Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издаётся с 1947 г.

Том 72

11
2018

Главный редактор

Микрин Е.А. – д.т.н., проф., академик РАН, ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королёва

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Афанасьев В.Н. – д.т.н., проф., МИЭМ НИУ ВШЭ
Ван Мэйлин – д.т.н., проф., Пекинский политехн. ун-т (КНР)
Иванов А.П. – д.э.н., проф., МГУПС (МИИТ)
Кларк Р. – д.т.н., проф., КИУ (г. Ворвик, Великобритания)
Криони Н.К. – д.т.н., проф., УГАТУ (г. Уфа)
Кузнецов А.Е. – д.т.н., проф., РГРТУ (г. Рязань)
Мальцева С.В. – д.т.н., проф., НИУ ВШЭ
Микаева С.А. – д.т.н., проф., МГУПИ
Неусыпин К.А. – д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Нефёдов Е.И. – д.ф.-м.н., ИРЭ РАН
Никифоров В.М. – д.т.н., проф., ФГУП «НПЦАП им. Н.А. Пилюгина»
Пролетарский А.В. – д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Путилов В.Н. – ООО «Изд-во "Инновационное машиностроение"» (заместитель главного редактора)
Румянцева О.Н. – генеральный директор ООО «Изд-во "Инновационное машиностроение"»
Ся Юаньцин – д.т.н., проф., Пекинский политехн. ун-т (КНР)
Фу Ли – д.т.н., проф., Ин-т Бейхан (КНР)
Фёдоров И.Б. – д.т.н., проф., академик РАН, президент МГТУ им. Н.Э. Баумана
Хэ Юн – д.т.н., проф., Нанкинский ун-т науки и технологии (КНР)
Шахнов В.А. – д.т.н., проф., член-кор. РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана
Шибанов Г.П. – д.т.н., проф., Гос. лётно-испытат. центр им. В.П. Чкалова
Янович Е.А. – д.э.н., проф., Кошалинский политехн. ин-т (Польша)

Редакторы — **Мымрина И.Н., Селихова Е.А.**
Компьютерная вёрстка — **Конова Е.В.**

Адрес редакции:
107076, Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2.
Тел.: 8 (499) 268-41-77.
E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;
http://www.mashin.ru

Учредитель:

ООО «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО "ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"»

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре 29 мая 2014 г. (ПИ № ФС77-58102), входит в перечень утверждённых ВАК при Минобрнауки России изданий для публикации трудов соискателей учёных степеней, а также в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Шалумов А.С., Соловьев Д.Б., Шалумов М.А. АСОНИКА-М-шкаф: моделирование типовых конструкций шкафов и стоек электроники на механические воздействия 483
Асадов Х.Г., Джахидзаде Ш.Н., Абдулов Р.Н. Метод многоступенчатой оптимизации сложных систем, характеризуемых множеством многокритериально оптимизируемых процессов 489
Кондрашов С.Н., Шумихин А.Г., Берсенева Н.И. Адаптивное управление составом формалина при его производстве . . . 492
Даев Ж.А., Султанов Н.З. Модель автоматической системы контроля и прогнозирования загрязнения магистрального газопровода на основе нечёткой логики 495
Мустафаев М.Г. Анализ эффективности функционирования и управления производственной системой предприятия . . . 499
Горбунов А.А., Балакин А.В., Микаева С.А. Исследование условий и степени развития экосистемы аквариума при освещении специальными люминесцентными лампами 502

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Шахтарин Б.И., Асланов Г.К., Асланов Т.Г. Определение координат очага землетрясения с использованием фигур второго порядка — эллипса и гиперболы 505
Лихоеденко К.П., Ревуцкий С.Д., Серегин Г.М., Сучков В.Б., Каракулин Ю.В. Современные технологии автоматизированного проектирования сверхвысокочастотных устройств . . . 510
Неусыпин К.А., Чжан Лифей, Ху Цяоцу, Шэнь Кай. Исследование точности оценивания погрешностей инерциальной навигационной системы при вертикальном перемещении летательного аппарата 517

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Шахнов В.А., Зинченко Л.А., Резчикова Е.В., Макарчук В.В., Сорокин Б.С. К проблеме моделирования динамических систем в наноинженерии 523

ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

По страницам журналов 528

© Издательство «Инновационное машиностроение», «Автоматизация. Современные технологии», 2018

Automation. Modern Technologies

MONTHLY INTERBRANCH SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

It is published since 1947

Volume 72 11 / 2018

Chief in Editor

Mikrin E.A. – dr.en.s., prof., academician of the RAS, RSC «Energy» behalf of S.P. Korolev

EDITORIAL COUNCIL:

Afanasyev V.N. – dr.en.s., prof., MIEM NRU HSE
Wang Meiling – Ph.D., prof., Beijing Ins. of Technology, P.R. China
Ivanov A.P. – dr.ec.s., prof., MSURE (MIIT)
Clark R. – Ph.D., prof., EMB of Warwick Un., UK
Krioni N.K. – dr.en.s., prof., USATU, Ufa
Kuznetsov A.E. – dr.en.s., prof., RSREU, Ryazan
Maltseva S.V. – dr.en.s., prof., NRU HSE
Mikaeva S.A. – dr.en.s., prof., MSUPI
Neusypin K.A. – dr.en.s., prof., MSTU behalf of N.E. Bauman
Nefedov E.I. – dr.ph.-m.s., IRE RAS
Nikiforov V.M. – dr.en.s., prof., FSUE «NPCAP behalf of N.A. Pilyugin»
Proletarskiy A.V. – dr.en.s., prof., MSTU behalf of N.E. Bauman
Putilov V.N. – LLC «Publishing "Innovative machine building"» (deputy chief editor)
Rumyantseva O.N. – General Director of LLC «Publishing "Innovative mashine building"»
Xia Yuantsin – Ph.D., prof., Beijing Ins. of Technology, P.R. China
Fu Li – Ph.D., prof., Beikhan Un., P.R. China
Fedorov I.B. – dr.en.s., prof., academician RAS, President of MSTU behalf of N.E. Bauman
He Yung – Ph.D., prof., Nanjing Un. of Science and Technology, P.R. China
Shakhnov V.A. – dr.en.s., prof., corr. member of RAS, MSTU behalf of N.E. Bauman
Shibanov G.P. – dr.en.s., prof., State Flight Test Center behalf of V.P. Chkalov
Yanovich E.A. – dr.ec.s., prof., Koszalin Polytechnic. Ins., Poland

Editors — **Mymrina I.N., Selikhova E.A.**
Computer layout — **Konova E.V.**

Editorial address:
107076, Moscow, Kolodezny lane – 2a, build. 2
Tel.: +7 (499) 268-41-77.
E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;
http://www.mashin.ru

Founder:

LLC «SCIENTIFIC AND TECHNICAL PUBLISHING "INNOVATIVE MACHINE BUILDING"»

The journal was registered in the Roskomnadzor on May 29, 2014 (PI No. FS77-58102), it is included in the list of publications approved by the Higher Attestation Commission (VAK) of the Russian Ministry of education and science for publication of the works of applicants for academic degrees and the system of the Russian index scientific citation (RINC)

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

Shalumov A.S., Soloviev D.B., Shalumov M.A. АСОНИКА-М-cabinet: Modeling of typical designs of electronics cabinets and racks on mechanical impacts 483
Asadov Kh.G., Dzhakhidzade Sh.N., Abdulov R.N. The method for multistage optimization of complex systems characterized by a set of multicriterion optimized processes 489
Kondrashov S.N., Shumikhin A.G., Berseneva N.I. Adaptive control of formalin formulation during its production 492
Daev Zh.A., Sultanov N.Z. Model of an automatic system for monitoring and prediction the contamination of a trunk gas pipeline based on fuzzy logic 495
Mustafayev M.G. Analysis of the operation and management efficiency for the production system of enterprise 499
Gorbunov A.A., Balakin A.V., Mikaeva S.A. Research of the conditions and the development degree of the aquarium ecosystem under special fluorescent lamps 502

MODERN TECHNOLOGIES

Shakhtarin B.I., Aslanov G.K., Aslanov T.G. Determination of the earthquakes centre coordinates using second order figures: ellipse and hyperbola 505
Likhoedenko K.P., Revutskiy S.D., Seregin G.M., Suchkov V.B., Karakulin Yu.V. Modern technologies of automatic designing of microwave devices 510
Neusypin K.A., Chzhan Lifey, Khy Tsyaotsy, Shen Kay. Research of the estimating accuracy of the inertial navigation system errors at vertical movement of an aircraft 517

INFORMATIONAL TECHNOLOGIES

Shakhnov V.A., Zinchenko L.A., Rezchikova E.V., Makarchuk V.V., Sorokin B.S. To the problem of modeling dynamic systems in nanoengineering 523

SURVEY OF PERIODICALS

Periodicals review 528

© Publishing «Innovative machine building», «Automation. Modern technologies», 2018

УДК 621.396.6.019.3

А.С. Шалумов, д-р техн. наук, проф.
(Научно-исследовательский институт «АСОНИКА»),
Д.Б. Соловьев, канд. техн. наук
(РКК «Энергия» им. С.П. Королёва),
М.А. Шалумов, канд. техн. наук
(Научно-исследовательский институт «АСОНИКА»)

ALS140965@mail.ru

АСОНИКА-М-шкаф: МОДЕЛИРОВАНИЕ ТИПОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ШКАФОВ И СТОЕК ЭЛЕКТРОНИКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Рассмотрены вопросы автоматизированного расчёта механических характеристик типовых конструкций шкафов и стоек радиоэлектронных средств при воздействии гармонической и случайной вибраций, одиночных и многократных ударов, линейных ускорений: назначение, описание подсистемы АСОНИКА-М-шкаф, примеры графического ввода конструкции, задания исходных данных, результатов расчётов.

Ключевые слова: радиотехническое устройство; моделирование; механические характеристики; гармоническая и случайная вибрации; одиночные и многократные удары; линейные ускорения.

The automated calculation problems of typical designs mechanical characteristics for cabinets and racks of radio electronic equipment at the impact of harmonic and random vibrations, single and multiple strikes, linear accelerations are considered. Designation, description of the subsystem ASONIKA-M-CABINET, examples of graphical design input, initial data definition and calculation results are given.

Keywords: radio engineering device; modeling; mechanical characteristics; harmonic and random vibration; single and multiple strikes; linear acceleration.

Назначение АСОНИКА-М-шкаф. Изначально подсистема автоматизированной системы обеспечения надёжности и качества аппаратуры (АСОНИКА) [1—3] АСОНИКА-М-шкаф была предназначена для расчёта механических характеристик шкафов радиоэлектронных средств (РЭС) при воздействии гармонической и случайной вибраций, одиночных и многократных ударов, линейных ускорений. После объединения её интерфейса с интерфейсом подсистемы АСОНИКА-М-3D (с версии 6.2) пользователям АСОНИКА-М-шкаф стали доступны расчёты на тепловые воздействия, в том числе с учётом усталостных разрушений. В состав подсистемы АСОНИКА-М-шкаф входит база данных (БД) с физико-механическими параметрами конструкционных материалов.

В настоящее время для построения конструкций шкафов используется либо встроенная в АСОНИКА-М-3D CAD-система, либо отдельная подсистема АСОНИКА-CAD. После создания конструкций шкафов они импортируются в интерфейс АСОНИКА-М-3D. Здесь задаются параметры конструкции и воздействия, выполняются расчёты и выводятся результаты.

Благодаря возможностям подсистемы АСОНИКА-М-3D можно получить на выходе поля выходных величин (перемещений, ускорений, напряжений), графики амплитудно-частотных характеристик (АЧХ), графики вольт-амперных характеристик (АВХ), абсолютные и относительные значения выходных величин, значения выходных величин в узлах конечно-элементной (КЭ) сетки, процентное превышение напряжениями допустимых значений, деформированное состояние конструкций с учётом усиления и анимацию отклика конструкции на механические воздействия.

После получения результатов данные передаются в другие подсистемы для дальнейшего расчёта. В этих целях, например, широко используется подсистема АСОНИКА-УМ для

управления данными с возможностью автоматической передачи информации между различными уровнями иерархии конструкции при моделировании «сверху вниз».

Создание конструкций шкафов и стоек РЭС средствами CAD-системы. Подготовка и ввод исходных данных осуществляются с помощью интерфейса графического ввода конструкций АСОНИКА-CAD. При запуске АСОНИКА-CAD необходимо выбрать тип конструкции «шкаф». Загрузится интерфейс ввода конструкции шкафа РЭС (рис. 1). При создании конструкции шкафа следует использовать только геометрические параметры, так как при импорте конструкции в АСОНИКА-М-3D крепления, контрольные точки и физические параметры удалятся. Все недостающие данные нужно будет задать в АСОНИКА-М-3D.

Интерфейс АСОНИКА-CAD позволяет строить модель шкафов РЭС разной конфигурации — с различными числом этажей конструкции, её размерами, числом блоков этажей, параметрами плат блоков. Интерфейс ввода конструкции шкафа РЭС состоит из рабочей области, главного меню и панели управления. Рассмотрим некоторые элементы интерфейса.

Панель управления состоит из визуальных параметров и команд управления. Имеются четыре режима визуальных параметров: полупрозрачный шкаф, полупрозрачный блок, показать размеры шкафа, показать толщины стенок шкафа.

Рис. 1. Выбор типа конструкции «шкаф» в АСОНИКА-CAD

Рассмотрим команды редактирования. Каждый пункт на панели редактирования раскрывается при нажатии на знак «+». Рассмотрим их по отдельности.

Первый пункт «*Шкаф*» содержит меню, с помощью которого можно править размеры шкафа, число этажей шкафа.

Редактирование креплений. Число креплений блока может быть произвольным. Их устанавливают последовательно на стенке шкафа РЭС.

Редактирование рёбер жёсткости. Для придания конструкции жёсткости при деформациях вводят рёбра жесткости.

Редактирование этажей шкафа. При задании параметров шкафа указывают число этажей шкафа, на которых располагаются с помощью направляющих блоки, в которых находятся платы.

Редактирование размеров направляющих, на которых находятся блоки. Для редактирования размеров направляющих, на которых находится блок на каждом этаже, необходимо раскрыть пункт «Направляющие» и нажать кнопку «Размеры».

Редактирование внутренних элементов. Число внутренних элементов может быть произвольным. Их устанавливают последовательно на стенках шкафа. Элемент можно разместить как снаружи, так и внутри блока.

Добавление, удаление, изменение контрольной точки. Контрольные точки имитируют датчики механических воздействий. Число контрольных точек может быть произвольное. Их устанавливают последовательно на стенках шкафа.

Пример графического ввода конструкции шкафа РЭС. Рассмотрим графический ввод конструкции на примере создания модели шкафа РЭС в CAD-системе АСОНИКА. Для этого в меню АСОНИКА выбирается АСОНИКА-CAD, пункт «Шкаф».

Заданы размеры шкафа: длина, ширина и высота. Указано число этажей — 2. При сохранении проекта файл получит расширение bl1. Для каждой стенки шкафа задана толщина. Далее задаются параметры этажей и направляющих. Заданы размеры направляющих: толщина, ширина, высота.

Следующий этап — редактирование этажей. Заданы следующие

параметры для первого этажа (блока): расстояние по *X* от начала координат до начала этажа, расстояние от нижней стенки шкафа до низа этажа, размеры этажа по осям *X*, *Y* и *Z*, число плат — 2. Заданы толщины стенок блока. Далее заданы параметры плат блока: расстояние по *Y* от низа этажа до каждой платы, толщина и ширина разъёма. Аналогичные параметры заданы для второго этажа.

