 3: Синтез регуляторов систем автоматического управления / Под ред. К. А. Пупкова и Н. Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004.
6. Гайдук А. Р. Аналитический синтез автономных многомерных систем // *Изв. вузов. Приборостроение*. 1984. № 11. С. 30—34.
7. Буков В. Н., Горюнов С. В., Рябченко В. Н. Анализ и синтез матричных линейных систем. Сравнение подходов // *АиТ*. 2000. № 11. С. 3—43.
8. Буков В. Н., Рябченко В. Н. Обобщение утверждений о реализуемости компенсатора на входе системы // *АиТ*. 2003. № 4. С. 30—43.
9. Асанов А. З., Ахметзянов И. З. Синтез двухконтурных многомерных динамических систем методом вложения // *Проектирование и исследование технических систем: Наб. Челны: Изд-во Камского ГПИ*, 2003. Вып. 3. С. 67—72.
10. Тянь В. К. Редукция синтеза многомерных линейных систем управления к синтезу одномерных с типовым объектом // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2008. № 4. С. 2—7.
11. Гайдук А. Р. Теория автоматического управления: Учебник. М.: Высшая школа, 2010.
12. Гайдук А. Р., Плаксиенко Е. А. Синтез динамических систем по требуемым показателям качества // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2008. № 4. С. 7—12.
13. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. М.: Наука, 1988.
14. Ким П. Д. Алгебраический метод синтеза линейных непрерывных систем управления // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2011. № 1. С. 9—15.
15. Гайдук А. Р. Непрерывные и дискретные динамические системы. М.: Училиствуз, 2004.

УДК 62-83:621.643.4: 006.354

В. А. Мозжечков, д-р техн. наук, проф.,
vam@tula.net,

А. С. Савин, аспирант,
Тулский государственный университет

Математическая модель электропривода трубопроводной арматуры с червячным механизмом измерения крутящего момента

Предложена математическая модель динамики функционирования электропривода трубопроводной арматуры с червячным механизмом измерения крутящего момента. Модель позволяет исследовать влияние конструктивных и эксплуатационных параметров привода, а также режимов его нагружения на динамические характеристики протекающих в нем энергетических и информационно-измерительных процессов.

Ключевые слова: математическая модель, электропривод, трубопроводная арматура, червячный редуктор, измерение крутящего момента

Электроприводы трубопроводной арматуры (ЭП ТПА) [1, 2] являются одним из наиболее массовых типов электроприводов. Их назначение — управление положением запорного органа трубопроводной арматуры, разновидностями которой являются вентили, задвижки, затворы, краны, клапаны и т. п.

В ЭП ТПА широко используются встроенные измерители момента силы нагрузки, действие которых основано на контроле смещения в редукторе привода подпружиненного червяка по шлицам его оси под действием тангенциальной силы взаимодействия червяка с червячным колесом [1, 2]. Смещение червяка с достаточной для практики точностью пропорционально моменту силы нагрузки, приложенной к выходному валу. Указанное смещение посредством приборной передачи и/или электронных датчиков преобразуется в механический или электрический сигнал момента нагрузки. Этот сигнал используется для защитных отключений привода, а также при реализации типовых для ЭП ТПА процессов управления, например, такого как закрытие арматуры с обеспечением заданного значения момента усилия герметизации (при этом реализуется терминальное управление [3], целью которого в данном случае является достижение заданного усилия герметизации в заданном интервале положений выходного вала привода).

Червячный редуктор привода и измеритель крутящего момента вышеуказанного типа образуют единый механизм, динамика которого существенно влияет на эффективность управления. Спецификой такого механизма, требующей учета при моделировании, является его нежесткость, многомассовость, существенное проявление сил трения в зацеплении червячной пары, наличие эффекта самоторможения.

Несмотря на обилие работ, посвященных математическому описанию динамики электроприводов, в том числе электроприводов с нежесткой и самотормозящейся передачей [4], динамика ЭП ТПА с механизмами указанного типа не описана с достаточной подробностью, позволяющей учитывать основные физические закономерности, проявляющиеся при функционировании привода, оценивать влияние его конструктивных и эксплуатационных параметров, а также режимов нагружения на динамику протекающих в нем процессов.

Перечисленные обстоятельства обусловили актуальность разработки предлагаемого в статье математического описания ЭП ТПА, учитывающего конструктивные особенности механической передачи вышеуказанного типа, позволяющего адекватно оценивать погрешности измерения крутящего момента и исследовать сопряженные с решением задач управления приводом информационные и энергетические динамические процессы.

Постановка задачи

Рассматриваемый класс ЭП ТПА предполагает наличие в составе привода червячного редуктора с механическим измерителем крутящего момента (рис. 1).

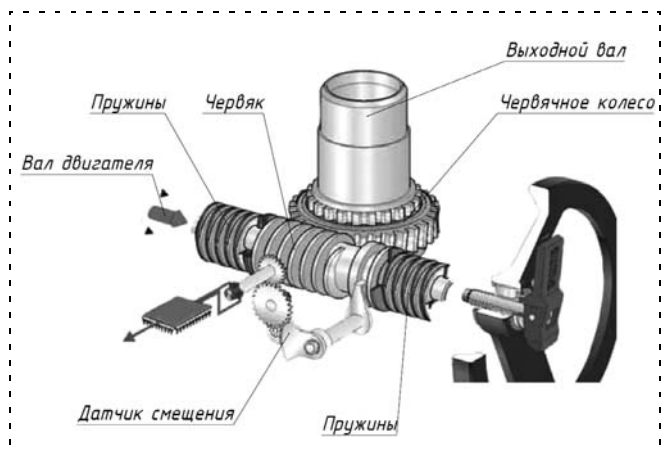


Рис. 1. Червячный редуктор с измерителем крутящего момента

Вал червячного колеса редуктора служит выходным валом привода. Вал двигателя (либо вал ручного дублера в режиме ручного управления приводом) вращает вал червяка редуктора. В результате взаимодействия червяка с червячным колесом возникает крутящий момент, приводящий в движение выходной вал привода. Червяк может смещаться вдоль своей оси, перемещаясь по продольным шлицам на его валу. Угловое положение червяка остается жестко связанным с угловым положением его вала и вала двигателя. При взаимодействии червяка с червячным колесом наряду с крутящим моментом возникает сила, смещающая червяк по шлицам вдоль его вала до положения, в котором она уравновешивается силой упругости силоизмерительных пружин, препятствующих осевым смещениям червяка. Деформация пружин, равная осевому смещению червяка, воспринимается датчиком смещения и используется как сигнал, определяющий значение крутящего момента, развиваемого приводом. Смещение червяка и, следовательно, деформация пружин ограничиваются упорами, исключающими полное сжатие и пластическую деформацию пружин.

Решим задачу построения математического описания динамических процессов в ЭП ТПА с механической передачей указанного типа, позволяющего анализировать силовое взаимодействие элементов конструкции, энергетические процессы, а также оценивать погрешности, возникающие при измерении крутящего момента привода в процессе управления ЭП ТПА, в зависимости от конструктивных и эксплуатационных параметров привода.

Уравнения динамики привода

Будем считать, что механическая передача привода состоит из твердых недеформируемых тел, за исключением пружин, противодействующих смещениям червяка вдоль шлицов его вала.

Для вывода уравнений движения механической подсистемы привода воспользуемся лагранжевым формализмом [5].

Пусть q_i — обобщенная координата, p_i — обобщенная скорость, ε_i — обобщенное ускорение. Величины с индексом $i = 1$ соответствуют угловому перемещению ротора двигателя, с индексом $i = 2$ — линейному смещению червяка, с индексом $i = 3$ — угловому перемещению червяка совместно с его валом, с индексом $i = 4$ — угловому положению червячного колеса с выходным валом привода и присоединенной к нему нагрузкой. Тогда

$$T_1 = J_1 p_1^2 / 2, \quad T_2 = J_2 p_3^2 / 2, \\ T_3 = (J_3 p_3^2 + m_3 p_2^2) / 2, \quad T_4 = J_4 p_4^2 / 2,$$

где T_i , J_i — кинетическая энергия и момент инерции соответственно ротора двигателя ($i = 1$), вала червяка ($i = 2$), собственно червяка ($i = 3$), червячного

колеса с выходным валом привода и присоединенной к нему нагрузкой ($i = 4$), m_3 — масса червяка.

В рассматриваемой системе угол поворота червяка и его вала равен углу поворота ротора двигателя, т. е. $q_3 = q_1$.

Угол поворота червячного колеса q_4 определяется соотношением

$$q_4 = q_3 / k_r + q_2 / R,$$

где k_r — передаточное число (коэффициент редукции) червячной пары по угловому перемещению (k_r равен отношению приращения угла поворота червяка к соответствующему приращению угла поворота червячного колеса при условии отсутствия смещений червяка по его валу); R — радиус делительной окружности червячного колеса.

С учетом указанных кинематических соотношений получим

$$T_1 = J_1 p_1^2 / 2, \quad T_2 = J_2 p_1^2 / 2, \quad T_3 = (J_3 p_1^2 + m_3 p_2^2) / 2, \\ T_4 = J_4 ((p_1 / k_r)^2 + (p_2 / R)^2 + 2 p_1 p_2 / k_r R) / 2.$$

Для рассматриваемой механической подсистемы привода полная кинетическая энергия имеет вид

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 = (J_1 + J_2 + J_3 + J_4 / k_r^2) \times \\ \times p_1^2 / 2 + (m_3 + J_4 / R^2) p_2^2 / 2 + J_4 p_1 p_2 / k_r R;$$

полная потенциальная энергия имеет вид

$$\Pi = \chi q_2^2 / 2,$$

где χ — жесткость силоизмерительных пружин.

Функция Лагранжа определяется выражением

$$L = T - \Pi = (J_1 + J_2 + J_3 + J_4 / k_r^2) p_1^2 / 2 + \\ + (m_3 + J_4 / R^2) p_2^2 / 2 + J_4 p_1 p_2 / k_r R - \chi q_2^2 / 2.$$

Из уравнений Лагранжа второго рода [5] находим дифференциальные уравнения движения механической подсистемы привода:

$$(J_1 + J_2 + J_3 + J_4 / k_r^2) \varepsilon_1 + J_4 / k_r R \varepsilon_2 = \\ = M_0 - M_1 - M_2 - M_3; \quad (1)$$

$$(m_3 + J_4 / R^2) \varepsilon_2 + J_4 / k_r R \varepsilon_1 + \chi q_2 = \\ = -F_1 - F_2 - F_3. \quad (2)$$

Уравнение (1) отражает баланс моментов сил на валу двигателя. Здесь M_0 — вращающий момент, развиваемый электродвигателем привода; M_1 — момент внешних сил нагрузки, приведенный к валу двигателя; M_2 — момент силы трения червяка о червячное колесо; M_3 — момент сил сопротивления, обусловленных трением в подшипниках и уплотнениях

валов привода, а также затратами энергии на перемешивание смазки в полости редуктора.

Уравнение (2) отражает баланс сил, приложенных к центру масс червяка и действующих вдоль его оси. Здесь F_1 — сила внешней нагрузки привода, приведенная к червяку; F_2 — сила трения червяка о колесо; F_3 — сила трения в шлицах червяка.

Вращающий момент двигателя M_0 определяется уравнениями динамики, связывающими текущее значение M_0 с параметрами и переменными, характеризующими состояние двигателя. Для асинхронных трехфазных двигателей с короткозамкнутым ротором, наиболее широко применяемых в ЭП ТПА, расчет электромагнитного крутящего момента с приемлемой точностью может основываться на уравнениях Парка—Горева [6, 7, 8].

При математическом описании сил, действующих в червячном зацеплении редуктора привода, приемлемые следующие допущения:

- взаимодействие зубьев червяка и червячного колеса осредненно замещается взаимодействием одной пары зубьев (одного зуба червяка с одним зубом колеса);
- площадка контакта зубьев червяка и колеса является плоской;
- центр контактной площадки совпадает с точкой касания делительных окружностей колеса и червяка;
- ось червяка перпендикулярна оси колеса.

В рамках принятых допущений взаимодействие зубьев червячной пары можно заменить взаимодействием пары клиньев, в которой один клин соответствует зубу червяка, а другой — зубу колеса. Это позволяет найти относительно простые зависимости, определяющие баланс сил, действующих в площадке контакта червяка с колесом.

В таком случае момент M_1 внешних сил нагрузки, приведенный к валу двигателя, есть $M_1 = M_L/k_r$, где M_L — момент внешних сил нагрузки, приложенный к выходному валу привода.

При описании силы трения в червячном зацеплении будем считать, что ее величина в процессе скольжения трущихся тел пропорциональна силе, прижимающей одно тело к другому (т. е. выполняется закон трения Амонтона [9], называемый также законом Кулона [10]). Несмотря на использование смазки в червячном зацеплении, сила трения не исчезает при обращении в ноль скорости скольжения трущихся тел, т. е. имеет место сухое трение [10]. При этом тело сохраняет состояние покоя, пока движущая сила не превосходит максимально возможного значения силы трения. В процессе скольжения сила сухого трения принимает направление, соответствующее диссипации кинетической энергии движущихся тел. С учетом сказанного момент M_2 сил трения в червячном зацеплении можно математически описать следующим образом.

При вращении вала ($p_1 \neq 0$) момент M_2 определяется соотношениями

$$M_2 = \text{sign} p_1 |\mu_{12} M_N|,$$

$$M_N = M_F / \text{tg} \varphi + r M_P / R,$$

$$M_F = M_0 - (J_1 + J_2 + J_3) \varepsilon_1 - M_3,$$

$$M_P = M_L + J_4 \varepsilon_4 = M_L + J_4 (\varepsilon_1 / k_r + \varepsilon_2 / R),$$

где μ_{12} — коэффициент трения червяка о колесо; M_N — момент силы, прижимающей друг к другу трущиеся тела, является результатом действия моментов M_F и M_P на наклонную площадку контакта зубьев червяка и колеса; M_F — момент сил на валу двигателя, прижимающий зуб червяка к зубу колеса; M_P — момент сил на валу червячного колеса, прижимающий зуб колеса к зубу червяка; r — радиус делительной окружности червяка; α — угол профиля витка червяка в его осевом сечении; $\varphi = 0,5\pi - \gamma$, где γ — угол подъема витка червяка на делительном диаметре [11].

В состоянии покоя ($p_1 = 0$) момент M_2 определяется следующим образом:

$$\text{если } |M_Q| < |\mu_{12}^0 M_N|, \text{ то } M_2 = M_Q,$$

$$\text{иначе } M_2 = \text{sign}(M_Q) |\mu_{12} M_N|,$$

где $M_Q = M_0 - M_1 - M_3 - J_4 \varepsilon_2 / (k_r R)$.

Значение M_Q — значение момента силы, необходимой для удержания пары трения в состоянии покоя, определяется из уравнения (1), когда $\varepsilon_1 = 0$, т. е. из условия сохранения состояния покоя, в котором $\varepsilon_1 = 0$, $p_1 = 0$, $q_1 = \text{const}$. Коэффициент трения в состоянии покоя μ_{12}^0 всегда больше коэффициента трения скольжения μ_{12} . Учтем данный факт, полагая $\mu_{12}^0 = \xi \mu_{12}$, где $\xi > 1$ — заданная константа.

Для большей лаконичности дальнейших описаний введем в рассмотрение функцию трения fric , отражающую вышеизложенную функциональную зависимость момента (обобщенной силы) трения M_2 от текущих значений величин p_1 , μ_{12} , M_N , M_Q , т. е. $M_2 = \text{fric}(p_1, \mu_{12}, M_N, M_Q)$.

В общем случае $F_{\text{тр}} = \text{fric}(v, \mu, N, Q)$, где $F_{\text{тр}}$, N , Q — обобщенные силы: сила трения, прижимающая сила и сила, необходимая для сохранения состояния покоя; μ — коэффициент трения; v — обобщенная скорость.

С учетом изложенного значение функции fric вычисляется следующим образом: если $v \neq 0$, или $|Q| < |\xi \mu N|$, то $\text{fric} = \text{sign} v |\mu N|$, иначе $\text{fric} = Q$.

Момент M_3 сил сопротивления, обусловленных трением в подшипниках и уплотнениях привода, а также затратами энергии на перемешивание смазки в полости редуктора, можно определить как

$$M_3 = M_{31} + M_{32}/k_r + M_{33},$$

где M_{31} — момент сил трения в уплотнениях вала двигателя и червяка, $M_{31} = \text{fric}(p_1, \mu_{131}, M_{31N}, M_{31Q})$, где M_{31N} — прижимающий момент, $M_{31N} = \text{const}$; M_{31Q} — удерживающий момент, $M_{31Q} = M_0 - M_1 - M_2 - M_{32Q}/k_r - J_4 \varepsilon_2 / k_r / R$; M_{32} — момент сил трения в уплотнениях выходного вала привода, $M_{32} = \text{fric}(p_4, \mu_{132}, M_{32N}, M_{32Q})$, где M_{32N} — прижимающий момент, $M_{32N} = \text{const}$; M_{32Q} — удерживающий момент, $M_{32Q} = k_r(M_0 - M_1 - M_2 - M_{31Q} - J_4 \varepsilon_2 / k_r / R)$; M_{33} — момент сил сопротивления, учитывающий затраты энергии на перемешивание смазки в полости редуктора, $M_{33} = hp_1$, где h — коэффициент вязкого трения.

В уравнении (2) сила, обусловленная действием момента внешних сил нагрузки на выходном валу привода, приведенная к червяку и действующая вдоль его оси, имеет вид $F_1 = M_L / R$.

Смещение червяка вдоль его оси сопровождается пренебрежимо малым скольжением зубьев червячной пары (доминирует качение зуба червяка по зубу колеса), поэтому с приемлемой точностью для большинства практических случаев можно считать $F_2 = 0$.

Сила сопротивления, обусловленная трением в шлицах червяка,

$$F_3 = \text{fric}(p_2, \mu_{23}, N_{23}, Q_{23}).$$

Сила прижатия шлицов червяка к шлицам его вала N_{23} является суммой двух слагаемых:

$$N_{23} = |(M_L + J_4 \varepsilon_4) \text{tg} \alpha / R| + |(M_0 - (J_1 + J_2) \varepsilon_1 - M_{31}) / \rho|.$$

Первое из них определяет силу отжатия червяка от колеса при взаимодействии их зубьев, а второе — силу прижатия шлицов червяка к шлицам его вала под действием крутящего момента двигателя. Первая сила направлена вдоль радиуса червяка, а вторая действует по касательной к делительной окружности шлицов вала червяка с радиусом ρ . Выражение, определяющее значение Q_{23} , находим из уравнения (2):

$$Q_{22} = -(F_1 + F_2 + \chi q_2 + J_4 \varepsilon_1 / k_r / R).$$

Наличие ограничителя смещения червяка в кинематической схеме привода описывается условием, дополняющим уравнения (1), (2):

$$\begin{aligned} &\text{если } \text{abs}(q_2) \geq x_{\text{max}}, \\ &\text{тогда } \varepsilon_2 = 0; p_2 = 0; q_2 = \text{sign } q_2 x_{\text{max}}, \end{aligned}$$

где x_{max} — число, задающее предел сдвига червяка от нейтрального положения.

Компьютерное моделирование

На основе представленного выше математического описания ЭП ТПА была разработана компьютерная модель, реализованная на языке MATLAB, обладающая высокой универсальностью и позволяющая с помощью персонального компьютера

моделировать процессы функционирования широкой гаммы ЭП ТПА.

В качестве примера, демонстрирующего возможности модели, были проанализированы переходные процессы в ЭП ТПА производства ЗАО "Тулаэлектропривод" марки ЭП4В-Б-250-45 с номинальным крутящим моментом 250 Н·м и номинальной частотой вращения выходного вала 45 мин⁻¹.

Привод в своем составе имеет однозаходный червячный редуктор с измерителем крутящего момента, соответствующий кинематической схеме, представленной на рис. 1. Конструктивные параметры редуктора привода имеют следующие значения: масса червяка — 0,68 кг; модуль червяка — 3 мм; делительный радиус червяка — 22 мм; угол профиля зуба червяка — 0,35 рад; коэффициент редукции червячной пары — 27,33; упругость пакета силоизмерительных пружин — $1,37 \cdot 10^{-6}$ Н/м; предел сдвига червяка от нейтрали — 5,5 мм; коэффициент трения в червячном зацеплении с учетом его зависимости от скорости скольжения определяется эмпирической формулой: $0,12 - rp_1^{1/4}$; моменты инерции: вала червяка — 10^{-4} кг·м, собственно червяка — $3 \cdot 10^{-4}$ кг·м, червячного колеса — $5 \cdot 10^{-4}$ кг·м², выходного вала привода — $8 \cdot 10^{-4}$ кг·м². В электр-

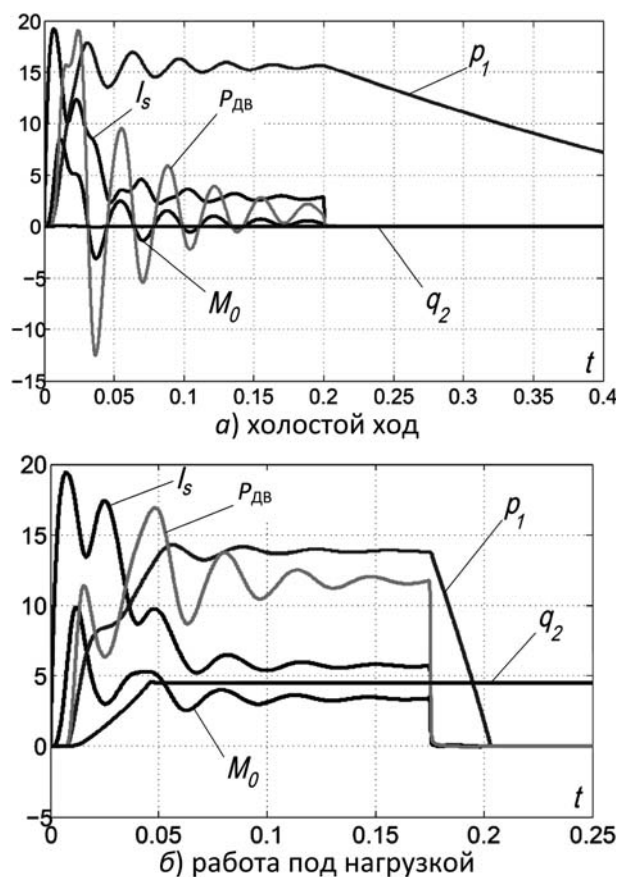


Рис. 2. Включение и выключение ЭП ТПА: а — холостой ход; б — работа под нагрузкой

приводе используется асинхронный трехфазный электродвигатель с короткозамкнутым ротором АИРБС80В4 производства ОАО "Могилевский завод "Электродвигатель". Его номинальная мощность 1,7 кВт, номинальная частота вращения выходного вала 1380 мин^{-1} . Он рассчитан на электропитание от сети с напряжением 380 В, частотой 50 Гц. Момент инерции ротора двигателя $3,3 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Для данного двигателя были идентифицированы следующие значения параметров модели Парка—Горева: сопротивление обмоток статора 4,47 Ом, ротора 8,12 Ом, индуктивность обмоток статора 0,254 Гн, ротора 0,464 Гн, взаимная индуктивность обмоток статора и ротора 0,323 Гн.

На рис. 2 представлены графики переходных процессов, соответствующие включению и последующему выключению ЭП ТПА на холостом ходу (рис. 2, а), а также при воздействии нагрузки (рис. 2, б) с моментом силы 250 Н·м и моментом инерции $40 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}$ (в режиме холостого хода момент инерции нагрузки и момент сил сопротивления нагрузки полагаются равными нулю). На дан-

ном и следующих рисунках: I_s — сила тока в обмотках статора электродвигателя, А; $P_{\text{дв}}$ — мощность, развиваемая электродвигателем, Вт $\times 200$; M_0 — крутящий момент, развиваемый электродвигателем, Н·м $\times 5$; p_1 — скорость вращения вала электродвигателя, рад/с $\times 10$; q_2 — величина продольного смещения червяка по шлицам вала, мм; t — время, с.

На рис. 3 представлены графики переходных процессов, соответствующие включению ЭП ТПА при наличии инерционной нагрузки с моментом инерции $40 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}$, с последующим появлением момента силы нагрузки M_L , возрастающего с постоянной скоростью $2 \text{ кН} \cdot \text{м/с}$. На рис. 3, а показан соответствующий данному режиму нагружения график ошибки измерения момента силы нагрузки. Начало графика соответствует началу роста момента силы нагрузки. Ошибку рассчитывали как отклонение от единицы отношения сигнала момента нагрузки к истинному значению момента нагрузки. В качестве сигнала момента нагрузки рассматривали величину, пропорциональную текущему линейному смещению червяка q_2 , а именно, величину χRq_2 .

Заключение

Таким образом, предложена математическая модель динамических процессов функционирования ЭП ТПА с червячным механизмом измерения крутящего момента. Модель учитывает основные физические эффекты, проявляющиеся при функционировании привода. Высокий уровень детализации предложенного математического описания позволяет исследовать влияние разнообразных конструктивных и эксплуатационных параметров привода, а также режимов нагружения на динамические характеристики протекающих в нем энергетических и информационно-измерительных процессов при наличии разнообразных возмущающих и управляющих воздействий.

Список литературы

1. Гуревич Д. Ф., Заринский О. Н., Косых С. И. Трубопроводная арматура с автоматическим управлением. Л.: Машиностроение, 1982. 320 с.
2. Трубопроводная арматура с автоматическим управлением: Справочник / Под ред. Косых С. И. М.: Энергоатомиздат, 1982. 389 с.
3. Крутько П. Д. Алгоритмы терминального управления линейных динамических систем // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1998. № 6. С. 33–45.
4. Основы проектирования следящих систем / Под ред. Н. А. Лакоты. М.: Машиностроение, 1978. 391 с.
5. Айзерман М. А. Классическая механика: Учеб. пособие для вузов. 2-е изд. М.: Наука, 1980. 367 с.
6. Горев А. А. Переходные процессы синхронной машины. М.: Государственное энергетическое издательство, 1950. 551 с.
7. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин: Учебник для вузов. 3-е изд. М.: Высш. шк., 2001. 327 с.
8. Башарин А. В., Постников Ю. В. Примеры расчета автоматизированного электропривода на ЭВМ. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 234 с.
9. Силин А. А. Трение и мы. М.: Наука, 1987. 192 с.
10. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. 1. Механика. М.: Наука, 1979. С. 101–102.
11. Ануриев В. И. Справочник конструктора машиностроителя: в 3 т. Т. 2. М.: Машиностроение, 2001. 912 с.

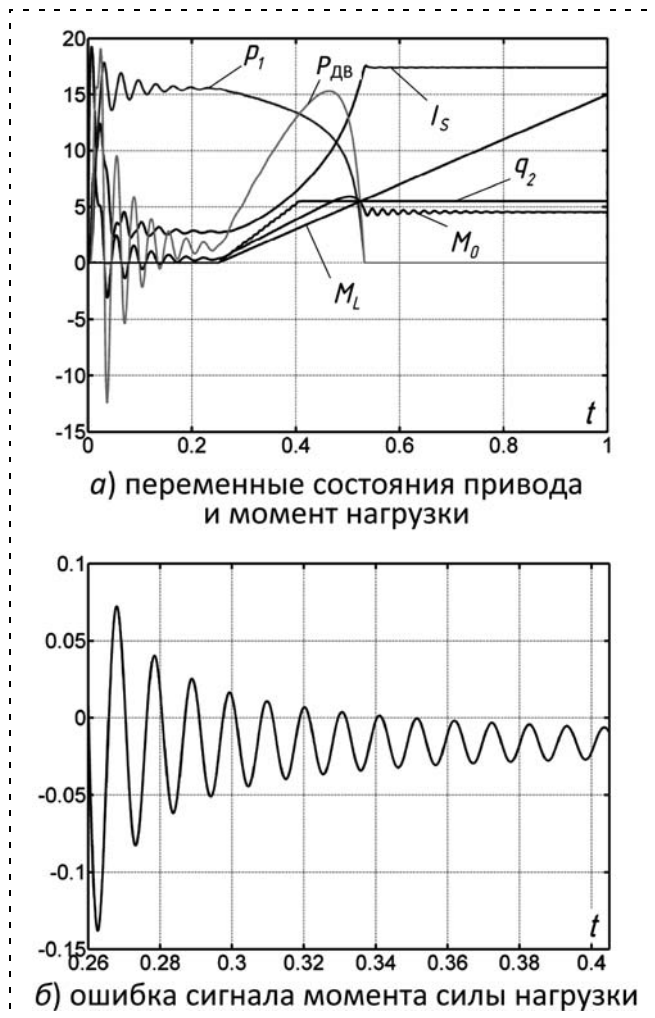


Рис. 3. Воздействие линейно возрастающей нагрузки на ЭП ТПА: а — переменные состояния привода и момент нагрузки; б — ошибка сигнала момента силы нагрузки

Ю. Н. Артеменко*, канд. техн. наук, нач. отд.,
АКЦ ФИАН,

А. Е. Городецкий**, д-р техн. наук, проф., зав. лаб.,
g27764@yandex.ru,

М. С. Дорошенко**, мл. науч. сотр.,
Институт проблем машиноведения РАН,

А. С. Коновалов***, д-р техн. наук, зав. каф.,
bmv@aanet.ru,

А. Ю. Кучмин**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,

И. Л. Тарасова**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

* Астрокосмический центр ФИАН, Москва

** Институт проблем машиноведения РАН, Москва

*** Санкт-Петербургский университет
аэрокосмического приборостроения

Особенности выбора электроприводов зеркальной системы космических радиотелескопов

Описываются особенности эксплуатации электроприводов для систем управления космических радиотелескопов. Приводится расчет силовых и тепловых характеристик электроприводов для различных подсистем управления космического радиотелескопа. На основе сравнения эффективности применения электромагнитного двигателя и пьезоэлектрического двигателя в условиях космоса дается рекомендация по использованию пьезоэлектрического двигателя. Приводится математическая модель пьезоэлектрического двигателя, позволяющая исследовать динамику различных подсистем управления космического радиотелескопа.

Ключевые слова: космический радиотелескоп, система автоматического управления, криогенные температуры, электроприводы

Введение

Космические телескопы (рис. 1) предназначены для исследования различных объектов Вселенной в миллиметровом и инфракрасном диапазонах (от 20 мкм до 20 мм) как с ультравысокой чувствительностью (режим одиночного телескопа), так и со сверхвысоким угловым разрешением (в режиме интерферометра — до десятков миллиардных долей угловой секунды). Высокая чувствительность таких радиотелескопов достигается за счет теплового экранирования антенны и глубокого охлаждения телескопов и приемной аппаратуры с помощью криогенной установки.

Главное зеркало (ГЗ), а также контррефлектор (КР) таких телескопов могут состоять из подвижных щитов, устанавливаемых на актуаторах, обеспечивающих адаптацию их поверхностей с помощью соответствующих управляющих систем, создание которых требует решения целого ряда проблем, связанных с эксплуатацией отдельных ее элемен-

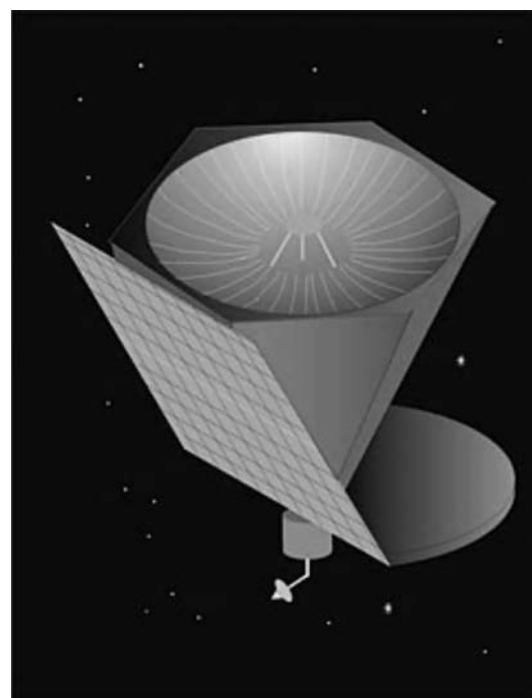


Рис. 1. Космический радиотелескоп "Миллиметронт"

тов в условиях сверхнизких температур и глубокого вакуума.