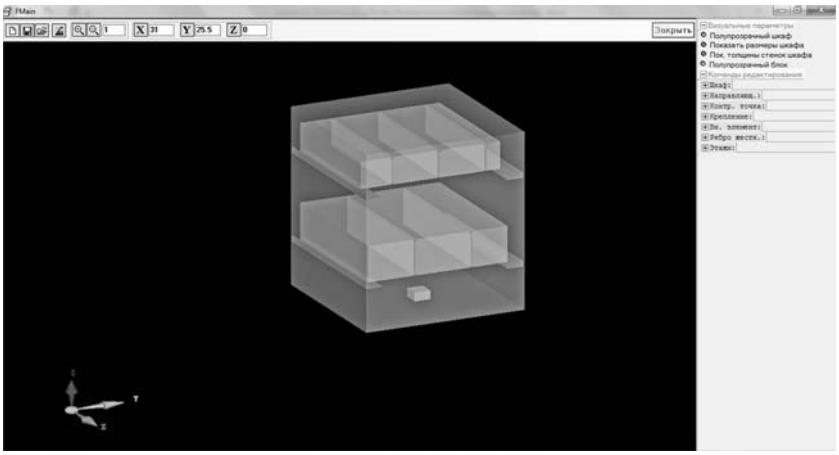


Рис. 2. Добавление внутреннего элемента на нижнюю стенку шкафа. Итоговый результат ввода конструкции шкафа

На следующем этапе ввода конструкции шкафа добавлен внутренний элемент на нижнюю стенку шкафа с параметрами: расположение «внутри», координата *X*, координата *Y*; заданы длина, толщина и ширина внутреннего элемента. Крепления будут заданы в АСОНИКА-М-3D.

Как было отмечено, в CAD-системе АСОНИКА задаются только геометрические параметры конструкции, остальные параметры (крепления, контрольные точки) задаются уже после импорта конструкции в АСОНИКА-М-3D, если это необходимо. Сохранённая модель шкафа (рис. 2) готова к импорту в АСОНИКА-М-3D. После импорта необходимо подготовить модель шкафа РЭС к расчётам, т. е. задать все необходимые параметры.

Пример подготовки к расчёту конструкции шкафа РЭС. Итак, модель шкафа в CAD-системе создана. Далее производится импорт данной модели в АСОНИКА-М-3D.

В АСОНИКА-М-3D для шкафа РЭС задаются следующие данные: материал, тепловые граничные условия, начальные и конечные температуры, давление, параметры КЭ-сетки, воздействия.

Параметры КЭ-сетки: алгоритм smartsize; точность разбиения низкая; средний размер грани дискрета 0.

Тепловые граничные условия (объёмные) для всех плат: источник мощности; параметры: мощность тепловыделения для каждой платы 4 Вт.

Температурные условия (для всех деталей): начальная температура 20 °С; конечная температура 60 °С.

Давление (для каждой внешней поверхности шкафа) 10 000 Па.

Параметры материала (задаются сразу для всей конструкции).

Механические параметры: плотность 2670 кг/м^3; модуль упругости 71 ГПа; коэффициент Пуассона 0,34; допустимое напряжение 345 МПа; коэффициент механических потерь (для вибрации 0,02, для удара $2{,}96\cdot10^{-5}$); для параметра «учитывать нелинейность» флажок пока не ставится; коэффициент зависимости коэффициента механических потерь (КМП) от напряжения (для вибрации $8\cdot10^{-10}$, для удара $1{,}184\cdot10^{-12}$).

Усталостные параметры: малоцикловая усталость (коэффициент усталостной прочности 573 МПа; показатель усталостной прочности −0,143; показатель усталостной пластичности −0,537; коэффициент усталостной пластичности 0,492; циклический показатель упрочнения 0,27; циклический модуль пластичности 719 МПа); многоцикловая усталость (параметр многоцикловой усталости 13,5; базовое число циклов 10^7; предел выносливости 150 МПа). Тепловые характеристики: коэффициент теплового расширения 10^{-6} 1/К; теплопроводность 151 Вт/(м·К); удельная теплоёмкость 880 Дж/(кг·К).

Параметры воздействий следующие.

Гармоническая вибрация:

Направление действия . . . . . .По всем осям равное
Диапазон частот, Гц . . . . . .От 10 до 500; шаг 100
Диапазон ускорения, *g* . . . . . .От 0 до 1
Временная зависимость . . . . . .Число периодов 3; число точек за период 12

Случайная вибрация:

Направление действия . . . . . .По всем осям равное
Диапазон частот, Гц . . . . . .От 10 до 2000; шаг 100
Диапазон ускорений, *g* . . . . . .От 0 до 0,1

Временная зависимость . . . . . .Длительность 0,5 с; частота дискретизации 200 % от максимальной частоты F_{max}

Одиночный удар:

Направление действия . . . . . .По всем осям равное
Временной диапазон, мс . . . . . .От 0 до 10; шаг 1
Диапазон ускорений, g. . . . . .От 0 до 1
Координаты точек, с помощью которых задаётся график ударного воздействия. . . . . .(0; 0), (0,382; 1), (0,733; 1), (1,747; 0), (10; 0)

Многократный удар:

Направление действия . . . . . .По всем осям равное
Временной диапазон, мс . . . . . .От 0 до 10; шаг 1
Диапазон ускорений, g. . . . . .От 0 до 10
Прочие параметры . . . . . .Число ударов 3; интервал следования ударов 15 мс
Координаты точек, с помощью которых задаётся график ударного воздействия. . . . . .(0; 0), (1,719; 10), (6,609; 9,978), (10; 0,022)

Линейное ускорение:

Направление действия . . . . . .По всем осям равное
Временной диапазон, мс . . . . . .От 0 до 100; шаг 10
Диапазон ускорений, g. . . . . .От 0 до 100
Координаты точек, с помощью которых задаётся график воздействия линейного ускорения. . . .(0; 0), (5,118; 14,260), (12,440; 34,730), (27,950; 60,780), (46,770; 79,840), (74,410; 95,040), (100; 100).

Виды расчётов:

1. Модальный анализ.

2. Гармоническая вибрация (воздействие задано по всем осям).

2.1. Гармоническая вибрация (воздействие задано по всем осям). Основные возможности расчёта:

усталостный расчёт;

расчёт в частотной области;

итерация по частоте: шаг уменьшается вблизи резонанса;

минимальный шаг: 20 Гц;

порог резонанса: 200 % от входного ускорения.

2.2. Гармоническая вибрация (воздействие задано по всем осям); в механических параметрах материала напротив «Учитывать нелинейность» ставится флажок. Основные возможности расчёта такие же, как в п. 2.1.

2.3. Гармоническая вибрация (воздействие задано по всем осям).

Основные возможности расчёта:

расчёт во временной области;

фиксированный шаг времени.

2.4. Гармоническая вибрация (воздействие задано по всем осям); в механических параметрах материала напротив «Учитывать нелинейность» ставится флажок.

Основные возможности расчёта:

расчёт во временной области;

список частот (указать одну частоту).

3. Случайная вибрация (воздействие задано по всем осям). Расчёт без учёта усталости.

3.1. Случайная вибрация (воздействие задано по всем осям). Расчёт с учётом усталости (сокращённый).

4. Одиночный удар (воздействие задано по всем осям).

5. Многократный удар (воздействие задано по всем осям). Расчёт без учёта усталости.

5.1. Многократный удар (воздействие задано по всем осям). Расчёт с учётом усталости.

6. Линейное ускорение (воздействие задано по всем осям).

7. Статический анализ. Расчёт на гравитацию (вдоль оси Z).

7.1. Статический анализ. Расчёт на давление.

7.2. Статический анализ. Расчёт на тепловое расширение.

7.3. Статический анализ. Комплексный расчёт сразу на гравитацию, давление, тепловое расширение.

8. Стационарный тепловой расчёт.

8.1. Стационарный тепловой расчёт + тепловое расширение.

9. Нестационарный тепловой расчёт без учёта теплового расширения и усталости. Параметры расчёта:

конечное время: 100 с;

шаг интегрирования: 10 с.

9.1. Нестационарный тепловой расчёт + тепловое расширение.

9.2. Нестационарный тепловой расчёт + тепловое расширение + усталостный расчёт. Число термических циклов: 5.

Некоторые этапы работ по подготовке конструкции к проведению расчётов представлены на рис. 3 и 4.

Некоторые результаты расчётов представлены в виде скринов экранов на рис. 5...8.

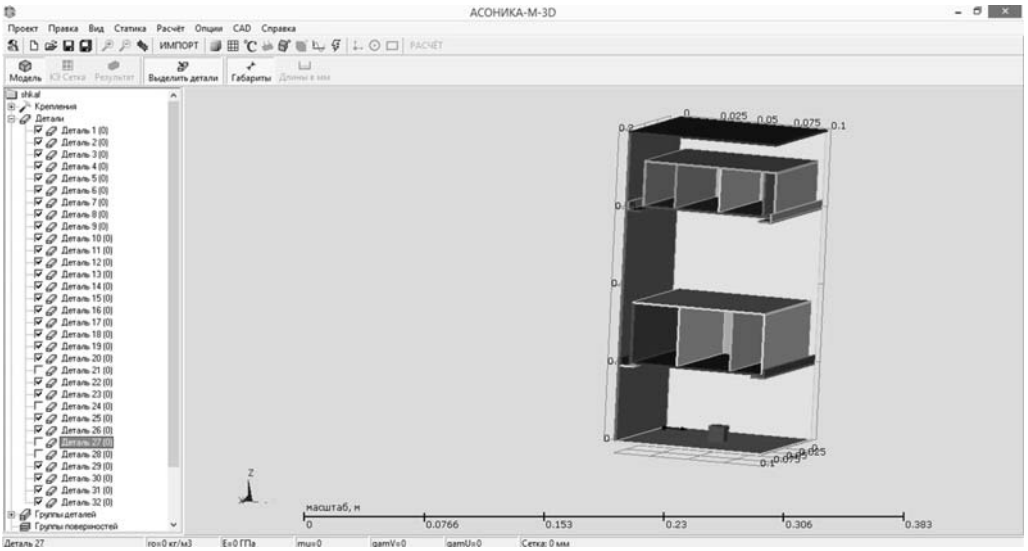


Рис. 3. Модель импортирована

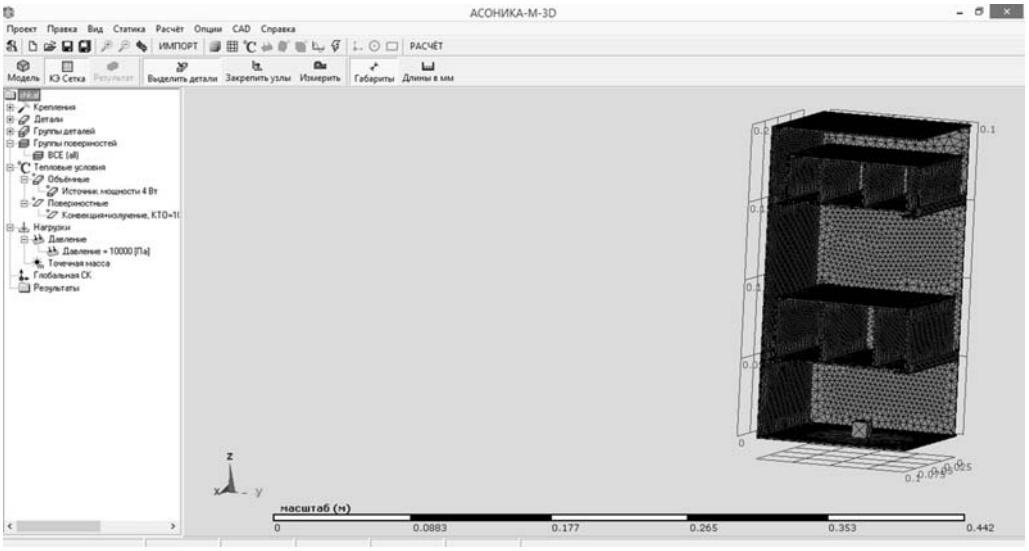


Рис. 4. КЭ-сетка сгенерирована

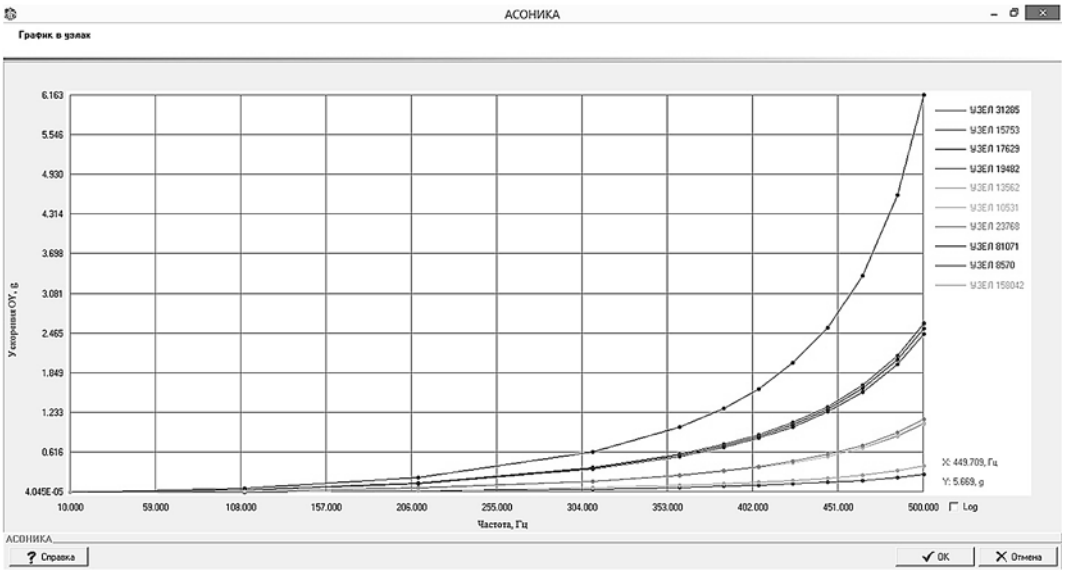


Рис. 5. Графики АЧХ в выделенных узлах

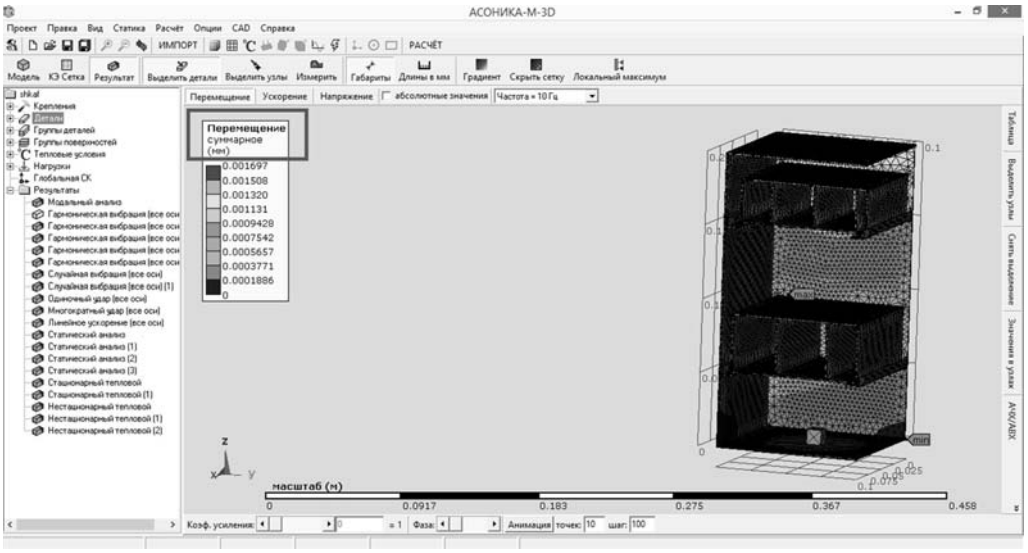


Рис. 6. Поля суммарных перемещений при расчёте на гармоническую вибрацию в частотной области