Для выставления заданной формы и положения зеркальных поверхностей радиотелескопа после раскрытия антенны и для возможной их периодической коррекции, а также для наведения телескопа на заданный источник излучения должна использоваться система адаптивного управления элементами зеркальной системы. При этом электроприводы системы адаптации космических телескопов должны работать при температуре до 4 К. Следовательно, традиционные принципы построения системы адаптивного управления зеркальной системой на основе двигателей постоянного тока либо асинхронных двигателей с цифровыми регуляторами на базе микроконтроллеров и промышленных вычислительных станций общего назначения в данном случае не могут быть использованы.

Обобщенная структура систем управления зеркальной системой радиотелескопа в условиях космоса

Система управления космического радиотелескопа (КРТ) в самом общем случае может состоять из пяти основных контуров [1]:

1) контур управления формой поверхности ГЗ. Положение щитов лепестков ГЗ меняется с помощью электромеханических актуаторов так, чтобы обеспечить минимальное среднеквадратическое отклонение (СКО) профиля поверхности от рассчитанного аппроксимирующего параболоида (АП) ГЗ;

2) контур управления положением ГЗ. Наведение ГЗ осуществляется по углу азимута и углу места

так, чтобы фокальная ось АП, построенного по методу наименьших квадратов (МНК) по измерениям реперных точек поверхности ГЗ, совместилась с линией визирования космического источника радиоизлучения (КИР);

3) контур управления положением КР. Положение КР изменяется так, чтобы фокус и фокальная ось АП ГЗ и фокус и фокальная ось аппроксимирующего эллипсоида (АЭ) КР совместились с минимальными ошибками;

4) контур управления формой поверхности КР. Положение щитов КР меняется с помощью электро-механических актуаторов так, чтобы обеспечить минимальное СКО между ходами лучей от всех точек поверхности ГЗ до перископического зеркала (ПЗ), рассчитываемых с учетом положения щитов ГЗ и КР;

5) контур управления положением ПЗ. Из памяти выбирается приемник излучения, с которым предполагается работа, и определяется управляющее воздействие, подаваемое на электропривод ПЗ. Затем по данным о координатах КИР и взаимном положении элементов зеркальной системы (ЗС) с помощью электродинамической модели (ЭДМ) ЗС рассчитываются координаты фазового центра (ФЦ) электромагнитного излучения в зоне ПЗ и определяются управляющие воздействия для электроприводов ПЗ, чтобы система координат (СК) приемника совместились с СК ФЦ.

Управление указанными контурами и их синхронизацию осуществляет центральный компьютер (ЦК) или супервизор. Он же координирует свою деятельность с другими подсистемами космического аппарата и с наземными службами.

Система адаптации КРТ обычно строится в виде управляющей локальной вычислительной сети (УЛВС), объединяющей УЭВМ1—УЭВМ5 контуров автоматического управления с контролерами оптических систем измерения положения ГЗ, КР и ПЗ под управлением сетевого сервера (супервизора). Данная УЛВС должна обеспечивать в реальном времени обмен информацией между подсистемами, находящимися в различных температурных режимах от 4 до 300 К в условиях глубокого вакуума, и подачу им питающих напряжений.

Обобщенная структура УЛВС представлена на рис. 2, где ОСИП — оптическая система измерения положения; САУ — системы автоматического управления актуаторами щитов; АЩ — актуаторы щитов ГЗ; ЩКР — щиты контррефлектора; ЭДА1, ..., ЭДА96 — электродвигатели актуаторов; ДОС1—ДОС96 — датчики обратной связи перемещения актуаторов; ЭДУМ — электродвигатель угла места; ДОСУМ — датчик обратной связи угла места; ДА — двигатели азимута;

ЭДКР1, ..., ЭДКР6 — электродвигатели системы перемещения контррефлектора; ДОСКР1, ..., ДОСКР6 — датчики обратной связи перемещения контррефлектора; ЭДПЗ1, ..., ЭДПЗ7 — электродвигатели системы перемещения плоского зеркала; ДОСПЗ1, ..., ДОСПЗ7 — датчики обратной связи перемещения плоского зеркала; ЭДЩКР1, ..., ЭДЩКР24 — электродвигатели системы актуаторов щитов КР; ДОСЩКР1, ..., ДОСЩКР24 — датчики обратной связи системы актуаторов КР.

Разработка системы управления положением и формой поверхности ГЗ и КР охлаждаемого КРТ является сложной проблемой, связанной, в частности, с необходимостью решения задач проектирования наиболее эффективных электроприводов КР и ГЗ, работающих в космосе при температуре 4 К, и расчета их силовых и тепловых характеристик.

Оценка силовых характеристик электроприводов

Для системы адаптации космических радиотелескопов обычно требуются следующие электроприводы:

- для диапазона перемещений до 0,006 мм с погрешностью обеспечения заданного положения до 0,002 мм;
- для диапазона перемещений до 0,3 мм с погрешностью обеспечения заданного положения до 0,05 мм;
- для диапазона перемещений до 5 мм с погрешностью обеспечения заданного положения до 0,2 мм.

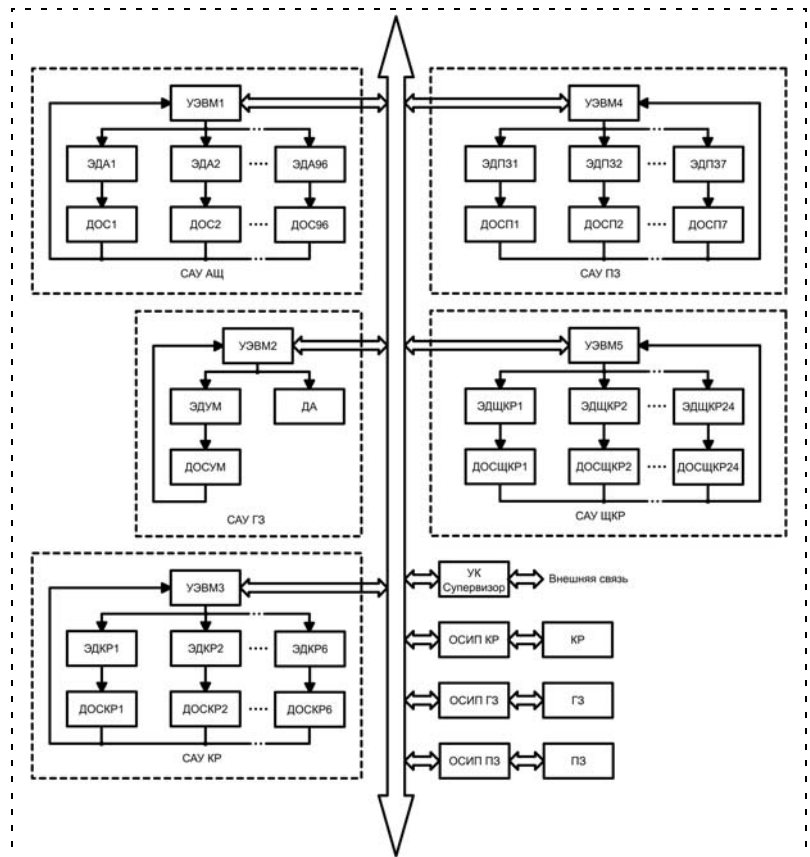


Рис. 2. Обобщенная структура УЛВС

Таблица 1

Уси- лие, Н	Пере- меше- ние, м	Скорость перемеще- ния, м/с	Требуе- мая мощ- ность, Вт	КПД	Потребляе- мая мощ- ность, Вт
10^{-2}	$6 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-8}$	0,95	$6,32 \cdot 10^{-8}$
10^{-1}			$6 \cdot 10^{-7}$	0,95	$6,32 \cdot 10^{-7}$
1			$6 \cdot 10^{-6}$	0,95	$6,32 \cdot 10^{-6}$
2			$1,2 \cdot 10^{-5}$	0,95	$1,26 \cdot 10^{-5}$
3			$1,8 \cdot 10^{-5}$	0,95	$1,89 \cdot 10^{-5}$
4			$2,4 \cdot 10^{-5}$	0,95	$2,53 \cdot 10^{-5}$
5			$3 \cdot 10^{-5}$	0,95	$3,16 \cdot 10^{-5}$
10			$6 \cdot 10^{-5}$	0,95	$6,32 \cdot 10^{-5}$

Таблица 2

Уси- лие, Н	Пере- меше- ние, м	Скорость перемеще- ния, м/с	Требуе- мая мощ- ность, Вт	КПД	Потребляе- мая мощ- ность, Вт
10^{-2}	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-6}$	0,95	$3,16 \cdot 10^{-6}$
10^{-1}			$3 \cdot 10^{-5}$	0,95	$3,16 \cdot 10^{-5}$
1			$3 \cdot 10^{-4}$	0,95	$3,6 \cdot 10^{-4}$
2			$6 \cdot 10^{-4}$	0,95	$6,32 \cdot 10^{-4}$
3			$9 \cdot 10^{-4}$	0,95	$9,47 \cdot 10^{-4}$
4			$1,2 \cdot 10^{-3}$	0,95	$1,26 \cdot 10^{-3}$
5			$1,5 \cdot 10^{-3}$	0,95	$1,58 \cdot 10^{-3}$
10			$3 \cdot 10^{-3}$	0,95	$3,16 \cdot 10^{-3}$

Диапазон рабочих температур может быть от 4 до 70 К. Поэтому двигатели электроприводов должны быть адаптированы к работе при сверхнизкой температуре и в глубоком вакууме, что требует их специального исполнения и проведения дополнительных исследований и расчетов, в частности исследования динамики поведения элементов конструкции зеркальной системы при их линейных и угловых перемещениях, исследования трения и смазки подвижных узлов конструкции телескопа при температуре 4 К, расчета силовых и тепловых характеристик электроприводов, работающих в космосе при температуре 4 К. Кроме того, работающие электродвигатели практически не должны влиять на температуру зеркальной системы радиотелескопа.

При расчетах требуемой мощности электродвигателей будем полагать, что их КПД в условиях сверхпроводимости (при 4 К) составит значение порядка 0,95...0,98.

Для перемещения ПЗ могут потребоваться электродвигатели, значения мощности которых приведены в табл. 1.

Для перемещения щитов лепестков ГЗ могут потребоваться электродвигатели, значения мощности которых приведены в табл. 2.

Значения мощности для перемещения КР электродвигателей приведены в табл. 3.

Для перемещения ГЗ по углу места могут потребоваться усилия порядка: $F = M/l = J\Delta\omega/(\Delta t l) = ((ml^2)/12)\Delta\omega/(\Delta t l) \approx 1500 \cdot 3 \cdot (0,01...0,1)/12 \approx (4...40)$ Н при скоростях перемещения от 0,05 до 0,5 м/с. Для таких перемещений может потребоваться электродвигатель, значения мощности которого приведены в табл. 4.

Таблица 3

Уси- лие, Н	Пере- меше- ние, м	Скорость перемеще- ния, м/с	Требуе- мая мощ- ность, Вт	КПД	Потребляе- мая мощ- ность, Вт
10^{-2}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-5}	0,95	$1,05 \cdot 10^{-5}$
10^{-1}			10^{-4}	0,95	$1,05 \cdot 10^{-4}$
1			10^{-3}	0,95	$1,05 \cdot 10^{-3}$
2			$2 \cdot 10^{-3}$	0,95	$2,1 \cdot 10^{-3}$
3			$3 \cdot 10^{-3}$	0,95	$3,15 \cdot 10^{-3}$
4			$4 \cdot 10^{-3}$	0,95	$4,2 \cdot 10^{-3}$
5			$5 \cdot 10^{-3}$	0,95	$5,25 \cdot 10^{-3}$
10			10^{-2}	0,95	$1,05 \cdot 10^{-2}$

Таблица 4

Уси- лие, Н	Пере- меше- ние, °	Скорость перемеще- ния, м/с	Требуе- мая мощ- ность, Вт	КПД	Потребляе- мая мощ- ность, Вт
5	90	0,05/0,5	0,25/2,5	0,95	0,263/2,63
10			0,5/5	0,95	0,526/5,26
15			0,75/7,5	0,95	0,79/7,9
20			1/10	0,95	1,05/10,5
25			1,25/12,5	0,95	1,32/13,2
30			1,5/15	0,95	1,58/15,8
35			1,75/17,5	0,95	1,84/18,4
40	2/20	0,95	2,1/21		

Для углового перемещения ПЗ с учетом его значительно меньшей массы по сравнению с массой ГЗ даже при возможно большей необходимой скорости его перемещения максимальная требуемая мощность двигателя будет не более 2 Вт.

Методика оценки тепловых характеристик электроприводов

Количество теплоты ΔQ , выделяемой электродвигателями при их кратковременной работе за время Δt , можно оценить на основе следующих соотношений: $\Delta Q = C_p \Delta T$, где C_p — коэффициент теплопроводности (для меди $C_p = 68,2$).

Рассмотрим две составляющие, влияющие на выделение теплоты. Первой составляющей является выделение теплоты из-за протекания тока:

$$\Delta Q = I^2 R \Delta t.$$

В этом случае изменение температуры можно примерно оценить следующим образом:

$$\Delta T_1 = I^2 R \Delta t / C_p.$$

Второй составляющей является выделение теплоты из-за трения, на которое может уходить до 2 % от потребляемой мощности:

$$\Delta T_2 = 0,02 P \Delta t / C_p.$$

Силу тока I можно оценить исходя из мощности двигателя P и используемого напряжения $U \approx 10$ мВ. Тогда для двигателей ПЗ сила тока будет не более $I_{\max} = P/U = 6,32 \cdot 10^{-5} / 10^{-2} = 6,32 \cdot 10^{-3}$ А.

Если учесть, что при 4 К сопротивление R будет очень мало (порядка $10^{-12} \dots 10^{-11}$ Ом), то можно

считать, что из-за протекания тока в двигателях ПЗ температура практически не будет изменяться. Из-за трения изменение температуры составит

$$\Delta T_2 = (6 \cdot 0,02 \cdot 6,32 \cdot 10^{-5} \cdot 1) / 68,2 = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ К.}$$

Следовательно, работающие двигатели ПЗ практически не будут изменять температуру телескопа.

Для двигателей актуаторов лепестков ГЗ сила тока будет не более

$$I_{\max} = P/U = 6,32 \cdot 10^{-3} / 10^{-2} = 6,32 \cdot 10^{-1} \text{ А.}$$

Если считать, что все 96 двигателей актуаторов лепестков ГЗ будут работать одновременно, то при $R = 10^{-11}$ Ом получим

$$\Delta T_1 \approx 100 \cdot 36 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-11} \cdot 1/68 \approx 5 \cdot 10^{-12} \text{ К.}$$

Из-за трения изменение температуры ожидается следующее:

$$\Delta T_2 = (96 \cdot 0,02 \cdot 6,32 \cdot 10^{-3} \cdot 1) / 68,2 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ К.}$$

Следовательно, электродвигатели актуаторов лепестков ГЗ тоже практически не будут изменять температуру телескопа.

Для двигателей КР сила тока будет не более

$$I_{\max} = P/U = 1,05 \cdot 10^{-2} / 10^{-2} = 1,05 \text{ А.}$$

Если считать, что все шесть двигателей КР будут работать одновременно, то при $R = 10^{-11}$ Ом получим: $\Delta T_1 \approx 6 \cdot 1 \cdot 10^{-11} \cdot 1/68 \approx 10^{-12}$ К. Из-за трения изменение температуры окажется следующим:

$$\Delta T_2 = (6 \cdot 0,02 \cdot 1,05 \cdot 10^{-2} \cdot 1) / 68,2 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ К.}$$

Следовательно, электродвигатели КР тоже практически не будут изменять температуру телескопа.

Для двигателей перемещения ГЗ по углу места сила при напряжении питания 12 В тока будет не более

$$I_{\max} = P/U = 21/12 = 2 \text{ А.}$$

При $R = 10^{-11}$ Ом получим: $\Delta T_1 \approx 2 \cdot 10^{-11} \cdot 1/68 \approx 3 \cdot 10^{-13}$ К. Из-за трения изменение температуры будет следующее:

$$\Delta T_2 = (0,02 \cdot 21) / 68,2 = 6 \cdot 10^{-3} \text{ К.}$$

Следовательно, электродвигатель поворота ГЗ по углу места тоже практически не будет изменять температуру телескопа.

Для двигателя поворота ПЗ сила тока при напряжении питания 10 мВ составит не более $I_{\max} = P/U = 2/10^{-2} = 200$ А. Тогда при $R = 10^{-11}$ Ом получим:

$$\Delta T_1 \approx 4 \cdot 10^4 \cdot 10^{-11} \cdot 1/68 \approx 10^{-8} \text{ К.}$$

Из-за трения изменение температуры будет следующее:

$$\Delta T_2 = (0,02 \cdot 2) / 68,2 = 6 \cdot 10^{-4} \text{ К.}$$

Следовательно, работающий электродвигатель поворота ПЗ также практически не будет изменять температуру телескопа.

Электродвигатели на основе пьезоэффекта

В точных следящих системах управления космических радиотелескопов, в которых регулируются параметры углового и линейного перемещений, использовать в качестве исполнительных элементов стандартные электрические двигатели (шаговые, постоянного вращения, моментные двигатели и др.), как было показано ранее, невозможно [2]. Поиск альтернативных исполнительных элементов для подобных приводов привел к пьезоэлектрическим двигателям вращения. Их эффективность по сравнению с электромагнитными двигателями показана на рис. 3. Проведенные исследования приводов, построенных на пьезоэлектрических двигателях вращения, показали, что можно создать многофункциональный пьезоэлектрический позиционный привод вращательного движения с высоким угловым разрешением для широкого применения в космической технике [3]. Однако применение пьезоэлектрических двигателей сдерживается сложностью изготовления хороших пьезокерамических и износостойких материалов. С этим связано в настоящее время ограничение мощности пьезоэлектрических двигателей уровнем порядка 10 Вт. Быстрый износ деталей, контактирующих в процессе передачи движения, ограничивает срок службы двигателей.

В настоящее время американской фирмой New Scale Technologies (www.NewScaleTech.com) уже разработан и серийно выпускается необходимый для систем управления космическими радиотелескопами пьезоэлектрический привод, прошедший испытания при температуре 6 К [4]. Основное достоинство пьезоэлектрических двигателей (ПЭД) — это отсутствие индукционных обмоток, изготовленных, как правило, из медного или алюминиевого провода и специального наборного сердечника.

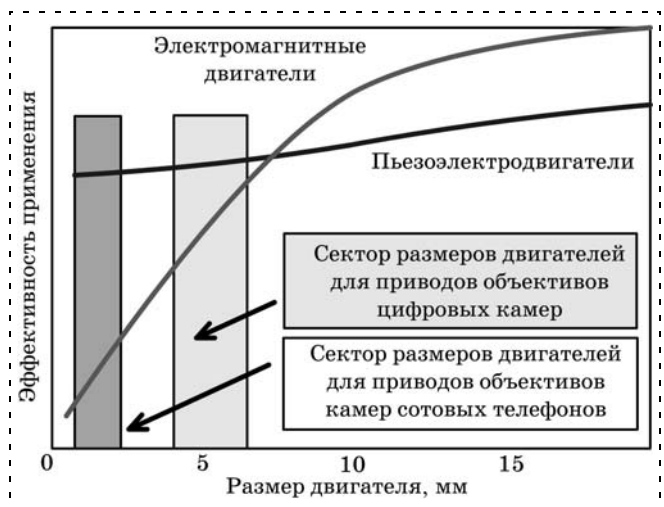


Рис. 3. Эффективность пьезоэлектрических двигателей

Рабочим элементом в них является пьезоэлектрическая керамика — один из немногих материалов, применяемых сегодня в технике, способных преобразовать электрическую энергию в механическую с фантастическим КПД, превышающим у отдельных видов 90 %. Это позволяет получать уникальные приборы, в которых электрические колебания прямо преобразуются во вращательное движение ротора; при этом усилии, развиваемое на оси такого двигателя, столь велико, что исключает необходимость применения какого-либо механического редуктора для повышения крутящего момента.

В типичной конструкции вращательного пьезоэлектрического двигателя статор двигателя содержит пьезокерамическое кольцо, на котором укреплены толкатели, упирающиеся на внутреннюю поверхность ротора, выполненного в виде цилиндрической чашки, закрепленной на валу. На торцевые поверхности пьезокерамического кольца нанесены электроды, подключаемые к генератору ультразвуковых колебаний. Частота генератора соответствует одной из частот собственных механических колебаний пьезокерамического кольца в радиальном направлении. Процесс преобразования колебаний пьезокерамического кольца в поступательное (вращательное) движение ротора (механическое детектирование) осуществляется следующим образом:

- при включении генератора механические колебания пьезокерамического кольца через толкатели передаются на ротор;
- в области фрикционного контакта толкателей с ротором векторы сил, передаваемых толкателями, раскладываются на две составляющие — составляющую вдоль радиуса ротора и составляющую, направленную по касательной к окружности ротора;
- последняя составляющая приводит ротор во вращательное движение, скорость вращения ротора при этом пропорциональна амплитуде механических колебаний кольца.

ПЭД имеют значительно меньшие габаритные размеры и массу по сравнению с аналогичными по силовым характеристикам электромагнитными двигателями (рис. 3). Отсутствие обмоток, пропитанных склеивающими составами, делает их пригодными для использования в условиях вакуума. ПЭД обладают значительным моментом самоторможения (до 50 % максимального крутящего момента) при отсутствии питающего напряжения за счет своих конструктивных особенностей. Это позволяет обеспечивать очень малые дискретные угловые перемещения (от единиц угловых секунд) без применения каких-либо специальных мер. Это свойство связано с квазинепрерывным характером работы пьезоэлектрического двигателя. Действительно, пьезоэлемент, который преобразует электрические колебания в механические, питается не постоянным, а переменным напряжением резонансной частоты. При подаче одного или двух импульсов можно получить очень маленькое угловое переме-

шение ротора. Например, некоторые образцы ПЭД, имеющие рабочую частоту вращения $0,2...6 \text{ с}^{-1}$, при подаче одиночного импульса на обкладки пьезоэлемента дадут в идеальном случае угловое перемещение ротора в $1/9\ 900\ 000...1/330\ 000$ от длины окружности, т. е. $0,13...3,9''$.

В настоящее время пьезоэлектрические двигатели вращения могут применяться в следующих космических системах:

- системах разворачивания солнечных батарей и управления ими;
- системах герметизации (упаковки);
- системах управления космическими телескопами и угловым положением радаров.

При этом ожидается уменьшение массогабаритных параметров от 3 до 5 раз при понижении цены. Также большой интерес представляют линейные электродвигатели на основе пьезоэффекта.

Однако использование пьезоэлектрических двигателей в исполнительных механизмах связано с рядом сложностей. Существенная зависимость резонансной частоты преобразователя от напряжения питания электродов, момента нагрузки и момента инерции на валу двигателя затрудняет обеспечение оптимального преобразования энергии. Регулировочные характеристики двигателя нелинейные, параболические; имеется довольно широкая зона нечувствительности. Механические характеристики довольно мягкие и имеют вид гипербол.

Компенсация этих недостатков может быть осуществлена путем выполнения исполнительного механизма с обратной связью по скорости. Обратная связь может быть реализована либо с непосредственным использованием измерителей скорости, либо косвенным методом, основанным на том, что угловая скорость ротора пропорциональна активной мощности, потребляемой электронным преобразовательным устройством. При этом необходимо применение специальных способов управления высокочастотными источниками питания пьезоэлементов, которые при существенной нелинейности характеристик самих пьезопреобразователей и нелинейности механических и регулировочных характеристик двигательной части могли бы обеспечить устойчивую работу при сильных случайных возмущениях. На практике для обеспечения требуемых статических и динамических характеристик при регулировании или стабилизации скорости применяются:

- амплитудный способ, основанный на регулировании амплитуды напряжения на электродах пьезоэлемента;
- амплитудно-фазовый способ, основанный на регулировании амплитуды напряжения и сдвига по фазе тока на электродах пьезоэлемента.

Пьезоэлектрические двигатели теоретически могут иметь весьма высокие силовые и энергетические характеристики, так как только пьезоэлектрическая керамика преобразует электрическую энергию в механическую с КПД, превышающим в ряде случаев 90 %.

Математическая модель пьезоэлектрического двигателя

Принципы действия ПЭД базируются на группе физических эффектов (пьезоэффектов), присущих материалам, способным изменять свои геометрические размеры под воздействием управляющего поля. Поэтому математическая модель ПЭД строится на основе двух уравнений:

- уравнения обратного пьезоэффекта

$$\frac{x}{il_0} = -\frac{\sigma}{Y} + d_{\text{п}}E, \quad (1)$$

где x — деформация пьезоэлемента; l_0 — первоначальная длина пьезоэлемента; σ — механическое напряжение в образце; Y — модуль Юнга; $d_{\text{п}}$ — пьезомодуль; E — напряженность приложенного поля; i — коэффициент мультипликации;

- уравнения прямого пьезоэффекта

$$P = -d_{\text{п}}\sigma + \varepsilon_0\chi E, \quad (2)$$

где P — поляризованность образца; ε_0 — электрическая постоянная; χ — диэлектрическая восприимчивость пьезоматериала.

Рассмотрим пьезоэлектрический элемент поперечного сечения S_0 , закрепленный одним концом на неподвижном основании, первоначальный размер l_0 которого изменяется на значение x под действием электрического поля E в направлении действия поля и перемещающий исполнительный орган массой m_0 , сочлененный с его свободным концом. Кроме исполнительного органа перемещаются также элементы объема активной части пьезоэлемента, масса которого m_k чаще всего меньше, чем масса исполнительного органа. При этом инерционностями перемещающихся элементарных объемов пьезоэлемента можно пренебречь либо, имея в виду, что пьезоэлемент закреплен одним концом, и эта его часть не принимает участия в движении, уточнить значение суммарной приведенной подвижной массы m_{Σ} , включив в нее кроме массы исполнительного органа m_0 часть массы пьезоэлемента m_k . Основное динамическое усилие в рассматриваемом случае действует на пьезоэлемент в направлении приложенного поля.

Будем считать, что силы трения в ПЭД не изменяются во времени и, кроме того, учтем, что для пьезоэлектрических материалов $\chi \gg 1$ [5]. Тогда умножив все члены уравнения (1) на YS_0 и продифференцировав уравнение (2) по времени, получим линейную модель ПЭД в виде следующей системы уравнений:

$$df_{\Sigma}/dt = K_0/C_0/R_{\text{вТ}}e_y - 1/C_0/R_{\text{вТ}}f_{\Sigma} - K_0K_{\text{п}}/C_0v; \quad (3)$$

$$dv/dt = 1/m_{\Sigma}f_{\Sigma} - (K_y + K_{\text{ж}})/i/m_{\Sigma}x - K_{\text{д}}/m_{\Sigma}v; \quad (4)$$

$$dx/dt = iv, \quad (5)$$

где $f_{\Sigma} = d_{\text{п}}EYS_0$ — усилие, вызванное электрическим полем; $K_0 = d_{\text{п}}YS_0/l_0$ — коэффициент обратного пьезоэффекта; C_0 — емкость пьезоэлемента; $R_{\text{вТ}}$ — эквивалентное внутреннее сопротивление источника управляющей ЭДС; e_y — управляющая

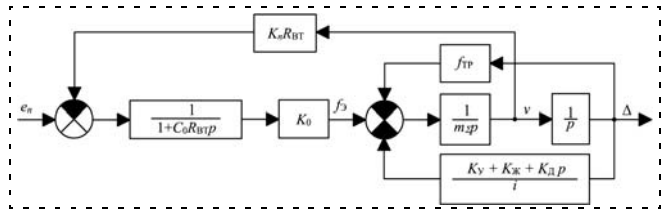


Рис. 4. Модель пьезоэлектрического двигателя

ЭДС; $K_{\text{п}} = d_{\text{п}}YS_0/l_0$ — коэффициент прямого пьезоэффекта ($K_0 = K_{\text{п}}$); v — скорость перемещения; $K_y = YS_0/l_0$ — коэффициент упругости; $K_{\text{ж}}$ — коэффициент жесткости; $K_{\text{д}}$ — коэффициент внутреннего демпфирования ($K_{\text{д}}/i$ — постоянная времени демпфирования); $T_{\Sigma} = R_{\text{вТ}}C_0$ — электростатическая постоянная времени.

Заменив в уравнениях (3)—(5) d/dt на p , получим модель ПЭД в символьном виде, которую можно представить в виде структурной схемы (рис. 4), позволяющей проводить исследование динамики управления конкретными ПЭД и выбирать оптимальные законы управления и рассчитывать параметры регуляторов.

Заключение

- Электропривод системы управления радиотелескопа должен быть адаптирован к работе при сверхнизких температурах и глубоком вакууме, что требует их специального исполнения.
- Расчет силовых характеристик электропривода для различных подсистем электропривода показывает, что требуются двигатели мощностью от микроватт до единиц ватт.
- Расчет температурных характеристик показывает, что работающие электродвигатели практически не будут влиять на температуру радиотелескопа.
- Анализ требуемых характеристик, а также эффективность различных типов двигателей показывает, что в большинстве подсистем управления могут использоваться пьезоэлектрические двигатели, при этом общая масса и габаритные параметры уменьшатся, а цена системы управления понизится.
- Полученная линейная математическая модель пьезоэлектрического двигателя позволяет рассчитывать параметры системы управления.

Список литературы

- Артеменко Ю. Н., Городецкий А. Е., Дубаренко В. В., Кучмин А. Ю., Тарасова И. Л. Проблемы создания систем адаптации космических радиотелескопов // Информационно-управляющие системы. 2010. № 3. С. 2—8.
- Лисов И. Космический телескоп имени Джеймса Вебба // Новости космонавтики. 2002. № 11.
- Самарин А. Миниатюрные линейные пьезоэлектрические двигатели // Компоненты и технологии. 2006. Вып. № 310.
- Sanguinetti B., Varcoe B. T. H. Use of a piezoelectric SGUGGLE motor for positioning at 6 K in a cryostat // Cryogenics. 2006. Vol. 46, N 6.
- Никольский В. В., Саидлер А. К. Моделирование процессов в вискозиметре с пьезоэлектрическим приводом // Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы. 2003. № 1 (11). С. 95—100.

УДК 621.9

В. Ф. Коростелев, Засл. деятель науки,
д-р техн. наук, зав. каф., проф.,
Giess300@mail.ru,

Владимирский государственный университет

Развитие металлообрабатывающей промышленности в Италии и в России

В последние годы среди ученых и специалистов наметились разногласия в оценках состояния отечественной металлообрабатывающей промышленности. На примере Италии показано, что в сложившейся на международном рынке ситуации в преимущественном положении оказывается тот, кто более эффективно использует свой научный и интеллектуальный потенциал. Намечившееся сближение Италии и России предоставляет новые возможности для развития взаимовыгодного сотрудничества в научной и производственной сфере.

Ключевые слова: стажировка российских студентов в Миланском университете и на итальянских предприятиях, высокий уровень технологий металлообработки, возможности для исследований и совместных проектов по созданию оборудования для высокоэффективных процессов обработки

В мае 2011 г. в рамках программы Итальянской технологической премии (Italian Technology Award) в МГТУ "Станкин" был проведен конкурс студенческих научных работ по металлообработке. Десяти лучшим студентам были вручены Сертификаты победителей (рис. 1) и предоставлена возможность



Рис. 1. Вручение сертификатов российским студентам

пройти стажировку в Миланском политехническом университете и на предприятиях металлообрабатывающей промышленности Италии.

Автор данной статьи участвовал в стажировке в качестве сопровождающего преподавателя группы российских студентов.

Если считать, что целью стажировки являлось ознакомление с состоянием науки, образования и производства в Италии, то эта цель в полной мере достигнута, остается лишь расставить акценты и сделать практические выводы для дальнейшей работы.

Прежде всего, обращает на себя внимание оригинальный подход к обучению, к исследованиям, к совершенствованию продукции, к завоеванию сегментов рынка. Прослеживается цепочка взаимосвязанных этапов:

дизайн → моделирование → выбор эргономичных вариантов → разработка новых материалов, разработка новых технологий → создание продукции с более высоким уровнем качества и потребительских свойств.