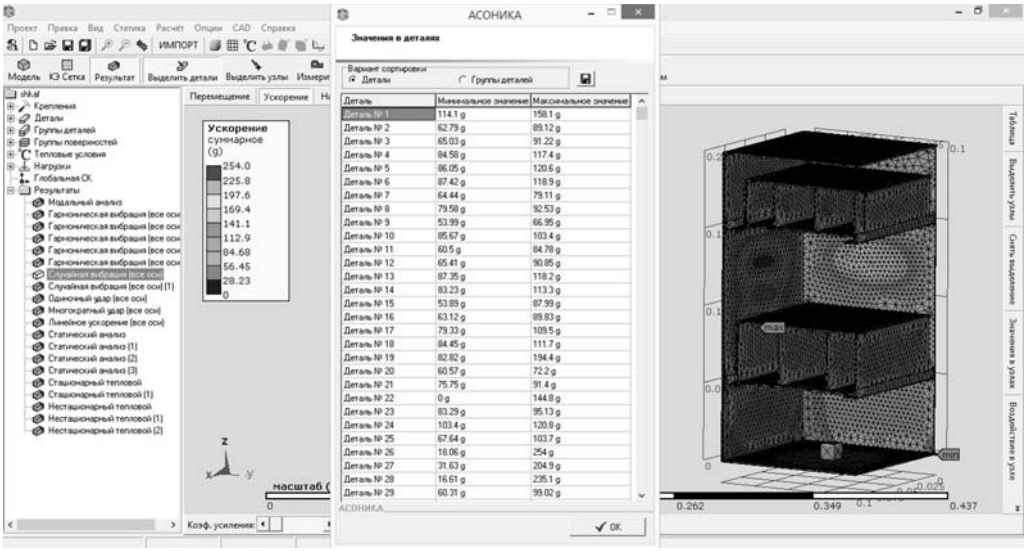


Рис. 7. Поля суммарных ускорений с таблицей граничных значений в деталях при расчёте на случайную вибрацию

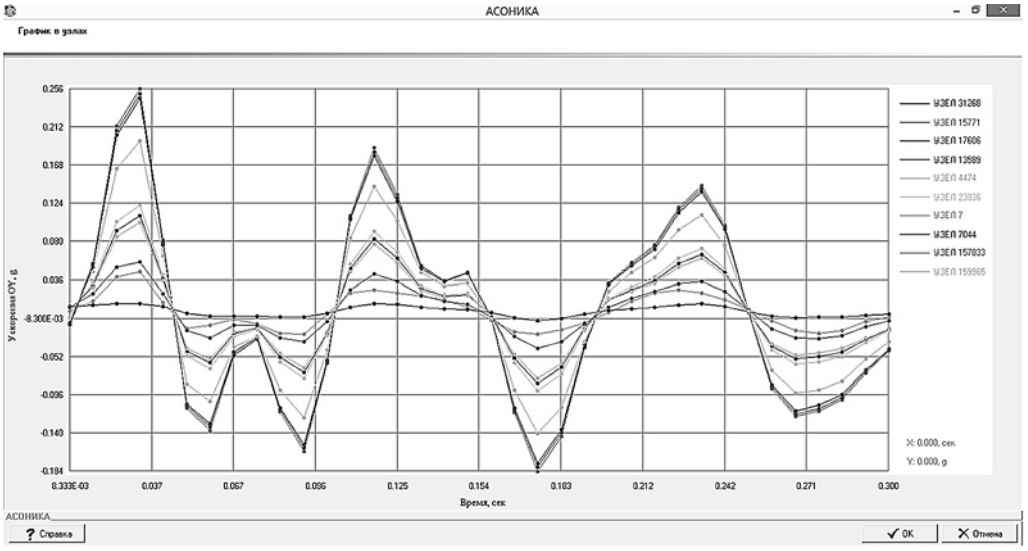


Рис. 8. Графики АВХ ускорений по оси *Y* в выбранных узлах

Библиографические ссылки

1. **Автоматизированная** система АСОНИКА для моделирования физических процессов в радиоэлектронных средствах с учётом внешних воздействий / А.С. Шалумов, Ю.Н. Кофанов, С.У. Увайсов, М.А. Шалумов и др.; под ред. А.С. Шалумова. М.: Радиотехника, 2013. 424 с.

2. **Автоматизированная** система АСОНИКА для проектирования высоконадежных радиоэлектронных средств на принципах CALS-технологий / А.С. Шалумов, Ю.Н. Кофанов, Н.В. Малютин и др.; под ред. Ю.Н. Кофанова, Н.В. Малютина, А.С. Шалумова. М.: Энергоатомиздат, 2007. 368 с.

3. **Шалумов М.А., Шалумов А.С.** Виртуальная среда проектирования РЭС на основе комплексного моделирования физических процессов. Владимир, Владимирский филиал РАНХиГС, 2016. 87 с.

Ссылка для цитирования

Шалумов А.С., Соловьев Д.Б., Шалумов М.А. АСОНИКА-М-шкаф: моделирование типовых конструкций шкафов и стоек электроники на механические воздействия // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 11. С. 483—489.

УДК 681.336

Х.Г. Асадов, д-р техн. наук, проф., **Ш.Н. Джахидзаде**
(Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика),
Р.Н. Абдулов, канд. техн. наук, доц.
(НИИ Министерства оборонной промышленности, г. Баку, Азербайджанская Республика)
asadzade@rambler.ru

МЕТОД МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ, ХАРАКТЕРИЗУЕМЫХ МНОЖЕСТВОМ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНО ОПТИМИЗИРУЕМЫХ ПРОЦЕССОВ

Предложен метод многоступенчатой оптимизации сложных систем, характеризуемых множеством многокритериально оптимизируемых процессов. Математически доказано, что при некоторых условиях общности многокритериально оптимизируемых процессов может быть сформулирована и решена задача многоступенчатой оптимизации таких процессов. При этом на первом этапе оптимизации решается задача линейного программирования применительно к фиксированной временной точке, а на втором — задача минимизации квадратичного интегрального функционала при фиксированной взаимосвязи частных критериев рассматриваемых процессов в период $t_0 - t_{\max}$.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация; сложная система; многоступенчатая оптимизация; функционал; линейное программирование.

A method for multistage optimization of complex systems characterized by a multitude of multicriterion optimized processes is proposed. It is mathematically proven that under certain conditions of the multicriterion optimized processes generality, the problem of multistage optimization of such processes can be formulated and solved. In spite of this at the first stage of optimization, the linear programming problem is solved with respect to a fixed time point, and on the second one, the problem of minimizing the quadratic integral functional is solved at a fixed interrelation of the particular criteria for the considered processes in the period $t_0 - t_{\max}$.

Keywords: multicriterion optimization; a complex system; multistage optimization; functional; linear programming.

Одним из путей оптимизации сложных систем и процессов является метод многоступенчатой (многоуровневой) оптимизации [1]. Оптимизация систем в этом методе осуществляется по уровням в определённой последовательности. При этом рассматриваемые процессы на каждом из этапов часто характеризуются несколькими частными конкурирующими критериями оптимизации, что создаёт возможность применения многокритериальной оптимизации [2].

В настоящее время известно большое количество оптимизационных задач, решаемых по методу многокритериальной оптимиза-

ции [1—3]. При скалярной линейно-свёрточной интерпретации таких задач в двухкритериальном случае рассматривается многочлен

$$x(t) = \alpha_1 Z_1(t) + \alpha_1 Z_2(t), \quad (1)$$

где $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$; $Z_1(t)$ и $Z_2(t)$ — конкурирующие (противофазные) частные критерии.

Хорошо известно, что задачи типа (1) могут быть решены путём обычного дифференцирования свёртки относительно переменной t.

Вместе с тем в сложных системах может существовать некоторое множество X показателей $x_i(t)$:

$$X = \{x_i(t)\}; \ \ i = \overline{1, n}. \quad (2)$$

С учётом изложенного

$$\begin{aligned} x_1(t) &= \alpha_{11} Z_1(t) + \alpha_{12} Z_2(t); \\ x_2(t) &= \alpha_{21} Z_1(t) + \alpha_{22} Z_2(t); \\ &\ldots \\ x_n(t) &= \alpha_{n,1} Z_1(t) + \alpha_{n,2} Z_2(t). \end{aligned} \quad (3)$$

При этом элементы множества (2) взаимосвязаны, т. е. существует линейный функционал — свёртка в виде

$$y = b_1 x_1(t) + b_2 x_2(t) + \ldots + b_n x_n(t). \quad (4)$$

В рассматриваемой оптимизационной задаче следует определить условие оптимизации выражения (4) при соблюдении следующих ограничительных условий:

$$\begin{aligned} &\alpha_{11} x_1(t) + \alpha_{12} x_2(t) + \ldots + \alpha_{1n} x_n(t) \geqslant c_1; \\ &\alpha_{21} x_1(t) + \alpha_{22} x_2(t) + \ldots + \alpha_{2n} x_n(t) \geqslant c_2; \\ &\ldots \\ &\alpha_{n,1} x_1(t) + \alpha_{n,2} x_2(t) + \ldots + \alpha_{n,n} x_n(t) \geqslant c_n; \\ &\alpha_{n+1,1} x_1(t) + \alpha_{n+1,2} x_2(t) + \ldots + \alpha_{n+1,n} x_n(t) \geqslant c_{n+1}. \end{aligned} \quad (5)$$

Решение задачи многоступенчатой оптимизации (1)—(5) предлагается в такой последовательности:

1. На первом этапе для фиксированного момента $t = t_0$ с учётом выражений (4) и (5) составляется и решается задача линейного программирования. В результате получаем множество оптимальных величин $x_{opt,i}(t)$; $i = \overline{1, n}$.

2. На втором этапе задачи оптимизации:

с учётом выражения (1) составляется множество

$$\Delta X = \{x_{opt,i} - [\alpha_{i1} Z_1(t) + \alpha_{i2} Z_2(t)]\}; \quad (6)$$

далее составляем интегральный функционал цели

$$F = \int_{t_0}^{t_{\max}} \left\{ \sum_{i=1}^{n} [x_{opt,i} - [\alpha_{i1} Z_1(t) + \alpha_{i2} Z_2(t)]]^2 \right\} dt, \quad (7)$$

где $t_{\max}$ — конечная точка заданного временного интервала (t_0—$t_{\max}$);

задаём функциональную связь между функциями $Z_1(t)$ и $Z_2(t)$ в виде

$$Z_1(t) = \varphi[Z_2(t)]; \quad (8)$$

решаем задачу вычисления оптимальной функции $Z_2(t)$, при которой F достигает своего минимума.

В качестве примера рассмотрим конкретное решение изложенной задачи для $n = 2$.

С учётом выражений (1) и (8) имеем

$$x(t) = \alpha_2 z_1(t) + \alpha_1 \varphi[z_1(t)]. \quad (9)$$

Множество (2) превращается в бинарное множество, т. е.

$$X = \{x_1(t), x_2(t)\}, \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} x_1(t) &= \alpha_{11} \varphi[Z_1(t)] + \alpha_{12} Z_2(t); \\ x_2(t) &= \alpha_{21} \varphi[Z_1(t)] + \alpha_{22} Z_2(t). \end{aligned} \quad (11)$$

Линейная свёртка — функционал цели (4) приобретает следующий вид:

$$y = b_1 x_1(t) + b_2 x_2(t). \quad (12)$$

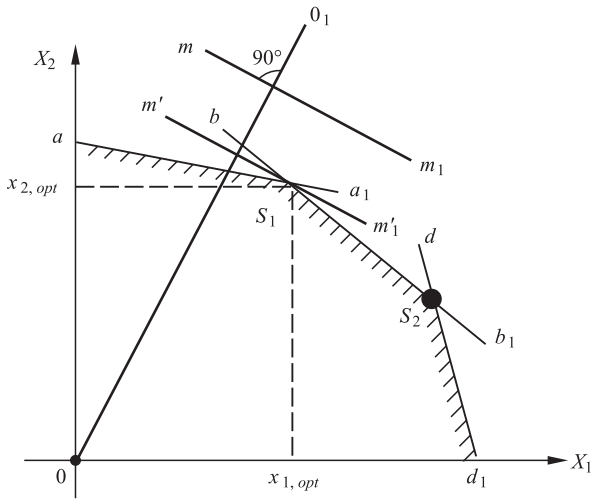
Ограничительные условия (5) запишем как

$$\alpha_{11} x_1(t) + \alpha_{12} x_2(t) \geqslant c_1; \quad (13)$$

$$\alpha_{21} x_1(t) + \alpha_{21} x_2(t) \geqslant c_2; \quad (14)$$

$$\alpha_{31} x_1(t) + \alpha_{31} x_2(t) \geqslant c_3. \quad (15)$$

На основе выражений (12) и (13) составляем и решаем задачу линейного программирования. Геометрическая интерпретация решения показана на рисунке, где ограничительные линии aa_1, bb_1 и dd_1 соответствуют ограничительным условиям (13)—(15); OO_1 — центральная линия; mm_1 — основание опорной плоскости; $m'm'_1$ — смещённое основание опорной плоскости; S_1, S_2 — узловые точки; $x_{1,\,opt}$ и $x_{2,\,opt}$ — решения оптимизационной задачи.



Геометрическая интерпретация решения задачи линейного программирования

Рассмотрим решение задачи минимизации функционала (7). При $n = 2$ функционал (7) приобретает следующий вид:

$$F = \int_{t_0}^{t_{\max}} \{[x_{opt,1} - [\alpha_{11}(Z_2(t)) + \alpha_{12}Z_2(t)]]^2 + \\ + [x_{opt,2} - [\alpha_{21}\varphi(Z_2(t)) + \alpha_{22}Z_2(t)]]^2\}dt. \quad (16)$$

Решение (16) находим методом дифференцирования и приравнивания к нулю:

$$\frac{dF}{dz_2(t)} = -2[x_{opt,1} - [\alpha_{11}\varphi(Z_2(t)) + \alpha_{12}Z_2(t)]] \times \\ \times [\alpha_{11}\varphi'_{z_2(t)} + \alpha_{12}] - 2[x_{opt,2} - \\ - [\alpha_{21}\varphi(Z_2(t)) + \alpha_{22}Z_2(t)]][\alpha_{21}\varphi'_{z_2(t)} + \alpha_{22}]. \quad (17)$$

Из выражения (17) ясно, что условие экстремума

$$\frac{dF}{dz_2(t)} = 0 \quad (18)$$

выполняется при

$$-\varphi'_{z_2(t)} = \frac{\alpha_{12}}{\alpha_{11}} = \frac{\alpha_{22}}{\alpha_{21}}. \quad (19)$$

Например, при

$$\varphi[Z_2(t)] = A - kZ_2(t) \quad (20)$$

получим

$$k = \frac{\alpha_{12}}{\alpha_{11}} = \frac{\alpha_{22}}{\alpha_{21}}. \quad (21)$$

Проверка решений (19) и (20) в смысле достижения функционалом (16) экстремума через вторую производную даёт

$$\frac{d^2F}{dz_2(t)^2} = -2[-[\alpha_{11}\varphi'_{z_2} + \alpha_{1,2}][\alpha_{11}\varphi'_{z_2} + \alpha_{12}] + \\ +[x_{opt,1} - [\alpha_{11}\varphi[Z_2(t)] + \alpha_{1,2}Z_2(t)]]\alpha_{11}\varphi''_{z_2} - \\ -2[-[\alpha_{21}\varphi'_{z_2} + \alpha_{22}][\alpha_{21}\varphi'_{z_2} + \alpha_{22}] + \\ +[x_{opt,2} - [\alpha_{21}\varphi[Z_2(t)] + \alpha_{22}Z_2(t)]]\alpha_{21}\varphi''_{z_2}. \quad (22)$$

Очевидно, что условие экстремума

$$\frac{d^2F}{dz_2(t)^2} = 0 \quad (23)$$

может быть удовлетворено при выражениях (19) и (20).

Очевидно, что при более сложных видах введённой функции связи φ путём анализа второй производной можно вычислить условия минимума или максимума функционала (16).

Таким образом, показано, что при выполнении некоторых условий общности многокритериально оптимизируемых процессов может быть составлена и решена задача многоступенчатой оптимизации таких процессов, где на первом этапе оптимизации решается задача линейного программирования применительно к фиксированной временной точке t_0, а на втором — задача минимизации квадратичного интегрального функционала при фиксированной взаимосвязи частных критериев рассматриваемых оптимизируемых процессов многокритериально.

Библиографические ссылки

1. **Штойер Т.Р.** Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения. М.: Радио и связь, 1992. 504 с.

2. **Бондаренко И.Б.** Метод многоуровневой оптимизации в задаче раздельного резервирования элементов // Известия вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57. № 3. С. 11—14.

3. **Гнатюк В.И.** Закон оптимального построения техноценозов: монография. Калининград: Директ-Мидеа, 2014. 476 с.

Ссылка для цитирования

Асадов Х.Г., Джахидзаде Ш.Н., Абдулов Р.Н. Метод многоступенчатой оптимизации сложных систем, характеризуемых множеством многокритериально оптимизируемых процессов // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 11. С. 489—491.

УДК 66.012-52

С.Н. Кондрашов, канд. техн. наук, доц., **А.Г. Шумихин,** д-р техн. наук, проф., **Н.И. Берсенева**
(Пермский национальный исследовательский политехнический университет)

Sergej.Kondrashov@pnos.lukoil.com

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СОСТАВОМ ФОРМАЛИНА ПРИ ЕГО ПРОИЗВОДСТВЕ

Предложен адаптивный способ, позволяющий стабилизировать качество формалина путём коррекции температуры контактного аппарата в зависимости от соотношения формальдегид/метанол в готовом продукте. Уменьшение дисперсии указанного соотношения позволяет снизить удельный расход метанола. С использованием предложенного метода разработана система автоматического управления процессом получения формалина.

Ключевые слова: процесс получения формалина; оптимальное управление; алгоритм адаптации; управление составом формалина; блок-схема; эксперимент.

An adaptive method that allows stabilizing the formalin quality by correcting the temperature of the contact device depending on the ratio of formaldehyde/methanol in the finished product is proposed. Reducing the dispersion of this ratio makes it possible to reduce the specific consumption of methanol. Using the proposed method, a system for automatic control of the formalin preparation process is developed.

Keywords: formalin preparation process; optimal control; adaptation algorithm; control of formalin formulation; block diagram; experiment.

В заводских условиях управление процессом получения формалина окислительной конверсией метанола с последующей абсорбцией формальдегида осуществляется путём воздействия на температуру в контактном аппарате в зависимости от физических параметров процесса и требуемого состава готового формалина [1]. Конечной целью управления является получение заданного количества формалина с содержанием (37 ± 0,5) % мас. формальдегида и 5...11 % мас. метанола. В работе [2] предложен экономически обоснованный способ управления производством формалина, согласно которому за критерий оптимальности управления принят чистый доход производства (прибыль), а само управление осуществляется путём изменения соотношения кислород/метанол в реакционной смеси и температуры контактного аппарата в зависимости от максимального выхода формальдегида на пропущенный метанол. Экспериментальная проверка эффективности управления процессом по каждому из двух указанных выше способов показала [2], что максимизация выхода формальдегида во втором способе позволила существенно снизить себестоимость целевого продукта по сравнению с себестоимостью, получаемой при первом способе управления процессом. Однако этот способ не получил распространения, так как зависимости выхода формальдегида от соотношения кислород/метанол и от температуры контактного аппарата были получены на основе анализа экспериментальных данных, не учитывающих нестационарность характеристик объекта управления. В общем случае на процесс получения формалина воздействуют такие динамические факторы, как колебания состава сырья, изменение температуры окружающей среды, изменение параметров и отказы технологического оборудования, снижение активности и селективности катализатора и др. Более того, при работе на катализаторе со сроком службы свыше 1000 ч, как показано в работе [2], меняется канал оптимального управления — им становится канал «соотношение кислород/метанол — температура в контактном аппарате». Указанных недостатков лишены адаптивные способы управления качеством продуктов, в частности способ управления по каналу «соотношение кислород/метанол — состав готового формалина», предложенный в работе [3]. В основу способа положены полученные экспериментальным путём регрессионные модели, связывающие степень превращения метанола и выход фор-

мальдегида с соотношением O_2/CH_3OH в реакционной пароспиртовоздушной смеси,

$$Y_1 = a_0 + a_1 X; \quad Y_2 = b_0 + b_1 X, \tag{1}$$

где X — соотношение кислород/метанол; Y_1 — степень превращения метанола; Y_2 — выход формальдегида; a_0, a_1, b_0, b_1 — коэффициенты.

При известных коэффициентах уравнения (1) и заданных массовых долях формальдегида Z_1 и метанола Z_2 в формалине значение соотношения кислород/метанол, которое необходимо поддерживать, чтобы получить заданное соотношение концентраций формальдегида и метанола в готовом формалине, определяется по формуле [3]

$$X = \frac{(1,066 - 1,0666a_0)Z_1/Z_2 - b_0}{1,0666a_1 Z_1/X_2 + b_1}. \tag{2}$$

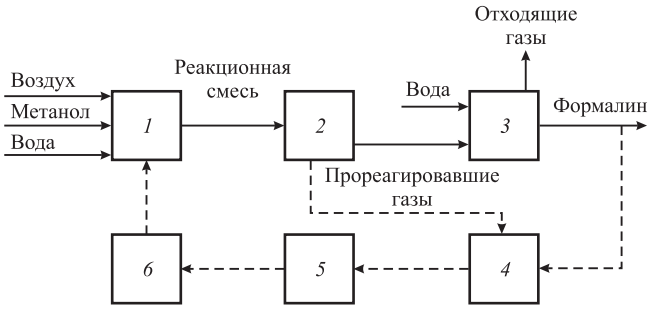
Как показано в работе [3], при постоянном расходе воздуха минимальное содержание метанола в формалине соответствует и максимальной производительности, и минимальной себестоимости. Поэтому за критерий управления процессом принято минимальное положительное отклонение содержания метанола в формалине от 5 %. Для управления по этому критерию выражение (2) было дополнено алгоритмом подстройки первой модели из математических моделей (1)

$$\begin{gathered} a_0[n] = a_0[n-1] + \\ + \frac{Y[n] - (a_0[n-1] + a_1[n-1]\,X[n])}{(Y[n] - \overline{Y}[n])^2 + 1 + (X[n])^2}; \\ a_1[n] = a_1[n-1] + \\ + \frac{Y[n] - (a_0[n-1] + a_1[n-1]\,X[n])}{(Y[n] - \overline{Y}[n])^2 + 1 + (X[n])^2} X[n], \end{gathered} \tag{3}$$

где $\overline{Y}[n] = \frac{n-1}{n}\overline{Y}[n-1] + \frac{1}{n}Y[n]$; Y, $\overline{Y}$ — текущее и усреднённое соотношения формальдегид/метанол в готовом формалине соответственно; n — такт управления.

Таким образом, выражение (2) вместе с алгоритмом адаптации (3) регрессионных математических моделей (1) можно использовать в адаптивной системе управления.

Для управления качеством готового формалина предложен адаптивный способ, позволяющий стабилизировать качество формалина путём коррекции температуры контактного аппарата в зависимости от соотношения формальдегид/метанол в готовом продукте.



Блок-схема адаптивного способа управления качеством готового формалина:

1 — стадия приготовления реакционной спиртоводно-воздушной смеси; *2* — стадия синтеза формальдегида; *3* — стадия абсорбции формальдегида до формалина; *4* — блок расчёта корректирующих коэффициентов $a_0[n]$ и $a_1[n]$; *5* — блок расчёта нового значения температуры контактного аппарата $T[n]$; *6* — регулятор температуры в контактном аппарате

При этом появляется возможность уменьшая дисперсию указанного соотношения, уменьшить удельный расход метанола [4].

Предлагаемый способ управления реализуется в соответствии с блок-схемой, показанной на рисунке. На линии готового формалина после стадии абсорбции измеряются концентрации формальдегида $C_ф$ и метанола $C_м$ и рассчитывается их текущее соотношение $Y[n] = C_ф/C_м$. Полученное соотношение $Y[n]$ используется для расчёта корректирующих коэффициентов $a_0[n]$ и $a_1[n]$ в соответствии с выражениями

$$a_0[n] = a_0[n-1] + \frac{Y[n] - Y^{зад}}{2 + T^2[n-1]}, \tag{4}$$

$$a_1[n] = a_1[n-1] + \frac{Y[n] - Y^{зад}}{2 + T^2[n-1]} T[n-1], \tag{5}$$

где n — номер такта управления; $T[n-1]$ — значение температуры контактного аппарата, реализованное на $[n-1]$-м такте управления; $Y[n]$ — значение соотношения концентраций формальдегида и метанола в формалине, реализованное на $[n]$-м такте управления; $Y^{зад}$ — заданное значение соотношения концентраций формальдегида и метанола в формалине.

Скорректированные коэффициенты используются для вычисления нового значения температуры контактного аппарата на стадии синтеза формальдегида по формуле [4]

$$T[n] = \frac{Y^{зад} - a_0[n]}{a_1[n]}. \tag{6}$$

Рассчитанное значение температуры $T[n]$ устанавливается в контактном аппарате при

помощи соответствующего регулятора. Затем вновь измеряются концентрации формальдегида $C_ф$ и метанола $C_м$ в формалине, рассчитывается их соотношение $Y[n]$, корректируются коэффициенты $a_0[n]$ и $a_1[n]$, рассчитывается новое значение температуры $T[n]$, устанавливаемое регулятором температуры в контактном аппарате. Регулирование таким образом осуществляется до тех пор, пока текущее соотношение $Y[n]$ не станет равным заданному $Y^{зад}$.

Для проверки рассмотренного алгоритма управления составом формалина, получаемого в заводских условиях, было проведено промышленное испытание агрегата формалина [5], результаты которого представлены в таблице.

Наряду с результатами экспериментов (п. 1, 2) в таблице представлены для сравнения данные, полученные при нормальной эксплуатации агрегата формалина — согласно технологическому регламенту (п. 3).

Из анализа результатов промышленного испытания агрегата формалина следует, что применение предложенного способа управления составом формалина позволяет уменьшить дисперсию соотношения концентрации формальдегида и метанола в формалине, при этом технологический процесс можно вести вблизи нижней границы допустимого диапазона концентраций метанола в формалине (например, поддерживать 8 % из диапазона 5...11 %), что приведёт к снижению удельного расхода метанола на 2...3 %. Кроме того, предложенный способ обладает адаптивными свойствами, в частности способностью компенсировать в процессе управления снижение активности катализатора.

С использованием рассмотренного адаптивного метода управления качеством формалина разработана система автоматического управления процессом получения формалина [6—10].

Результаты экспериментальной проверки адаптивного алгоритма управления качеством готового формалина

Номер п/п	Параметры процесса получения формалина	Такт управления, n	$C_ф$, %	$C_м$, %	$Y[n]$	$a_0[n]$	$a_1[n]$	$T[n]$, K
1	$Y^{зад} = 5{,}9$	0	37,4	6,8	5,5	5,722	-0,8	695
	$Q_м = 1786$ кг/ч	1	37,6	6,6	5,7	5,812	-0,864	698
	$Q_в = 1960$ м^3/ч	2	37,7	6,5	5,8	5,869	-0,829	699
	$Q_{см} = 739$ кг/ч	3	37,7	6,4	5,9	5,918	-0,831	701
	$Q_{ор} = 581$ кг/ч	4	37,8	6,5	5,9	5,918	-0,831	700
	$T_0 = 690$ °C	5	37,7	6,4	5,9	5,918	-0,831	700
	$C_{H_2O} = 56$ %	—	—	—	—	—	—	—
2	$Y^{зад} = 5{,}0$	0	37,2	7,9	4,7	4,867	-0,6	696
	$Q_м = 1718$ кг/ч	1	37,3	7,7	4,8	4,940	-0,616	698
	$Q_в = 1880$ м^3/ч	2	37,5	7,5	5,0	5,015	-0,623	700
	$Q_{см} = 739$ кг/ч	3	37,6	7,5	5,0	5,015	-0,623	700
	$Q_{ор} = 622$ кг/ч	4	37,6	7,5	5,0	5,015	-0,623	700
	$T_0 = 690$ °C	—	—	—	—	—	—	—
	$C_{H_2O} = 55{,}8$ %	—	—	—	—	—	—	—
3	$p = 0{,}88$ кг/л	—	36,5	7,5	4,9	—	—	715
	$Q_м = 2587$ кг/ч		37,2	8,4	4,4			705
	$Q_в = 2920$ м^3/ч		38,1	9,0	4,2			705
	$Q_{см} = 1405$ кг/ч		37,9	8,8	4,3			705
	$Q_{ор} = 237$ кг/ч		37,0	8,1	4,6			710
	$C_{H_2O} = 55{,}1…56$ %		36,9	8,0	4,6			710

Обозначения: $Y^{зад}$ — заданное соотношение концентраций формальдегида и метанола в формалине; C_{H_2O} — содержание воды в формалине; $Q_м$ — расход метанола; $Q_в$ — расход воздуха; $Q_{см}$ — расход воды на смешение; $Q_{ор}$ — расход воды на орошение; p — плотность готового формалина; T_0 — температура в контактном аппарате перед началом эксперимента.

Библиографические ссылки

1. **Шумихин А.Г., Кондрашов С.Н., Мельков Д.А., Зорин М.П.** Аналитический обзор научных работ по проблемам математического моделирования, идентификации и управления технологическими процессами в производстве формалина // Вестник ПНИПУ: Химическая технология и биотехнология. 2017. № 1. С. 7—36.
2. **Шигин Е.К., Щербань Г.Т.** О критерии оптимальности управления производством формалина // Химическая промышленность. 1967. № 7. С. 14—20.
3. **Шумихин А.Г., Чарная Е.Б., Кондрашов С.Н.** Управление производством формалина с использованием технико-экономических критериев // Химическая промышленность. 1997. № 1. С. 74—76.
4. **Шумихин А.Г., Кондрашов С.Н., Майер В.В.** Способ управления процессом получения формалина // Патент России № 1669911. 1991. Бюл. № 30.
5. **Кондрашов С.Н.** Разработка и исследование алгоритмов управления производством формалина: Дис. ... канд. техн. наук. Пермь, 1994. 150 с.
6. **Способ** автоматического управления процессом получения формалина / Шумихин А.Г., Кондрашов С.Н., Майер В.В. и др. // Патент России № 2058289. 1996. Бюл. № 11.
7. **Способ** управления процессом синтеза формальдегида / Меренков В.Г., Шумихин А.Г., Кондрашов С.Н. и др. // Патент России № 1807050. 1993. Бюл. № 13.
8. **Кондрашов С.Н., Савостина А.С.** Моделирование узла синтеза формальдегида // Вестник ПНИПУ: Химическая технология и биотехнология. 2016. № 1. С. 7—18.
9. **Кондрашов С.Н., Горохова М.Н.** Разработка алгоритма оптимального управления технологическим процессом получения формальдегида // Вестник ПНИПУ: Химическая технология и биотехнология. 2016. № 1. С. 19—28.
10. **Кондрашов С.Н., Бортникова А.С.** Разработка алгоритма управления узлом контактирования производства формалина подачей дополнительного потока воздуха // Вестник ПНИПУ: Химическая технология и биотехнология. 2016. № 4. С. 9—26.

Ссылка для цитирования

Кондрашов С.Н., Шумихин А.Г., Берсенева Н.И. Адаптивное управление составом формалина при его производстве // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 11. С. 492—495.

УДК 658.5

Ж.А. Даев, д-р филос., канд. техн. наук, ассоц. проф.
(Технопарк Zerek Актюбинского университета им. С. Баишева, г. Актобе, Казахстан),
Н.З. Султанов, д-р техн. наук, проф.
(Оренбургский государственный университет)

zhand@yandex.ru

МОДЕЛЬ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА НА ОСНОВЕ НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ

Предложено решение задачи контроля и прогнозирования степени загрязнения внутренней полости магистрального газопровода с помощью методов нечёткой классификации. Показана возможность применения нечётких моделей и методов нечёткой классификации для разработки автоматических систем поддержки принятия решений диспетчерских служб предприятий, занимающихся эксплуатацией магистральных газопроводов.

Ключевые слова: контроль; автоматизация; магистральный газопровод; нечёткая классификация.