В основу политики на международном рынке заложено стремление расширить границы экспорта, увеличить объем наукоемкой высокорентабельной продукции. Примерами такой продукции являются "Большие машины" — карусельные станки с диаметром планшайбы 20 м для космической промышленности, в том числе для Российского космического центра им. М. В. Хруничева (рис. 2 и рис. 3, 4, см. вторую сторону обложки), автомобили Ferrari, Iveco, оборудование для испытаний материалов, оборудование для научных исследований, гоночные мотоциклы Ducati и др.



Рис. 2. Карусельный станок

Обращает на себя внимание высокий интеллектуальный и профессиональный уровень специалистов, высочайший уровень оснащения производства современными программными системами, компьютерным оборудованием и интерфейсами (рис. 5, см. третью сторону обложки), а также конфиденциальность, контролируемое управление информацией.

По внешнему виду выпускаемой продукции трудно определить уровень развития технологий литейного, кузнечно-штамповочного, сварочного, механосборочного производств, обеспечивающих конкурентные преимущества.

Складывается впечатление, что все, о чем мы говорим на лекциях, ориентируясь на литературные данные и на результаты собственных и заимствованных исследований, в итальянской металлообрабатывающей промышленности уже есть и работает.

Тогда естественно возникает вопрос: какими достижениями располагает Россия в данной области и каковы перспективы налаживания партнерских взаимовыгодных отношений.

Справедливости ради следует отметить, что итальянцы признают наши успехи в освоении космоса и принимали участие в совместных российско-итальянских проектах по космической тематике, выполняя обязательства по разработке и созданию специальных измерительных систем.

Надо также сказать, что современное состояние металлообрабатывающей промышленности в России, с точки зрения конкуренции на международном рынке и обеспечения технологической независимости от других стран, особого оптимизма не внушает. И такое положение, как справедливо отмечает ректор МГТУ "СТАКИН" д-р техн. наук проф. С. Н. Григорьев в работе [1], совершенно недопустимо для российских машиностроительных производств, выпускающих продукцию стратегического назначения (вооружение, ракетно-космическую технику, ядерное оборудование).

Уровень развития металлообрабатывающих станков, оснащенных системами ЧПУ, определяется использованием функций искусственного интеллекта, наличием модели процесса обработки, эффективностью обратных связей, управлением жизненным циклом инструментов, числом каналов параллельного управления, числом одновременно интерполируемых координат, пропускной способностью линий связи. Отставание России по большинству показателей, определяющих нанометрическую точность и высокий класс шероховатости поверхности, составляет 10...15 лет.

Важно также отметить положительную тенденцию к снижению взаимного недоверия между странами, когда на передний план выдвигаются не проблемы противостояния, а системные проблемы международного разделения труда, проблемы сбалансированного взаимодействия человека и природы в преддверии изменения климата и техногенных катастроф.

Пример взаимодействия Италии и России в этом смысле показателен и ориентирует на новые приоритеты, на новые идеи в проектировании и разработке новых видов продукции и новых видов обработки, в производстве новых материалов с улучшенными свойствами.

Нет сомнения в том, что наметившееся отставание в области разработки программно-аппаратных средств для металлообрабатывающей промышленности может быть преодолено. В той же работе [1] представлены конструктивные предложения по развитию созданной в России импортозамещающей системы ЧПУ класса "Hi-End", а также по использованию этой системы для управления не только процессом резания, но и такими высокоэффективными процессами обработки, как лазерная, электронно-лучевая, гидроабразивная.

Если сегодня правительство России имеет возможность инвестировать, например, в объеме 400 млрд рублей в создание охранных зон и природных заповедников, то соразмерное финансирование научно-технической программы "Развитие отечественного станкостроения и инструментальной промышленности" позволило бы более быстрыми темпами создавать свою отечественную ОС реального времени, сконцентрировать усилия на разработку электронной элементной базы программно-технических комплексов, приступить к проектированию металлообрабатывающего оборудования нового поколения.

Особое внимание необходимо обратить на исследование и оптимизацию новых процессов обработки.

Давая высокую оценку систем, создаваемых ведущими производителями — фирмами FANUC, SIEMENS, BOSCH REXROTH, MITSUBISHI, HEIDENHAIN и др., — следует отметить, что они разработаны с ориентацией на традиционные процессы обработки и не могут быть использованы для исследования и разработки новых более эффективных процессов. Этот недостаток предстоит устранить путем дооснащения разрабатываемых систем управления контрольно-измерительными подсистемами.

И если сегодня разработанный в Германии протокол DrivtClick обеспечивает пропускную способность промышленной сети, на порядок превышающую скорость передачи информации по используемому в России протоколу Profibus DP, то это еще не означает, что у нас нет разработок такого же высокого уровня.

И в Италии, и в России, как и в других странах, производство оборудования с новыми технологическими возможностями на 20...30 лет отстает от разработки новых процессов, а попытки приспособить имеющееся оборудование для реализации новых процессов изначально обречены на отрицательный результат.

Во Владимирском государственном университете при финансовой поддержке Министерства образования и науки и целого ряда предприятий обо-

ронной, космической промышленности и точного машиностроения реализован крупномасштабный проект по созданию гидравлических прессов для статической опрессовки жидкого металла до начала кристаллизации. Этапы работы над проектом представлены в монографиях [2—4], в патентах РФ №№ 2252108, 2193945, 2172226, 2111085, в публикациях в журналах "Мехатроника, автоматизация, управление" [5—6], "Нано- и микросистемная техника" [7—11], "Тяжелое машиностроение" [12] и др.

В процессе выполнения исследований заготовки из сплава В95 массой 2,5 кг при температуре 800 °С были опрессованы под давлением 500 МПа. Давление такого уровня для изменения наноструктуры сплава и его свойств ранее нигде не применялось.

Располагая опытом проектно-конструкторских, технологических разработок, взаимодействия с российскими заводами, объединяя достижения "Станкина" и других вузов и научно-исследовательских центров, заимствуя возможности итальянских предприятий, сроки разработки и создания оборудования для высокоэффективных процессов металлообработки можно существенно сократить.

Критически оценивая имеющиеся потенциальные возможности и ресурсы для разработки проектов международного уровня с участием ученых и специалистов из российских вузов, следует особо подчеркнуть, что с теоретической точки зрения современные системы управления как основная кибернетическая составляющая современного технологического оборудования располагают обширными возможностями, которые не находят практического использования. Одной из причин, существенно затрудняющих дальнейшее развитие, является отсутствие заказов и финансирования.

Современные системы ЧПУ решают серьезные народно-хозяйственные проблемы, но их функционирование осуществляется в среде, в которой конечная цель заранее определена, хорошо изучена и является известной.

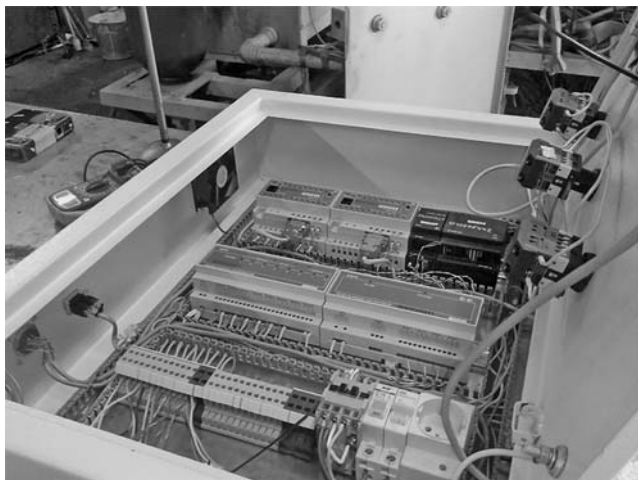


Рис. 6. Трехуровневая система управления на базе ПЛК и ПК

Для управления технологическими процессами в условиях неопределенности необходимы соответствующие интеллектуальные алгоритмы.

Пример создания стойки управления прессом на современной элементной базе представлен на рис. 6.

Составными элементами данной системы управления являются:

- модуль программно-временного управления с помощью ПЛК;
- модуль сбора, обработки и представления измерительной информации;
- модуль принятия решений с использованием интеллектуальных алгоритмов и нейросетевых моделей.

Результаты исследований разработанной системы управления предполагается опубликовать в ближайших номерах данного журнала.

Возможность использования нейросетевой модели в системе управления процессом приведена в работе [13].

Достоинством разработанной системы является инвариантность по отношению к управляемому процессу.

Можно сослаться и на работы других авторов, в которых использование систем управления с интеллектуальными функциями качественным образом улучшают возможности металлообрабатывающего оборудования.

Взаимодействие России с Италией в области металлообработки в направлении создания нового технологического оборудования для производственных и научно-исследовательских целей может быть направлено на решение следующих проблем:

- ♦ *ресурсосбережение.* Назрела необходимость в создании оборудования для металлургического и заготовительного производств, где потери металла вследствие несовершенства технологий достигают 50 %;
- ♦ *разработка новых материалов.* Необходимо признать, что разработанные до настоящего времени материалы полностью исчерпали свои возможности, а для удовлетворения потребностей развивающихся отраслей экономики необходимы новые материалы. В частности, шатун в итальянских двигателях стальной, а возможность использования легких сплавов требует проведения исследований;
- ♦ *улучшение качества жизни.* Создание оборудования для высокоэффективных процессов металлообработки важно также с точки зрения защиты экологии и условий труда, в чем в равной мере заинтересованы все страны независимо от конкуренции на международном рынке.

Список литературы

1. Григорьев С. Н. Научно-технические проблемы построения современных технологических систем с числовым программным управлением // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 4. С. 19—26.

2. Коростелев В. Ф. Технология литья с программным наложением давления. М.: Машиностроение, 2000. 204 с.
3. Коростелев В. Ф. Теория, технология и автоматизация литья с наложением давления. М.: Новые технологии, 2004. 224 с.
4. Качак В. В., Коростелев В. Ф., Хромова Л. П. Нанотехнологии и упрочнение сплавов. М.: Новые технологии, 2011. 240 с.
5. Коростелев В. Ф., Шелоков М. Е., Игошин А. В. Программно-корректируемое управление наложением давления при литье автомобильных дисков // Мехатроника, автоматизация, управление. 2003. № 10. С. 8—12.
6. Коростелев В. Ф., Рассказчиков А. Н., Мартынов И. Е. Алгоритмическое и программное обеспечение системы управления процессом литья с наложением давления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 1. С. 35—42.
7. Аракелян М., Коростелев В. Ф., Кутровская С. В., Кучерик А. О., Кирилина А. Н. Наноиндентирование УНТ, пропитанных расплавом алюминия под давлением // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 9. С. 2—4.

8. Коростелев В. Ф., Хромова Л. П. Исследование межатомных взаимодействий с использованием данных об изменениях физико-механических свойств сплавов // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 2. С. 8—13.
9. Коростелев В. Ф., Хромова Л. П. Формирование квазикристаллических структур в сплавах на основе алюминия // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 5. С. 33—38.
10. Коростелев В. Ф., Хромова Л. П. Формирование квазикристаллических структур в условиях наложения давления // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 6. С. 17—21.
11. Коростелев В. Ф. Технология и управление формированием нанокристаллического строения изделий и прецизионных сплавов // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 10. С. 14—17.
12. Коростелев В. Ф., Ловушкин М. Ю., Грачев А. А. Разработка исследовательского оборудования для освоения технологии производства изделий из нанокристаллических материалов // Тяжелое машиностроение. 2011. № 3. С. 2—7.
13. Коростелев В. Ф., Большаков А. Е. Мехатроника, автоматизация и управление, 2011. № 10. С. 50—55.

УДК 624.042.7

Ю. А. Бурьян, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой,
В. Н. Сорокин, д-р техн. наук, проф.,
А. А. Капелюховский, канд. техн. наук, доц.,
vesto4ka@bk.ru,
Омский государственный технический университет

Система управления интенсивностью излучения скважинного гидродинамического генератора

Рассмотрена возможность построения экстремальной системы управления интенсивностью излучения стержневым гидродинамическим генератором, расположенным в скважине на уровне нефтяного пласта.

Ключевые слова: скважина, гидродинамический излучатель, резонансная частота, расход жидкости, экстремальная система управления

В настоящее время для интенсификации притока нефти в призабойной зоне пласта широко используются волновые генераторы различных принципов действия, работающие в широком диапазоне частот — от единиц герц до десятков килогерц. Практика применения волновых генераторов в добывающих и нагнетательных скважинах показала их высокую эффективность [1].

Условия резонанса в стержневом гидродинамическом генераторе

Одним из перспективных волновых генераторов является стержневой гидродинамический излучатель акустических волн, который представляет собой устройство с двумя осесимметрично расположенными отверстиями. Жидкость, вытекающая с большой скоростью из отверстия (сопла), формирует турбулентную струю, в пограничном слое ко-

торой возникают вихревые кольца в виде периодических структур. Столкновение этих колец с кромкой выходного отверстия приводит к появлению упругих волн. Для усиления интенсивности излучения упругих волн предлагается использование резонаторов в виде стержней, образованных продольными прорезями в теле тонкостенной трубы.

Пульсации давления в потоке жидкости возбуждают изгибные колебания стержней на резонансной частоте, что повышает интенсивность и монохроматичность излучения генератора.

Принципиальная схема стержневого гидродинамического излучателя показана на рис. 1.

В работе [3] экспериментально определена зависимость числа Струхала Sh от диаметра d проходного сечения входного сопла и расстояния L от входного сопла до отражателя с выходным соплом:

$$Sh = 0,48 \left(\frac{L}{d} \right)^{-0,81}. \quad (1)$$

Известно также [4], что число Струхала в широком диапазоне чисел Рейнольдса связано с час-

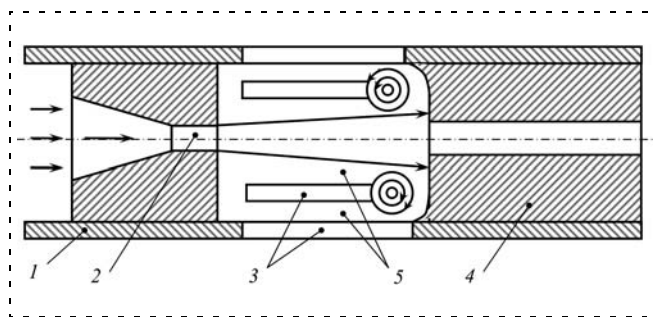


Рис. 1. Стержневой гидродинамический излучатель:
1 — насосно-компрессорная труба (НКТ); 2 — входное сопло;
3 — профрезерованные пазы; 4 — отражатель с выходным соплом; 5 — стержни

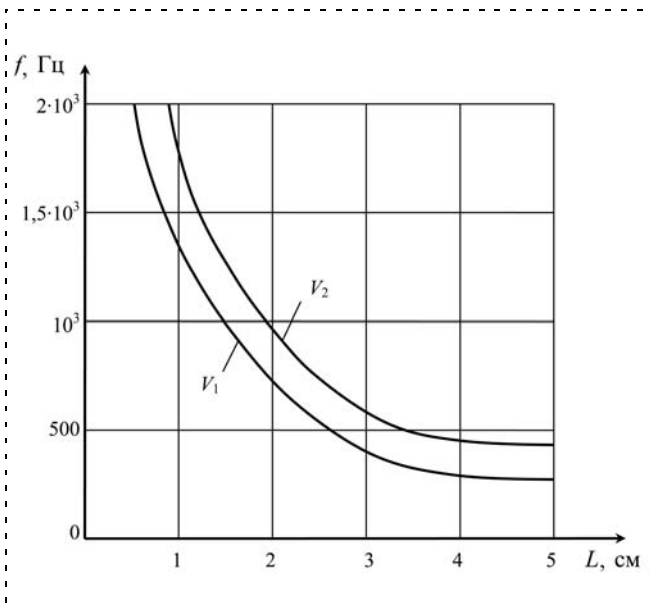


Рис. 2. График зависимости $f(L)$

той пульсаций f скоростью V струи жидкости в сечении сопла и диаметром сопла следующей зависимостью:

$$f = \frac{ShV}{d}. \quad (2)$$

Таким образом, для частоты f получаем

$$f = \frac{0,48V}{d} \left(\frac{L}{d}\right)^{-0,81}. \quad (3)$$

Для диаметра сопла $d = 4$ мм, скорости $V_1 = 20$ м/с и $V_2 = 40$ м/с на рис. 2 показана зависимость частоты f от расстояния L .

Расчетным или экспериментальным путем могут быть определены необходимые для конкретных конструктивных параметров излучателя необходимые V и L , обеспечивающие резонансные колебания стержней и, соответственно, максимальную амплитуду перепада давления на частоте f .

Для оценки зависимости амплитуды колеблющегося в жидкости стержня от частоты внешнего воздействия будем полагать, что стержень с заделкой на концах подвержен действию равномерно распределенной периодической нагрузки с интенсивностью $Q(t) = q \sin(\omega t)$, где q определена пульсирующим с частотой ω перепадом давления.

В стержнях с защемленными концами изгибные колебания без учета демпфирования происходят с основной частотой

$$f_1 = \frac{(4,73)^2}{2\pi l^2} a \frac{1}{\sqrt{1+\eta}}, \quad (4)$$

где $a = \sqrt{\frac{JE}{\rho F}}$; $\eta = 0,6689 \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right) \left(\frac{c}{h}\right)$ — коэффициент, учитывающий влияние жидкости; J, F — момент инерции и площадь сечения стержня; E, ρ — модуль упругости и плотность материала стержня; ρ_0 — плотность жидкости; h — толщина стержня; $c = \sqrt{\frac{bl}{\pi}}$; b, l — ширина и длина стержня.

В первом приближении будем полагать, что демпфирование определяется интенсивностью излучения звука колеблющимся стержнем и пропорциональна скорости перемещения точек стержня.

В этом случае дифференциальные уравнения, описывающие колебания стержня, будут иметь вид [8]

$$EJ \frac{\partial^4 y}{dx^4} + \rho F \frac{\partial^2 y}{dt^2} + \mu EJ \frac{\partial^5 y}{dt dx^4} = q \sin \omega t, \quad (5)$$

где y — поперечное (радиальное) перемещение; x — продольная координата; μ — коэффициент демпфирования.

Решения уравнения (5) без учета затухания ищется в виде разложения в ряд по функциям Крылова $X_n(x)$:

$$y(x, t) = \sum_i S_i(t) X_i(x), \quad (6)$$

где $i = 1 \dots n, n \rightarrow \infty$.

Граничные условия для $X_i(x)$ имеют вид:

$$\begin{aligned} X &= 0 \text{ для } x = 0, x = l; \\ X' &= 0 \text{ для } x = 0, x = l. \end{aligned}$$

Уравнение (5) для безразмерных координат $\xi = \frac{x}{l}$ будет иметь вид

$$\frac{EJ}{\rho Fl^4} \frac{\partial^4 y}{\partial \xi^4} + \frac{\partial^4 y}{\partial t^2} + \frac{\mu JE}{\rho Fl^4} \frac{\partial^5 y}{\partial t \partial \xi^4} = \frac{1}{\rho F} q \sin \omega t. \quad (7)$$

Подставляя решение $y(x, t)$ в выражение (7), с учетом того, что для фундаментальной функции существует соотношение

$$\frac{\partial^4 X_i(\xi)}{\partial \xi^4} = r_i^4 X_i(\xi),$$

где r_i — фундаментальные числа, получим

$$\begin{aligned} \sum_i X_i(\xi) [\ddot{S}_i(t) + \mu \omega_i^2 \dot{S}_i(t) + \omega_i^2 S_i(t)] &= \\ &= \frac{1}{\rho F} q \sin \omega t. \end{aligned} \quad (8)$$

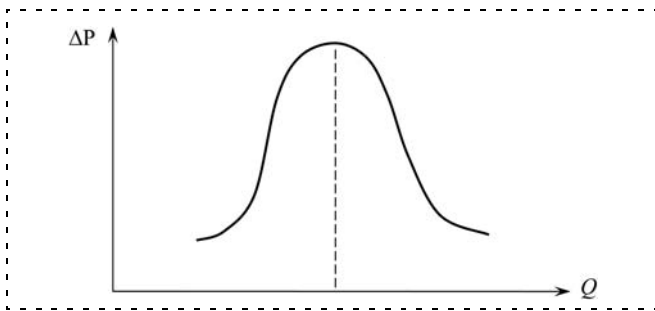


Рис. 3. График зависимости $\Delta P(Q)$

Если формы колебаний стержня близки к основной форме, то $r_n^4 \gg r_1^4$, что позволяет опустить все члены разложения в ряд, кроме первого [7]. В этом случае уравнение основного тона колебаний будет иметь вид

$$\ddot{S}_1 + \mu \omega_1^2 \dot{S}_1 + \omega_1^2 S_1 = \frac{1}{X_1(\xi) \rho F} q \sin \omega t. \quad (9)$$

Для основной формы колебаний в случае стержня с жестко зашпеленными концами и для середины пролета фундаментальная функция будет равна [2] $X_{\xi = \frac{1}{2}}(\xi) = 1,588$.

Амплитуда колебаний середины стержня в соответствии с решением уравнения (9) и учетом того, что $\omega_1 = 2\pi f_1$, где f_1 определяется выражением (4), будет иметь вид

$$S_1 = \frac{qt^4(1+\eta)}{1,588(4,73)^4 JE} \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{\omega^2}{4\pi^2 f_1^2}\right)^2 + \mu^2 \omega^2}}. \quad (10)$$

Если учесть, что связь $\omega = 2\pi f$ и скорости V струи жидкости в сечении сопла линейная (3), то при неизменных размерах L и d зависимость перепада давления ΔP , создаваемого колеблющимся стержнем от V (или расхода Q), будет иметь вид резонансной кривой.

Типичный график зависимости ΔP от Q вблизи резонанса показан на рис. 3.

Математическая модель распространения управляющего и измеряемого сигнала по заполненной жидкостью скважине

В процессе эксплуатации излучателя в скважинных условиях можно ожидать нарушение настройки колебаний стержня в резонансе с пульсациями давления в струе. Причинами этого являются изменение газового фактора, потери давления при его доведении с устья скважины до излучателя и т. д. В результате будет уменьшаться интенсивность излучения. Если учесть, что собственная частота ко-

лебаний стержня практически не изменяется, то появляется принципиальная возможность построения автоматической экстремальной системы управления настройкой в резонанс по максимуму амплитуды перепада давления на частотах вблизи резонансной частоты f с помощью управления расходом насоса на устье скважины.

Протяженную скважину, заполненную жидкостью, по которой передаются необходимые для работы излучателя давление и расход и в которой по межтрубному пространству доводится перепад давления от излучателя на частоте f до измерителя, можно рассматривать как гидравлическую линию с распределенными параметрами.

Уравнения неустановившегося ламинарного движения сжимаемой среды в упругой цилиндрической трубе круглого сечения имеют вид [5]

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{2\tau_0}{\rho_0 r_0} &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \Delta P}{\partial x}; \\ \frac{\partial V}{\partial x} &= -\frac{1}{B_{\text{тр}}} \frac{\partial \Delta P}{\partial t}, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где $\frac{1}{B_{\text{тр}}} = \frac{1}{B} + \frac{1}{E_1}$ — приведенный модуль упругости трубы; $E_1 = \frac{E\delta_0}{2r_0}$; E — модуль упругости стенки

трубы; B — модуль объемной упругости среды; r_0 — радиус трубы; δ_0 — толщина стенки трубы; τ_0 — квазистационарное касательное напряжение на стенке трубы; ΔP — давление среды.

Проводя преобразование Лапласа уравнений (11) и вводя операторный коэффициент распространения возмущений [5], получаем

$$\vartheta(p)^2 = \frac{p}{B_{\text{тр}}} \left[\rho_0 p + \frac{2W_{\tau v}(p)}{r_0} \right], \quad (12)$$

где $W_{\tau v}(p) = \frac{\tau_0(p)}{v(p)}$; $\tau_0(p)$, $v(p)$ — изображение по

Лапласу соответственно нестационарного касательного напряжения на стенке трубы и средней по сечению потока скорости среды.

Решение для системы уравнений (11) для гидравлической линии длиной L можно записать в виде [5]

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_2(p, L) &= \Delta P_1(p, 0) \text{ch}[\vartheta(p)L] - \\ &- \frac{\vartheta(p) B_{\text{тр}} V_1(p, 0)}{p} \text{sh}[\vartheta(p)L]; \\ V_2(p, L) &= V_1(p, 0) \text{ch}[\vartheta(p)L] - \\ &- \frac{p \Delta P_1(p, 0)}{\vartheta(p) B_{\text{тр}}} \text{sh}[\vartheta(p)L], \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где ΔP_1 , ΔP_2 , V_1 , V_2 — соответственно давления и скорости в начале и конце линии.

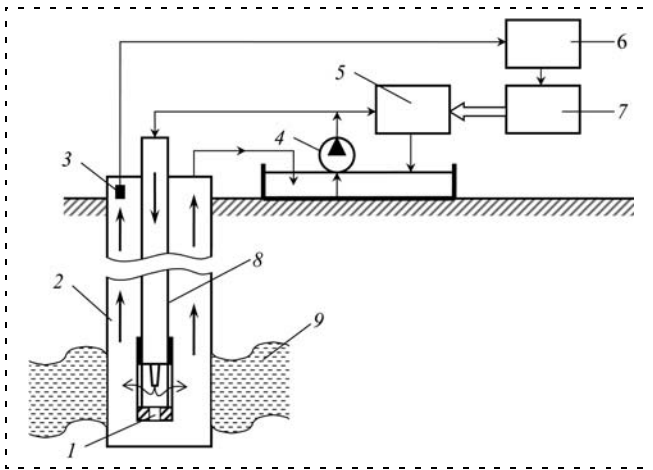


Рис. 4. Функциональная схема системы управления: 1 — стержневой гидродинамический излучатель; 2 — обсадная труба; 3 — измеритель; 4 — насос; 5 — регулятор расхода; 6 — блок управления; 7 — привод золотника регулятора; 8 — насосно-компрессорные трубы; 9 — нефтеносный пласт

Для настройки в резонанс стержней излучателя, находящихся на уровне пласта, необходимо изменить расход в начале линии длиной $L = H$, где H — глубина скважины, в то время как измерение амплитуды перепада давления на частоте f происходит на устье скважины.

Вследствие этого необходимо рассматривать две линии с распределенными параметрами:

1) передача по насосно-компрессорной трубе изменений по расходу от устья скважины до забойной части;

2) передача перепада давления от забойной части до устья по жидкости в обсадной трубе.

Гидравлическая схема (рис. 4) данной системы такова, что от концов линий не происходит отражений волн возмущений (для первой линии по $Q(t)$, по второй — $\Delta P(t)$), так как линии пропускают тот расход среды, который переносится прямой волной. Таким образом, можно считать, что нагрузки, подключенные к концам линий, являются согласованными. В этом случае из (13) можно получить выражения:

$$\frac{Q_2(p, L)}{Q_1(p, 0)} = e^{-\vartheta_1(p)H} \quad \text{—} \quad (14)$$

для линии по передаче расхода;

$$\frac{\Delta P_1(p, 0)}{\Delta P_2(p, L)} = e^{-\vartheta_2(p)H} \quad \text{—} \quad (15)$$

для линии по передаче перепада давления.

В предположении квазистационарного характера гидравлического сопротивления линии согласной работе [5] можно записать

$$\left. \begin{aligned} \vartheta_1(p) &= \frac{p}{C_L}; \\ \vartheta_2(p) &= \frac{p}{C_L} + \delta, \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

где $C_L = \sqrt{\frac{B_{тр}}{\rho_0}}$ — скорость распространения волны

возмущения; $\delta \approx \frac{4\nu}{r_0^2} \sqrt{\frac{\rho_0}{B_{тр}}}$ — коэффициент затухания;

ν — кинематическая вязкость.

В этом случае передаточные функции по расходу от устья до излучателя $W_1(p)$ и по перепаду давления от излучателя до устья $W_2(p)$ будут иметь вид

$$\left. \begin{aligned} W_1(p) &= e^{-T_L p}; \\ W_2(p) &= K_L'' e^{-T_L p}, \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

где $K_L'' = e^{-\delta H}$, $T_L = \frac{H}{C_L}$.

Система управления гидродинамическим генератором

Функциональная схема системы управления стержневым гидродинамическим излучателем показана на рис. 4.

Учитывая, что зависимость регулируемой величины от расхода жидкости имеет вид в соответствии с рис. 3, система управления гидродинамическим излучателем должна быть экстремальной. Принципиальная структурная схема такой системы показана на рис. 5.

В целях повышения помехозащищенности системы управления и с учетом наличия блоков запаздывания при прохождении сигналов по гидравлической линии экстремальный регулятор (ЭР) целесообразно выбрать дискретным шагового типа [6].

В ЭР значения показателя ΔP_2 измеряются дискретно через интервалы времени Δt , и по результатам сравнения величин ΔP_2 в начале и конце каж-

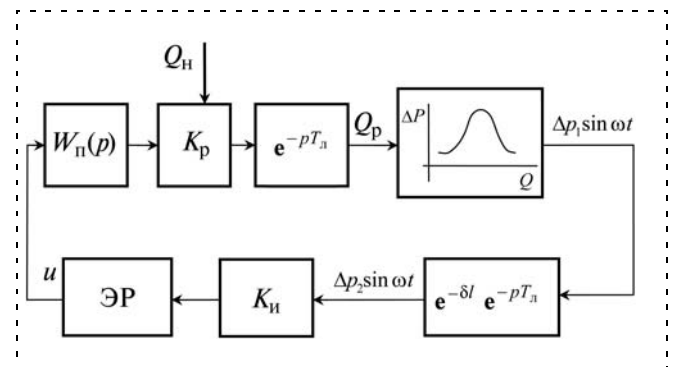


Рис. 5. Структурная схема экстремальной системы управления: 1 — объект регулирования (излучатель); $W_n(p)$ — передаточная функция привода золотника регулятора расхода; K_p — коэффициент пропорциональности регулятора расхода; K_n — коэффициент пропорциональности измерителя; ЭР — экстремальный регулятор; Q_n — расход, поступающий от насоса; Q_p — расход, поступающий в НКТ; $\omega = 2\pi f$ — частота стержневого излучателя; u — управляющее воздействие на привод золотника

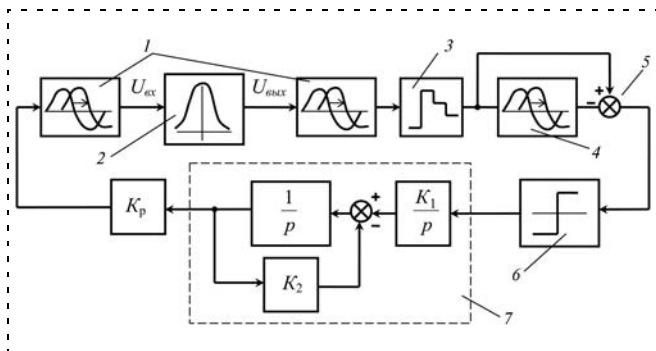


Рис. 6. Схема набора экстремальной системы:
 1 — блоки задержки, моделирующие прохождение сигналов по гидравлической линии; 2 — блок линейной интерполяции входного сигнала в соответствии с заданной табличной функцией; 3 — блок дискретизации по времени; 4 — блок задержки; 5 — блок сравнения; 6 — блок, реализующий функцию signx; 7 — модель привода золотника регулятора расхода

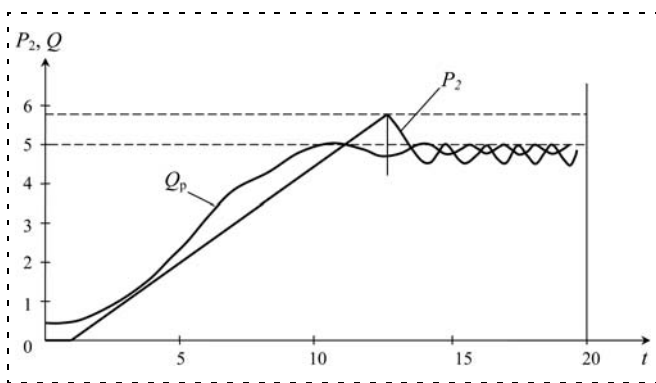


Рис. 7. Результат численного решения

дого шага изменяется управляющее воздействие u (в предположении отсутствия зоны нечувствительности регулятора) в соответствии со следующим алгоритмом:

$$u_{n+1} = u_n + \Delta u \Phi_{n+1}, \quad (18)$$

где $\Phi_{n+1} = \text{sign}(\Delta P_n) \text{sign} \Phi_n$ — функция переключения на $(n + 1)$ -м шаге квантования по времени; u_n , u_{n+1} — управляющее воздействие на n -м и $(n + 1)$ -м шагах квантования по времени; Δu — приращение управляющего воздействия на каждом шаге квантования по времени; ΔP_n — приращение критерия на n -м шаге.

Известно [6], что для обеспечения устойчивости экстремальной системы управления при наличии

запаздывания шаг квантования Δt должен выбираться из обеспечения условия $\Delta t > 2T_{\text{д}}$.

Математическое моделирование экстремальной системы управления проведено с использованием пакета прикладных программ MATLAB с расширением *Simulink*. Схема набора экстремальной системы управления приведена на рис. 6. Линейную интерполяцию входного сигнала осуществляли в соответствии с заданной табличной функцией (см. таблицу).

$U_{\text{вх}}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{\text{вых}}$	0,3	1	2,7	4	4,6	5	4,6	4	2,7	1	0,3

Результат численного решения в соответствии с рис. 6 для параметров $T_{\text{д}} = 0,2$ с; $\Delta t = 1$ с, $K_1 = 0,5$, $K_p = 10$ и таблицы для блока 2 представлен на рис. 7.

Результат моделирования показывает, что в экстремальной системе управления после переходного процесса длительностью 12,5 с возникают автоколебания около положения экстремума с относительной амплитудой 10 % и периодом 1 с.

Проведенное исследование показывает принципиальную возможность построения гидроакустического скважинного генератора с экстремальной системой управления амплитудой пульсаций давления на резонансной частоте стержневого излучателя.

Список литературы

1. Ганиев Р. Ф. Волновые машины и технологии (введение в волновую технологию). М.: Научно-издательский центр "Регулярная и хаотическая динамика", 2008. 192 с.
2. Тимошенко С. П., Янг Д. Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле. М.: Машиностроение, 1985. 472 с.
3. Кравцов Я. И., Марфин Б. А. Автоколебание в струйном излучателе. Математическая модель // Труды Академэнерго. 2006. № 1. С. 201—205.
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
5. Попов Д. Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. М.: Машиностроение, 1987. 464 с.
6. Власов К. П. Теория автоматического управления. Харьков: Изд-во "Гуманитарный центр", 2007. 524 с.
7. Нашиф А., Джоунс Д., Хендерсон Дж. Демпфирование колебаний. М.: Мир, 1988. 448 с.
8. Филиппов А. П. Колебания деформируемых систем. М.: Машиностроение, 1970. 734 с.

Е. С. Брискин, д-р. физ.-мат. наук, проф.,
dtm@vstu.ru,

А. В. Малолетов, канд. техн. наук.,

Д. О. Лихобабин, аспирант,

lihobabin@yandex.ru,

Волгоградский государственный
технический университет

Об управлении режимом работы скважинной штанговой насосной установки

Рассматривается и изучается работа скважинной штанговой насосной установки. Решается задача об управлении угловой скоростью ведущего кривошипа станка-качалки в целях согласования скорости плунжера со скоростью фильтрации жидкости.

Ключевые слова: скважинная штанговая насосная установка, проницаемость, скорость фильтрации, объемный расход

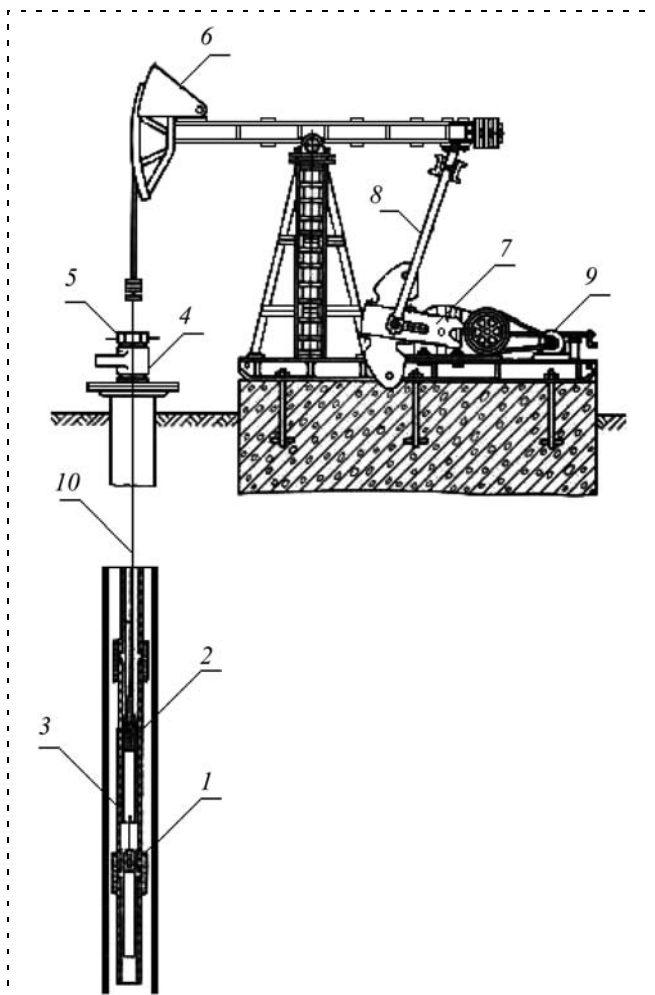


Рис. 1. Скважинная штанговая насосная установка:
1 — всасывающий клапан; 2 — нагнетательный клапан; 3 — штанговый насос; 4 — устьева обвязка; 5 — устьева сальник; 6 — балансир; 7 — кривошип; 8 — шатун; 9 — электродвигатель; 10 — колонна насосных штанг

Введение

В настоящее время для добычи нефти широко применяются скважинные штанговые насосные установки (СШНУ). В основу способа эксплуатации скважин штанговыми насосами положено использование объемного насоса возвратно-поступательного действия, спускаемого в скважину и приводимого в действие приводом, расположенным на поверхности [1]. Типовая схема СШНУ приведена на рис. 1.

Скважинный насос представляет собой насос одностороннего действия. Он состоит из цилиндра, прикрепленного к колонне насосно-компрессорных труб, плунжера, соединенного с колонной штанг. Нагнетательный клапан установлен на плунжере, а всасывающий — в нижней части цилиндра. Связанный с колонной штанг плунжер также совершает возвратно-поступательное движение. На рис. 2 приведена схема таких насосов.

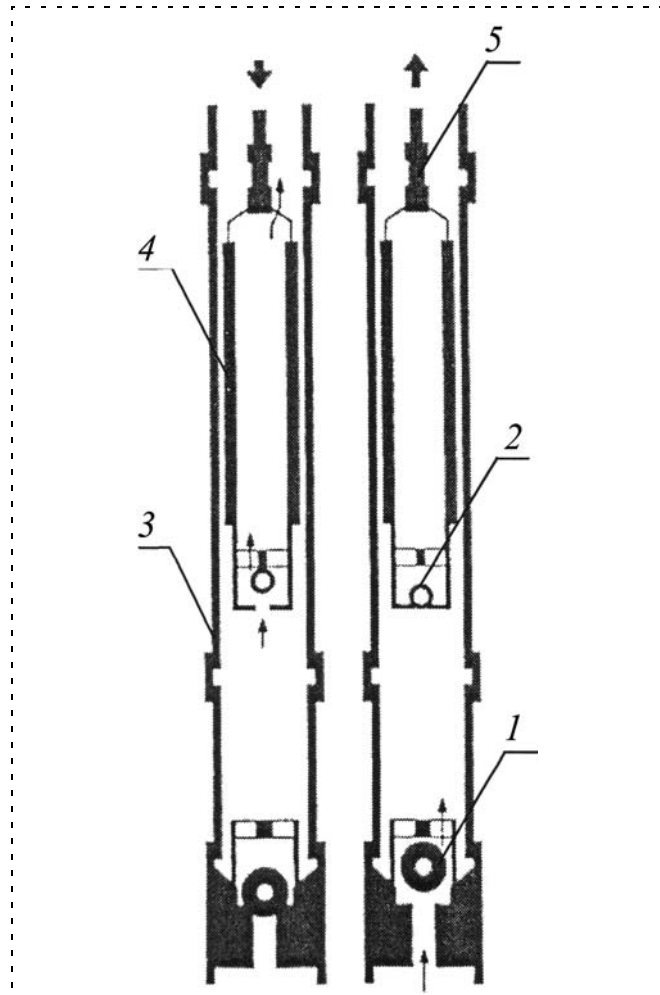


Рис. 2. Схема насоса:
1 — всасывающий клапан; 2 — нагнетательный клапан; 3 — цилиндр насоса; 4 — плунжер; 5 — насосная штанга

При ходе плунжера 4 вверх (рис. 2) всасывающий клапан 1 открывается, и жидкость под действием пластового давления через открытый клапан поступает в цилиндр 3, заполняя подплунжерное пространство. Нагнетательный клапан 2 при этом закрыт давлением столба жидкости в насосно-компрессорных трубах, и жидкость, находящаяся в цилиндре 3 в надплунжерном пространстве, выталкивается плунжером 4 в насосно-компрессорные трубы и далее через устьевое оборудование в отводящую трубу.

При ходе плунжера 4 вниз в подплунжерном пространстве создается повышенное давление жидкости, под воздействием которого всасывающий клапан 1 закрывается, а нагнетательный 2 открывается, и жидкость через нагнетательный клапан, внутреннюю полость плунжера 4 и корпус клапана открытого типа поступает в надплунжерное пространство.

Постановка задачи

В процессе эксплуатации нефтяных скважин, в том числе скважинными штанговыми насосами, возможно снижение проницаемости призабойной зоны пласта. По мере разработки залежей приток нефти и газа в скважину постепенно уменьшается. Причина этого заключается в засорении призабойной зоны — заполнении порового пространства коллекторов твердыми частицами породы, тяжелыми смолистыми остатками нефти, солями, выпадающими от пластовой воды, отложениями парафина, гидратами в газовых пластах и пр. Поэтому при ходе плунжера скважинного штангового насоса вверх в соответствии с законом движения станка-качалки жидкость под воздействием пластового давления может не успеть заполнить подплунжерное пространство, что негативно влияет на весь технологический процесс и приводит в конечном итоге к срыву подачи насоса.

Для обеспечения энергетически эффективного режима работы привода станка-качалки следует управлять угловой скоростью ведущего кривошипа в пределах одного оборота [2], однако в данной статье ставится задача о согласовании средней угловой скорости ведущего кривошипа привода станка-качалки со скоростью фильтрации жидкости.

Уравнения движения станка-качалки

В основе конструкции станка-качалки, являющегося индивидуальным приводом скважинного штангового насоса, лежит четырехзвенный рычажный механизм, кинематическая схема которого приведена на рис.3.

Коромысло механизма (звено ML) имеет протяженную "хвостовую" часть, на которой закреплена направляющая в виде дуги окружности с центром

в оси вращения коромысла. На эту направляющую ложится гибкая подвеска (трос), соединенная с колонной штанг D, приводящих в движение плунжер скважинного штангового насоса. Такая конструкция обеспечивает прямолинейное поступательное движение штанги и плунжера насоса.

При вращательном движении кривошипа OK вокруг оси O коромысло LM совершает вращательное движение вокруг оси O₁. Между углом поворота кривошипа OK $\varphi = \varphi(t)$ и углом поворота коромысла LM $\gamma_3(t)$ устанавливается связь:

$$\gamma_3 = \gamma_3(\varphi). \quad (1)$$

Тогда, дифференцируя (1), получим

$$\dot{\gamma}_3 = \frac{\partial \gamma_3}{\partial \varphi} \dot{\varphi};$$

$$\ddot{\gamma}_3 = \frac{\partial^2 \gamma_3}{\partial \varphi^2} \dot{\varphi}^2 + \frac{\partial \gamma_3}{\partial \varphi} \ddot{\varphi}.$$

Координата (относительно некоторого центрального положения), скорость и ускорение точки подвеса D определяются следующими формулами:

$$\begin{aligned} z_D &= r_3(\gamma_3 - \pi); \\ \dot{z}_D &= r_3 \dot{\gamma}_3; \\ \ddot{z}_D &= r_3 \ddot{\gamma}_3, \end{aligned} \quad (2)$$

где r_3 — длина звена O₁M.

Пренебрегая деформацией штанг и инерционными силами, можно считать, что скорость и ускорение точки подвеса штанг равны соответственно скорости и ускорению движения плунжера. Максимальное значение координаты $z_{D\max}$ соответствует нижнему положению плунжера насоса, минимальное — $z_{D\min}$ — верхнему положению. Разница

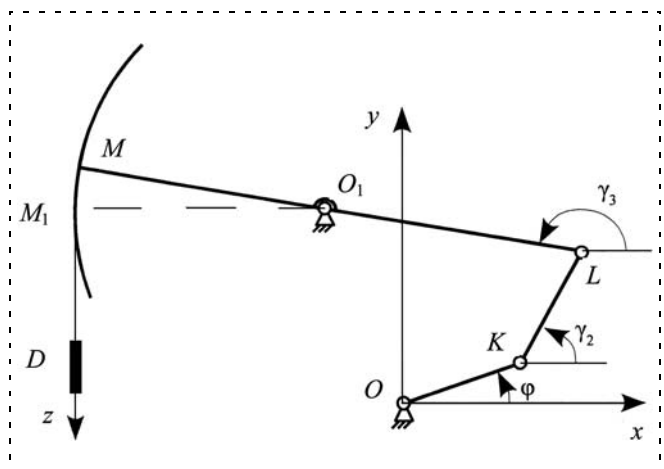


Рис. 3. Кинематическая схема станка-качалки

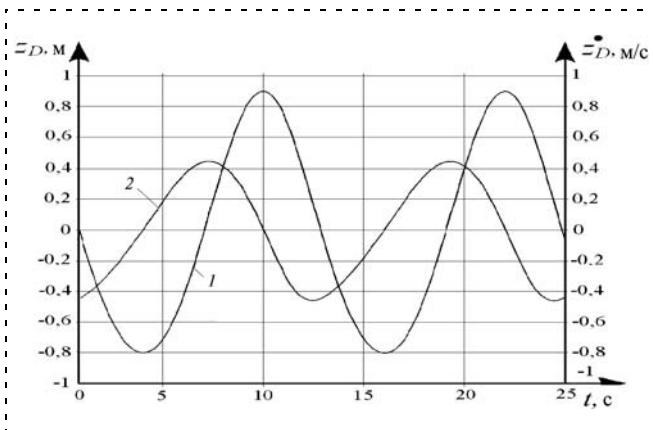


Рис. 4. Зависимости координаты (1) и скорости (2) плунжера от времени

между этими значениями определяет ход плунжера и позволяет определить объем жидкости, извлекаемой за один цикл работы.

В качестве примера рассматривается станок-качалка с параметрами: размеры механизма — $OK = 0,7$ м; $KL = 3,2$ м; $O_1L = 2,5$ м; $r_3 = 3,0$ м; координаты точки O_1 в выбранной системе координат (рис. 3) $x_{O_1} = 2,45$ м; $y_{O_1} = 3,16$ м; при равномерном вращательном движении кривошипа

$$\varphi = \varphi(t),$$

$$\omega = \dot{\varphi} = 5 \text{ мин}^{-1} = 0,524 \text{ рад/с}; \quad \ddot{\varphi} = 0.$$

Соответствующие рассмотренному случаю закон движения плунжера и скорость его движения показаны на рис. 4. Из графика видно, что для рассматриваемого примера закон движения плунжера близок к синусоидальному.

На рис. 5 показана скважина, оборудованная штанговым насосом, где h — высота столба жидкости в обсадной трубе скважины 10 над уровнем, на котором установлен скважинный штанговый насос; ξ — изменение уровня жидкости в обсадной трубе при движении плунжера насоса 4.

Пусть $P_{\text{атм}}$ — давление над столбом жидкости в обсадной трубе 10 (атмосферное давление), $P_{\text{пласт}}$ — давление на контуре питания скважины, $P_{\text{заб}}$ — забойное давление (вблизи перфорационных отверстий 7). В состоянии покоя (при неработающем станке-качалке) в системе скважина—пласт существует равновесие:

$$P_{\text{пласт}} = P_{\text{заб}} = P_{\text{атм}} + \rho gh.$$

При движении плунжера насоса 4 (рис. 5) вверх объемный расход жидкости Q через проходное отверстие 8 всасывающего клапана 3 определяется выражением

$$Q = Q_1 + Q_2, \quad (3)$$

где Q_1 — объемный расход жидкости, поступающей из пласта 9 через перфорационные отверстия 7 обсадной трубы 10; Q_2 — объемный расход жидкости в пространстве между обсадной трубой 10 и насосно-компрессорной трубой 1 (затрубное пространство).

В соответствии с формулой Дюпюи для объемного расхода [3]

$$Q_1 = \frac{2\pi kh_1}{\mu \ln r_k} \Delta P,$$

где k — проницаемость коллектора; h_1 — мощность (толщина нефтяного пласта); μ — кинематическая вязкость жидкости; r_k — радиус контура питания скважины; ΔP — разность давлений, за счет которого движется жидкость.

Так как $\Delta P = P_{\text{пласт}} - P_{\text{заб}}$, то обозначив $\alpha = \frac{2\pi kh_1}{\mu \ln r_k}$, получим

$$Q_1 = \alpha(P_{\text{пласт}} - P_{\text{заб}}); \quad (4)$$

$$Q_2 = S_{\text{затр}} \dot{\xi}, \quad (5)$$

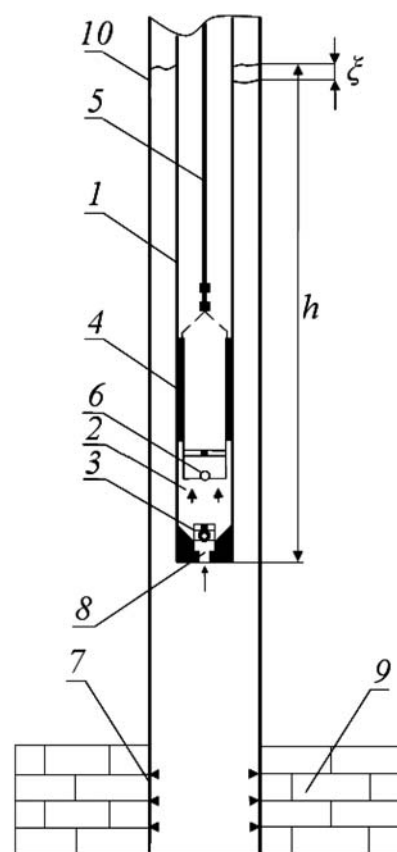


Рис. 5. Компонновка скважины, оборудованной штанговым насосом:

1 — колонна насосно-компрессорных труб; 2 — подплунжерное пространство; 3 — всасывающий клапан; 4 — плунжер насоса; 5 — колонна насосных штанг; 6 — нагнетательный клапан; 7 — перфорационные отверстия; 8 — проходное отверстие всасывающего клапана; 9 — пласт; 10 — колонна обсадных труб

где $\dot{\xi}$ — скорость изменения уровня жидкости в затрубном пространстве; $S_{затр}$ — площадь кольца, образованного насосно-компрессорной 1 и обсадной 10 трубами (рис. 5).

Из уравнения неразрывности потока при условии, что пластовая жидкость заполняет весь объем подплунжерного пространства 2, не отрываясь от поверхности плунжера насоса 4 при движении его вверх, имеем,

$$Q = vS_{кл} = \dot{z}_D S_{пл}, \quad (6)$$

где v — скорость жидкости в проходном отверстии 8 всасывающего клапана 3 при движении плунжера насоса 4 вверх (рис. 5); $S_{кл}$ — площадь поперечного сечения проходного отверстия 8; $S_{пл}$ — площадь поперечного сечения плунжера 4 насоса (внутренний диаметр цилиндра).

В соответствии с уравнением Бернулли

$$P_{заб} = \rho \frac{v^2}{2} + P_{подпл}, \quad (7)$$

где $P_{подпл}$ — давление в подплунжерном пространстве 2 насоса (рис. 5).

Так как при движении плунжера насоса вверх в подплунжерном пространстве образуется разрежение, то $P_{подпл} = 0$.

Объединяя (3), (4), (5), (6), получим

$$S_{пл} \dot{z}_D = S_{затр} \dot{\xi} + \alpha(P_{пласт} - P_{заб});$$

$$S_{пл} \dot{z}_D = S_{затр} \dot{\xi} + \alpha(P_{пласт} - P_{атм} - \rho g(h - \xi)).$$

Так как $P_{пласт} - P_{атм} - \rho gh = 0$, то

$$S_{пл} \dot{z}_D = S_{затр} \dot{\xi} + \alpha \rho g \xi. \quad (8)$$

Вместе с тем, так как в уравнении (7) $P_{подпл}$ не может быть отрицательным, должно выполняться неравенство

$$\rho g(h - \xi) + P_{атм} - \frac{\rho v^2}{2} \geq 0. \quad (9)$$

Объединяя (2), (6), (9), получаем

$$\omega \leq \frac{S_{кл}}{r_3 S_{пл}} \sqrt{\frac{2}{\rho} [\rho g(h - \xi) + P_{атм}]},$$

откуда определяется максимально допустимая угловая скорость ω_{\max} привода станка-качалки как функции изменения уровня жидкости ξ .

При движении плунжера насоса вниз $Q = 0$, тогда уравнение (8) имеет вид

$$S_{затр} \dot{\xi} + \alpha \rho g \xi = 0. \quad (10)$$

Совместное решение уравнений (8) и (10) позволяет построить зависимость изменения уровня жидкости в обсадной трубе от времени при различных параметрах α (рис. 6). При параметрах скважины $h_1 = 5$ м, $k = 75$ мкм², $\mu = 1,8$ мПа · с, $r_k = 100$ м значение $\alpha = 2,58 \cdot 10^{-12}$.

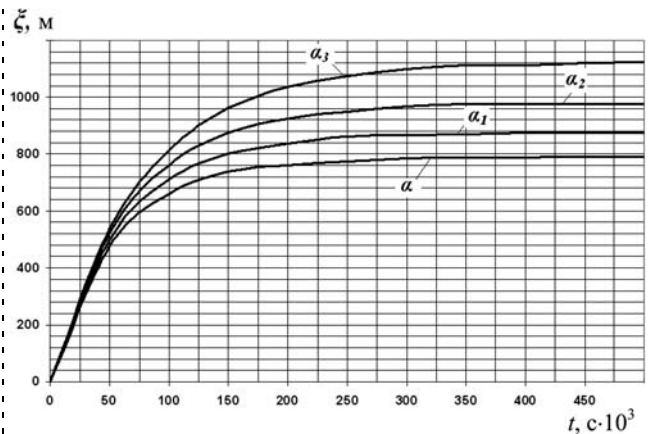


Рис. 6. Изменение уровня ξ в затрубном пространстве при работе станка-качалки при различных параметрах α ($\alpha_1 = 0,9\alpha$, $\alpha_2 = 0,8\alpha$, $\alpha_3 = 0,7\alpha$)

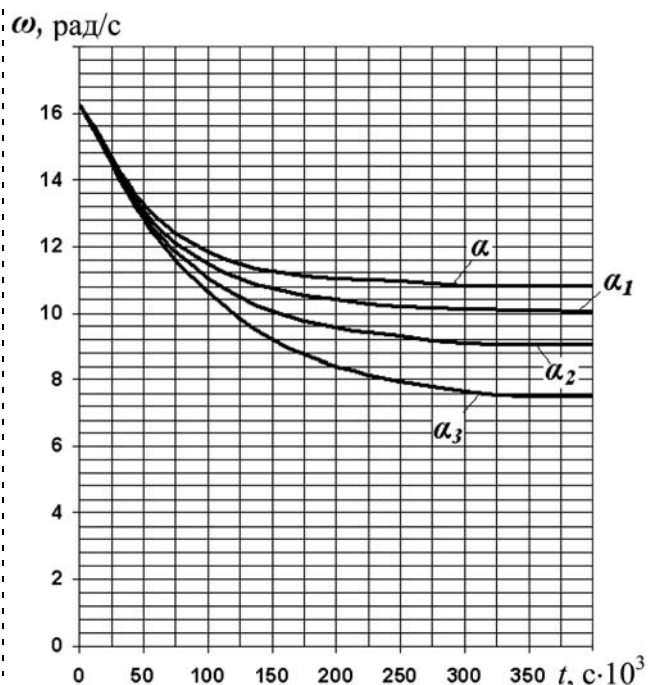


Рис. 7. Изменение угловой скорости вала приводного двигателя станка-качалки ω при различных α ($\alpha_1 = 0,9\alpha$, $\alpha_2 = 0,8\alpha$, $\alpha_3 = 0,7\alpha$)

На графике (рис. 7) показано изменение угловой скорости ведущего кривошипа станка-качалки от времени при различных α . Из графика видно, что для каждой скважины, характеризующейся параметром α , существует собственная минимальная эксплуатационная угловая скорость вала приводного двигателя станка-качалки.

Анализ уравнений движения жидкости через всасывающий клапан скважинного штангового насоса показывает, что между скоростью движения плунжера и уровнем жидкости в затрубном пространстве существует связь. Поэтому для обеспечения эффективной работы станка-качалки может быть реализована система автоматического управления угловой скоростью вала приводного двигателя.

Для реализации системы автоматического управления режимами работы установки скважинного штангового насоса предлагалось использовать датчик текущего дебита — стационарный динамограф с нейромодулем для распознавания динамограммы [4].

В рассматриваемой задаче в скважину целесообразно установить датчик уровня, который после достижения в затрубном пространстве динамического уровня жидкости будет регистрировать его

отклонение и давать сигнал системе управления на изменение угловой скорости вала асинхронного двигателя станка-качалки. Такая система управления позволит избежать срыва подачи штангового насоса и неполного наполнения плунжера. Кроме того, при изменении проницаемости коллектора с течением времени система сможет выбрать такую эксплуатационную угловую скорость вала, при которой отбор пластовой жидкости будет наиболее эффективен.

Список литературы

1. **Ивановский В. Н., Дарищев В. И., Сабилов А. А., Каштанов В. С., Пекин С. С.** Скважинные насосные установки для добычи нефти. М.: ГУП Изд-во "Нефть и газ" РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2002. 824 с.
2. **Брискин Е. С., Калинин Я. В.** Об энергетически эффективных алгоритмах движения шагающих машин с цикловыми двигателями // Изв. РАН. ТиСУ. 2011. № 2. С. 170—176.
3. **Чарный И. А.** Подземная гидрогазодинамика. М.-Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", Институт компьютерных исследований, 2006. 436 с.
4. **Шаньгин Е. С., Тагирова К. Ф., Исбер Ф. А., Михеев П. С.** Управление режимами работы установки скважинного штангового насоса на основе данных динамометрирования // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 8 С. 46—49.

ИНФОРМАЦИЯ

16—19 апреля 2012 г. в Москве в ИПУ им. В. А.Трапезникова РАН состоится

3-я Российская конференция с международным участием

«Технические и программные средства управления, контроля и измерения» (УКИ-12)

Тематические направления

1. Теория, методы исследования и проектирования, опыт применения технических средств, основанных на различных физических и схемотехнических принципах.
2. Теория, алгоритмы и программное обеспечение систем УКИ.
3. Анализ состояния, тенденций и перспектив развития систем УКИ.
4. Дискретно-событийные модели в системах УКИ, включая сетцентрические, логические, на основе нечеткой логики, сети Петри и др.
5. Создание средств систем УКИ на основе новых современных технологий.
6. Компьютерное и физическое моделирование технических и программных средств систем УКИ.
7. Многопроцессорные и многомашинные системы как средства систем УКИ; их архитектуры, надежность, отказоустойчивость, диагностируемость.
8. Теоретические и прикладные аспекты оценивания и повышения качества средств систем УКИ, метрологическое обеспечение создания и применения средств УКИ, их испытания и сертификация.
9. Методы проектирования технических и программных средств систем УКИ для работы в экстремальных условиях и применения в специфических областях.
10. Особенности построения технических и программных средств встроенных, сетевых систем УКИ.
11. Вопросы обучения в области средств систем УКИ.

Подробную информацию о конференции
см. на сайте: <http://cmm.ipu.ru>

УДК 519.854.33

Д. И. Кузовлев, аспирант,
А. П. Тизик, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,
Ю. П. Тресков, науч. сотр.,
 tizik_ap@mail.ru,
 ВЦ РАН, г. Москва

Декомпозиционный алгоритм для решения транспортной задачи с ограниченными пропускными способностями*

Рассматривается новый декомпозиционный метод решения транспортной задачи с ограниченными пропускными способностями. Метод основан на декомпозиции исходной задачи на фиксированное множество одномерных задач, затем, при необходимости, на ряд двумерных оптимизационных задач. Вопрос о допустимости решается потоковым методом. Целочисленность и монотонность по целевой функции итерационного процесса обеспечивает конечность алгоритма. В результате может получиться или единственное оптимальное решение исходной транспортной задачи с ограниченными пропускными способностями, или система ограничений, из которой можно получить все оптимальные решения. Конструкции алгоритма иллюстрируются на конкретном примере.

Ключевые слова: транспортная задача, декомпозиция, потоки в сетях

Введение

Термин "транспортная задача" в связи с общностью математической записи употребляется по отношению к большому числу разнообразных по своему содержанию задач. Среди них — задача о распределении изделий между предприятиями, регулирование парка вагонов, оптимизация структуры энергетического баланса, распределение посевной площади, задача о смеси и т. д. Задачи транспортного типа применяются также в системах СПУ, АСУ и в других системах, где возникают соответствующие формализации. В данной статье метод последовательных изменений параметров функционала для транспортных задач [1] распространяется на транспортные задачи с ограниченными пропускными способностями. Специфика транспортной задачи с ограниченными способностями выявляет особенности применения данного алгоритма. Заметим, что применение стандартных подходов, например, симплекс-метода для указанного

класса задач предполагает дополнительные трудоемкие процедуры и существенное усложнение метода. В данном рассмотрении метод [1] напрямую применяется для транспортных задач с ограниченными пропускными способностями. В литературе алгоритмы решения транспортных задач часто (см., например [2]) излагаются на конкретных примерах с небольшой размерностью, так что конструкции для общего случая становятся очевидными.

Постановка и решение задачи

Имеется транспортная задача с ограниченными пропускными способностями линий:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i, \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad (2)$$

$$0 \leq x_{ij} \leq d_{ij} \leq \min(a_i, b_j), \quad i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n; \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min. \quad (4)$$

В работе [1] предложен алгоритм решения задачи (1)—(4) без верхнего ограничения в (4). Покажем на конкретном примере особенности применения алгоритма из работы [1] в случае строгих неравенств в верхних ограничениях (3). В такой постановке, вообще говоря, может не оказаться допустимых решений, поэтому первым этапом решения поставленной задачи является проверка их существования. Это можно сделать с помощью известного метода расстановки пометок [3]. Вторым этапом, основным в алгоритме, является решение $m + n$ одномерных оптимизационных задач — по числу алгебраических ограничений в исходной задаче (1)—(4). Целевой функцией каждой одномерной задачи служит деленная на два часть целевой функции исходной задачи (1)—(4), содержащая переменные, имеющиеся в ее ограничениях. Если объединение оптимальных решений $m + n$ одномерных задач является допустимым решением исходной задачи, то, очевидно, тем самым получено оптимальное решение исходной задачи (1)—(4). Если на втором этапе оптимальное решение не получено, на третьем этапе последовательно решаются mn двумерных оптимизационных задач (пару ограни-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-01-00781-а).