The problem solution of control and prediction of the contamination degree of the main gas pipeline internal cavity with the help of fuzzy classification methods is proposed. The possibility of using fuzzy models and methods of fuzzy classification for the development of automatic decision support systems for the dispatching services of enterprises engaged in the operation of main gas pipelines is shown.

Keywords: control; automation; main gas pipeline; fuzzy classification.

Введение. Трубопроводная транспортировка природного газа является одним из основных способов транспортировки данного вида энергоносителей. В соответствии с данными работы [1] доля природного газа как источника энергии будет составлять не ниже 30 %

во всём энергетическом балансе до 2030 г. во всём мире. Поэтому перед предприятиями газовой промышленности стоят важные задачи, связанные с обеспечением эффективности магистральных газопроводов.

Для обеспечения эффективности магистральных газопроводов и их безопасной эксплуатации применяют различные виды технической диагностики. Работы по технической диагностике магистральных газопроводов имеют три уровня [2—4]. На первом уровне выполняется внутритрубная диагностика, на втором — геотехническая диагностика, на третьем — наземная (инструментальная) диагностика отдельных опасных участков газопровода. Внутритрубная диагностика связана с запуском в полость трубы различных снарядов и скребков. Внутритрубные снаряды выполняют функции очистки и выноса из полости трубы различных отложений и мусора, контроля проходимости диагностических приборов по внутренней поверхности трубы, контроля геометрии поперечного сечения трубы, регистрации нарушения размеров формы трубы, определения кривизны трубопровода, выявления аномальных зон, коррозионных потерь и т. д. [3].

Способы запуска и виды внутритрубных снарядов приведены в работах [3, 5]. Моделирование процессов движения внутритрубных снарядов подробно описывается в работах [6, 7].

Внутритрубную диагностику магистральных трубопроводов можно выполнять в плановом порядке либо по результатам различных исследований и показателям, которые связаны с эффективностью магистральных газопроводов. При этом необходимо принять решение о проведении внутритрубной диагностики на определённом газопроводе либо на отдельном участке магистрального газопровода. Для решения этой задачи могут быть использованы методы нечёткого моделирования. В частности, задача о принятии решения по очистке газопровода может быть сведена к задачам нечёткой классификации [8, 9]. Система автоматической нечёткой классификации всех газопроводов, обслуживаемых определённым управлением магистральных газопроводов, может стать частью автоматизированной системы оперативно-диспетчерского управления (АСОДУ) диспетчерской службы газотранспортного предприятия. Такая система может помогать диспетчерским службам вести контроль состояния газопровода и принимать решение о необходимости его очистки на основе анализа поступающей в систему информации.

Построение нечёткой модели поддержки принятия решений. Приложения теории нечётких множеств часто применяют для решения задач классификации [9]. Для задач эксплуатации магистральных газопроводов примером такой классификации может быть отнесение отдельных трубопроводов к различным классам по степени их загрязнения. Например, в зависимости от степени загрязнения газопроводов и их участков можно ввести лингвистическую переменную — загрязнение газопровода и термы нечётких множеств типа «отсутствие загрязнения — О», «умеренное загрязнение — У» и «сильное загрязнение — С». Очевидно, что введённые состояния магистрального газопровода являются нечёткими и представляют собой некоторые классы. Поэтому введение нечёткой системы позволило бы оперативному диспетчерскому персоналу принимать решения о необходимости проведения очистных операций либо докладывать руководству о необходимости и целесообразности проведения таких операций.

Если система на основе анализа поступающих данных относит участок газопровода к классу «незагрязнённый» или, другими словами, лингвистическая переменная попадает в нечёткое множество «отсутствие загрязнения», то нет необходимости на данном участке проводить внутритрубную диагностику с очисткой полости. Если же лингвистическая переменная попадает в область класса «умеренное загрязнение», то газопровод можно эксплуатировать, но при этом необходимо на будущее запланировать работы по очистке внутренней полости. В случае если система классифицирует состояние участка или газопровода как «сильное загрязнение», должно приниматься решение о немедленном проведении внутритрубной диагностики и очистке магистрального газопровода.

Для того чтобы отнести магистральный газопровод или его участок к определённому классу, системе необходимо получать данные либо признаки загрязнения газопровода, на основании которых будет приниматься соответствующее решение [9]. В общем случае входных признаков может быть много. Перечислим некоторые из них:

x_1 — температура точки росы газа по воде либо влажность на участке газопровода;

x_2 — доля механической примеси в составе газа;

x_3 — перепад давлений на определённом участке газопровода;

x_4 — температура точки росы по углеводородам либо наличие тяжёлых компонентов газа;

x_5 — температура транспортируемого газа;

x_6 — давление транспортируемого газа;

x_7 — время действия загрязняющего фактора.

Для каждого газопровода или его участка системой составляется вектор признаков, на основании которого могут быть вычислены степени принадлежности лингвистической переменной для каждого класса степени загрязнения. Наибольшее значение степени принадлежности к определённому классу будет служить основанием для отнесения газопровода к этому классу, на основании чего будет приниматься решение о необходимости проведения очистных операций. Возможная структура автоматической системы классификации загрязнения газопроводов представлена на рис. 1 [9].

Покажем возможную реализацию такой нечёткой системы классификации загрязнения при использовании двух признаков: x_1 — влажности газа, мг/м^3, и x_2 — времени, ч, действия такого фактора, как влажность газа. В данном примере для каждого из признаков вводится по три нечётких множества в соответствии с диапазонами измерений, которые могут быть приняты в соответствии с нормативными документами либо контрактами на поставку природного газа. Каждое газотранспортное предприятие должно определять свою политику, которая важна для выработки соответствующих решений. Данная политика затем ложится в основу системы поддержки принятия решений диспетчерами.

На рис. 2 приводится двумерная функция принадлежности, необходимая для проведения классификации газопроводов. В качестве функций принадлежности отдельных признаков выбраны тарпецеидальные функции μ_1 и μ_2, которые отражают степень соответствия каждого признака определённому классу. Функции принадлежности, как известно, являются безразмерными и изменяются от нуля до единицы [9].

На рис. 2 видно, что газопроводы попадают в разряд умеренно загрязнённых (У) на пересечении серединных нечётких множеств обоих признаков, по которым оценивается степень загрязнения. В случае когда загрязняющий фактор не вышел за пределы крайнего левого нечёткого множества и время его действия также оставалось в пределах первого

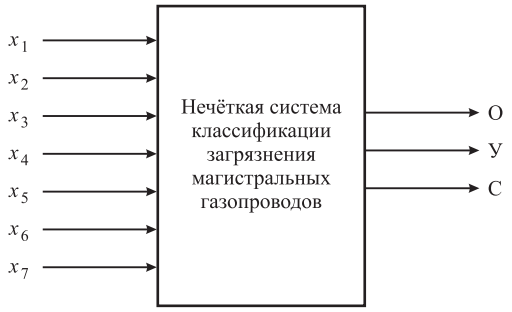


Рис. 1. Структура нечёткой системы классификации загрязнения

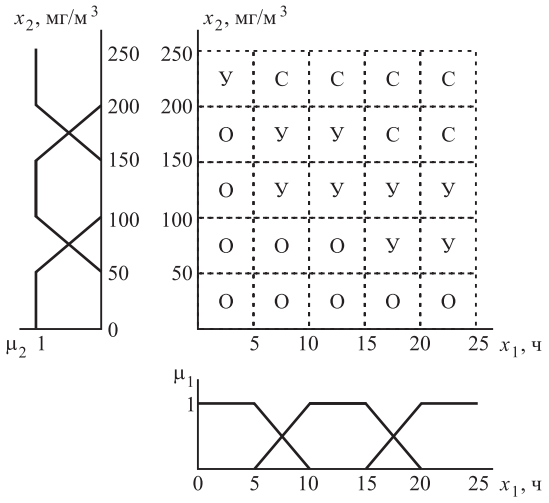


Рис. 2. Функция принадлежности, зависящая от двух аргументов: x_1 и x_2, необходимая для выполнения классификации газопроводов

множества, газопровод можно считать незагрязнённым (О). При максимальных значениях загрязняющего фактора и его длительном действии нечёткие множества определяют область сильного загрязнения (С). Данные области определяются путём пересечения введённых нечётких множеств. Пересечение нечётких множеств выполняется с помощью специальных операторов, которые описываются в работе [9].

Реализация нечёткой модели принятия решений. Нечёткие множества, связанные с признаками для решения поставленной задачи, и операторы, необходимые для их обработки, могут быть реализованы на любом языке программирования логических контроллеров, на аппаратном уровне [10, 11] либо на уровне человеко-машинного интерфейса систем Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA). Седьмая часть стандарта Международной электротехнической комиссии (МЭК) 61131-7 регламентирует построение нечётких систем на языках стандарта МЭК 61131-3 [10].

Другими словами, реализация нечёткой системы принятия решений на уровне контроллеров либо ресурсами SCADA зависит от архитектуры разрабатываемой автоматической системы и её особенностей. Очевидно, что она может быть реализована на обоих уровнях, хотя такие системы чаще реализуются на уровне АСОДУ в качестве подсистемы.

Заключение. В данной работе авторами предложена система принятия решений, или система-советчик, основанная на принципах построения нечётких классификаторов. Показана возможность построения таких систем для поддержки принятия решений диспетчерскими службами предприятий, занимающихся трубопроводной транспортировкой природного газа, на примере оценки степени загрязнения магистральных трубопроводов. Также показана возможность реализации подобных систем на уровне аппаратных либо программных решений. Статья адресована специалистам, занимающимся разработкой автоматизированных систем управления технологическими процессами и эксплуатацией магистральных газопроводов.

Библиографические ссылки

1. **Economides M.J., Wood D.A.** The state of natural gas // J. of Natural Gas Science and Engineering. 2009. Vol. 1. No. 1. P. 1—13.

2. **Стеклов О.И.** Комплексная техническая диагностика магистральных газонефтепроводов. Ч. 1 // Территория нефтегаз. 2006. № 4. С. 20—23.

3. **Стеклов О.И.** Комплексная техническая диагностика магистральных газонефтепроводов. Ч. 2 // Территория нефтегаз. 2006. № 5. С. 12—17.

4. **Стеклов О.И.** Комплексная техническая диагностика магистральных газонефтепроводов. Ч. 3 // Территория нефтегаз. 2006. № 6. С. 48—55.

5. **Серебренников Д.А., Кадочникова Т.А.** Анализ современных способов очистки полости магистральных газопроводов // Материалы 5-й Междунар. науч.-практ. конф. «Проблемы теории и практики современной науки». 2016. С. 98—103.

6. **Nguyen T.T., Kim S.B., Yoo H.R., Rho Y.W.** Modeling and simulation for pig flow control in natural gas pipeline // KSME Intern. J. 2001. Vol. 15. No. 8. P. 1165—1173.

7. **Azevedo L.F.A., Braga A.M.B., Nieckele A.O., Naccache M.F., Gomes M.G.F.M.** Simple Hydrodynamic Models for the Prediction of Pig Motions in Pipelines // Proceedings of the 1996 Offshore technology conference. TX. USA, 1996. P. 729—739.

8. **Лапшин Б.М., Овчинников А.Л., Булгаков В.Ф.** Датчик прохождения скребков и поршней СПРМ-1 // Территория нефтегаз. 2015. № 4. С. 17.

9. **Пегат А.** Нечеткое моделирование и управление. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2013. 798 с.

10. **Петров И.В.** Программируемые контроллеры. Стандартные языки и инструменты / под ред. проф. В.П. Дьяконова. М.: СОЛОН-Пресс, 2003. 256 с.

11. **Даев Ж.А.** Реализация алгоритмов для систем измерения расхода и количества природного газа в среде прикладного программирования CoDeSys // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2017. № 4. С. 28—31.

Ссылка для цитирования

Даев Ж.А., Султанов Н.З. Модель автоматической системы контроля и прогнозирования загрязнения магистрального газопровода на основе нечёткой логики // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 11. С. 495—498.

Уважаемые авторы и читатели!

Редакция и редакционная коллегия сообщают:
межотраслевой научно-технический журнал «Автоматизация. Современные технологии»
успешно прошёл аккредитацию в ВАК при Минобрнауки России
для публикации работ соискателей учёных степеней по отрасли науки:
05.00.00 — технические науки;
и четырём группам специальностей:
05.02.00 — машиностроение и машиноведение;
05.07.00 — авиационная и ракетно-космическая техника;
05.11.00 — приборостроение, метрология
и информационно-измерительные приборы и системы;
05.13.00 — информатика, вычислительная техника и управление.
Напоминаем: статьи следует подавать в редакцию заблаговременно!
С правилами оформления статей можно ознакомиться на сайте mashin.ru

УДК 681.586

М.Г. Мустафаев, канд. техн. наук
(НПП «Экофон», г. Владикавказ)

dzhamilya79@yandex.ru

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМОЙ ПРЕДПРИЯТИЯ

Рассмотрена структура производственной системы как совокупность элементов и связей между ними. Их взаимное расположение отражает иерархическую структуру производственной системы. Взаимодействие элементов в иерархической системе отображает информационно-управляющие процессы, даёт представление о характеристиках функционирования производственной системы, способствует повышению качества организации производственных процессов. Проведён анализ результативности функционирования системы, обеспечивающей производство продукции высокого качества с заданными параметрами.

Ключевые слова: система; параметр; структура; информация; отображение; множество; процесс; эффективность; управление.

The structure of the production system as a collection of elements and links between them is considered. Their mutual arrangement reflects the hierarchical structure of the production system. Interaction of elements in the hierarchical system displays information-control processes, gives a representation_of the characteristics of the production functioning systems and, improves the quality of the organization production processes. The analysis of the system effectiveness providing production of high quality products with the specified parameters was carried.

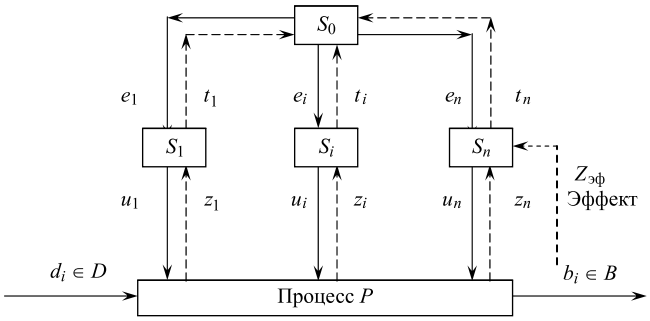
Keywords: system; parameter; structure; information; display; multiplicity; process; efficiency; control.

Введение. Функционирование предприятий происходит в условиях создания новой продукции и внедрения новых информационных технологий, а также повышения требований к качеству. Фактором развития предприятия становятся производственные системы. Повышение эффективности функционирования производственных систем связано с качеством и эффективностью управления и организации производственной системы [1—4]. Создание и реализация эффективного способа организации функционирования производственной системы позволяют осуществлять комплексный подход к поиску организационных резервов её эффективности. В основе построения производственных систем лежат принципы организации производственных процессов. Эффективность организации систем обусловлена последовательностью действий и взаимодействием элементов, согласованным выполнением функций, соответствием управления структуры системы.

Методологический подход к описанию управления процессами в производственной системе. Характерными особенностями производственной системы является наличие большого количества разнородных объектов и элементов, объединённых в систему для достижения единой цели, а также сложные взаимопереплетающиеся связи. Достижение системной единой цели в соответствии с её назначением обеспечивается решением совокупности конкретных задач отдельными элементами системы или её подсистемами. Математическое описание производственной системы позволяет отображать существующие взаимоотношения элементов, выделять их структурные особенности, судить о системе, подсистемах и их отношениях. Такой подход обеспечивает сущность организации производственных процессов и повышение качества организации.

Изменение входного воздействия или значений параметров, характеризующих поведение отдельных элементов системы в соответствии с установленными функциональными зависимостями, приводит к изменению выходных параметров системы и её состояния. Это и различие параметров, характеризующих каждый из элементов и систему в целом, а также наличие функциональных зависимостей между ними затрудняет математическое описание процесса поведения таких систем.