чений составляет одно ограничение из (1) и одно ограничение из (2)). Целевой функцией двумерной задачи служит сумма целевых функций соответствующих одномерных задач. В оптимальном решении произвольной двумерной задачи значение целевой функции не меньше, чем сумма значений целевых функций в оптимальных решениях соответствующих одномерных задач. Далее каждая двумерная задача эквивалентно записывается в виде совокупности двух одномерных задач с модифицированными функционалами. Монотонный по функционалу ограниченный целочисленный итерационный процесс решения двумерных задач имеет предел. Если окончательно все одномерные задачи имеют единственное решение, то объединение этих решений есть оптимальное решение исходной задачи (1)–(4). Если решения одномерных задач не единственны (задаются в виде уравнений), то любое допустимое решение системы этих уравнений есть оптимальное решение исходной задачи (1)–(4). Полученная система уравнений может оказаться несовместной. В этом случае на четвертом этапе находится максимальный поток по транспортной сети, в которой используются только попавшие в уравнения линии. Полученный максимальный поток, не являющийся допустимым решением исходной задачи, позволяет сформировать новую транспортную задачу меньшей размерности с обобщенными производителями и обобщенными потребителями. В новой задаче алгоритм возвращается на второй этап и т. д.

В решаемом примере, ограничения и целевая функция которого выписаны ниже, имеется пять пунктов производства и пять пунктов потребления:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^5 x_{1j} = 15, \quad \sum_{j=1}^5 x_{2j} = 23, \quad \sum_{j=1}^5 x_{3j} = 25, \quad \sum_{j=1}^5 x_{4j} = 12, \\ \sum_{j=1}^5 x_{5j} = 14, \quad \sum_{i=1}^5 x_{i1} = 20, \quad \sum_{i=1}^5 x_{i2} = 10, \quad \sum_{i=1}^5 x_{i3} = 19, \\ \sum_{i=1}^5 x_{i4} = 18, \quad \sum_{i=1}^5 x_{i5} = 22, \quad x_{ij} \geq 0, \quad 1 \leq i, j \leq 5, \\ x_{11} \leq 6, \quad x_{12} \leq 5, \quad x_{13} \leq 1, \quad x_{14} \leq 2, \quad x_{15} \leq 5, \\ x_{21} \leq 15, \quad x_{22} \leq 6, \quad x_{23} \leq 4, \quad x_{24} \leq 5, \quad x_{25} \leq 6, \\ x_{31} \leq 10, \quad x_{32} \leq 8, \quad x_{33} \leq 10, \quad x_{34} \leq 6, \quad x_{35} \leq 12, \\ x_{41} \leq 2, \quad x_{42} \leq 1, \quad x_{43} \leq 4, \quad x_{44} \leq 3, \quad x_{45} \leq 3, \\ x_{51} \leq 1, \quad x_{52} \leq 4, \quad x_{53} \leq 5, \quad x_{54} \leq 5, \quad x_{55} \leq 5. \end{aligned}$$

Необходимо:

$$\begin{aligned} 2x_{11} + 2x_{12} + 6x_{13} + 8x_{14} + 10x_{15} + 2x_{21} + 2x_{22} + \\ + 4x_{23} + 6x_{24} + 8x_{25} + 12x_{31} + 6x_{32} + 4x_{33} + 6x_{34} + \\ + 8x_{35} + 8x_{41} + 6x_{42} + 8x_{43} + 4x_{44} + 6x_{45} + 10x_{51} + \\ + 8x_{52} + 10x_{53} + 6x_{54} + 4x_{55} \rightarrow \min. \end{aligned}$$

Первый этап решения

С помощью расстановки пометок для нахождения максимального потока [3] проверяется наличие допустимого решения. Допустимое решение поставленной задачи существует: $x_{11} = 4, x_{12} = 5, x_{13} = 1, x_{14} = 2, x_{15} = 3, x_{21} = 14, x_{22} = 5, x_{23} = 0, x_{24} = 2, x_{25} = 2, x_{31} = 0, x_{32} = 0, x_{33} = 10, x_{34} = 6, x_{35} = 9, x_{41} = 2, x_{42} = 0, x_{43} = 4, x_{44} = 3, x_{45} = 3, x_{51} = 0, x_{52} = 0, x_{53} = 4, x_{54} = 5, x_{55} = 5$. Следовательно, можно перейти ко второму этапу.

Второй этап решения

В соответствии с [1] решаются 10 одномерных задач. Второй этап не дает допустимого решения, так как легко видеть, что, например, в одномерной задаче для первого производителя $x_{14} = 2$, а в одномерной задаче для четвертого потребителя $x_{14} = 0$. Следовательно, нужно перейти к третьему этапу.

Третий этап решения

На третьем этапе решается последовательность двумерных задач [1]. После решения 50 двумерных задач коэффициенты целевых функций одномерных задач перестали изменяться.

Одномерные задачи для производителей и их решения приняли следующий вид:

$$\begin{aligned} x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} = 15 \\ x_{11} + x_{12} + 4x_{13} + 4x_{14} + 4x_{15} \rightarrow \min \\ x_{11} = 6; \quad x_{12} = 5; \quad x_{13} + x_{14} + x_{15} = 4; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} + x_{25} = 23 \\ x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} + x_{25} \rightarrow \min \\ x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} + x_{25} = 23; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_{31} + x_{32} + x_{33} + x_{34} + x_{35} = 25 \\ 8x_{31} + 5x_{32} + 2x_{33} + 2x_{34} + 2x_{35} \rightarrow \min \\ x_{31} = 0; \quad x_{32} = 0; \quad x_{33} + x_{34} + x_{35} = 25; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_{41} + x_{42} + x_{43} + x_{44} + x_{45} = 12 \\ 7x_{41} + 5x_{42} + 5x_{43} + x_{44} + 4x_{45} \rightarrow \min \\ x_{41} = 1; \quad x_{42} = 1; \quad x_{43} = 4; \quad x_{44} = 3; \quad x_{45} = 3; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_{51} + x_{52} + x_{53} + x_{54} + x_{55} = 14 \\ 8x_{51} + 7x_{52} + 7x_{53} + 2x_{54} + 2x_{55} \rightarrow \min \\ x_{54} = 5; \quad x_{55} = 5; \quad x_{52} + x_{53} = 4; \quad x_{51} = 0. \end{aligned}$$

Одномерные задачи для потребителей и их решения приняли следующий вид:

$$\begin{aligned} x_{11} + x_{21} + x_{31} + x_{41} + x_{51} = 20 \\ x_{11} + x_{21} + 4x_{31} + x_{41} + 2x_{51} \rightarrow \min \\ x_{11} + x_{21} + x_{41} = 20; \quad x_{31} = 0; \quad x_{51} = 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_{12} + x_{22} + x_{32} + x_{42} + x_{52} = 10 \\ x_{12} + x_{22} + x_{32} + x_{42} + x_{52} \rightarrow \min \\ x_{12} + x_{22} + x_{32} + x_{42} + x_{52} = 10; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}x_{13} + x_{23} + x_{33} + x_{43} + x_{53} &= 10 \\2x_{13} + 3x_{23} + 2x_{33} + 3x_{43} + 3x_{53} &\rightarrow \min \\x_{13} = 1; x_{33} = 10; x_{23} + x_{43} + x_{53} &= 8;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}x_{14} + x_{24} + x_{34} + x_{44} + x_{54} &= 18 \\4x_{14} + 5x_{24} + 4x_{34} + 3x_{44} + 4x_{54} &\rightarrow \min \\x_{14} = 2; x_{24} = 2; x_{34} = 6; x_{44} = 3; x_{54} &= 5;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}x_{15} + x_{25} + x_{35} + x_{45} + x_{55} &= 22 \\6x_{15} + 7x_{25} + 6x_{35} + 2x_{45} + 2x_{55} &\rightarrow \min \\x_{45} = 3; x_{55} = 5; x_{15} + x_{35} = 14; x_{35} &= 0.\end{aligned}$$

Легко видеть, что выписанная система ограничений несовместна. Из первой одномерной задачи первой группы имеем

$$x_{13} + x_{14} + x_{15} = 4,$$

а из третьей, четвертой и пятой одномерных задач второй группы соответственно —

$$x_{13} = 1; x_{14} = 2; x_{15} + x_{35} = 14.$$

Это с учетом того, что $x_{35} \leq 12$, дает $x_{15} \geq 2$, т. е.

$$x_{13} + x_{14} + x_{15} \geq 5.$$

Применяя лемму из работы [1], увеличим все коэффициенты целевой функции первой одномерной задачи первой группы на единицу. Целевая функция этой задачи примет вид

$$2x_{11} + 2x_{12} + 5x_{13} + 5x_{14} + 5x_{15} \rightarrow \min.$$

Затем уменьшим на единицу каждый из коэффициентов при x_{13} , x_{14} и x_{15} , увеличив на единицу соответствующие коэффициенты в третьей, четвертой и пятой одномерных задачах второй группы. В итоге целевая функция первой одномерной задачи первой группы примет вид

$$2x_{11} + 2x_{12} + 4x_{13} + 4x_{14} + 4x_{15} \rightarrow \min.$$

Целевые функции третьей, четвертой и пятой одномерных задач второй группы соответственно примут вид

$$\begin{aligned}3x_{13} + 3x_{23} + 2x_{33} + 3x_{43} + 3x_{53} &\rightarrow \min; \\5x_{14} + 5x_{24} + 4x_{34} + 3x_{44} + 4x_{54} &\rightarrow \min; \\7x_{15} + 7x_{25} + 6x_{35} + 2x_{45} + 2x_{55} &\rightarrow \min.\end{aligned}$$

В итоге решения третьей, четвертой и пятой одномерных задач второй группы целевые функции примут вид

$$\begin{aligned}x_{33} = 10, x_{13} + x_{23} + x_{43} + x_{53} = 9; x_{14} + x_{24} &= 4, \\x_{34} = 6, x_{44} = 3, x_{54} = 5; x_{45} = 3, x_{55} = 5, x_{35} &= 12, \\x_{15} + x_{25} &= 2.\end{aligned}$$

Тем самым несовместность системы ограничений по переменным x_{13} , x_{14} , x_{15} устранена. Однако в целом несовместность полученной системы ограничений сохраняется — группа переменных x_{33} ,

x_{34} , x_{35} принимает различные значения в одномерных задачах. Снова применяя лемму, получим после преобразований целевую функцию третьей одномерной задачи из первой группы

$$9x_{31} + 6x_{32} + 3x_{33} + 3x_{34} + 3x_{35} \rightarrow \min,$$

целевые функции третьей, четвертой и пятой одномерных задач второй группы

$$\begin{aligned}3x_{13} + 3x_{23} + 3x_{33} + 2x_{43} + 3x_{53} &\rightarrow \min; \\5x_{14} + 5x_{24} + 5x_{34} + 2x_{44} + 4x_{54} &\rightarrow \min; \\7x_{15} + 7x_{25} + 6x_{35} + 4x_{45} + 2x_{55} &\rightarrow \min.\end{aligned}$$

Решения третьей, четвертой и пятой одномерных задач второй группы примут вид

$$\begin{aligned}x_{43} = 4, x_{13} + x_{23} + x_{33} + x_{53} = 15; x_{54} = 5, x_{44} = 3; \\x_{14} + x_{24} + x_{34} = 10; x_{55} = 5, x_{45} = 3, x_{35} = 12, \\x_{15} + x_{25} = 2.\end{aligned}$$

Остальные одномерные задачи сохраняют свои ранее найденные решения. Из полученных ограничений легко находятся допустимые (а следовательно, оптимальные) решения исходной транспортной задачи с ограниченными пропускными способностями. Ниже приведены все оптимальные решения исходной задачи.

Первое оптимальное решение:

$$\begin{aligned}x_{11} = 6, x_{12} = 5, x_{13} = 1, x_{14} = 1, x_{15} = 2; \\x_{21} = 13, x_{22} = 2, x_{23} = 3, x_{24} = 5; \\x_{33} = 9, x_{34} = 4, x_{35} = 12; \\x_{41} = 1, x_{42} = 1, x_{43} = 4, x_{44} = 3, x_{45} = 3; \\x_{52} = 2, x_{53} = 2, x_{54} = 5, x_{55} = 5.\end{aligned}$$

Второе оптимальное решение:

$$\begin{aligned}x_{11} = 6, x_{12} = 5, x_{13} = 1, x_{14} = 1, x_{15} = 2; \\x_{21} = 13, x_{22} = 1, x_{23} = 4, x_{24} = 5; \\x_{33} = 9, x_{34} = 4, x_{35} = 12; \\x_{41} = 1, x_{42} = 1, x_{43} = 4, x_{44} = 3, x_{45} = 3; \\x_{52} = 3, x_{53} = 1, x_{54} = 5, x_{55} = 5.\end{aligned}$$

Третье оптимальное решение:

$$\begin{aligned}x_{11} = 6, x_{12} = 5, x_{14} = 2, x_{15} = 2; \\x_{21} = 13, x_{22} = 1, x_{23} = 4, x_{24} = 5; \\x_{33} = 10, x_{34} = 3, x_{35} = 12; \\x_{41} = 1, x_{42} = 1, x_{43} = 4, x_{44} = 3, x_{45} = 3; \\x_{52} = 3, x_{53} = 1, x_{54} = 5, x_{55} = 5.\end{aligned}$$

Четвертое оптимальное решение:

$$\begin{aligned}x_{11} = 6, x_{12} = 5, x_{14} = 2, x_{15} = 2; \\x_{21} = 13, x_{22} = 2, x_{23} = 4, x_{24} = 4; \\x_{33} = 9, x_{34} = 4, x_{35} = 12; \\x_{41} = 1, x_{42} = 1, x_{43} = 4, x_{44} = 3, x_{45} = 3; \\x_{52} = 2, x_{53} = 2, x_{54} = 5, x_{55} = 5.\end{aligned}$$

Пятое оптимальное решение:

$$\begin{aligned}x_{11} &= 6, x_{12} = 5, x_{14} = 2, x_{15} = 2; \\x_{21} &= 13, x_{22} = 2, x_{23} = 3, x_{24} = 5; \\x_{33} &= 10, x_{34} = 3, x_{35} = 12; \\x_{41} &= 1, x_{42} = 1, x_{43} = 4, x_{44} = 3, x_{45} = 3; \\x_{52} &= 2, x_{53} = 2, x_{54} = 5, x_{55} = 5.\end{aligned}$$

Общая стоимость перевозки составляет 446 единиц.

Заключение

Предлагаемый подход эффективен, например, для транспортных задач, в которых среди оптимальных

решений необходимо выбрать решение, удовлетворяющее каким-нибудь дополнительным экстремальным требованиям. Традиционными методами решать такие задачи было бы весьма затруднительно, так как не всегда удается выделить все оптимальные решения.

Список литературы

1. Тизик А. П., Цурков В. И. Метод последовательной модификации функционала для решения транспортной задачи // Автоматика и телемеханика. 2011. № 12.
2. Гольштейн Е. Г., Юдин Д. Б. Задачи линейного программирования транспортного типа. М.: Наука, 1969.
3. Форд Л. Р., Фалкерсон Д. Р. Потoki в сетях. М.: Мир, 1963.

УДК 658.5

Т. Г. Гришина, канд. техн. наук, доц.,
grishena@mail.ru,
МГТУ "СТАНКИН"

Вероятностное обоснование и принятие решений при управлении автоматизированным производством

Рассмотрены основные факторы, влияющие на обоснованность принимаемых решений при управлении автоматизированным производством. Предложен вероятностный метод определения обоснованности факторов, влияющих на обоснованность принимаемых решений. Приведено решение вопроса о количественных характеристиках влияния факторов, в частности, факторов неполноты и неточности информации.

Ключевые слова: вероятностный метод, обоснованность, критерии эффективности, неоптимизируемые параметры

Введение

Обоснованность относится к числу основных критериев, характеризующих орган управления, и может быть определена как степень приближения выбранного решения к оптимальному.

В динамике управления теснейшим образом переплетаются интуитивные и научно обоснованные решения. Научное обоснование является фундаментом, основой, на которую накладываются творческие замыслы человека. В свою очередь, построение этого фундамента, его "архитектура" основывается на совместном творчестве лица, принимающего решения, и лица, осуществляющего реализацию, без которого немислимо управление.

Принятые решения фактически включают в себя интуитивные оценки лица, принимающего решения (лица, осуществляющего реализацию), и научно

обоснованные рекомендации, полученные с помощью специального математического обеспечения управления (СМОУ). Таким образом, обоснованность зависит от трех основных факторов, отражающих ее объективное и субъективное содержание: H — глубины научного познания закономерностей управляемого процесса, т. е. от уровня развития науки; T — степени использования этих знаний при обосновании конкретного решения, т. е. от качества средств обеспечения управления и, в первую очередь, от качества СМОУ и технических средств автоматизации; $Ч$ — индивидуальных особенностей конкретного лица, принимающего решение (лица, осуществляющего реализацию) — его опыта, интуиции, психологического стереотипа, способности ориентироваться в быстро меняющейся обстановке, степени знания моделей СМОУ (главным образом, ограничений и допущений, принятых в моделях и учитываемых в них факторов).

Вероятностный метод определения обоснованности факторов, влияющих на обоснованность принимаемых решений

В качестве основных факторов, влияющих на обоснованность принимаемых решений, можно перечислить следующие:

1) квалификация лица, принимающего решения (лица, осуществляющего реализацию), выражающаяся в умении правильно оценить быстроменяющуюся обстановку и выбрать способ использования ресурсов (решение), в наибольшей степени отвечающий ей;

2) точность определения получаемых с помощью СМОУ параметров управления x_l ($l = \overline{1, u}$) и критериев эффективности $K(X)$, зависящая от качества учета включенных в математические модели факторов X ;

3) полнота оптимизационных математических моделей, связанная с наличием определенного числа учитываемых, но неоптимизируемых параметров управления;

4) точность и полнота информации об обстановке на момент реализации решения;

5) число m альтернативных вариантов, исследуемых с помощью СМОУ в процессе выработки решения.

Проанализируем, как в интересах оценки обособленности могут быть количественно учтены перечисленные факторы, кроме первого.

Точность рекомендаций, получаемых с помощью математических моделей СМОУ, можно оценивать по абсолютным или относительным отклонениям параметров управления или критериев эффективности от экстремальных значений, присущих оптимальным решениям, т. е. по следующим величинам:

$$\eta = \max_l \eta_l = \max_l |x_l^{(0)} - x_l|; \quad (1)$$

$$\eta' = \max_l \eta'_l = \max_l \left[1 - \frac{\min_l(x_b, x_l^{(0)})}{\max_l(x_b, x_l^{(0)})} \right]; \quad (2)$$

$$\delta = |K(X) - K(X^{(0)})|; \quad (3)$$

$$\delta' = 1 - \{\min[K(X), K(X^{(0)})]\} / \{\max[K(X), K(X^{(0)})]\}. \quad (4)$$

В реальных задачах применяют как величины η , так и δ , однако в дальнейшем будем иметь в виду величину η .

Погрешность η является важнейшей характеристикой алгоритмов выработки рекомендаций для принятия решений наряду со временем вычислений t . Как правило, имеют место нелинейные зависимости $\eta(t)$. Например, при использовании метода Кифера—Джонсона для отыскания экстремума унимодальной функции и переменных, как показано в работе [1], асимптотически справедливо следующее соотношение:

$$\eta = \exp(-at^{1/u}), \quad (5)$$

где a — параметр.

Погрешности $\eta_l = x_l^{(0)} - x_l$ являются случайными величинами. Примем закон их распределения нормальным с математическим ожиданием ошибки, равным нулю, и среднеквадратическим отклонением Δ_l . Несмотря на внешнюю обычность такого допущения, для каждого конкретного модуля СМОУ оно должно быть тщательно проверено.

Пусть также для простоты $\Delta_l = \Delta (l = \overline{1, u})$. Тогда плотность вероятностей ошибок выражается известным соотношением

$$\varphi(\eta) = \varphi(\eta_l) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\Delta} \exp[-(\eta_l/\sqrt{2}\Delta)^2]. \quad (6)$$

Ошибки в значениях параметров управления приводят и к ошибке в значении целевой функции $K(X)$. Пусть допустимой является ошибка в значении K , не превышающая величины ΔK . Одномерной области $[-\Delta K, \Delta K]$ на оси критерия может отвечать область сложной конфигурации в пространстве параметров управления, причем максимальные ее размеры по различным параметрам могут быть различны [2, 3]. Для простоты изложения, однако, не будем учитывать это обстоятельство. Примем, что отрезку $[-\Delta K, \Delta K]$ отвечает гиперкуб $-\varepsilon \leq \Delta_l \leq \varepsilon (l = \overline{1, u})$, и будем считать, что для каждого из модулей СМОУ известна зависимость $\varepsilon = \varepsilon(\Delta K)$, позволяющая по величине ΔK установить максимально допустимое отклонение ε каждого из параметров управления от его оптимального значения $x_l^{(0)}$. Тогда вероятность $P(1)$ получения решения, которое по целевой функции будет отклоняться от оптимального на величину, не превышающую ΔK , равна

$$P(1) = \left[\int_{-\varepsilon}^{\varepsilon} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\Delta} \exp\left[-\left(\frac{x}{\sqrt{2}\Delta}\right)^2\right] dx \right]^u = [2\Phi_0(\varepsilon/\Delta)]^u, \quad (7)$$

где

$$\Phi_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp(-t^2/2) dt.$$

Влияние фактора полноты оптимизационных математических моделей может быть количественно оценено числом неоптимизируемых параметров управления μ и одной дополнительной характеристикой, которую можно представить следующим образом. Пусть $\mu = 1$, неоптимизируемый параметр x_H может принимать любое значение в интервале $[a, b]$, и при фиксированных значениях остальных параметров управления критерий эффективности K является унимодальной функцией x_H . Тогда, как нетрудно показать, для определения оптимального значения $x_H^{(0)}$ с точностью до ε методом золотого сечения необходимо рассмотреть

$$m_{01} = 1 - 2,078 \ln[\varepsilon/(b - a)]$$

вариантов значений неоптимизируемого параметра x_H . Правило задания вариантов и алгоритм поиска описаны в работе [4] и здесь не рассматрива-

Таблица 1

Значения m_{01} при $\mu = 1$
для ряда различных величин $\varepsilon_1 = \varepsilon/(b - a)$

$\varepsilon_1 = \varepsilon/(b - a)$...	0,5	0,3	0,1	0,01	0,001	0,0001
m_{01}	...	2,44	3,50	5,78	10,57	15,35	20,14
Округленное значение m_{01}	...	3	4	6	11	16	21

ются. Не исследуется и случай $\mu > 1$, хотя принципиально подход остается тем же: необходимо задаться процедурой поиска экстремальных значений $x_{n1}^{(0)}, x_{n2}^{(0)} \dots x_{n\mu}^{(0)}$ и найти число вариантов m_{01} наборов значений неоптимизируемых параметров, перебрав которые, можно с заданной точностью найти искомые $x_{nj}^{(0)}, j = \overline{1, \mu}$. Если параметр x_n изменяется дискретно, то m_{01} представляет собой число принимаемых им значений.

Таким образом, количественными характеристиками влияния рассматриваемого фактора являются величины μ и m_{01} . Значения m_{01} при $\mu = 1$ для ряда различных величин $\varepsilon_1 = \varepsilon/(b - a)$ приведены в табл. 1.

Наиболее сложным является вопрос о количественных характеристиках влияния фактора неполноты и неточности информации. Для единообразия подхода будем и этот фактор оценивать числом вариантов m_{02} , понимая под m_{02} , например, число областей множества обстановок при районировании его по Динеру или другую аналогичную по смыслу величину. Здесь требуются еще дополнительные исследования. Как показывает опыт, реализация метода районирования сталкивается с огромными вычислительными трудностями [5, 6, 7]. Видимо, именно поэтому до сих пор известны единичные примеры задач, исследованных методом районирования. Как правило, для ситуаций, представляющих практический интерес, число районов m_{02} оказывается весьма большим. Дальнейшие исследования в этой области должны быть направлены на отыскание методов резкого сокращения числа рассматриваемых вариантов обстановки m_{02} . Возможно, это приведет к изменению самого подхода к проблеме, но так или иначе неопределенность информации всегда будет вынуждать лицо, принимающее решение, увеличивать объем вычислений, исследовать дополнительные варианты решений [8]. В формировании этих вариантов существенную помощь лицу, принимающему решение, должно оказывать СМОУ. Имеется в виду необходимость разработки специальных модулей, предназначенных для анализа полноты и точности информации об обстановке и подготовки по результатам анализа рекомендуемых вариантов для исследований и расчетов (тем самым определяется и число m_{02}).

Способ формализации понятия обоснованности

Рассмотрим один из возможных способов формализации понятия обоснованности, позволяющий непосредственно связать обоснованность решения с введенными параметрами $\Delta, \varepsilon, m_{01}, m_{02}$ и числом фактически исследованных вариантов m .

Определим обоснованность как вероятность выбора правильного (оптимального) решения. Можно указать следующие преимущества вероятностного подхода:

- 1) вероятностный подход — естественный способ учета случайностей в значениях параметров управления, возникающих за счет случайных ошибок η_j ;
- 2) возможность, как следует из формулы (7), учитывать требования по точности оптимизации ΔK и связанной с этим максимально допустимой погрешности в значениях параметров управления ε ;
- 3) возможность с единой точки зрения, на одной методической основе учитывать как качество математических моделей СМОУ, от которого зависят ошибки в определении формально оптимальных решений, так и остальные факторы, влияние которых на обоснованность определяется помимо характеристик СМОУ неполнотой данных об обстановке.

Первые два преимущества очевидны, третье нуждается в комментариях. Формирование альтернативных вариантов в процессе обоснования и выбора решения — одна из сложных проблем. Из вышесказанного следует, что при этом должны быть в совокупности учтены факторы неполноты математических моделей СМОУ, а также неопределенности обстановки. Каждый из этих факторов в отдельности характеризуется своим числом вариантов (m_{01} и m_{02} соответственно). Полное число вариантов m_0 , которое должно быть проанализировано, является функцией этих составляющих: $m_0 = f(m_{01}, m_{02})$. Вид функции f пока не исследован. Ясно лишь, что нижней границей полного числа вариантов является сумма, а верхней — произведение величин m_{01} и m_{02} :

$$m_{0 \min} = m_{01} + m_{02} \leq f(m_{01}, m_{02}) \leq m_{01}m_{02} = m_{0 \max}$$

Необходимо, конечно, стремиться к формированию таких вариантов, которые позволят свести их число к минимально возможному значению $m_{0 \min}$. Для формализации этого процесса помимо чисто математических изысканий необходимо тщательное исследование методологии и конкретных приемов работы опытных лиц, принимающих решения. В их опыте, без сомнения, содержатся эффективные эвристические способы. Анализ подобной эвристики, ее частичная или полная формализация в СМОУ дадут в руки лицу, принимающему решение, инструмент, способный существенно облегчить его работу в процессе выработки решений.

Отметим, что величина m_0 является средней характеристикой, аналогичной, например, среднему-обходимому числу попаданий для поражения объекта в теории стрельбы [9]. Действительно, в любой из вариантов, который формируется для оптимизации решения, по неоптимизируемым в математических моделях параметрам или по полю возможных обстановок, т. е. определяется объективными, алгоритмируемыми факторами, лицо, принимающее решение (лицо, осуществляющее реализацию), вносит творческий вклад, закрепляя в соответствии со своим опытом и знаниями часть параметров управления. Этот процесс практически всегда может быть продолжен [10, 11, 12]. Имеется в виду возможность после получения хорошего варианта найти лучший, затем еще более лучший и т. д. Практические ограничения на этот процесс накладываются характеристиками конкретно складывающейся обстановки. В зависимости от них число исследуемых вариантов m может быть как меньше, так и больше m_0 , а значение m_0 по смыслу является средним, т. е. в среднем достаточным для определения наилучшего варианта в данных условиях обстановки. Поэтому правомочным является понятие условной вероятности выбора правильного решения при рассмотрении одного варианта (при условии, что ошибки формально оптимального решения не превзойдут заданных значений):

$$p(1) = 1/m_0.$$

Безусловная вероятность выбора правильного решения при рассмотрении одного варианта равна

$$P_{10} = p(1)P(1) = \frac{1}{m_0} [2\Phi_0(\varepsilon/\Delta)]^{u-\mu-\rho}, \quad (8)$$

где ρ — число закрепляемых лицом, принимающим решение (лицом, осуществляющим реализацию), параметров управления. Нижней границей значения вероятности P_{10} служит величина

$$P_1 = \frac{1}{m_0} [2\Phi_0(\varepsilon/\Delta)]^{u-\mu}. \quad (9)$$

Предпочтительнее использовать вероятность P_1 вместо P_{10} , поскольку величина ρ , которой распоряжается лицо, принимающее решение, не может быть известна заранее. Хотя при этом обоснованность занижается, формулу (9) можно признать приемлемой по двум соображениям:

1) соотношения для вычисления обоснованности получены при большом числе упрощающих допущений и качественных рассуждений, поэтому вообще трудно говорить о вычислении абсолютных значений обоснованности, скорее эти соотношения служат для качественно-количественных оценок обоснованности;

2) в принципе, как уже отмечалось, важны не абсолютные, а относительные значения обоснованности, позволяющие сравнивать между собой различные процедуры выбора решений или различные варианты организации работы органа управления при выборе решений.

Обоснованность решения при рассмотрении m вариантов равна

$$P = 1 - (1 - P_1)^m = 1 - e^{-\alpha m}, \quad (10)$$

где

$$\alpha = -\ln(1 - P_1) = -\ln\left\{1 - \frac{1}{m_0} [2\Phi_0(\varepsilon/\Delta)]^{u-\mu}\right\}. \quad (11)$$

По тем же причинам, что и при вычислении P_{10} , можно использовать для определения числа m_0 его нижнюю оценку, т. е. полагать

$$m_0 = m_{01} + m_{02}.$$

Отметим, что в выражениях (10) и (11) учитываются все перечисленные ранее факторы, влияющие на обоснованность. Кроме того, обоснованность, вычисляемая по формуле (10), во-первых, обладает свойством насыщаемости, а во-вторых, имея смысл вероятности, теоретически никогда не может достигнуть значения, равного единице. Имеет смысл подчеркнуть еще одно принципиальное отличие между вариантным и вероятностным методами. В вариантном методе значение $m_{\text{зад}}$ задается лицом, принимающим решение (лицом, осуществляющим реализацию), т. е. является субъективной характеристикой. В вероятностном же методе значение m_0 определяется (вычисляется) по соответствующим модулям СМОУ — на основе объективных сведений об обстановке, свойств модулей СМОУ и требований к точности вычислений, т. е. является объективной характеристикой.

Выражение (10) в практических целях может быть трансформировано следующим образом. Время, затрачиваемое на исследование m вариантов, равно $t_1 = m\Delta t_0$, где Δt_0 — время исследований одного варианта. Таким образом, имеют место два соотношения:

$$P = 1 - \exp(-\alpha t_1/\Delta t_0); \quad t_1 = \Delta t_0[-\ln(1 - P)]/\alpha. \quad (12)$$

Первое позволяет определить обоснованность P при заданном значении времени t_1 , отводимого на выбор решения. По второму, напротив, можно оценить время t_1 , необходимое для получения заданного значения обоснованности P .

Характер зависимости обоснованности решений P от числа исследуемых вариантов m и погреш-

ности получения формально оптимальных решений Δ (фактически от значений параметра ε/Δ) можно проследить по табл. 2 и 3 и рис. 1 и 2. Величины P в табл. 2 и на рис. 1 определены при двух значениях Δ ($\Delta = 0,01$; $\Delta = 0,10$) и следующих значениях остальных параметров: $m_0 = 5$; $\varepsilon = 0,1$; $u - \mu = 2$. В табл. 3 и на рис. 2 значения параметров те же, а $m = 9$.

Таблица 2

Значения обоснованности P при различном числе исследуемых вариантов m

m	P	
	$\Delta = 0,01$	$\Delta = 0,10$
1	0,200	0,093
5	0,672	0,387
9	0,866	0,585
13	0,945	0,720
17	0,977	0,810
21	0,991	0,872
25	0,996	0,913

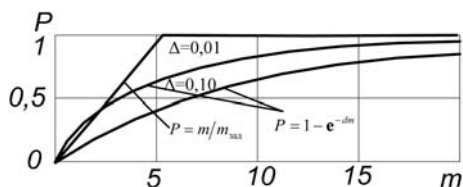


Рис. 1. Зависимость обоснованности решений от числа исследуемых вариантов m

Таблица 3

Значения обоснованности P при различных погрешностях Δ

Δ	ε/Δ	α	P	Δ	ε/Δ	α	P
0	∞	0,223	0,866	0,15	0,67	0,050	0,364
0,01	10	0,223	0,866	0,20	0,50	0,030	0,235
0,03	3,33	0,223	0,865	0,30	0,33	0,014	0,116
0,05	2	0,201	0,836	0,50	0,20	0,005	0,044
0,10	1	0,098	0,585	1	0,10	0,001	0,011

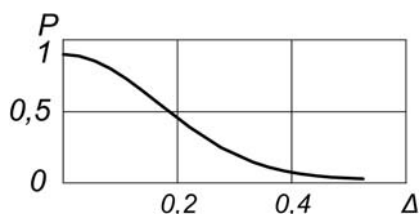


Рис. 2. Зависимость обоснованности решений от погрешности решений Δ

Максимальное значение относительной погрешности δ достигается, как можно показать, при $m = m_0$ и всегда больше величины

$$\delta_{\min} = x/(1 - x); x = (1 - 1/m_0)^{m_0}.$$

Для рассмотренного примера $\delta_{\min} = 59\%$.