Для математического описания поведения производственной системы необходимы её



Взаимодействие элементов в иерархической системе производственного процесса

формализация и нахождение математической зависимости, определяющие влияние управляющих элементов объекта на его выходные параметры. Для описания управления процессами производственной системы, считаем, что она отображает информационно-управляющие процессы. В этом случае производственную систему можно представить в виде иерархической системы. Схема взаимодействия элементов в системе представлена на рисунке, где S_0 — управляющая система-координатор; S_1, S_i, S_n — нижестоящие управляющие системы (подсистемы); $d_i \in D$ — внешние возмущения окружающей среды; $b_i \in B$ — выход процесса; $u_i \in U$ — управляющие связи; P — процесс: $U \times D \to B$; $e_i \in E$ — координирующие связи; $z_i \in Z$ — информационная обратная связь от процесса; $t_i \in T$ — информация от нижестоящих систем.

Структура производственной системы представляет собой совокупность элементов и связей между ними, которые определяются исходя из распределения функций и целей. Работа системы сводится к выбору способа координации, модифицированию функций, определяющих стратегии нижестоящих подсистем, выбору координирующих воздействий после принятия решений. Их взаимное расположение отражает иерархическую структуру производственной системы. Она включает вышестоящую управляющую систему и нижестоящие управляющие подсистемы, а также управляемый процесс. Взаимодействие между подсистемами — это передача информации вниз, от нижестоящих управляющих систем к процессу. Такая передача является управляющим воздействием. Передача информации от вышестоящей к нижестоящим управляющим системам, а также передача информации наверх (обратная связь) управляющим подсистемам являются координирующим вмешательством.

Система решает задачу A, координатор S_0 — задачу A_0, управляющие системы — свои задачи, составляющие множество

$$A = A_1 \cup A_2 \cup \ldots \cup A_n.$$

В этом случае производственная система представляется следующими множествами:

$$\begin{cases} E = e_1 e_2 \ \ldots \ e_n; \\ Z = z_1 z_2 \ \ldots \ z_n; \\ T = t_1 t_2 \ \ldots \ t_n; \\ U = u_1 u_2 \ \ldots \ u_n; \end{cases}$$

$$\begin{cases} B = (B_1, B_2, \ldots, B_n), \\ D = (D_1, D_2, \ldots, D_n). \end{cases}$$

На локальные элементы системы поступают входные связи управляющих воздействий и внешних возмущений. Управляющая система — координатор S_0 осуществляет отображение, порождающее связь e_i. Этим процессом управляет представленная локальным описанием система S_n, которая описывается в модели как «вход — выход», подвергающийся возмущению D. К системе S_n поступают координирующие связи $e_i \in E$ и информация относительно реализации процесса P, формирующаяся в виде связей $z_i \in Z$. Выходами системы являются управление $u_i \in U$ и информация $t_i \in T$.

Таким образом, взаимосвязь в системе описывается отображениями

$$P_1 : A \times A_0 \times T \times D_1 \Rightarrow E;$$
$$P_2 : E \times Z \times D_2 \times A_1 \Rightarrow U;$$
$$P_3 : X \times b \times D_3 \Rightarrow B,$$

при оценке эффективности имеем

$$V : X \times B \times D \to R;$$
$$H_1 : U \times D \times B \to Z;$$
$$H_2 : A \times D \times R \to Z_{эф};$$
$$M : E \times U \times Z \times A_0 \times A \times A_{эф} \to T,$$

где X — множество ресурсов; V — множество мер выполнения; $Z_{эф}$ — информация об эффективности функционирования производственной системы; M — результативность.

Анализ взаимодействия элементов в иерархической системе отображает информационно-управляющие процессы, даёт представление о характеристиках функционирования

производственной системы, способствует повышению качества организации производственных процессов при создании изделий.

Представление производственной системы в виде иерархической системы позволяет отображать существующую систему отношений элементов как между собой, так и с окружающей средой, использовать структурные свойства системы, выделять важные их структурные особенности, а также даёт возможность судить о системе в целом, подсистемах, их взаимных отношениях и организации процессов.

Эффективность функционирования производственной системы. Функционирование производственной системы предприятия предусматривает эффективный способ управления её составляющими при высокой степени организационно-технической и производственно-технологической оснащённости предприятия. Эффективность управления определяется по результатам функционирования производственной системы и степени достижения поставленной цели. При оценке эффективности управления учитывается эффективность деятельности предприятия.

При управлении производственной системой структуру можно описать полным графом с равномерным распределением и с минимальным значением структурной компактности, соответствующими функционирующим компонентам: выпускаемой продукции, технологическому процессу, технологическому оборудованию, материально-техническому обеспечению, информационно-организационному обеспечению и кадрам, занятым в производственном процессе. Конечной целью производственной системы является стабильный выпуск изделий высокого качества. Это значит, что функционирование производственной системы предполагает реализацию критериев результативности.

Эффективность производственной системы отражает соотношение эффекта и затрат на его получение, а также степень достижения цели. Результативность функционирования системы обеспечивает производство продукции высокого качества с заданными параметрами и удовлетворение потребности потребителей.

Качество цели определяет успех функционирования системы. Результативность функционирования системы зависит от соответствия планируемой цели и возможности предприятия, выбранной стратегии, объёма и качества ресурсов.

Заключение. Анализ эффективности функционирования производственной системы позволяет обосновывать методы и инструменты организации производства в целях повышения результативности их воздействия на производственную систему, а также для обеспечения возможности применения информационных технологий, способствующих повышению эффективности производственной системы. Использование средств и методов организации производства в производственной системе во взаимосвязи и взаимозависимости обеспечивает реализацию производственного процесса и эффективное достижение целей, а также обеспечение выпуска продукции требуемого качества. Повышение эффективности организации производственных систем обеспечивается совокупностью организационных форм, инструментов и методов управления, позволяющих за счёт использования имеющихся ресурсов достичь максимального экономического эффекта.

Библиографические ссылки

1. **Мустафаев М.Г.** Системный подход к обеспечению качества изделий // Автоматизация и современные технологии. 2007. № 1. С. 43—45.

2. **Мустафаев М.Г.** Эффективность управления технологическим процессом при создании сложных изделий // Автоматизация и современные технологии. 2011. № 11. С. 34—37.

3. **Мустафаев Г.А., Мустафаев М.Г.** Формирование эффективной системы организации и управления производственным процессом // Автоматизация и современные технологии. 2013. № 1. С. 40—42.

4. **Мустафаев Г.А., Мустафаев М.Г.** Повышение эффективности функционирования и совершенствования управления производственными процессами // Организатор производства. 2013. № 1. С. 90—93.

Ссылка для цитирования

Мустафаев М.Г. Анализ эффективности функционирования и управления производственной системой предприятия // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 11. С. 499—501.

Вниманию авторов!

Требования к оформлению статей, присылаемых для публикации, можно найти на сайте www.mashin.ru

УДК 628.97:621.385.2

А.А. Горбунов, канд. техн. наук, доц., **А.В. Балакин**
(Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва),
С.А. Микаева, д-р техн. наук, проф.
(Росссийский технологический университет МИРЭА)

mikaeva@npo.lit.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ И СТЕПЕНИ РАЗВИТИЯ ЭКОСИСТЕМЫ АКВАРИУМА ПРИ ОСВЕЩЕНИИ СПЕЦИАЛЬНЫМИ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫМИ ЛАМПАМИ

Рассмотрены вопросы оценки эффективности использования специальных люминесцентных ламп для освещения аквариумов. Представлены результаты исследования развития экосистемы при освещении данными видами источников света.

Ключевые слова: специальная люминесцентная лампа; аквариум; экосистема; степень восприятия.

The questions of the utilization efficiency evaluation of special fluorescent lamps for illumination of aquariums are considered. The research results of the ecosystem development under illumination with these types of light sources are presented.

Keywords: special fluorescent lamp; aquarium; ecosystem; degree of perception.

Обеспечение надлежащего освещения в аквариуме является важной задачей. На современном рынке представлены разнообразные лампы для аквариума, которые позволяют в максимальной степени учесть особенности конкретных аквариумных рыбок и растений. Из специализированных аквариумных ламп в России наиболее широко представлены лампы фирмы Hagen. Эти лампы достаточно дороги, однако дают лучший эффект, чем обычные. Такие лампы, как Sun-Glo, Power-Glo, Live-Glo, обладают довольно широким спектром и способны стимулировать рост некоторых групп водорослей. Для аквариумов с живыми растениями наиболее подходит сочетание ламп Aqua-Glo и Flora-Glo. В качестве альтернативы используют более дешевые аналоги, которые выпускают фирмы Osram, Philips и GE [1—4].

Для исследования характеристик специальных люминесцентных ламп для освещения аквариумов была разработана экспериментальная установка, представляющая собой конструкцию, состоящую из двух стеклянных аквабоксов одинакового размера, склеенных специальным аквариумным герметиком (рис. 1) [5—8]. Её особенностью является то, что длина аквариума совпадает с длиной светового столба люминесцентных ламп. Это обеспечивает выполнение одного из требований по освещению аквариумов — равномерность освещения по всей длине аквабоксов.

Была разработана конструкция единой крышки для аквабоксов. Так как аквабоксы должны быть независимыми друг от друга, включая и освещение, то в конструкции крышки между источниками света предусмотрена перегородка. Внутренняя поверхность крышки выкрашена в чёрный матовый цвет. В ней предусмотрены отверстия под проводку и аэрацию (рис. 2). Исследовавшаяся осве-

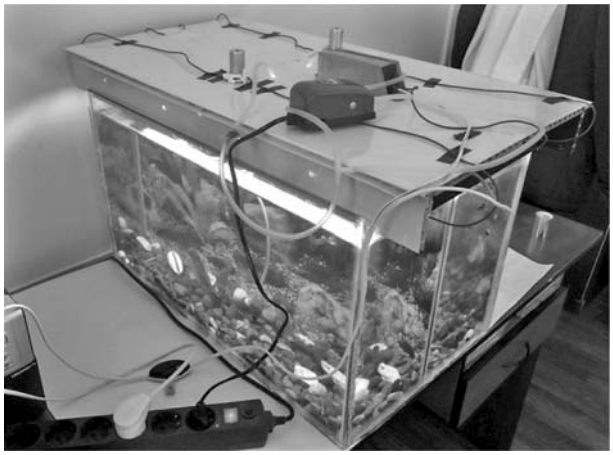


Рис. 1. Экспериментальная установка

Рис. 2. Крышка аквариума с последовательным подключением двух ламп

тительная система включала в себя экспериментальные люминесцентные лампы Sylvania Aquastar и Hagen Power-Glo, пускорегулирующий аппарат 2УБИ-20/220 и два стартёра 4-20СК127.

В экспериментальную установку были помещены представители флоры (эхинодорус красный жемчуг и элодея канадская) и фауны (рыбки гуппи). Для каждого аквабокса было взято по одному ростку из выбранных видов растений. Число рыб определялось с учётом проанализированной полученной ранее информации по их содержанию и размножению. Для каждого аквабокса гуппи были взяты в количестве шести особей: два самца и четыре самки. Так же были внесены в экосистемы и моллюски: шесть штук для каждого аквабокса. Прежде чем посадить растения в грунт, провели замеры их размеров. Результаты представлены в таблице. Был проанализирован их внешний вид на наличие повреждений.

Общий срок наблюдения составил девять недель. Для систематического наблюдения были выбраны промежуточные контрольные точки, временной интервал между которыми составил семь дней. Соответственно, получилось девять таких точек: первой контрольной точкой являлся десятый день после начала эксперимента.

Длина растений в начале эксперимента, см

Номер аквабокса + тип лампы	Эхинодорус красный жемчуг, номер листа			Элодея канадская, номер отростка		
	1	2	3	1	2	3
№ 1 + Hagen Power-Glo	3,5	3	1	7	5,5	2
№ 2 + Sylvania Aquastar	3,5	4	0,5	7	5,5	4,5

Во время наблюдения обращали внимание на проходящие в аквабоксах процессы, при этом учитывали:

поведение рыб, т. е. проводили сравнение активности обитателей аквабоксов не только в данный момент, но и с результатами в предыдущей контрольной точке. Подсчитывали число особей, обращали внимание на рост рыб и наличие новорожденных мальков, а также на готовность самок к живорождению;

рост растений, общую оценку состояния растения. Особое внимание в начале эксперимента обращали на то, прижилось ли растение или нет, появились ли новые ростки и лепестки.

Контрольная точка № 1. При подсчёте числа рыб в аквабоксе № 2 были обнаружены первые мальки, всего пять штук. Поскольку живорождение у рыб происходит спустя 1—2 месяца, можно утверждать, что рыбы были приобретены уже оплодотворёнными. Вследствие этого мальки были разделены по аквабоксам поровну, так как один из мальков погиб. При осмотре в аквабоксах растений явного их роста выявлено не было. Активность обитателей была не слишком высока, но, скорее всего, это был период адаптации к новым условиям.

Контрольная точка № 2. Наблюдения показали заметное увеличение активности в обоих аквабоксах. Число особей в экосистемах не изменилось. Но вот активность растительности дала о себе знать: длина отростков элодеи увеличилась на 3—4 см в двух аквабоксах. Были замечены новые отростки элодеи, за неделю они достигли примерно 5 см. Разницы в активности флоры и фауны между аквабоксами практически не наблюдалось.

Контрольная точка № 3. Выявлено значительное увеличение длины растений. В обоих аквабоксах выявлено практически двукратное увеличение размеров растений и активный рост брюшка у самок гуппи.

Контрольная точка № 4. Отмечено появление отложений икры улиток. Также замечено увеличение длины отростков и листочков у растений. Замечено малое увеличение области брюшка у самок. Активность рыб находилась на прежнем уровне.

Контрольная точка № 5. В аквабоксе № 2 обнаружено большое число новорожденных мальков — 16 штук. Растения также продолжали расти.

Контрольная точка № 6. Следует обратить особое внимание на бурное развитие и рост в обоих аквабоксах улиток катушек. Также в аквабоксе № 1 были обнаружены мальки — 6 штук. При наблюдении выявлено незначительное помутнение воды в авкабоксе № 2.

Контрольная точка № 7. Из-за непрерывного роста элодеи в обоих аквабоксах ростки растений достигли верхнего уровня воды, длина отростков составляла около 40 см. Также наблюдался заметный рост лепестков эхинодоруса в аквабоксе № 2.

Контрольная точка № 8. Наблюдалось активное размножение моллюсков. Число улиток в аквабоксах практически одинаково и составило примерно шестьдесят в каждом аквабоксе. Рост растений продолжался. В аквабоксе № 1 вода стала более мутной.

Контрольная точка № 9. Результаты в последней, итоговой, контрольной точке позволили определить средний рост растений и числа мальков.

Заключение. В статье приведены результаты исследования развития экосистемы аквариума при освещении специальными люминесцентными лампами. Для этого была использована конструкция, включающая в себя два аквабокса, в которых были созданы одинаковые условия (было помещено одинаковое количество рыб, растений и моллюсков). Был проведён анализ развития экосистемы в течение девяти недель, а именно роста растений и развития и увеличения популяции рыб и моллюсков.

Оценивая степень развития представителей экосистемы путём анализа результатов наблюдений в контрольных точках, можно сделать вывод о том, что в аквабоксе № 1 с люминесцентной лампой Hagen Power-Glo преимущественно развиваются представители растительного мира, в отличие от аквабокса № 2 с люминесцентной лампой Sylvania Aquastar. Что касается представителей фауны экосистемы аквабоксов, то их развитие преимущественно наблюдалось в аквабоксе № 2 с использованием специальной люминесцентной лампы, о чем свидетельствуют наблюдения и подсчёт числа особей рыб и моллюсков.

Библиографические ссылки

1. **Козлов И.Н., Горбунов А.А., Калинин А.Д.** Современные источники света для освещения аквариумов // XLIV Огаревские чтения: материалы науч. конф. / отв. за вып. П.В. Сенин. Саранск, 2016. С. 10—16.

2. **Микаева С.А.** Разработка и исследование технологии производства компактных люминесцентных ламп информационно-измерительных приборов и систем: дис. ... д-ра техн. наук. Московская государственная академия приборостроения и информатики. М., 2007.

3. **Балакин А.В., Горбунов А.А.** Исследование влияния спектров люминесцентных ламп на цветовое восприятие объекта // Материалы XXI науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва. Саранск, 2017. С. 240—243.

4. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Экспериментальные исследования характеристик перспективных источников света, приборов и систем. М.: РусАнс, 2017. С. 136.

5. **Козлов И.Н., Горбунов А.А.** Анализ современных источников света для подсветки аквариумов // Научный взгляд в будущее. 2016. Т. 4. № 4. С. 40—43.

6. **Козлов И.Н., Балакин А.В., Горбунов А.А.** Использование специальных люминесцентных и светодиодных источников света для подсветки аквариумов // Материалы XX науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва. Саранск, 2016. С. 104—108.

7. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Технология производства для нанесения покрытия на компактные люминесцентные лампы // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 11. С. 24—29.

8. **Микаева С.А., Железникова О.Е., Синицына Л.В.** Комплекс современного исследовательского оборудования для световых измерений // Автоматизация и современные технологии. 2012. № 12. С. 33—36.

Ссылка для цитирования

Горбунов А.А., Балакин А.В., Микаева С.А. Исследование условий и степени развития экосистемы аквариума при освещении специальными люминесцентными лампами // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 11. С. 498—504.

Уважаемые читатели!

Перепечатка материалов из журнала «Автоматизация. Современные технологии» возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала.

При этом ссылка на журнал обязательна.

УДК 550.34.01

Б.И. Шахтарин, д-р техн. наук, проф.
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана),
Г.К. Асланов, д-р техн. наук, проф.
(Дагестанский государственный технический университет, г. Махачкала),
Т.Г. Асланов, канд. техн наук
(Северо-Кавказский институт — филиал Всероссийского государственного университета юстиции, г. Махачкала)

tabasik@gmail.com

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИГУР ВТОРОГО ПОРЯДКА — ЭЛЛИПСА И ГИПЕРБОЛЫ

Приведены рекомендации по минимизации ошибок определения координат очага землетрясения за счёт оптимального выбора сейсмодатчиков.

Определены математические зависимости, позволяющие выявить ошибки вычисления гипоцентра землетрясения в зависимости от взаимного расположения двух сейсмодатчиков, используя значения скоростей сейсмических волн, разности времени прихода сейсмических волн к двум сейсмодатчикам, продольной волны к двум сейсмодатчикам и допустимой ошибки в определении разности времени.

Показано, что при расположении сейсмодатчиков на разных растояниях от очага землетрясения, предложенный метод позволяет определять координаты очага землетрясения с меньшими ошибками по сравнению с известными методами.

Ключевые слова: землетрясение; координаты очага; сейсмодатчик; окружность; эллипс; гипербола; ошибка; уравнение.

Recommendations for errors minimization at determining the coordinates of the earthquake centre due to the optimal choice of seismic sensors are adduced. Mathematical dependencies are determined that allow to determine the errors in calculating the hypocenter of the earthquake depending on the relative position of the two seismic sensors, using the values of the seismic wave velocities, the difference in the arrival time of seismic waves to two seismic sensors, the longitudinal wave to two seismic sensors, and the permissible error in determining the time difference.

It is shown that when seismic sensors are located at different distances from the earthquake centre, the proposed method makes it possible to determine the coordinates of the earthquake centre with fewer errors than the known methods.

Keywords: earthquake; coordinates of the centre; seismic sensor; circle; ellipse; hyperbola; error; equation.

Введение. При определении координат очага землетрясения возникают ошибки, одной из причин которых является неверный выбор сейсмодатчиков. Как показано в работе [1], одним из оптимальных вариантов уменьшения ошибки является выбор сейсмодатчиков таким образом, чтобы угол с вершиной, находящейся в очаге землетрясения, и с лучами, проходящими через точки расположения двух сейсмодатчиков, был близок к прямому углу. Это приводит к тому, что при вычислении координат очага землетрясения по методу сфер, окружности, соответствующие расстояниям до очага землетрясения, пересекаются под прямым углом.

Как известно из работы [2], фигуры второго порядка (гипербола и эллипс) пересекаются под прямым углом, если их фокусы совпадают. Используем эти две кривые второго порядка для нахождения координат гипоцентра.

В работе приводятся комбинированный метод определения координат землетрясения с использованием кривых второго порядка и рекомендации по минимизации ошибок определения координат очага землетрясения за счёт оптимального выбора сейсмодатчиков.

Постановка задачи. Для нахождения ошибок при определении гипоцентра землетрясения в зависимости от взаимного расположения двух сейсмодатчиков используются

значения скоростей сейсмических волн, разности времени прихода сейсмических волн к двум сейсмодатчикам, продольной волны к двум сейсмодатчикам и допустимая ошибка в определении разности времени.

Зависимость ошибки в определении гипоцентра землетрясения от взаимного расположения сейсмодатчиков определяется по величине разности координат гипоцентров, вычисленных с учётом ошибок в определении разности времен пробега сейсмических волн на сейсмодатчики и разность времени прихода продольной волны к двум сейсмодатчикам, а также без учёта указанных ошибок.

Ошибки в определении глубины очага землетрясения при использовании для расчёта комбинированным методом малы по сравнению с другими известными методами для мелкофокусных землетрясений

Методы исследования. В работе [1] рассматриваются вопросы влияния взаимного расположения сейсмодатчиков и очага землетрясения на ошибки определения координат эпицентра и гипоцентра. Причём в начале рассматриваются ошибки в определении гипоцентра в зависимости от перемещения одного из сейсмодатчиков на плоскости, проходящей через его начальное положение, неподвижные гипоцентр и другой сейсмодатчик, а затем и от результата пересечения фигур (сфер), соответствующих геометрическим местам положения гипоцентров землетрясения, определяемых по разностям времени пробега продольной и поперечной волн на сейсмостанции — окружности и третьего сейсмодатчика.

Координаты очага землетрясения могут быть вычислены с использованием комбинированного метода сфер и гиперболоидов [3].

Геометрическим местом точек пересечения гиперболоида и сферы при условии размещения фокусов гиперболоида и сферы на одной прямой является окружность.

Для нахождения координат очага землетрясения необходимо использовать данные третьего сейсмодатчика, который не должен находиться на одной прямой с первыми двумя. Если третий сейсмодатчик определяет расстояние до очага землетрясения по разности времени пробега продольной и поперечной сейсмических волн, то геометрическим местом положения очага землетрясения будет сфера. Точка пересечения этой сферы с указанной окружностью и является очагом землетрясения. Ошибки, возникающие при пересечении окружности со сферой, рассмотрены в работе [1].

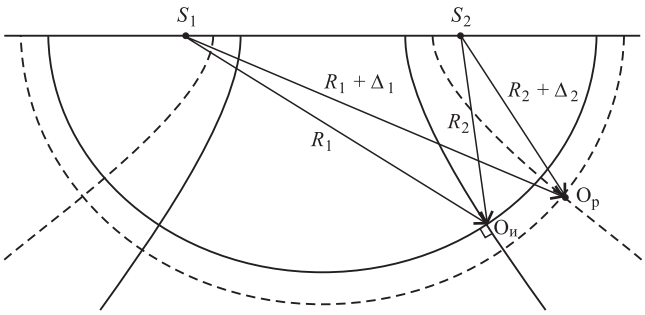


Рис. 1. Взаимное расположение сейсмодатчиков и очага землетрясения на плоскости

Пусть сейсмодатчики расположены в точках S_1 и S_2 (рис. 1) на расстояниях R_1 и R_2 от истинного очага землетрясения $O_и$. Геометрическим местом точек, соответствующих постоянной разности расстояний от истинного очага землетрясения до сейсмодатчиков, является гипербола, а постоянной сумме расстояний от очага землетрясения до сейсмодатчиков — эллипс. $O_р$ — расчётное положение очага землетрясения, вызванное наличием ошибок Δ_1 и Δ_2 в определении расстояний R_1 и R_2.

Для удобства расчётов сейсмодатчик S_1 расположим в начале координат и примем за опорный. По разности времени прихода сейсмических волн к сейсмодатчикам и расстоянию от опорного сейсмодатчика до очага землетрясения может быть получено уравнение эллипса в полярных координатах [4]:

$$R = \frac{(R_1 + R_2)^2 - X_2^2}{2(R_1 + R_2) - 2X_2 \cos\varphi}, \qquad (1)$$

где R — расстояние от начала координат до очага землетрясения, $R_1 + R_2 = \text{const}$; R_1, R_2 — фокальные радиусы эллипса; X_2 — расстояние от опорного до второго сейсмодатчика (длина отрезка от S_1 до S_2); φ — полярный угол, образованный прямой, проходящей через два сейсмодатчика, и фокальным радиусом, исходящим из начала координат.

Для построения эллипса необходимо иметь значение суммы расстояний от очага землетрясения до сейсмодатчиков S_1 и S_2. Для нахождения суммы расстояний воспользуемся методом сфер [1]:

$$R_1 = \frac{V_1 V_2 \Delta t_1}{V_1 - V_2}; \qquad (2)$$

$$R_2 = \frac{V_1 V_2 \Delta t_2}{V_1 - V_2}, \qquad (3)$$

где V_1, V_2 — скорости продольной и поперечных волн соответственно; t_i — разность времени прихода продольной и поперечной волн на i-й сейсмодатчик.

После подстановки в уравнение (1) параметров R_1 и R_2 из уравнений (2) и (3) получим

$$R = \frac{V_1^2 V_2^2 (\Delta t_1 + \Delta t_2)^2 - 2V_1 V_2 (\Delta t_1 + \Delta t_2)(V_1 - V_2) - X_2^2 (V_1 - V_2)^2}{-2X_2 (V_1 - V_2)^2 \cos\varphi}. \quad (4)$$

Уравнение гиперболы в соответствии с уравнением [3] имеет вид

$$R = \frac{X_2^2 - (t_r V_1)^2}{2t_r V_1 + 2X_2 \cos\varphi}, \quad (5)$$

где t_r — разность времени прихода продольной сейсмической волны к двум сейсмодатчикам.

Приравняв правые части уравнений (4) и (5), после некоторых преобразований получим

$$\cos\varphi = \frac{2V_1 V_2 (\Delta t_1 + \Delta t_2)(V_1 - V_2) b - 2(\Delta t_1 + \Delta t_2) V_1 c}{2X_2 (V_1 - V_2)^2 b + 2X_2 c},$$

где $b = X_2^2 - [(\Delta t_1 - \Delta t_2) V_1]^2$,
$c = V_1^2 V_2^2 (\Delta t_1 + \Delta t_2)^2 - X_2^2 (V_1 - V_2)^2$.

Произведя замену $V_2 = kV_1$, окончательно получим

$$\cos\varphi = \frac{k[(\Delta t_1 + \Delta t_2)(X_2^2 - t_r^2 V_1^2)(1-k) - t_r k V_1^2 (t_1 + t_2)^2] + t_r X_2^2 (1-k)^2}{V_1 X_2 [k^2 (\Delta t_1 + \Delta t_2)^2 - t_r^2 (1-k)^2]},$$

где k — коэффициент пропорциональности между скоростями продольной и поперечной волн.

После подстановки cosφ в уравнение (5) получим расстояние от начала координат до очага землетрясения.

Для сравнительного анализа точности определения координат по комбинированному методу гиперболы и окружности, рассчитанных в декартовой системе координат [3], с комбинированным методом эллипса и гиперболы, уравнения, определяющие угол cos φ, и уравнения (5) запишем в декартовой системе координат.

Эпицентр землетрясения может быть найден по следующей формуле:

$$X = R\cos\varphi, \quad (6)$$

а глубина расположения очага землетрясения —

$$Z = \sqrt{R^2 - X^2}. \quad (7)$$

Пусть из-за ошибок в показаниях сейсмодатчиков имеет место увеличение расстояния до очага землетрясения ($t_1^* = t_1 + \Delta t_1$, $t_2^* = t_2 + \Delta t_2$, $t_r^* = t_r + \Delta t_3$), тогда эпицентр землетрясения может быть вычислен по формуле

$$X^* = R^* \cos\varphi^*. \quad (8)$$

В то же время глубина очага землетрясения вычисляется по формуле

$$Z^* = \sqrt{R^{*2} - X^{*2}}. \quad (9)$$

Вычтя из уравнения (8) уравнение (6), получим уравнение ошибки в определении эпицентра землетрясения

$$\Delta X = |R\cos\varphi - R^* \cos\varphi^*|.$$

Вычтя из уравнения (9) уравнение (7), получим уравнение ошибки в определении глубины очага землетрясения

$$\Delta Z = |\sqrt{R^2 - X^2} - \sqrt{R^{*2} - X^{*2}}|.$$

На рис. 2 приведены графические зависимости ошибки в определении координат очага землетрясения на плоскости, проходящей через два сейсмодатчика и очаг землетрясения, полученные моделированием в среде MatLab уравнений (8) и (9).

Рисунок 2, *а* и *б* соответствует случаю, когда знаки ошибок измерений разности времени прихода продольной волны к двум сейсмодатчикам и продольной и поперечной сейсмических волн ко второму сейсмодатчику противоположны разности времени прихода продольной и поперечной сейсмических волн к опорному сейсмодатчику. Рисунок 2, *в* и *г* соответствует случаю, когда знаки оши-

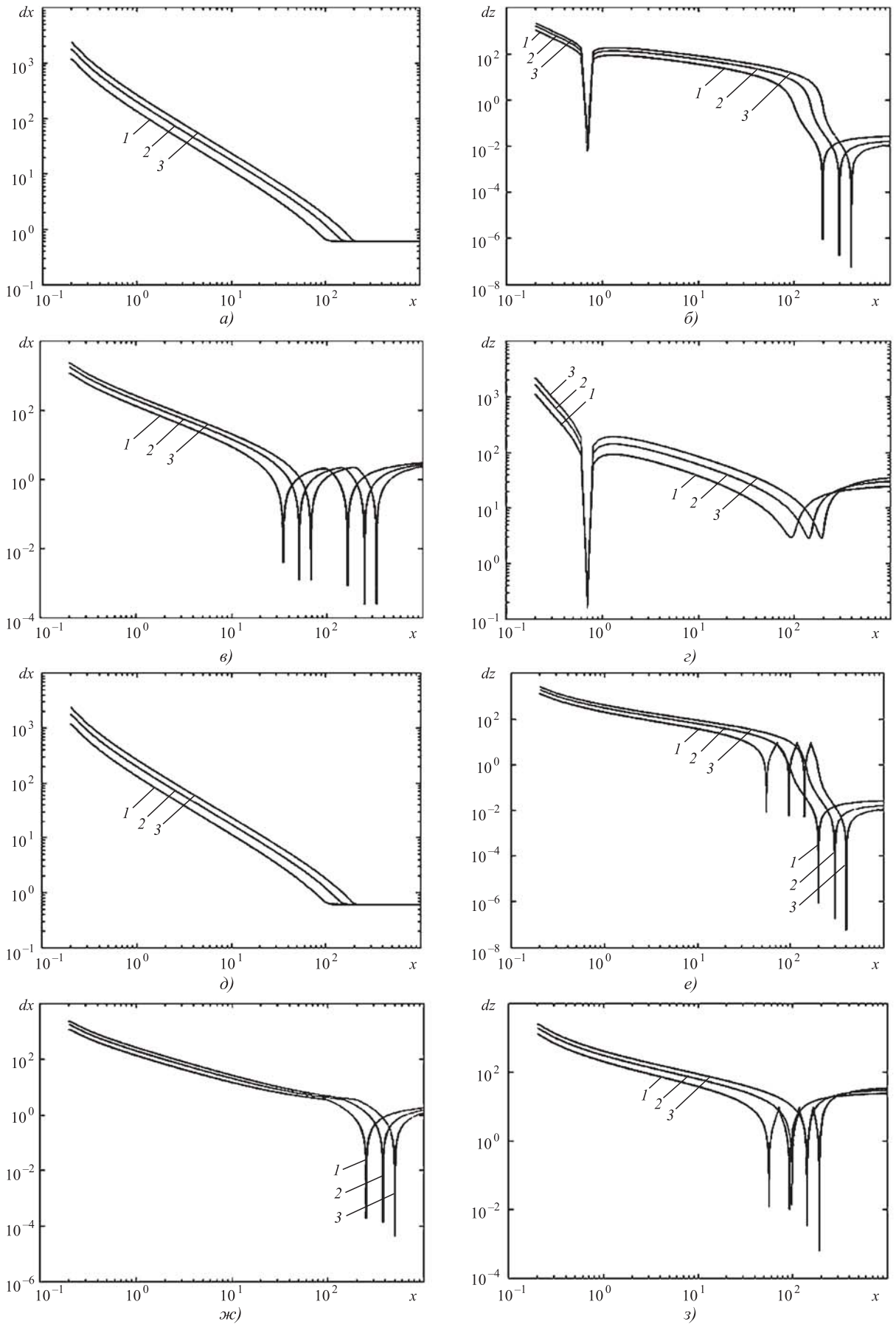


Рис. 2. Ошибки в определении координат очага землетрясения в плоскости

бок измерений разности времени прихода продольной волны к двум сейсмодатчикам противоположны разности времени прихода продольной и поперечной сейсмических волн к двум сейсмодатчикам. Рисунок 2, *д* и *е* соответствует случаю, когда знаки ошибок измерений разности времени прихода продольной и поперечной сейсмических волн ко второму сейсмодатчику противоположны разности времени прихода продольной и поперечной сейсмических волн к опорному сейсмодатчику и разности времени прихода продольной волны к двум сейсмодатчикам. Рисунку 2, *ж* и *з* соответствуют ошибки, направленые в сторону увеличения расстояния от сейсмодатчиков до очага землетрясения.