На рис. 2 показана зависимость обоснованности P от погрешности решений Δ , имеющая значение при выборе для исследований целесообразной совокупности модулей. Видно, что $P(\Delta)$ — невыпуклая функция. Это обстоятельство следует учитывать при разработке алгоритмов решения соответствующих оптимизационных задач.

Список литературы

1. Квейд Э. Анализ сложных систем / Пер. с англ. М.: Сов. радио, 1969. 520 с.
2. Григорьев С. Н. Принципы создания многофункциональной системы числового программного управления технологическим оборудованием на базе общего ядра с открытой модульной архитектурой // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2011. № 5. С. 1—11.
3. Григорьев С. Н., Мартинов Г. М. Перспективы развития распределенных гетерогенных систем ЧПУ децентрализованными производствами // Автоматизация в промышленности. 2010. № 5. С. 4—8.
4. Гуд Г. Х., Маккол Р. Э. Системотехника. Введение в проектирование больших систем / Пер. с англ. М.: Сов. радио, 1962. 382 с.
5. Григорьев С. Н. Тенденции и проблемы модернизации машиностроительного производства на базе отечественного станкостроения // Вестник МГТУ Станкин. 2010. № 3. С. 7—13.
6. Черпаков Б. И., Григорьев С. Н. Тенденции развития технологического оборудования в начале XXI века // Ремонт, восстановление, модернизация. 2003. № 10. С. 2—7.
7. Мартинов Г. М. Современные тенденции развития компьютерных систем управления технологического оборудования // Вестник МГТУ "Станкин". 2010. № 1. С. 119—125.
8. Змиева К. А. Повышение эффективности управления процессом механообработки на основе автоматизированной системы энергосбережения // Безопасность жизнедеятельности. 2009. № 10. С. 6—8.
9. Wassermann A. J., Guts S. The future of programming. — Commun.: ACM, 1982. V. 25. N 3. P. 196—206.
10. Андреев А. Г., Григорьев С. Н. Построение компьютерных систем программного управления мехатронными устройствами по модульному принципу // Мехатроника, автоматизация, управление. 2005. № 10. С. 8—13.
11. Змиева К. А. Методика повышения энергоэффективности асинхронного электродвигателя посредством организации амплитудно-частотного управления электропитанием // Электротехнические комплексы и системы управления. 2010. № 3. С. 39—44.
12. Шварцбург Л. Э. Анализ энергетической безопасности технологических процессов // Вестник МГТУ "Станкин". 2010. № 4. С. 98—105.

УДК 62-5:004.8

В. А. Виттих,

д-р техн. наук, проф., научный советник,
vittikh@iccs.ru,

Институт проблем управления
сложными системами РАН, Самара

Интерсубъективные системы как объекты постнеклассической науки

Исходя из постнеклассической научной рациональности обосновывается необходимость введения понятия "интерсубъективные системы" и разработки соответствующей теории.

Ключевые слова: интерсубъективная система, постнеклассическая научная рациональность, субъективность, интерсубъективность, коммуникативное действие, актор, холон, самоорганизация

Введение

Объектами изучения науки являются системы совершенно различных "миров": мира природного (например, солнечная система), мира абстрактного (система уравнений), мира искусственного (производственная система) и мира духовного (система моральных и нравственных норм). Столь широкий диапазон применения термина "система" во второй половине XX века привел к формированию научного направления, связанного с разработкой общей теории систем (ОТС) [1]. Однако, несмотря на повышенный интерес к этой проблеме, ОТС так и не была создана, причем есть все основания предполагать, что идея построения ОТС так и останется мертворожденной.

Причина несбывшихся надежд кроется в изменении самих оснований науки во время глобальных научных революций: возникновения в XVII веке классической науки, становления в период с конца XIX до середины XX столетия неклассического естествознания и, наконец, рождения в последней трети прошлого века постнеклассической науки. Эти стадии развития науки можно охарактеризовать как три исторических типа научной рациональности — классический, неклассический и постнеклассический, — сменявшие друг друга в истории технологической цивилизации [2]. В этих условиях можно говорить не об одной ОТС, а о множестве теорий,

каждая из которых связана с тем или иным типом научной рациональности и соответствующим классом объектов исследований.

1. Классическая научная рациональность

Классическая рациональность исходит из того, что объективно-истинное знание может быть получено только в том случае, когда субъект (исследователь) отделен от объекта (изучаемой системы), а из описания и объяснения исключается все, что относится к самому субъекту и средствам (процедурам) его познавательной деятельности. Для такого ученого-рационалиста характерно утверждение превосходства мышления над чувствами, установка на естественную упорядоченность мира, наличие в нем объективных закономерностей и вера в то, что свойства целого (системы) полностью определяются состоянием и свойствами его частей (подсистем). Опираясь на эти положения, классическая наука, рассматриваемая чаще всего как синоним классического естествознания, строила и развивала причинно-механическую картину природы, которая выступала одновременно и как картина реальности, применительно к сфере физического знания, и как общенаучная картина мира [2].

Претензии на "общенаучность" классической рациональности привели к тому, что она стала доминировать не только при исследованиях природных явлений и процессов, но и при изучении социальных, экономических, социотехнических и иных искусственных объектов, а это, в свою очередь, привело к формированию у части научного сообщества убеждения в возможности создания ОТС с позиций классической науки. Тем не менее, эта убежденность не могла быть достаточно твердой, поскольку неклассическая рациональность уже характеризовалась пониманием относительной истинности теорий и картины природы, допуская истинность нескольких отличающихся друг от друга конкретных теоретических описаний одной и той же реальности; при этом принимаются также типы объяснения и описания, которые, в отличие от классической рациональности, содержат ссылки на средства и операции познавательной деятельности (например, в квантово-релятивистской физике в качестве необходимого условия объективности объяснения и описания выдвигается требование фиксации

особенностей средств наблюдения, которые взаимодействуют с объектом) [2].

И, наконец, о какой ОТС может идти речь, если постнеклассическая рациональность исходит из того, что знания об объекте соотносятся не только с особенностями его взаимодействия со средствами наблюдения, но и с ценностно-целевыми структурами деятельности субъекта [2, 3]. Иными словами, оппозиция субъекта и объекта заменяется в постнеклассической науке их суперпозицией, а место всеобщего "унифицированного" субъекта, каковым является субъект классической рациональности, занимает индивид, личность [4].

2. Постнеклассическая рациональность

Переход к постнеклассической рациональности приводит к необходимости отказа от декартовских онтологических построений, постулирующих единую картину объективного мира "твердой" материи, в которой нет места человеку и сознанию [3], и использования фундаментальной онтологии М. Хайдеггера [5], рассматривающего *бытие как бытие человека*, сознание которого конструирует (конституирует) его собственный предметный мир. Тогда учение о бытии предстает как *онтология субъективности*: человек располагается в центре своего предметного мира. Таким образом, происходит *переход от мира объективного к миру субъективному*.

В связи с этим ключевую роль приобретает предложенное Э. Гуссерлем *понятие intersубъективности*, указывающее на внутреннюю социальность индивидуального сознания [4]. Жизненный мир, по А. Шюцу, — это и есть мир, складывающийся из intersубъективных отношений между людьми [6], а установление необходимого *взаимопонимания* действующих индивидов осуществляется с помощью *коммуникативных действий*. Это понятие введено Ю. Хабермасом в его "Теории коммуникативного действия", где *достижение социальной общности при сохранении индивидуальности каждого ее элемента* рассматривается как *основная функция коммуникации* [7].

Таким образом, в основание постнеклассической рациональности предлагается положить понятия субъективности, intersубъективности и коммуникативного действия, с помощью которых можно определить (в отличие от природных систем) класс *intersубъективных систем*, который кратко можно охарактеризовать следующим образом.

3. Intersубъективные системы

Атомарным элементом таких систем, способным к *саморазвитию и самоорганизации*, является человек с его субъективными чувствами, желаниями, знаниями, опытом и т. п., обладающий не формальным

"физико-математическим", а "жизненным" разумом. *Актером* называется человек, который может *осознать* сложившуюся *проблемную ситуацию* и осуществлять *познавательную-деятельностную функцию* для ее регулирования. Актеры являются *неоднородными*, поскольку каждый из них, в общем случае, имеет свой субъективный взгляд на мир [8].

Актер вместе с имеющимися в его распоряжении интеллектуальными, материальными и трудовыми ресурсами образует *базовый холон*, для управления которым актер *располагает властными полномочиями и несет ответственность* за принимаемые решения. Базовые холоны являются источниками ресурсов и власти при образовании *составного холона*, т. е. реализуется принцип лоуархии (lowerarchy) [9], хотя по взаимному соглашению между составными и базовыми холонами могут быть установлены *иерархические отношения* [10]. Составные холоны, в свою очередь, могут "интегрироваться" в более крупные холоны или, наоборот, "дезинтегрироваться".

Сталкиваясь с неопределенностью возникающих проблемных ситуаций, "intersубъективные" актеры, обладающие структурой индивидуального сознания, отвечающей факту существования других актеров, коммуницируют друг с другом в целях достижения взаимопонимания и, в конечном счете, консенсуса [11], договариваясь в рамках следующих форм intersубъективности: семантической, эмпирической, логической, операциональной и нормативной [12]. Эти *типы intersубъективности*, сами *актеры*, "погруженные" в проблемную ситуацию, и *система поддержки их коммуникативных действий* образуют *структуру intersубъективной теории* [13].

Стремление к достижению взаимопонимания неоднородных актеров предполагает наличие у них чувства *солидарности*, которая трактуется (в философии Рорти) как направление мышления на объединение разнообразных точек зрения не на основе их тождества, а в контексте их различия. Эти различия не провоцируют мировоззренческие конфликты, а создают условия для свободного выбора. Рорти отрицает необходимость смыслового "центра", полагая, что социальная надежда призвана опереться не на объективность, а на солидарность [7]. В частности, *социальное партнерство* можно рассматривать как одну из форм проявления солидарности [14].

Таким образом, системообразующими элементами intersубъективных систем являются неоднородные актеры — своеобразные "субъективные начала", действующие в общих интересах, не забывая и о своих, потребность в согласии которых удовлетворяется посредством коммуникативно рационального, аргументированно достигаемого взаимо-

понимания. Акторов вынуждает договариваться стремление к свободе самореализации, которая, как известно, заканчивается там, где начинается свобода другого актора.

Следует отметить, что некоторые из упомянутых особенностей построения intersubъективных систем можно обнаружить в так называемых системах согласованной инженерной деятельности (concurrent engineering systems), в которых инженеры (неоднородные акторы) путем организации соответствующих коммуникативных действий обеспечивают на стадии проектирования учет факторов всего жизненного цикла изделия (производственные факторы, особенности сборки, испытаний и технического обслуживания) [15, 16].

Заключение

Холоническая структура intersubъективных систем, предполагающая динамическую композицию и декомпозицию холонов, и их способность к самоорганизации позволяют относить такие системы к разряду сложных развивающихся систем [11]. Не возникает сомнений и в том, что социальные, экономические, социотехнические и иные "искусственные" системы, по своей сути, являются intersubъективными. Зачем же понадобилось вводить это новое понятие?

Дело в том, что в отличие от "естественных" систем, в которых действуют законы природы, "искусственные" системы зарождаются и развиваются, в конечном счете, под "воздействием" человеческого сознания, а поэтому для их изучения как целостностей методы классического естествознания оказываются неприемлемыми. Все эти "человекоцентрированные" системы нуждаются в разработке своей собственной методологии, базирующейся на принципах постнеклассической научной рациональности, "возвращающей" человека в теорию [17]. Тогда, именно по методологическому признаку, этот широкий класс систем может быть объединен под одним общим названием — intersubъективные системы (их можно определить также как лоурар-

хические). В этом случае ученые и специалисты, работающие в области технических, экономических, социальных наук и других "наук об искусственном", могут соединить свои усилия на разработке теории intersubъективных систем, практическая потребность в которой приобретает все возрастающее значение по мере нашего вхождения в информационное общество.

Список литературы

1. **Энциклопедия** кибернетики. Т. 2. Киев: Главная редакция Украинской советской энциклопедии, 1975. С. 335—339.
2. **Степин В. С., Горохов В. Г., Розов М. А.** Философия науки и техники. М.: Гардарики, 1996.
3. **Философия**: учебное пособие для высших учебных заведений. Ростов н/Д: Феникс, 2003.
4. **Зотов А. Ф.** Современная западная философия. М.: Проспект, 2010.
5. **Хайдеггер М.** Бытие и время. Харьков: Фолио, 2003.
6. **Современный философский словарь.** Лондон, Франкфурт-на-Майне, Париж, Люксембург, Москва, Минск: ПАН-ПРИНТ, 1998.
7. **Всемирная энциклопедия.** Философия. М.: АСТ; Мн.: Харвест, Современный литератор, 2001.
8. **Виттих В. А.** Организация сложных систем. Самара, Самарский научный центр РАН, 2010.
9. **Акофф Р. Л.** За пределами социализма и капитализма: развивающееся общество. Проблемы управления в социальных системах. Т. 1. Вып. 1. 2009. С. 112—140.
10. **Koestler A.** The Ghost in the Machine. London: Arcana books, 1989.
11. **Виттих В. А.** Когнитология развивающихся систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 10. С. 45—50.
12. **Хюбнер К.** Истина мифа. М.: Республика, 1996.
13. **Виттих В. А.** Управление ситуациями в сложных развивающихся системах с применением intersubъективных теорий // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 12. С. 2—6.
14. **Виттих В. А.** Социальное партнерство как основа организации процессов управления в информационном обществе. Проблемы управления и моделирования в сложных системах. // Тр. XIII Междунар. конф. Самара, Самарский научный центр РАН, 2011. С. 365—368.
15. **O'Grady P., Young R.** Issues in concurrent engineering systems // Journal of Design and Manufacturing. 1991. Vol. 1. N 1. P. 27—34.
16. **Виттих В. А.** Согласованная инженерная деятельность. Состояние, проблемы, перспективы // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1997. № 1. С. 6—14.
17. **Виттих В. А.** Парадигма ограниченной рациональности принятия решений — 2. // Вестник Самарского государственного технического университета (серия "Технические науки"). 2010. № 2 (26). С. 23—31.



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 опасного развития бортовой качки судна
в условиях ветроволнового воздействия 57

Лебедев Г. Н., Ефимов А. А., Мирзоян Л. А.

Метод маршрутизации облета неподвижных объектов при
мониторинге наземной обстановки на основе динамического
программирования 63

В. М. Дорожко,

канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,

bendor@iacp.dvo.ru,

Институт автоматизации и процессов управления

ДВО РАН, г. Владивосток

Идентификация опасного развития бортовой качки судна в условиях ветроволнового воздействия

Методом вычислительной гидродинамики выполнено моделирование бортовой качки поперечного сечения рыболовного судна (контура) в условиях ветроволнового воздействия. Установлено, что идентификационным признаком опасного развития процесса качки, ведущего к опрокидыванию, является положительная тенденция фазового сближения максимумов колебаний угла бортовой и ординаты вертикальной качки контура, сопровождающегося нарастанием их амплитуд.

Ключевые слова: морское судно, идентификационный признак, ветроволновое воздействие, бортовая качка, вертикальная качка, опрокидывание судна

Введение

Среди морских происшествий наиболее опасными являются случаи, связанные с потерей остойчивости [1] (способности судна иметь равновесное положение, устойчивое в отношении угловых отклонений). Из анализа материалов Европейского морского агентства по безопасности (European Maritime Safety Agency) за 2002—2009 гг. [2] следует, что в 60 % случаев опрокидывание судов приводило к гибели членов экипажа.

В отличие от других качеств судов снижение остойчивости не поддается визуальному контролю, поэтому часто команда не подозревает о грозящей опасности до последнего момента перед опрокидыванием [3]. Возникновение качки большой амплитуды приводит к снижению сопротивляемости судна внешним кренящим нагрузкам [4]. Наибольшую опасность при этом представляют ситуации, в которых судно расположено бортом (лагом) к направлению распространения волн и ветра: при выполнении разворота (циркуляции), при потере управляемости в случае движения судна на попутном волнении, а также при поломке двигателя. В работе [5] отмечается, что из 10 аварийных судов нет ни одного, причины гибели которого полностью охватывались бы нормами остойчивости без дополнительных обстоятельств. Указанное заключение свидетельствует в пользу актуальности исследований по остойчивости судов в условиях штормового моря. Исследованиям этой проблемы и, в особенности, ветроволнового воздействия на судно посвящено большое число работ. Часть из них

направлена на изучение влияния регулярного волнения на качку судов [6—8]. В других работах [9—11] основное внимание уделяется исследованиям влияния ветра на динамику морских судов. Можно отметить исследования [12, 13], в которых влияние на остойчивость судов ветра и волн учитывается раздельно. Такой подход справедлив с точки зрения общей оценки безопасности судна, но недостаточен для описания его движения в реальных условиях, когда на качающееся судно действует одновременно ветер и волны. По этой причине не известны идентификационные признаки, позволяющие в реальном времени судить о развитии процесса снижения остойчивости судна, испытывающего одновременное воздействие ветра и волнения.

На основании анализа результатов опытов в работе [14] сформулирован вывод о том, что опрокидывание на волнении происходит через несколько колебаний при воздействии высоких волн примерно равной интенсивности, т. е. пакетов волн, близких к регулярным. Наблюдения [15] приводят к заключению о достаточно длительном времени воздействия шквалистого ветра на судно, исчисляемого в некоторых случаях минутами. В связи с этим в данной работе ставится задача исследования динамики системы "волнение—ветер—судно" в численной модели, предусматривающей одновременное воздействие на судно регулярного волнения и постоянного ветра.

В отличие от названных выше работ, в которых основное внимание уделено разработке аналитических моделей, описывающих качку на волнении, в данной статье методом вычислительной гидродинамики создается численная модель виртуального гидродинамического бассейна, в котором на поверхности воды свободно плавающее судно испытывает бортовую качку в условиях ветроволнового воздействия. При этом в процессе качки вычисляются силы и моменты, а также положение, скорость и ускорение по всем степеням свободы судна. Подобный подход к моделированию, реализуемый в последнее время [16], дает возможность более полно отразить динамические процессы в системе "волны—ветер—судно", всесторонне проанализировать колебательный процесс и установить идентификационные признаки, непосредственно предшествующие опрокидыванию судна. Особенность поведения судна при воздействии ветра на регулярном волнении состоит в том, что время опрокидывания составляет до нескольких периодов качки [4]. Из этого следует, что при установлении идентификационного признака опрокидывания у судоводителя появляется возможность обнаружить нарастание опасной ситуации и предупредить ее развитие до опрокидывания путем изменения курса и (или) скорости судна.

Результаты анализа динамики системы "волнение—ветер—судно" в виде идентификационных признаков опасного развития процесса качки мо-

гут служить основой для совершенствования автоматизированных судовых систем управления безопасностью мореплавания.

Основные модельные представления

Для изучения движения судна на волнении обратимся к методу вычислительной гидродинамики computational fluid dynamics (CFD) [17], применение которого в данной задаче позволяет моделировать численными методами движение судна в условиях ветроволнового воздействия при одновременной регистрации параметров его движения.

В целях формального описания модели выберем две правые коллинеарные системы координат: неподвижную $o\xi\zeta$ и подвижную $oxuz$, 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 [18]. Выберем поперечное сечение судна (контур) в плоскости ouz . Придадим контуру массоинерционные характеристики поперечного сечения толщиной в один метр. Расчетную область (прямоугольный канал) сформируем в плоскости $o\eta\zeta$, ось $o\eta$ которой лежит на условной поверхности спокойной воды (при отсутствии волн) и направлена в сторону, противоположную направлению распространения волн. Под воздействием волн и ветра контур совершает угловые колебания (бортовую качку) относительно своего центра тяжести и одновременно испытывает периодические линейные горизонтальные (дрейф) и вертикальные (вертикальная качка) перемещения.

В основу CFD-метода положены Reynolds-averaged-Navier-Stokes-уравнения неразрывности несжимаемой жидкости и сохранения импульса [17], которые могут быть записаны в тензорном виде:

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

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

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

где $i, j, l = \overline{1, 2}$; x_1, x_2 — декартовы координаты в абсолютной системе $o\eta\zeta$ и u_1, u_2 — соответствующие им мелкомасштабные осреднения значений

абсолютной скорости потока жидкости, а также u'_1, u'_2 — флуктуации абсолютной скорости, ответственные за диссипацию энергии; μ и ρ — вязкость и плотность воды, соответственно; p — давление; $\rho \overline{u'_i u'_j}$ — напряжения Рейнольдса, полученные осреднением флуктуационных компонент скорости; δ_{ij} — символ Кронекера.

Для вычисления напряжений Рейнольдса применена модель турбулентности k - ε renormalization group mathematical technique (RNG) [19], которая позволяет получать расчетные величины, близкие к их экспериментальным значениям [20]. В связи с этим уравнения (1)–(3) дополняются [17] следующими уравнениями в тензорном виде транспорта турбулентной кинетической энергии (k) и скорости диссипации турбулентной энергии (ε), а также выражением эффективной турбулентной вязкости (μ_{eff}):

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) &= \\ &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}; \quad (5) \end{aligned}$$

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

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

$$\eta_{k\varepsilon} = k\varepsilon \sqrt{\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)}; \quad C_{1\varepsilon} = 1,42; \quad C_{2\varepsilon} = 1,65;$$

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

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 воде.

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 $o\eta\zeta$. Вход канала (правая вертикальная граница) разделен на две части: верхнюю — для поступления по-

тока воздуха, моделирующего ветер с постоянной скоростью (v_0), и нижнюю, на которой задается скорость потока воды в виде вектора, горизонтальная (v_η) и вертикальная (v_ζ) компоненты которого определяются выражениями [21]

$$v_\eta = -\frac{gkr}{\sigma} \frac{\text{ch}[k(\zeta + H_c)]}{\text{ch}(kH_c)} \cos(k\eta_{in} - \sigma t + \varphi_0); \quad (7)$$

$$v_\zeta = \frac{gkr}{\sigma} \frac{\text{sh}[k(\zeta + H_c)]}{\text{ch}(kH_c)} \sin(k\eta_{in} - \sigma t + \varphi_0), \quad (8)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения; r — амплитуда волны; H_c — глубина воды в канале; η_{in} — координата входной границы канала; $k = \sigma^2/g$ — волновое число; σ — угловая частота волнения; φ_0 — начальное значение фазы, выбираемое на интервале $[-\pi, \pi]$.

Для определения граничных условий на контуре применена модель SDOF (six degree of freedom) [22]. В данной 2D-задаче из шести реализуются три степени свободы указанной модели: дрейф, бортовая и вертикальная качка контура. При этом на каждом временном шаге вычисляются F_η , F_ζ — о η - и о ζ -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 , $\dot{\eta}_g$ и ζ_g , $\dot{\zeta}_g$ — линейные о η - и о ζ -компоненты векторов положения и скорости центра тяжести контура, соответственно; θ_g , $\dot{\theta}_g$ — угол и угловая скорость бортовой качки контура относительно оси ox соответственно; точка над переменными указывает на их первую производную по времени. В равновесном положении вертикальная ось симметрии контура совпадает с осью oz . При этом угол θ_g отклонения вертикальной оси симметрии контура от оси oz регистрируется как положительный при крене контура на правый борт, т. е. при вращении контура относительно оси ox по часовой стрелке. На основе полученных значений указанных сил и момента, с учетом массы, геометрии, положения, скорости центра тяжести, момента инерции контура на каждом временном шаге вычислений определяются линейные и угловые перемещения и вычисляется новое положение контура. При этом одновременно выполняется перестроение и выравнивание элементов сеточного разбиения расчетной области канала.

На первом этапе выполнено исследование структуры воздушного потока над взволнованной поверхностью воды. Кроме того, вычислены временные реализации давления на воздушной части (надстройке) контура. На втором этапе выполнено моделирование динамики системы "волны—ветер—судно" для различных периодов собственных угло-

вых колебаний контура и различных значений начальной (для равновесного положения контура) метацентрической высоты контура. В процессе качки геометрический центр подводной части контура перемещается по кривой, центр кривизны которой называется метацентром [15]. Тогда расстояние от положения метацентра до центра тяжести контура носит название начальной метацентрической высоты (далее — метацентрической высоты). Задавая различное положение центра тяжести, мы, тем самым, определяем метацентрическую высоту контура. На основе анализа результатов численного моделирования качки контура в условиях ветроволнового воздействия устанавливается идентификационный признак опасного развития процесса качки, ведущего к опрокидыванию судна.

Численные результаты и их обсуждение

Для численного моделирования выбраны два контура (поперечные сечения двух рыболовных судов) с различными высотами бортов $H_1 = 5,4 \text{ м}$ и $H_2 = 5,0 \text{ м}$ со следующими характеристиками: $B = 8,8 \text{ м}$ — ширина; $T = 3,5 \text{ м}$ — осадка; $H_w = 3 \text{ м}$ — средняя высота надстройки контура; $L = 1 \text{ м}$ — условная толщина контура; $M_s = 27\,059 \text{ кг}$ — масса; $V = 26,3476 \text{ м}^3$ — объем погруженной части контура; $C_0 = 1,94 \text{ м}$ — расстояние от нижней точки контура (от киля) до геометрического центра подводной части контура, находящегося в состоянии равновесия. Расстояние от киля до метацентра контура вычислено по формуле [15] $m_0 = C_0 + LB^3/12V$ и составило $4,04 \text{ м}$. Конкретное значение метацентрической высоты h_0 обеспечивается заданием положения центра G тяжести контура на расстоянии [15] $G = m_0 - h_0$ от киля. Тогда выбранным величинам $h_0 = 0,5 \text{ м}$ и $h_0 = 1,0 \text{ м}$ соответствуют $G_1 = 3,54 \text{ м}$ и $G_2 = 3,04 \text{ м}$, а также высоты бортов $H_1 = 5,4 \text{ м}$, $H_2 = 5,0 \text{ м}$, что обеспечивает равенство предельно допустимого крена 60° [23] контуров для обоих значений метацентрической высоты. Расчетная область (канал) представляет собой прямоугольник длиной 320 м и высотой 140 м . Глубина морской воды с плотностью $\rho = 1027 \text{ кг/м}^3$, заполняющей канал, составляет 70 м . Координата правой границы канала $\eta_{in} = 90 \text{ м}$. Сеточное разбиение волновой зоны, выполненной в виде вытянутого прямоугольника, охватывающего контур и взволнованную поверхность, выполнено треугольными элементами со сторонами $0,3 \text{ м}$, перестраиваемыми после каждого временного шага вычислений для обеспечения перемещения контура в соответствии с вычислительными процедурами SDOF-модели. Сеточное разбиение остального пространства канала выполнено прямоугольными элементами со сторонами 1 м , размеры которых для согласования с треуголь-

ными элементами уменьшаются по мере приближения к границам волновой зоны. Шаг дискретизации времени в процессе численного моделирования качки принят равным 0,002 с. Для вычисления вязкой компоненты сил вокруг контура создана подвижная зона с пограничной неперестраиваемой сеткой, высота слоев которой увеличивается по мере

удаления от границы контура. Высота первого слоя пограничной сетки составляет 2 мм. Подвижная зона перемещается вместе с контуром как единое целое. Для численного моделирования выбрана амплитуда и длина поверхностной волны $r = 1,7$ м и $\lambda = 56$ м соответственно. Период поверхностного волнения составляет $T = 6$ с. Скорость ветра на входе канала $v_0 = -25$ м/с. Периоды собственных колебаний контура $T_0 = 5; 6; 7$ с

обеспечиваются назначением соответствующих значений метацентрической высоты и момента инерции [24] контура относительно оси ox , вычисляемого по формуле

$$I_x = \frac{gh_0 M_s T_\theta^2}{(2\pi)^2 (1 + k_\theta)}, \text{ где } k_\theta = 0,3 -$$

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.

Для подтверждения репрезентативности идентификационного признака численное моделирование качки контура в условиях ветроволнового воздействия выполнено для всех сочетаний значений h_0, T_θ . Результаты вычислений формировали в виде двух минутных массивов значений переменных качки: $t, \eta_g, v_\eta = \dot{\eta}_g, \zeta_g, \dot{\zeta}_g, \theta_g,$

$\omega = \dot{\theta}_g, F_\eta, F_\zeta$ и M_θ . При этом включение ветрового воздействия выполнялось со второй минуты качки.

Исследование структуры поля скорости ветра над взволнованной поверхностью показало (рис. 1), что скорость постоянного ветра приобретает в привидном десятиметровом слое ярко выраженный колебательный характер, коррелированный с поверхностным волнением.

Нестационарный процесс движения воздуха над взволнованной поверхностью можно рассматривать как периодическую последовательность порывов воздуха.

Синфазные (в привидном десятиметровом слое) с ординатой поверхностного волнения, т. е. с ординатой центра тяжести контура, порывы ветра вызывают на надстройке контура высотой в три метра 60 %-ную модуляцию давления (рис. 2) от его среднего значения (500 Па).

На основе анализа результатов численного моделирования качки в условиях ветроволнового воздействия для каждого из значений частот соответствующих периодов ($T_0 = 5; 6; 7$ с) собственных коле-

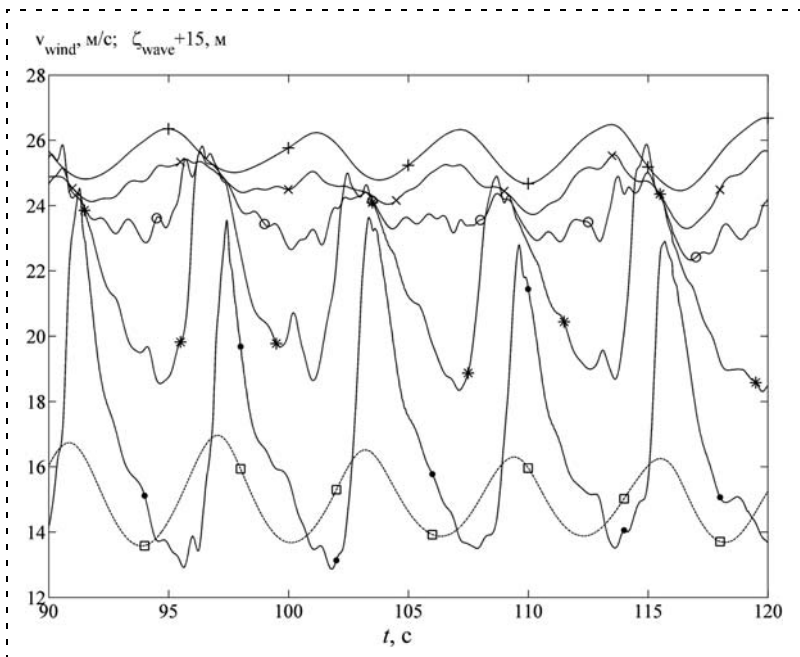


Рис. 1. Временные реализации ординаты поверхностного волнения (\square — ζ_{wave}) и скорости ветра (v_{wind}) над взволнованной поверхностью на удалениях от уровня спокойной воды:

● — 3 м/с; * — 5 м/с; ○ — 7 м/с; × — 11 м/с; + — 20 м/с

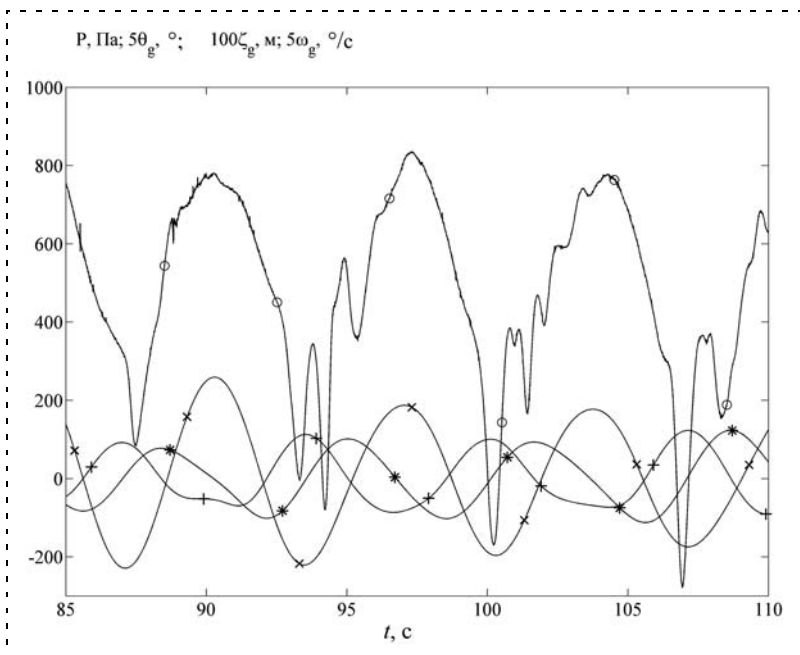


Рис. 2. Временные реализации:

○ — давление потока воздуха (P) на надстройке, * — угол качки (θ_g), × — ордината центра тяжести контура (ζ_g) на волнении, + — угловая скорость качки (ω_g)

баний и метacentрических высот $h_0 = 0,5; 1,0$ м контура выявлены процессы опрокидывания контура двух типов:

- первый (рис. 3) — опрокидывание ($|\theta_g| \geq 50^\circ$) происходит сразу же после наибольшего сближения максимумов колебаний угла крена и ординаты центра тяжести контура;
- второй (рис. 4) — для опрокидывания после наибольшего сближения указанных максимумов потребовался еще один период колебаний.

На рис. 3, а, рис. 4, а четыре последних максимумов угла крена и ординат центра тяжести контура обозначены θ_{gi} и ζ_{gi} , $i = \overline{1,4}$, соответственно, при этом результаты вычислений представлены двумя группами диаграмм (а и б): кинематической и динамической, соответственно.

Рассматривая попарно (рис. 3, а, рис. 4, а) точки $(\theta_{gi}, \zeta_{gi})$, $i = \overline{1,4}$, можно отметить уменьшение интервала времени между ними (фазовое сближение) по мере раскачивания контура синхронным и синфазным периодическим ветроволновым воздействием, результатом которого является, кроме того, нарастание амплитуд углов бортовой ($\theta_{g4} < \dots < \theta_{g1}$) и ординат вертикальной ($\zeta_{g4} < \dots < \zeta_{g1}$) качки контура, а в конечном итоге — приближение к ситуации начала (θ_{g1}, ζ_{g1}) процесса опрокидывания. В процессе качки под воздействием сил F_ζ и F_η происходит периодическое смещение положения центра тяжести как по ординате $o\zeta$, так и по абсциссе $o\eta$ соответственно, что отражается (рис. 3, б, рис. 4, б) в колебательном характере ускорений (a_ζ, a_η) центра тяжести контура.

После подъема контура (рис. 3, а) с максимальным креном (θ_{g1}) на вершину волны силы, действующие на контур, стремятся вернуть контур в нормальное к поверхности волны ($\theta_g = 0$) положение [24], что выражается в максимальном значении модуля (рис. 3, б) ускорения $a_{\theta 1}$, а соответственно, и момента $M_{\theta 1} = a_{\theta 1} I_x$. Отрицательные значения ускорения $a_{\theta 1}$ и момента $M_{\theta 1}$ указывают на то, что силы, формирующие момент, стремятся повернуть контур на наветренную сторону. Обусловленное моментом $M_{\theta 1}$ нарастание модуля угловой скорости до максимума (ω_{g1}) приводит к накопленной кинетической энергии вращения контура $0,5 I_x \omega_{g1}^2$, достаточной для опрокидывания контура на наветренный склон волны (рис. 3, а).

На рис. 4 представлен другой случай, когда нарастание амплитуд (рис. 4, а) колебаний крена θ_{gi} и ординаты центра тяжести ζ_{gi} протекает медленнее, что объясняется увеличением периода собственных колебаний с $T_0 = 5$ с (см. рис. 3) до $T_0 = 6$ с (рис. 4) и, соответственно, момента инерции масс контура с $64\ 653$ кг·м² до $93\ 100$ кг·м², вследствие чего для опрокидывания контура потребовался еще один период колебаний. После подъема контура с максимальным креном θ_{g1} на вершину волны (рис. 4, а) модуль ускорения (рис. 4, б) $a_{\theta 1}$ и, соответственно, модули момента $M_{\theta 1} = a_{\theta 1} I_x$ и угловой скорости ω_{g1} также приобретают максимальные значения.

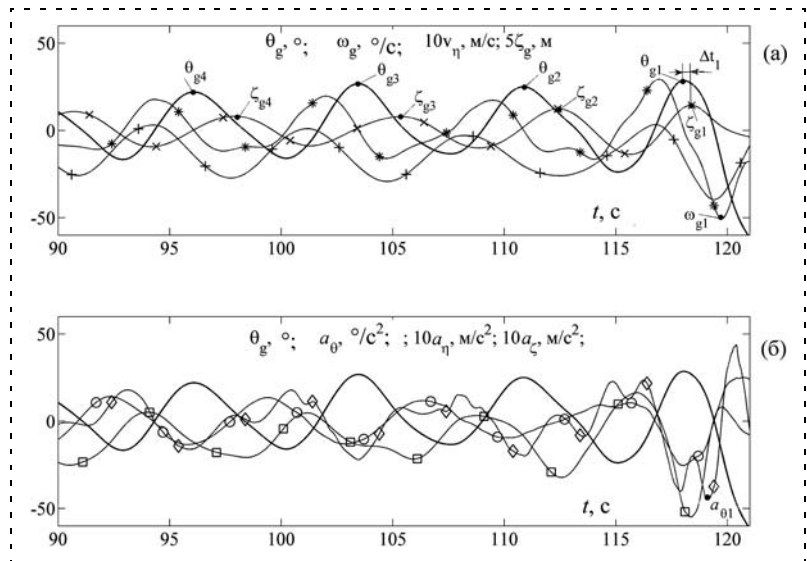


Рис. 3. Временные диаграммы качки контура ($T_0 = 5$ с):

кривая без маркеров — θ_g ; * — ω_g ; + — $v_\eta = \dot{\eta}$; × — ζ_g ; ◇ — $a_\theta = M_\theta/I_x$; ○ — $a_\eta = F_\eta/M_s$; □ — $a_\zeta = (F_\zeta - gM_s)/M_s$

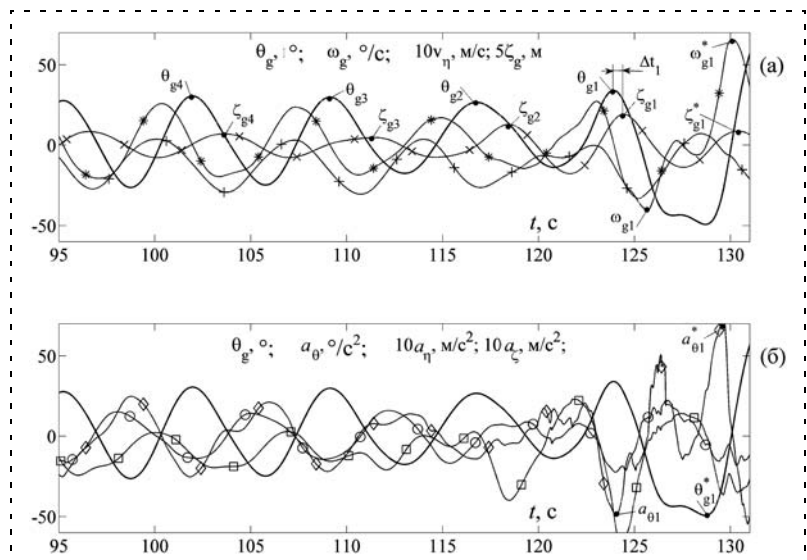


Рис. 4. Временные диаграммы качки контура ($T_0 = 6$ с):

кривая без маркеров — θ_g ; * — ω_g ; + — $v_\eta = \dot{\eta}$; × — ζ_g ; ◇ — $a_\theta = M_\theta/I_x$; ○ — $a_\eta = F_\eta/M_s$; □ — $a_\zeta = (F_\zeta - gM_s)/M_s$

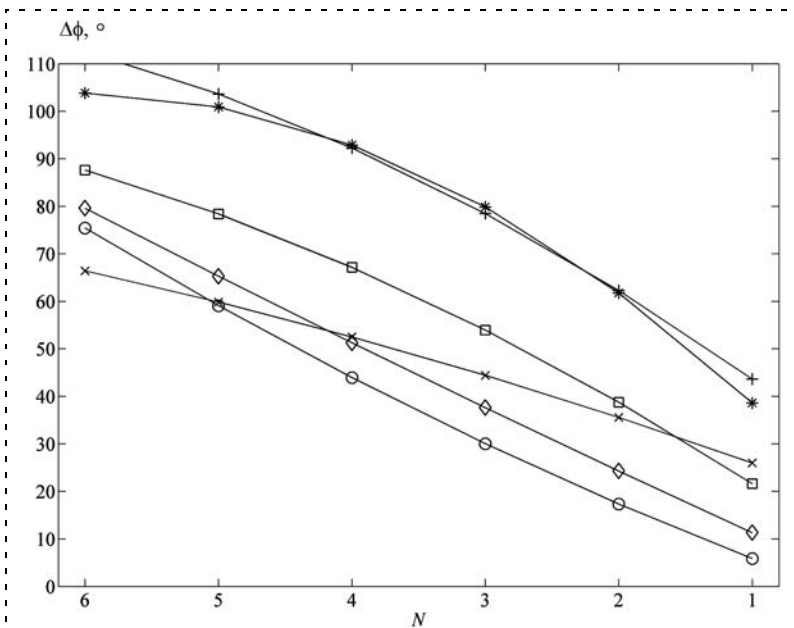


Рис. 5. Зависимость фазового сдвига от метацентрической высоты (h_0) и периода (T_0) собственных колебаний контура; N — номера (в порядке уменьшения) последних перед опрокидыванием шести периодов качки. Для $h_0 = 0,5$ м: * — $T_0 = 5$ с, + — $T_0 = 6$ с, × — $T_0 = 7$ с; для $h_0 = 1,0$ м: ○ — $T_0 = 5$ с, □ — $T_0 = 6$ с, ◇ — $T_0 = 7$ с

При этом отрицательные значения угловой скорости ω_{g1} и ускорения $a_{\theta 1}$ и, соответственно, момента $M_{\theta 1} = a_{\theta 1} I_x$ указывают на то, что силы, формирующие момент, стремятся повернуть контур на наветренную сторону. Дальнейшее развитие процесса опрокидывания свидетельствует о недостаточности кинетической энергии $0,5 I_x \omega_{g1}^2$ для опрокидывания контура непосредственно после максимального сближения точек θ_{g1} и ζ_{g1} . В процессе подъема на следующий гребень волны (ζ_{g1}^*) с углом крена θ_{g1}^* на контур снова синфазно действуют волна и порыв ветра, сообщая ему ускорение $a_{\theta 1}^*$ и угловую скорость ω_{g1}^* , достаточную для накопления соответствующей кинетической энергии вращения и опрокидывания ($\theta_g > 50^\circ$) контура на подветренную сторону.

В обоих случаях (рис. 3 и 4) в процессе подъема на вершины волн контур стремится принять нормальное положение к склону волны [24], т. е. периодически выполняет крен на подветренную сторону. В эти же моменты времени на надстройку контура (см. рис. 2) периодически воздействует давление порывов ветра, способствующих раскачиванию и увеличению крена, что в конечном итоге является причиной максимального накренения контура на вершине волны (θ_{g1} , ζ_{g1}), т. е. фазового сближения максимумов колебаний угла бортовой качки и ординаты центра тяжести перед опрокидыванием контура.

На рис. 5 представлена аппроксимация методом наименьших квадратов [25] результатов вычисления

фазового сдвига между максимумами колебаний угла крена и ординаты центра тяжести контура в течение последних перед опрокидыванием шести периодов. Вычисление значений фазовых сдвигов на каждом периоде выполнено по формуле $\Delta\phi_i = 360\Delta t_i/T_i$, $i = \overline{1,6}$, где T_i и Δt_i — фактическое значение периода бортовой качки и интервала времени (например, на рис. 3 и 4: для $i = 1$, Δt_1) между максимумами колебаний угла крена и ординаты центра тяжести на i -м периоде соответственно. Из анализа диаграмм следует, что с уменьшением метацентрической высоты (h_0) и периода (T_0) бортовой качки снижается сопротивляемость контура к ветроволновому воздействию, так как опрокидывание происходит при больших фазовых сдвигах, соответственно для опрокидывания требуется менее длительный интервал времени ветроволнового воздействия.

Таким образом, в качестве идентификационного признака опасного развития процесса качки, ведущего к опрокидыванию вследствие ветроволнового воздей-

ствия, можно принять положительную тенденцию фазового сближения максимумов колебаний угла бортовой качки и ординаты центра тяжести контура, сопровождающуюся нарастанием амплитуд указанных колебаний.

Заключение

Модуляция волнами ветрового давления на надстройку оказывает существенное влияние на качку контура. Периодическое синфазное воздействие волн и модулированного волнами ветра может привести к развитию скоротечного процесса раскачивания и опрокидывания контура. Увеличение метацентрической высоты и периода собственных бортовых колебаний повышает сопротивляемость контура к ветроволновому воздействию. В практической плоскости в целях обеспечения безопасности судов в условиях штормового моря можно рекомендовать осуществление автоматизированного контроля за амплитудами и фазовым сближением колебаний угла бортовой и ординаты вертикальной качки. При обнаружении опасной тенденции нарастания амплитуд и фазового сближения контролируемых величин судоводителю рекомендуется экстренное изменение курса и (или) скорости судна.

Список литературы

1. Buca M. P., Senjanovic I. Nonlinear Ship Rolling and Capsizing // Brodogadnja. 2006. Vol.57, N 4. P. 321—331.
2. European Maritime Safety Agency. Reports of capsizing and listing: URL: <http://www.emsa.europa.eu/> (Дата обращения: 20.05.11).

3. **Севастьянов Н. Б.** Остойчивость промысловых судов. Л.: Судостроение. 1970. 200 с.

4. **Нечаев Ю. И.** Моделирование остойчивости на волнении. Современные тенденции. Л.: Судостроение, 1989. 240 с.

5. **Ярисов В. В.** Опасные ситуации при оценке безопасности мореплавания различных типов судов // Эксплуатация и проектирование судов и орудий лова. Калининград: БГАРФ, 1999. Вып. 28. С. 29—32.

6. **White A. S., Gleeson P. T., Karamanoglu M.** Control of ship capsizing in stern quartering seas // International Journal of Simulation. 2007. Vol. 8, N 2. P. 20—31.

7. **Zhan-Jun Long, Seung-Keon Lee, and Han-Suk Choi.** Risk evaluation of ship dynamic stability in regular waves // Journal of Marine Science and Technology. 2010. Vol. 18, N 4. P. 530—536.

8. **Surendran S., Venkata Ramana Reddy J.** Numerical simulation of ship stability for dynamic environment // Ocean Engineering. 2003. N 30. P. 1305—1317.

9. **Абрамовский В. А.** Влияние структуры поля скоростей ветра над волнением на динамику морских объектов // Судостроение. 2009. № 6. С. 41—46.

10. **Haddara M. R., Soares C. G.** Wing load on marine structures // Marine Structures. 1999. N 12. P. 199—209.

11. **Bačkalov I., Kalajdžić M., Hofman M.** Inland vessel rolling due to severe beam wind: A step towards a realistic model // Probabilistic Engineering Mechanics. 2010. N 25. P. 18—25.

12. **Bulian G., Francescutto A.** A simplified modular approach for the prediction of the roll motion due to the combined action of wind and waves // Journal of Engineering for the Maritime Environment. 2004. Vol. 218, N 3. P. 189—212.

13. **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.

14. **Ярисов В. В.** Накренение и опрокидывание малотоннажного судна при его заливании попутной волной. Калининград: БГА РФ. 2003. 140 с.

15. **Справочник** по теории корабля: В трех томах. Т. 2 / Под ред. Я. И. Войткунского. Л.: Судостроение, 1985.

16. **Дорожко В. М.** Идентификация снижения сопротивляемости морского судна к динамическому воздействию ветровой нагрузки // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 5. С. 58—63.

17. **Роуч П.** Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980.

18. **Семенова В. Ю.** Расчет нелинейной поперечной качки судна, расположенного лагом к регулярному волнению // Судостроение. 2003. № 4. С. 10—13.

19. **Yakhot V., Orszag S. A.** Renormalization Group Analysis of Turbulence: Basic Theory // Journal of Scientific Computing. 1986. Vol. 1, N 1. P. 1—51.

20. **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.

21. **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.

22. **Колесник В. П.** Решения ANSYS-CFD в авиакосмических технологиях: динамические перестраиваемые сетки в расчетной аэродинамике // АКТО-2008: Авиакосмические технологии и оборудование. Казань-2008. IV Междунар. научно-практ. конф. 12—15 августа 2008 г.

23. **Правила** классификации и постройки морских судов. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2008.

24. **Семенов-Тянь-Шанский В. В., Благовещенский С. Н., Холдилин А. Н.** Качка корабля. Л.: Судостроение, 1969.

25. **Дорожко В. М.** Ортогональные многочлены в моделях регрессии наблюдений // Математическое моделирование. 2003. Т. 15, № 11. С. 45—50.

УДК 004.946

Г. Н. Лебедев, д-р техн. наук, проф.,

А. В. Ефимов, аспирант,
astrowave@gmail.com,

Л. А. Мирзоян, канд. техн. наук, доц.,

Московский авиационный институт
(государственный технический университет)

Метод маршрутизации облета неподвижных объектов при мониторинге наземной обстановки на основе динамического программирования¹

Рассматривается задача облета беспилотным летательным аппаратом группы неподвижных точечных наземных объектов. Предложен алгоритм маршрутизации полета с помощью динамического программирования, позволяющий определить область притяжения в виде эллипса с учетом направления полета.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, маршрутизация полета, функция Беллмана, динамическое программирование

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки по проекту НК-528П/58ФЦП, контракт П-787.

В настоящее время проблема поиска оптимального маршрута полета летательного аппарата (ЛА) является крайне актуальной. Одной из основных причин роста интереса к этой задаче можно назвать стремление сократить продолжительность полета ЛА, тем самым получая возможность гораздо быстрее выполнять мониторинг наземной обстановки, а также снизить расход топлива.

Существуют различные подходы к решению задачи маршрутизации при обслуживании заданного множества объектов, сводящиеся к получению таких процедур, как метод ветвей и границ [1], алгоритм "ближайшего соседа", алгоритм Дейкстры [2], области притяжения которых (границы которых имеют одинаковый штраф) представляют собой либо круг, либо неповорачиваемый эллипс [3] независимо от того, в каком направлении движется в данный момент ЛА по отношению к контрольной точке планируемого маршрута.

Также обычно принимается во внимание существование областей запрета (показанных на рис. 1 в виде двух окружностей радиусом R), обусловленных ограничениями располагаемых перегрузок ЛА при боковом движении.

Таким образом, в данной статье ставится задача маршрутизации полета с учетом динамики ЛА с

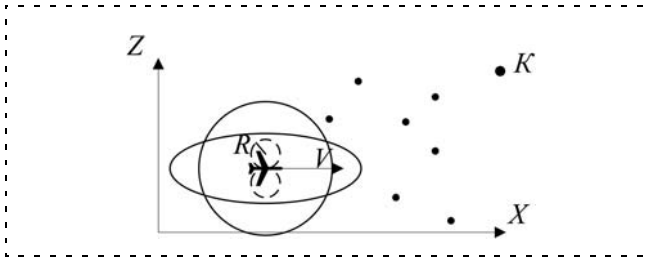


Рис. 1. Картина расположения объектов в регионе и не зависящей от направления полета области притяжения

тем расчетом, чтобы параметры области притяжения менялись в зависимости от направления движения ЛА и окружающего его множества объектов в текущий момент времени.

Постановка задачи

Рассмотрим решение задачи планирования маршрута полета при следующих допущениях.

1. Задано множество контролируемых точечных неподвижных наземных объектов и их координаты x_j, z_j . Относительные важности их наблюдения считаются одинаковыми. По характеру их достижимости можно различить три группы — попавшие в план объекты, находящиеся в передней полусфере; в задней полусфере (более труднодоступной, так как ЛА должен осуществить разворот более, чем на 90°), и объекты, не попавшие в план. Это отличает данную постановку от классической задачи коммивояжера при попадании в каждый пункт.

2. Рассматривается только движение ЛА в горизонтальной плоскости, когда текущее состояние полета характеризуется линейными координатами пути x, z , модулем скорости V и углом α направления скорости. Скорость V считается заданной и неизменной.

3. Динамика бокового движения ЛА при перелете к объекту j может быть приближенно описана дифференциальными уравнениями, если пренебречь разницей в длине пути по прямой и по дуге окружности при перелете в упрежденную точку:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \frac{x_j - x}{\Delta t_j} \approx \frac{x_j - x}{r_j} V; \\ \dot{z} &= \frac{z_j - z}{\Delta t_j} \approx \frac{z_j - z}{r_j} V; \\ \dot{\alpha} &= \frac{\frac{z_j - z}{r_j} - \alpha}{\Delta t_j} \approx \frac{\frac{z_j - z}{r_j} - \alpha}{r_j} V = \frac{\alpha_j - \alpha}{r_j} V. \end{aligned} \quad (1)$$

4. При боковом маневре боковая перегрузка ЛА ограничена, что определяет заданный минимальный

радиус R окружности, по которой доступен разворот ЛА.

5. Для достижения очередного объекта, не лежащего на линии прямолинейного полета, осуществляется наведение методом пропорциональной навигации, в результате чего ЛА пролетает над объектом под известным ракурсом, определяющим новое направление полета новым углом α_j . Процесс пересчета нового угла в статье не рассматривается.

6. В качестве критерия оптимальности маршрута принято условие максимума числа контролируемых объектов за заданное время T , чему соответствует условие минимума среднего времени перелета от одного объекта к другому, определяющее критерий

$$I = \sum_{j=1}^M \frac{r_j}{V} \approx \sum_{j=1}^M \frac{r_j}{V \Delta t} dt \approx \int_0^T \frac{r_j}{V \Delta t} dt \rightarrow \min. \quad (2)$$

Предложенное подынтегральное выражение $f_0 = r_j / V \Delta t$ функционала (2) указывает, что в первом приближении при постоянной скорости V без учета динамики ЛА лучше выбрать ближайший очередной объект на минимальном расстоянии r_j . Величина Δt соответствует предварительной оценке среднего времени перелета между объектами, зависящего от их насыщенности в контролируемом регионе.

При перечисленных допущениях требуется сформировать такой алгоритм маршрутизации, который с учетом ограничений при боковом маневре ЛА обеспечил бы наибольшее число контролируемых объектов, преимущественно расположенных по меняющемуся направлению полета.

Метод решения задачи с помощью динамического программирования

Поскольку выбираемый маршрут есть результат многошагового выбора очередного объекта, а принятие решения на каждом шаге кроме текущего штрафа в виде потерянного времени еще имеет последствия для будущих шагов, наиболее подходящим методом оптимизации является динамическое программирование [4].

Учитывая дискретный характер альтернативных решений при выборе "куда лететь", уравнение Беллмана в частных производных можно записать в виде

$$\begin{aligned} -\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} &= \min_j \left\{ f_{oj} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \dot{x}_j + \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \dot{z}_j + \frac{\partial \varepsilon}{\partial \alpha} \dot{\alpha}_j \right\} = \\ &= \min_j \left\{ f_{oj} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \frac{x_j - x}{r_j} V + \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \frac{z_j - z}{r_j} V + \frac{\partial \varepsilon}{\partial \alpha} \frac{\alpha_j - \alpha}{r_j} V \right\} = \\ &= F_j(x, z, \alpha), \end{aligned} \quad (3)$$

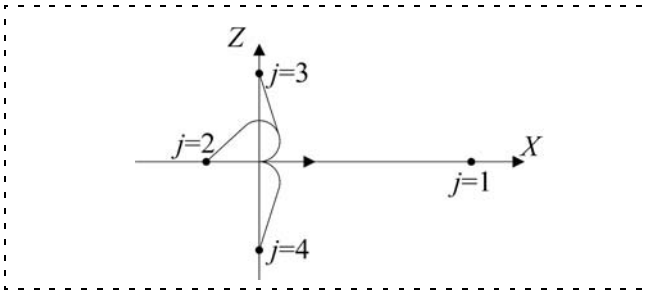


Рис. 2. Расположение объектов в окрестности ЛА, имеющих примерно одинаковую длину достигаемого пути

где ε — функция Беллмана; F_j — функция текущего риска с учетом последствий в будущем; j — номер выбираемого объекта в текущий момент времени. Например, это может быть либо объект впереди по направлению полета ($j = 1$), сзади ($j = 2$), слева ($j = 3$) или справа ($j = 4$), как показано на рис. 2.

Принципиальным отличием решаемой задачи от принятого в методе АКОР допущения о непрерывности управления является то, что управление является альтернативным (в частности, согласно рис. 2, $j = 1, 2, 3, 4$). Поэтому для приближенного управления воспользуемся подходом [5], основанном на вычислении функции минимального риска F_j для различных альтернатив в ситуациях, близких к границам переключения при отклонениях "влево и вправо" от рабочей точки, в которой нельзя отдать предпочтения ни одной альтернативе. Согласно этому методу, вычисление этих функций риска, называемых ординатами риска C_i , осуществляется вначале путем представления функции Беллмана степенным рядом

$$\varepsilon(\bar{x}_n, \tau) = \alpha(\tau) + \sum_{i=1}^n \beta_i(\tau)x_i + \sum_{i=1}^n \gamma_i(\tau)\frac{x_i^2}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n \psi_{ik}(\tau)x_i x_k. \quad (4)$$

Затем, независимо от значений исходных данных решаемой задачи, функции риска $F_j(\bar{x}_n, \tau)$ представляются степенными полиномами того же порядка, что и функция Беллмана $\varepsilon(\bar{x}_n, \tau)$, а ординаты риска

$$C_i^- = \min_j \{F_j(\bar{x}_p - \Delta x_i)\}, \quad C_i^+ = \min_j \{F_j(\bar{x}_p + \Delta x_i)\},$$

$$C_{il}^{++} = \min_j \{F_j(\bar{x}_p + \Delta x_i + \Delta x_l)\} \text{ и коэффициенты } \beta_i,$$

γ_i, ψ_{ik} вычисляются в предположении очевидного предпочтения одной альтернативы перед другими в отдельных точках пространства состояния, например, в середине интервала x_{pi} , а также на левой и правой границах интервала возможных значений

переменных x_i . В отличие от случая открытой области управления $u(\tau)$ задача оптимизации решается при условии, что все коэффициенты функции риска в правой части уравнения Беллмана зависят от j -го номера выбираемой альтернативы, а минимизация функционала осуществляется аппроксимацией множества пересекающихся функций риска F_j одним степенным полиномом, для чего используется метод рабочей точки. Это позволяет записать систему дифференциальных уравнений относительно искомых коэффициентов аппроксимации $\alpha(\tau), \beta_i(\tau), \gamma_i(\tau), \psi_{ik}(\tau)$, определить установившееся значение этих коэффициентов при асимптотическом поведении оптимальной системы и довести решение задачи до конца, если приравнять ординаты риска друг другу:

$$C_0 = C_i^+ = C_i^- = C_{ik}^{+-}. \quad (5)$$

Вычисление ординат минимального риска в различных полетных ситуациях

Предварительные исследования показали, что применительно к данной задаче представление функции Беллмана ε в квадратичной форме недостаточно, чтобы получить адекватное описание. Поэтому была взята следующая аппроксимация:

$$\varepsilon = \alpha + \beta_1 x + 0,5\gamma_1 x^2 + \beta_2 z + 0,5\gamma_2 z^2 + \beta_3 \alpha + 0,5\gamma_3 \alpha^2 + \psi_{12} x z + \psi_{13} x \alpha + \psi_{23} z \alpha + \lambda x z \alpha, \quad (6)$$

где $\beta_i, \gamma_i, \psi_{ik}, \lambda$ — искомые коэффициенты, а последнее слагаемое $\lambda x z \alpha$ содержит произведение трех переменных. Тогда, найдя значения $\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}, \frac{\partial \varepsilon}{\partial z}, \frac{\partial \varepsilon}{\partial \alpha}$ из (6) и подставив их в (3), получим в общем виде формулу для вычисления функций риска:

$$\begin{aligned} F_j(x, z, \alpha) &= \frac{r_j}{V\Delta t} + (\beta_1 + \gamma_1 x + \psi_{12} z + \psi_{13} \alpha + \lambda z \alpha) \times \\ &\times \frac{x_j - x}{r_j} V + (\beta_2 + \gamma_2 z + \psi_{12} x + \psi_{23} \alpha + \lambda x \alpha) \frac{z_j - z}{r_j} V + \\ &+ (\beta_3 + \gamma_3 \alpha + \psi_{13} x + \psi_{23} z + \lambda x z) \frac{\alpha_j - \alpha}{r_j} V = \\ &= \frac{r_j}{V\Delta t} + (\beta_1 + \gamma_1 x + \psi_{12} z + \psi_{13} \alpha + \lambda z \alpha) \frac{\Delta x_j}{r_j} V + \\ &+ (\beta_2 + \gamma_2 z + \psi_{12} x + \psi_{23} \alpha + \lambda x \alpha) \frac{\Delta z_j}{r_j} V + \\ &+ (\beta_3 + \gamma_3 \alpha + \psi_{13} x + \psi_{23} z + \lambda x z) \frac{\Delta \alpha_j}{r_j} V, \quad (7) \end{aligned}$$

где $\Delta x_j = x_j - x$, $\Delta z_j = z_j - z$, $\Delta \alpha_j = \alpha_j - \alpha$ — приращения координат вектора текущего состояния динамической системы.

Теперь можно приступить к вычислению ординат риска, задав в качестве рабочей точки положение ЛА, представленное на рис. 2, когда расстояние до объектов 1, 2, 3, 4 выбрано таким образом, что они примерно одинаковы, и нельзя отдать предпочтение ни одной из альтернатив. При этих допущениях координаты рабочей точки равны $x = x_0$; $z = z_0$; $\alpha = 0$, а расстояние r_j между ЛА и объектами были взяты кратными минимальному радиусу R : $r_1 = 8R$, $r_2 = R$, $r_3 = r_4 = 3R$. Это позволяет вычислить первую ординату C_0 как среднее значение из четырех функций риска, возникающих при перелете ЛА в различных направлениях:

$$C_0 = 0,2\beta_1 + 0,2x_0\gamma_1 + 0,2z_0\psi_{12} + \frac{5,8R}{V^2\Delta t}. \quad (8)$$

Теперь рассмотрим полетные ситуации при отклонениях от рабочей точки. При $x = x_0 + \Delta x_1 = x_0 + R$ минимальный штраф будет при полете ЛА к объекту 1, а при $x = x_0 - \Delta x_2 = x_0 - 9R$ лучше лететь к объекту 2, поэтому

$$\begin{aligned} C_1^+ &= \min_j F_j(x = x_0 + R, z = z_0, \alpha = 0) = \\ &= (x_0 + R)\gamma_1 + z_0\psi_{12} + \frac{7R}{V^2\Delta t}; \\ C_1^- &= \min_j F_j(x = x_0 - 9R, z = z_0, \alpha = 0) = \\ &= \beta_1 + (x_0 - 9R)\gamma_1 + z_0\psi_{12} + \frac{8R}{V^2\Delta t}. \end{aligned} \quad (9)$$

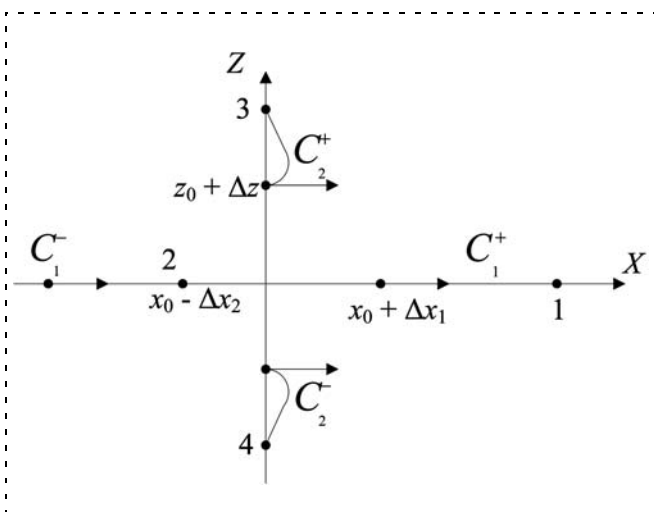


Рис. 3. Иллюстрация полетных ситуаций при поочередных отклонениях по x и z от рабочей точки

Различные по модулю отклонения Δx_1 и Δx_2 были взяты для того, чтобы направление полета ЛА было одинаково — вперед. Иллюстрация полетных ситуаций представлена на рис. 3.

Зададимся теперь отклонениями Δz по второй координате z . При $z = z_0 + \Delta z$ минимальный путь ЛА будет при полете к объекту 3, а при $z = z_0 - \Delta z$ — при полете к объекту 4. Поэтому при $\Delta z = R$ получим

$$\begin{aligned} C_2^+ &= \min_j F_j(x = x_0, z = z_0 + R, \alpha = 0) = \\ &= 0,8x_0\psi_{12} + 0,8\beta_2 + 0,8(z_0 + R)\gamma_2 + \\ &+ \frac{0,55}{R}\beta_3 + \frac{0,55x_0}{R}\psi_{13} + \frac{0,55(z_0 + R)}{R}\psi_{23} + \\ &+ \frac{0,55x_0(z_0 + R)}{R}\lambda + \frac{3,7R}{V^2\Delta t}; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} C_2^- &= \min_j F_j(x = x_0, z = z_0 - R, \alpha = 0) = \\ &= -0,8x_0\psi_{12} - 0,8\beta_2 - 0,8(z_0 - R)\gamma_2 - \\ &- \frac{0,55}{R}\beta_3 - \frac{0,55x_0}{R}\psi_{13} - \frac{0,55(z_0 - R)}{R}\psi_{23} - \\ &- \frac{0,55x_0(z_0 - R)}{R}\lambda + \frac{3,7R}{V^2\Delta t}. \end{aligned}$$

Иллюстрация для оценок ординат C_2^+ и C_2^- также представлена на рис. 3.

Далее, задавшись отклонениями по α , при $\Delta \alpha = \pm \frac{\pi}{2}$ получим очевидный выбор альтернатив полета, как это показано на рис. 4, при достижении объектов 3 и 4.

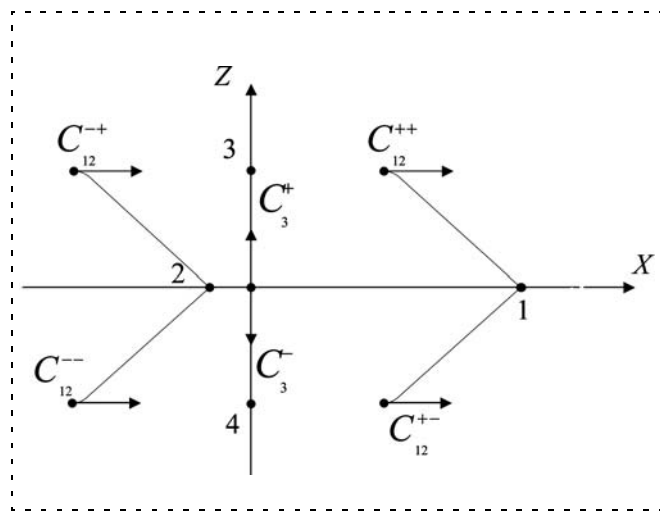


Рис. 4. Иллюстрация полетных ситуаций при отклонении по α и попадании к объектам 3 и 4 и попарных отклонениях по x и z при попадании к объектам 1 и 2

При $\Delta\alpha = \frac{\pi}{2}$ нужно лететь к объекту 3, при $\Delta\alpha = -\frac{\pi}{2}$ — к объекту 4, и это обеспечит минимальное время полета. Поэтому ординаты C_3^+ и C_3^- равны

$$\begin{aligned} C_3^+ &= x_0\psi_{12} + \beta_2 + z_0\gamma_2 + \frac{\pi}{2}(\psi_{23} + x_0\lambda) + \frac{4R}{V^2\Delta t}; \\ C_3^- &= -\left[x_0\psi_{12} + \beta_2 + z_0\gamma_2 + \frac{\pi}{2}(\psi_{23} + x_0\lambda)\right] + \frac{4R}{V^2\Delta t}. \end{aligned} \quad (11)$$

Теперь нужно задаться попарными отклонениями координат системы. Как показано на рис. 4, число полетных ситуаций увеличивается вдвое. Так, при отклонениях по x и z возникают четыре ситуации, для которых очевидно предпочтение перелета к объекту 1 при $x = x_0 + \Delta x_1$ и к объекту 2 — при $x = x_0 + \Delta x_2$. В частности, при $x = x_0 + R$; $z = z_0 + 3R$ получим

$$\begin{aligned} C_{12}^{++} &= 0,97\beta_1 - 0,14\beta_2 - \frac{0,02}{R}\beta_3 + 0,97(x_0 + R)\gamma_1 - \\ &- 0,14(z_0 + R)\gamma_2 + 0,97z_0\psi_{12} - \frac{0,02}{R}(x_0 + R)\psi_{13} - \\ &- \frac{0,02}{R}(z_0 + R)\psi_{23} - 0,02(x_0 + R)\lambda + \frac{7,2R}{V^2\Delta t}. \end{aligned} \quad (12)$$

Аналогичным образом можно поступить при оценке ординат минимального риска C_{13} при рассмотрении четырех ситуаций, показанных на рис. 5.

В этих случаях лучше лететь к объекту 2, если $x = x_0 - \Delta x_2$, и к объекту 1, если $x = x_0 + \Delta x_1$. Поэтому получим, в частности, при $x = x_0 + R$, $\Delta\alpha = \frac{\pi}{2}$

оценку C_{13}^{++} минимального риска в виде

$$\begin{aligned} C_{13}^{++} &= 0,87\beta_1 - \frac{0,225}{R}\beta_3 + 0,87(x_0 + R)\gamma_1 - \\ &- \frac{0,35}{R}\gamma_3 + 0,87z_0\psi_{12} + \left(1,145 + 0,225\frac{x_0}{R}\right)\psi_{13} - \\ &- 0,225\frac{z_0}{R}\psi_{23} + \left(1,145 + 0,225\frac{x_0}{R}\right)z_0\lambda + \frac{8R}{V^2\Delta t}. \end{aligned} \quad (13)$$

При попарных отклонениях по α и z также возникают четыре ситуации, показанные на рис. 5, причем к объекту 2 лучше лететь при $z = z_0 + R$, $\Delta\alpha = -\frac{\pi}{2}$ и $z = z_0 - R$, $\Delta\alpha = \frac{\pi}{2}$, к объекту 3 — при

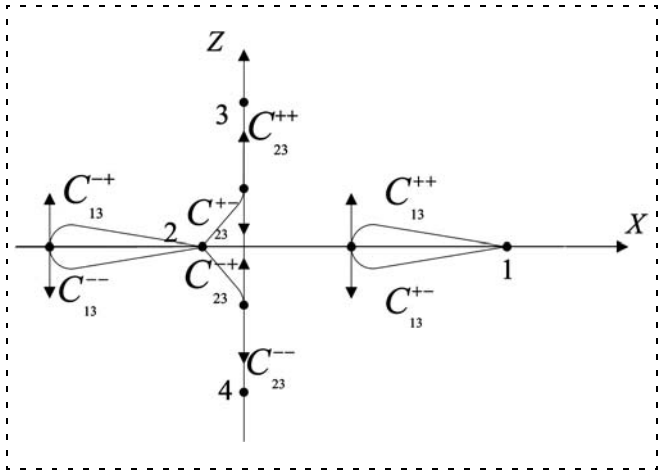


Рис. 5. Иллюстрация полетных ситуаций при попарных отклонениях по α и x и по α и z

$z = z_0 + R$, $\Delta\alpha = \frac{\pi}{2}$, к объекту 4 — при $z = z_0 - R$,

$\Delta\alpha = -\frac{\pi}{2}$. Поэтому ординаты риска C_{23} равны

$$\begin{aligned} C_{23}^{++} &= \beta_2 + (R + z_0)\gamma_2 + x_0\psi_{12} + \\ &+ \frac{\pi}{2}\psi_{23} + \frac{x_0\pi}{R}\lambda + \frac{3R}{V^2\Delta t}; \\ C_{23}^{--} &= -\beta_2 + (R - z_0)\gamma_2 - x_0\psi_{12} + \\ &+ \frac{\pi}{2}\psi_{23} + \frac{x_0\pi}{R}\lambda + \frac{3R}{V^2\Delta t}; \\ C_{23}^{+-} &= -\frac{2}{\pi}\beta_1 - \frac{2}{\pi}\beta_2 - \frac{1}{R}\beta_3 - \frac{2x_0}{\pi}\gamma_1 - \frac{2}{\pi}(z_0 + R)\gamma_2 + \\ &+ \frac{\pi}{2R}\gamma_3 - \frac{2}{\pi}(z_0 + x_0 + R)\psi_{12} + \left(1 - \frac{x_0}{R}\right)\psi_{13} - \\ &- \frac{z_0}{R}\psi_{23} + \left(z_0 + R - \frac{x_0z_0}{R}\right)\lambda + \frac{\pi}{2}\frac{R}{V^2\Delta t}; \\ C_{23}^{-+} &= -\frac{2}{\pi}\beta_1 + \frac{2}{\pi}\beta_2 + \frac{1}{R}\beta_3 - \frac{2x_0}{\pi}\gamma_1 + \frac{2}{\pi}(z_0 - R)\gamma_2 + \\ &+ \frac{\pi}{2R}\gamma_3 + \frac{2}{\pi}(z_0 + x_0 + R)\psi_{12} - \left(1 - \frac{x_0}{R}\right)\psi_{13} + \\ &+ \frac{z_0}{R}\psi_{23} - \left(z_0 + R - \frac{x_0z_0}{R}\right)\lambda + \frac{\pi}{2}\frac{R}{V^2\Delta t}. \end{aligned} \quad (14)$$

Осталось рассмотреть последний случай одновременно трех возможных отклонений Δx , Δz , $\Delta\alpha$, которым соответствует восемь возможных комбинаций, показанных на рис. 6.

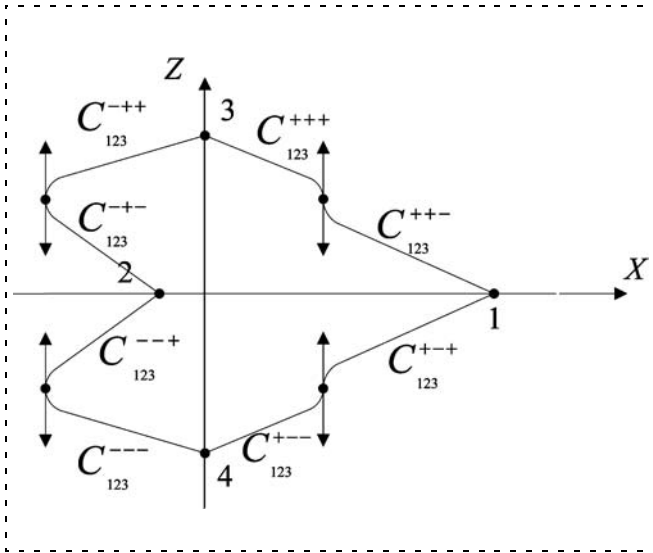


Рис. 6. Иллюстрация восьми полетных ситуаций при одновременном отклонении по x , z и α от рабочей точки

В частности, при $x = x_0 + R$; $z = z_0 + R$; $\Delta\alpha = \frac{\pi}{2}$ нужно лететь к объекту 3, и соответственно ордината риска C_{123}^{+++} равна

$$C_{123}^{+++} = -0,44\beta_1 + 0,88\beta_2 + \frac{0,22}{R}\beta_3 - 0,44(x_0 + R)\gamma_1 + 0,88(x_0 + R)\gamma_2 + \frac{0,34}{R}\gamma_3 - (0,44z_0 + 0,88x_0 + 0,44R)\psi_{12} + \left(\frac{0,22x_0}{R} - 0,46\right)\psi_{13} + \left(\frac{0,22z_0}{R} + 1,6\right)\psi_{23} + \left(\frac{0,22x_0z_0}{R} - 0,5z_0 + 1,64x + 0,93R\right)\lambda + \frac{2,3R}{V^2\Delta t}. \quad (15)$$

Таким образом, если проанализировать все рассмотренные выше полетные ситуации, то можно увидеть, что всего получается 27 различных ординат, а приравнивание их друг другу для оценки 10 искомых коэффициентов β_i , γ_i , ψ_{ik} , λ функции Беллмана представляет трудно обозримое число систем уравнений, равное числу сочетаний C_{27}^{10} . Поэтому был использован упрощенный подход, для которого дополнительно потребуются так называемые "средние" ординаты риска C_{13} и C_{23} , вычисленные по формулам

$$C_{13} \approx 0,25(C_{13}^{++} + C_{13}^{+-} + C_{13}^{-+} + C_{13}^{--});$$

$$C_{23} \approx 0,25(C_{23}^{++} + C_{23}^{+-} + C_{23}^{-+} + C_{23}^{--}).$$

Приближенный аналитический синтез функции Беллмана в задаче маршрутизации полета

Приравнивая друг другу ординаты C_{13} и C_{23} согласно изложенной в [5] методике, можно сразу вычислить один из искомых коэффициентов функции Беллмана

$$\gamma_3 = \frac{2,5R^2}{V^2\Delta t}. \quad (16)$$

Поскольку при приравнивании друг другу ординат риска по условию (5) существует избыточное число вариантов составленных уравнений, используем вначале только ординаты риска при одиночных отклонениях по x , z и α в случаях, не связанных с дальнейшими упрощениями. Это позволяет сразу вычислить коэффициенты γ_1 и γ_2 и получить соотношения, облегчающие дальнейшие расчеты.

Приравняем ординаты $C_1^+ = C_1^-$. Тогда с помощью формул (8) и (9) получим

$$\gamma_1 = \frac{0,1}{V^2\Delta t}. \quad (17)$$

Тогда при условии $C_1^+ = C_0$ получим равенство

$$\beta_3 + \gamma_1x_0 + \psi_{12}z_0 = \frac{-1,65R}{V^2\Delta t}. \quad (18)$$

Приравнивая ординаты $C_2^+ = C_2^-$ с помощью формул (10), получим

$$0,8(x_0\psi_{12} + \beta_2 + z_0\gamma_2) + \frac{1}{R}[\beta_3 + x_0\psi_{13} + z_0(\psi_{23} + x_0\lambda)] = 0. \quad (19)$$

Из условия равенства $C_3^+ = C_3^-$ с помощью формул (11) получим

$$x_0\psi_{12} + \beta_2 + z_0\gamma_2 = 0. \quad (20)$$

Тогда из равенств (18) и (19) следует, что

$$\beta_2 + x_0\psi_{13} + z_0(\psi_{23} + x_0\lambda) = 0. \quad (21)$$

Далее, приравнивая ординаты $C_1^+ = C_3^+$ и $C_1^+ = C_2^+$, получим два равенства

$$0,64R\gamma_2 + \psi_{23} + \lambda x_0 = \frac{1,6R}{V^2\Delta t};$$

$$\psi_{23} + \lambda x_0 = \frac{0,9R}{V^2\Delta t}. \quad (22)$$

Отсюда можно вычислить коэффициент γ_2 функции Беллмана:

$$\gamma_2 = \frac{1,25R}{V^2\Delta t}. \quad (23)$$

Равенства (18)—(22) потребуются для вычисления остальных семи коэффициентов функции Беллмана, а именно $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \psi_{12}, \psi_{23}, \psi_{13}, \lambda$, найденных следующим путем. Приравняв ординаты $C_{13}^{++} = C_1^+; C_{123}^{+++} = C_1^+; C_{12}^{++} = C_1^+$, получим систему трех линейных уравнений относительно неизвестных коэффициентов ψ_{12}, ψ_{13} и λ .

Решение этой системы дает результаты

$$\psi_{13} = \frac{1,3z_0 - 0,33R}{V^2\Delta t}; \psi_{12} \cong 0; \lambda = \frac{-1,3R}{V^2\Delta t}. \quad (24)$$

Вычисление оставшихся коэффициентов не представляет трудности. Зная значения ψ_{12} и γ_1 , из равенства (18) находим коэффициент β_1 , из равенства (20) при известных значениях ψ_{12} и γ_2 находим коэффициент β_2 . Зная значение ψ_{13} и условие (22), находим коэффициент β_3 с помощью равенства (21), а коэффициент ψ_{23} при известном значении λ определяем из равенства (22). Тогда получим

$$\begin{aligned} \beta_1 &= -\frac{1,65R + 0,1x_0}{V^2\Delta t}; \beta_2 = -\frac{1,25z_0}{V^2\Delta t}; \\ \beta_3 &= \frac{0,33x_0R - 0,9z_0R - 1,3x_0z_0}{V^2\Delta t}; \\ \psi_3 &= \frac{0,9R + 1,3x_0}{V^2\Delta t}. \end{aligned} \quad (25)$$

Этим завершается аналитический расчет всех 10 коэффициентов функции Беллмана, вычисляемых по формулам (16)—(17), (23)—(25). Нужно подчеркнуть, что во все эти формулы входят параметры V и R , характеризующие свойства ЛА, и характеризующие внешнюю среду параметры: x_0 — это среднее значение координат x_j ($j = 1, \dots, M$) этих объектов; z_0 — это среднее значение координат z_j ($j = 1, \dots, M$) этих объектов; Δt — среднее время перелета от одного объекта в другой как фактор насыщенности контролируемого региона.

Наконец, если подставить найденные коэффициенты в само выражение (7) функции риска F_j и приравнять эту функцию некоторой константе, то можно получить границу области притяжения, на которой значение риска одинаково. Полученная геометрическая интерпретация, представленная на рис. 7 (см. третью сторону обложки), весьма полезна и указывает на то, что найденная фигура весьма похожа на эллипс, повернутый на угол α . Также при выборе очередного объекта явное предпочтение отдается тем объектам, которые находятся по пути направления полета. Объекты слева и справа менее предпочтительны, а последней по приоритету является часть региона в задней полусфере, что пол-

ностью соответствует физическому смыслу решаемой задачи. На рис. 7 также показаны две окружности, определяющие область недоступных для наблюдения в данный момент наземных объектов.

Аппроксимация функции Беллмана и пример работы полученного алгоритма маршрутизации

Полученный аналитический результат предполагается использовать на каждом шаге выбора очередного объекта следующим образом. При попадании к объекту ($j - 1$) строится прямоугольное окно заданного размера (например, $10R \times 10R$), и внутри определяется состав попавших в него объектов. Это позволяет найти вначале параметры этих объектов в окрестности $x_0, z_0, \Delta t$. Затем при заданных значениях x, z и α ЛА для каждого объекта $j = 1, \dots, M$ вычисляется поочередно функция риска F_j и определяется тот объект, у которого значение F_j минимально. Затем вычисляется новый угол α направления полета, при котором происходит пролет ЛА над новым объектом. Далее после перелета к этому объекту указанная процедура в алгоритме повторяется. Пример работы полученного алгоритма приведен на рис. 8.

Таким образом, вычисление функций риска происходит многократно. Поэтому эту процедуру целесообразно упростить. С этой целью воспользуемся тригонометрической формулой для описания границы одинакового значения риска в виде эллипса

$$\begin{aligned} F_j^* &= \sqrt{[(\Delta x_j - a)\cos\varphi + (\Delta z_j - b)\sin\varphi]^2 + \dots} \\ &\rightarrow + K[(\Delta z_j - b)\cos\varphi + (\Delta x_j - a)\sin\varphi]^2 - 1, \end{aligned}$$

где a и b — координаты центра; K — коэффициент "сжатия" его главных осей; φ — угол приращения; $\Delta x_j, \Delta z_j$ — приращения координат местоположения

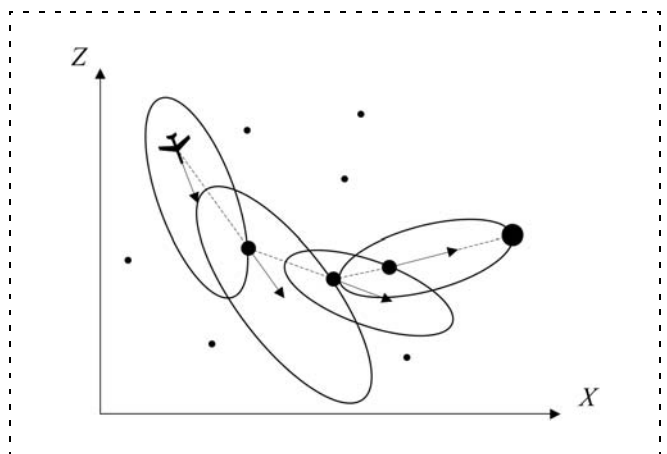


Рис. 8. Пример последовательного выбора наблюдаемых объектов

ЛА при перелете к объекту j . При угле $\varphi < \frac{\pi}{4}$ функцию

F_j^* можно упростить следующим образом:

$$F_j^* = \sqrt{[(\Delta x_j - a) + (\Delta z_j - b)\varphi]^2} + \rightarrow \\ \rightarrow + K[(\Delta z_j - b) + (\Delta x_j - a)\varphi]^2 - 1,$$

а при ее разложении в ряд Тейлора можно получить следующую аппроксимацию:

$$F_j^* = r_j + \frac{\Delta x_j}{r_j} [-a + (K-1)b\varphi] + \\ + \frac{\Delta z_j}{r_j} [-Kb + (K-1)a\varphi] - \frac{ab\varphi(K-1)}{r_j}. \quad (26)$$

Формула (26) удобна для сопоставления с выражением (7), в результате чего параметры "повернутого" эллипса оказываются равными

$$a = 1,65R + 0,1x_0; \quad b = z_0; \quad \varphi = \alpha + \Delta\alpha_j; \\ K = \frac{1,25(Rz_0 + 1,45x_0z_0)}{Rz_0 + 1,45x_0z_0 - 0,36x_0R}. \quad (27)$$

Зависимость параметров эллипса a , b , φ , K от x_0 , z_0 также соответствует характеру предпочтения в принятии решений.

Выводы

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Показано, что область притяжения в выборе альтернативы маршрутного полета есть эллипс, главная ось которого повернута в направлении полета ЛА, а его центр сдвинут вперед, что при выборе очередного объекта дает предпочтение объектам, лежащим по пути движения ЛА.
2. Найдена зависимость параметров эллипса от значений x_0 , z_0 , Δt , характеризующих топологию расположения контролируемых объектов в заданном регионе.

Список литературы

1. Лебедев Г. Н. и др. Теория оптимальных систем. М.: МАИ, 1999. 317 с.
2. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ. 2-е изд. М.: Вильямс, 2006.
3. Галютин В. Б. Планирование маршрута на основе самообучения // Авиакосмическое приборостроение. 2002. № 2. С. 16–18.
4. Беллман Р. Динамическое программирование. М.: ИЛ, 1960. 215 с.
5. Боголюбов А. А., Галютин В. Б., Лебедев Г. Н. Проблема управления полетом с помощью искусственного интеллекта. Авиакосмическое приборостроение. 2002. № 1. С. 21–22.

ИНФОРМАЦИЯ

24–26 апреля 2012 года,

Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., Саратов, Россия

29–31 мая 2012 года,

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

2–4 октября 2012 года,

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина

Распределенная во времени и пространстве

XXV Международная научная конференция

«МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ» (ММТТ-25)

Председатель конференции — академик РАН Г. И. Марчук

Направления работы конференции:

1. Качественные и численные методы исследования дифференциальных уравнений
 2. Оптимизация и оптимальное управление технологическими процессами
 3. Математическое моделирование технологических процессов
 4. Математическое моделирование и проектирование инженерно-экологических систем
 5. Компьютерная поддержка производственных процессов
 6. Интеллектуальные системы в технике и технологиях
 7. Математические методы и задачи в медицине и биофизике
 8. Математические методы в экономике, менеджменте и гуманитарных науках
 9. Информационные технологии в технике и образовании
 10. Математическое моделирование информационно-измерительных и телеметрических систем
- Во время работы конференции состоится **Школа молодых ученых (ШМУ-17)**

Подробная информация о конференции и условиях участия в ней размещается на сайте <http://mmtt25.sstu.ru>

CONTENTS

Sergeev S. F. Mechatronics as a Convergent Applied Science discipline 2

In this article we consider the basis of mechatronics as an output of the social dynamic self-organizing system. The self-organizing system produce the scientific discourse, centered on technical, technological and science-based ideas of regulatory systems. We present the main areas of mechatronics development, which determined by the convergent structure of society's science and technological environment.

Keywords: mechatronics, convergence, paradigm, self-organizing, postclassical science

Krasnodubets L. A., Kramar V. A. Design Of Adaptive Controllers For Mechatronic Systems 7

Methods of the new technology for designing of continuous control systems movement, built on the use of the concepts of inverse tasks of dynamics, combined with the optimization criteria on energy propagate on mechatronic systems. In this analytical minimization of the local quadratic criterion is replaced by a numerical procedure allows to obtain the finite – difference equation for the required control, conferring the adaptive properties to mechatronic system. The process of adaptation in a system with digital controller and conditions for its stability has been researched. The basic relations for the synthesis of parameters of an adaptive digital controller were given. Simulation carried out comparative analysis of the dynamic characteristics of the two mechatronic systems with adaptive and traditional P and PI – controllers.

Keywords: mechatronic system, the energy criterion, adaptation, local optimization, the control law, the digital controller, synthesis, analysis, simulation

Gaiduk A. R., Plaksienko E. A. Synthesis of Separate and Coherent Multivariate Control Systems 13

To shown possibility of the exact decision of multivariable plant decomposition problem on a line of a one-dimensional independent channels. On the basis of output and influences control the method of multivariable control systems synthesis both independent in I. N. Voznesensky's sense and coherent is offered in view of requirements to control processes quality.

Keywords: multivariable plant, stabillability, decomposition, synthesis, control, separate, coherent, stability

Mozzhechkov V. A., Savin A. S. Mathematical Model of Electric Actuators for Valves with the Worm Mechanism for Torque Measurements 21

Mathematical model of electric actuators for valves with the worm mechanism for torque measurements offered. The model allows to investigate the influence of design and operational parameters of the actuator, as well as its modes of loading on the dynamic characteristics of information and power processes occurring in the actuator.

Keywords: mathematical model, electric actuator, pipeline armature, valves, worm gear, modeling of dynamic processes

Artemenko Yu. N., Gorodetsky A. E., Doroshenko M. S., Konovalov A. S., Kuchmin A. Yu., Tarasova I. L. Problems of the Choice of Electric Drives of Space Radio-Telescope System Dish System 26

Following questions of a choice of electric motors are considered: calculation of power and thermal characteristics of the electric drive, efficiency of application of various types of electric drives, use substantiation piezoelectric engine and mathematical model of the engine.

Features of operation of electric drives for control systems of space radio telescopes are described. Calculation of power and thermal characteristics of electric drives for various subsystems of management of a space radio telescope is resulted. On the basis of comparison of efficiency of application of the electromagnetic engine and piezoelectric engine in the conditions of space the recommendation about use piezoelectric engine is given. The mathematical model piezoelectric engine is resulted, allowing to make researches of dynamics of various subsystems of management of a space radio telescope.

Keywords: space radio-telescope, automatic control system, cryogenic temperatures, antenna-system electric drivers

Korostelev V. F. Development of the Metal-Working Industry in Italy and in Russia. 32

Last years among scientists and experts disagreements were outlined in estimations of a condition of domestic metal-working industry. On an example of Italy it is shown that in the situation which have developed in the international market in primary position there is the one who uses scientific and a mental potential more effectively. The outlined rapprochement of Italy and Russia gives new possibilities for development of mutually advantageous cooperation in scientific and industrial sphere.

Keywords: training of the Russian students at Milan university and at the Italian enterprises, high level of technologies of metal working, possibility for researches and joint projects on creation of the equipment for highly effective processes of processing

Buriyan Yu. A., Sorokin V. N., Kapelyukhovskiy A. A. Intensity of Radiation Control System of Bar Downhole Hydrodynamic Generator 35

In article possibility of construction of an extreme control system by intensity of radiation by the rod hydrodynamic generator located in a borehole at level of an oil layer is considered.

Keywords: borehole, hydrodynamic source, resonant frequency, expense of a liquid, extreme control system

- Briskin E. S., Maloletov A. V., Likhobabin D. O.** About Control of an Operating Mode of Deep-Well Pump Installation 40
Deep-well pump installation work is considered and studied. The problem about control of angular speed of a leading crank of pumping unit for the coordination of plunger speed with speed of a filtration of a liquid is solved.
Keywords: deep-well pump installation, permeability, speed of a filtration, the volume expense
- Kuzovljov D. I., Tizik A. P., Treskov Yu. P.** Decompositional Algorithm for Solving Transportation Problem with Fixed Channel Capacities 45
In this paper the new decompositional method for solving transportation problem with fixed channel capacities. Method is based on decomposition of initial problem into fixed quantity of 1-dimencional problems, and then, if there is such need, into several 2-dimencional problems. Permissibility is proved with flow method. Integrality and monotony of iterational process on the objective function provides final of the algorithm. In the result one may achieve only one optimal solution or system of restrictions, from wich one may get all optimal solution. The algorithm is illustrated by a concrete example.
Keywords: transportation problem, decomposition, network flows
- Grishina T. G.** Likelihood Substantiation And Decision-Making At Management Of The Automated Manufacture 48
In the article are the major factors influencing supportability of making decisions at management by automated manufacture considered. The probabilistic approach to definition of justification the factors influencing validity of making decisions is offered. The decision of a question on quantitative characteristics of influence the factors, in particular factors of information incompleteness and discrepancy is resulted.
Keywords: probabilistic approach, supportability, performance criteria, nonobjective variables
- Vittikh V. A.** Intersubjective Systems as Entities of Post-Non-Classical Science 53
Proceeding from the post-non-classical scientific rationality the paper substantiates the necessity of introduction of the term "intersubjective systems" and development of the corresponding theory.
Keywords: intersubjective system, post-non-classical scientific rationality, subjectivity, intersubjectivity, communicative action, actor, holon, self-organization
- Dorozhko V. M.** Identification of Dangerous Development of the Vessel Roll at Influence of the Wind and Waves 57
The method of computing hydrodynamics was used to modeling of a roll of cross-section of a fishing boat (contour) in the conditions of wind-wave influence. It is revealed, that an identification sign of dangerous development of rolling process, leading to capsizing, is the positive tendency of phase rapprochement of maximums of roll angle and heave ordinate of the contour, escorted by increasing of their amplitude.
Keywords: ocean vessel, identification sign, wind-wave effects, roll, heave, vessel capsizing
- Lebedev G. N., Efimov A. V., Mirzoyan L. A.** Path Planning for an Aircraft Performing Observation of Static Ground Targets in Controlled Area Based on Dynamic Programming 63
In this article we consider a path planning problem for an aircraft performing reconnaissance of static ground targets. We suggest an algorithm which uses a dynamic programming for solving a path planning problem and allows us to determine the domain of attraction in the form of an ellipse.
Keywords: unmanned aerial vehicle, routing, Bellman function, dynamic programming

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 07.11.2011. Подписано в печать 19.12.2011. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
 Усл. печ. л. 8,82. Заказ МН112. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати,
 телерадиовещания и средств массовых коммуникаций
 Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02
 Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".
 105120, г. Москва, ул. Нижняя Сыромятническая, д. 5/7, стр. 2, офис 2.