При моделировании инструментальная ошибка измерения разности времени пробега сейсмических волн сейсмодатчиками принята равной 0,5 с.

Кривым *1*, *2* и *3* соответствуют удаления эпицентра землетрясения от опорного сейсмодатчика на расстояния 100, 150 и 200 км соответственно, а глубина очага землетрясения принята равной 10 км.

Оценка результатов. В результате выполненной работы предложен метод определения координат очага землетрясения, а также получены зависимости для расчёта точности определения глубины и эпицентра землетрясения.

При расположении сейсмодатчиков в разных сторонах от очага землетрясения предложенный метод позволяет определять координаты очага землетрясения с меньшими ошибками по сравнению с известными методами [1, 3].

При разнонаправленных ошибках в определении разности времени прихода поперечной и продольной волн к обоим сейсмодатчикам (рис. 2, *а* и *д*) использование предложенного метода даёт результаты, аналогичные методу сфер [1].

При разнонаправленных ошибках в определении разности времени прихода продольной волны к обоим сейсмодатчикам и ошибок в определении разности времени прихода поперечной и продольной волн к обоим сейсмодатчикам даёт результаты, аналогичные комбинированному методу гипербол и сфер, предложенному в работе [3].

К такому же выводу приходим и при ошибках, направленных в сторону увеличения расстояния от сейсмодатчиков до очага землетрясения (рис. 2, *в* и *ж*).

Следует также отметить, что эта задача может быть решена методами комбинаторики, что требует бóльших временных затрат. В связи с этим следует автоматизировать процесс выбора сейсмодатчиков для нахождения координат очага землетрясения.

Заключение. На рис. 2 из-за наличия ошибок в измерении времени прихода сейсмических волн и в связи с близким расположением сейсмодатчиков графики стремятся к бесконечности, что приводит к преобразованию гиперболы в эллипс. В результате этого эллипсы, как показано в работах [1, 3], не пересекаются.

Спады в значениях ошибок на рис. 2 соответствуют расположению одного из сейсмодатчиков непосредственно над эпицентром землетрясения.

Рассмотренный метод даёт меньшие ошибки по сравнению с методом сфер и комбинированным методом (сфер и гиперболоида) [1, 3], если сейсмодатчики расположены в разных сторонах от очага землетрясения.

Предложенный метод позволяет определить с меньшими ошибками глубину очага землетрясения для мелкофокусных землетрясений.

Научный метод применим также в навигационных системах, где в настоящее время используются методы сфер и гиперболоидов.

Библиографические ссылки

1. **Асланов Т.Г., Магомедов Х.Д., Мусаева У.А., Тагиров Х.Ю.** Влияние пространственного расположения сейсмодатчиков на точность определения гипоцентра землетрясения // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016. № 43(4). С. 73—84. DOI:10.21822/2073-6185-2016-43-4-73-84.

2. **Большая** советская энциклопедия. В 30 т. / Гл. ред. А.М. Прохоров. 3-е изд. М.: Сов. энцикл., 1969—1978.

3. **Асланов Т.Г., Тагиров Х.Ю.** Определение координат очага землетрясения с использованием комбинированного метода // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017. № 45(2). С. 52—63. DOI:10.21822/2073-6185-2017-45-2-52-63.

4. **Погорелов А.В.** Аналитическая геометрия [Электронный ресурс]/ Электрон. текстовые данные. М., Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2005. 208 с. Режим доступа: http://www.iprbookshop.ru/16488.html (дата обращения: 03.06.2018).

Ссылка для цитирования

Шахтарин Б.И., Асланов Г.К., Асланов Т.Г. Определение координат очага землетрясения с использованием фигур второго порядка — эллипса и гиперболы // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 11. С. 503—509.

УДК.621.396

К.П. Лихоеденко, С.Д. Ревуцкий, Г.М. Серегин, В.Б. Сучков, Ю.В. Каракулин
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

wave@sm.bmstu.ru

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ УСТРОЙСТВ

Рассмотрены возможности современных систем автоматизированного проектирования при разработке сверхширокополосного полосового фильтра. Приведены основные положения модели замкнутых форм, технологии оптимизации конструкции, а также программных модулей на основе метода моментов и метода конечных элементов в среде проектирования AWR DE. Сопоставлены результаты моделирования характеристик полосового фильтра с данными измерений макетной платы в рабочей полосе частот.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование; сверхвысокочастотный полосовой фильтр; оптимизация; метод моментов.

The possibilities of modern automatic designing systems at the development of an ultra-wideband bandpass filter are considered. The main provisions of the closed-form model, design optimization technologies, and program modules based on the torque method and the finite element method in the AWR DE designing environment are adduced. The simulation results of the bandpass filter characteristics with measurement data of the prototype board in the operating frequency band are compared.

Keywords: automatic designing; ultrahigh-frequency bandpass filter; optimization; method of moments.

Введение. Современные системы автоматизированного проектирования (САПР) для создания высокочастотных (ВЧ) и сверхвысокочастотных (СВЧ) устройств предоставляют разработчику широкий выбор разнообразных инструментов при проведении схемотехнического и электромагнитного анализа исследуемого устройства. Большое значение при проектировании имеет учёт технологических особенностей производства, корпусирования интегральных микросхем, выполнения электрических контактов, а также использование компонентов поверхностного монтажа.

Параметры полосового фильтра

Параметр фильтра	Значение
Центральная частота ПФ, МГц	2042,5
Полоса пропускания по уровню 3 дБ, МГц	330,0
Потери в полосе 1885...2200 МГц, дБ	Не более 2,5
Полоса заграждения по уровню 25 дБ, МГц	700...730
Коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) в полосе 1885...2200 МГц	Не более 1,8

В статье последовательно рассмотрены различные методы расчёта, реализованные в САПР NI AWR DE, на примере полосового фильтра (ПФ), состоящего из свёрнутых резонаторов в микрополосковом исполнении [1] в диапазоне частот 1885...2200 МГц. Требования к ПФ приведены в таблице.

Топология фильтра (рис. 1) может быть получена за счёт применения специализиро-

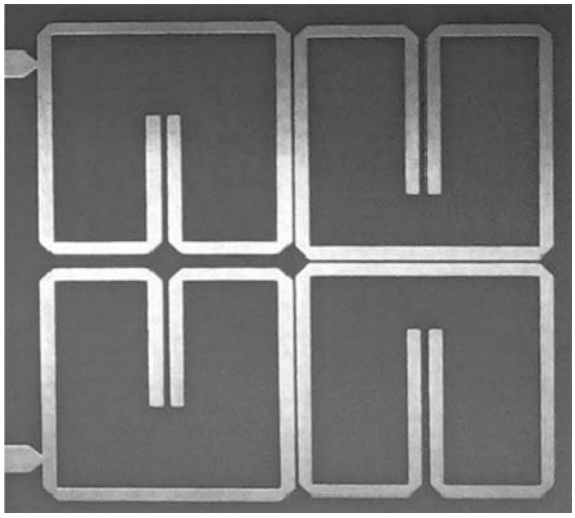


Рис. 1. Внешний вид макета разработанного полосового фильтра в диапазоне частот 1885...2200 МГц

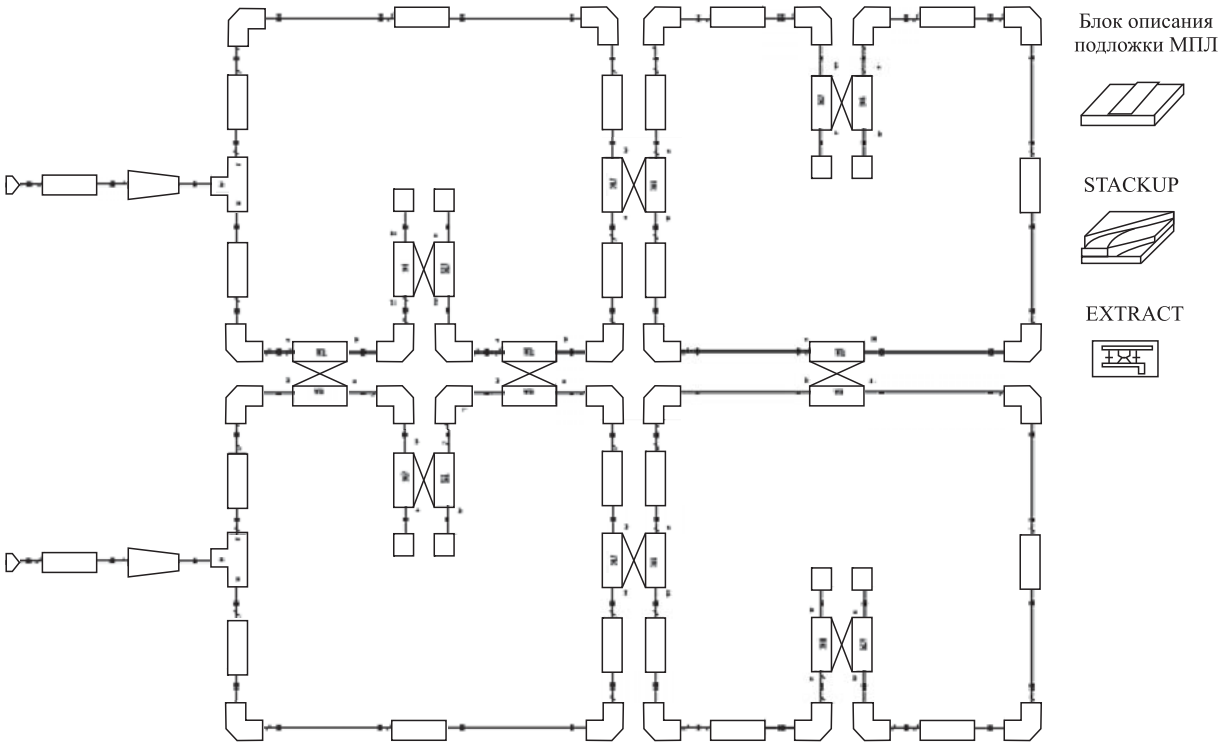


Рис. 2. Схема полосового фильтра, собранного из элементов в замкнутой форме

ванного программного обеспечения (ПО) для синтеза частотно-селективных структур на основе анализа доступной литературы с использованием сторонних решений. Следующим этапом после создания топологии фильтра является анализ и оптимизация полученного решения.

Проектирование полосового фильтра на основе моделей в замкнутой форме. Одним из наиболее распространённых подходов к анализу СВЧ-устройств можно назвать подход, при котором топология исследуемого устройства представляется в виде соединения обособленных блоков, каждый из которых представляет собой модель той или иной неоднородности микрополосковой или связанных микрополосковых линий (МПЛ), представленных аналитическими выражениями. Этот подход, описанный в литературе по проектированию СВЧ-устройств [2], основан на представлении распределённой структуры моделями в замкнутой форме (closed forms) [3]. На рис. 2 приведена схема ПФ, собранная на элементах в замкнутой форме. На схеме можно выделить такие неоднородности, как отрезки МПЛ и связанных МПЛ, тройники, повороты, отрезки МПЛ с изменяемой шириной.

С помощью такого подхода можно оперативно оценить возможность физической реализации проектируемого устройства, оценить его габариты, провести сравнение различных вариантов реализации (например, на подложках из разных материалов). Так же можно оценить влияние различных конструктивных параметров (например, длины и ширины резонаторов, зазоров между связанными МПЛ) на характеристики проектируемого фильтра (рис. 3 и 4).

Ещё одним важным преимуществом использования моделей из замкнутых форм является возможность оперативно провести анализ топологии проектируемого устройства и оценить выход готовых изделий.

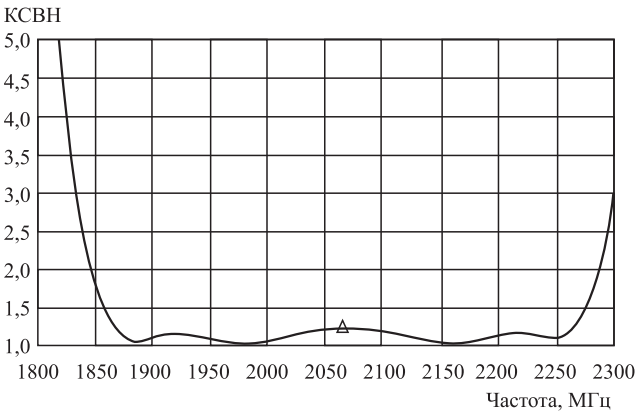


Рис. 3. Зависимость КСВН от частоты полосового фильтра, собранного из элементов в замкнутой форме «closed form»

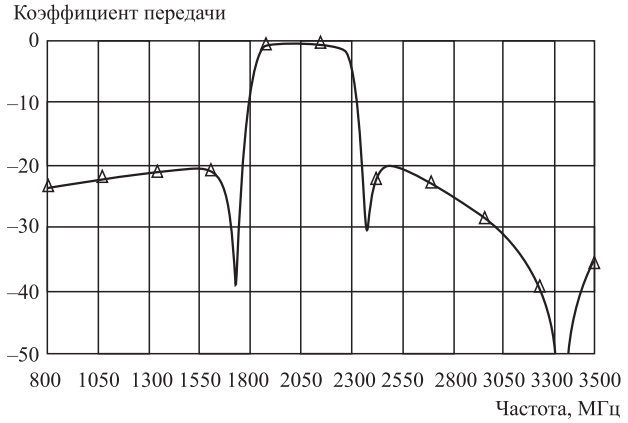


Рис. 4. Зависимость коэффициента передачи полосового фильтра, собранного из элементов в замкнутой форме, от частоты

К недостаткам описываемого метода можно отнести низкую точность при моделировании разомкнутых МПЛ, переходных отверстий, а также при расчёте связанных МПЛ, что очень важно в рассматриваемом случае, так как проектируемый ПФ содержит четыре микрополосковых связанных резонатора. Именно связи между резонаторами определяют характеристики ПФ. Поэтому они должны быть рассчитаны как можно точнее. Важно учесть не только влияние зазоров между резонаторами, но и толщину слоя металлизации, которая оказывает непосредственное влияние на уровень связи между резонаторами. Для этих целей наилучшим образом подходят электродинамические методы моделирования.

Технология автоматического извлечения схемы. Прежде чем проводить анализ полученной топологии ПФ электродинамическими методами, её необходимо «подготовить». Выполнить такую «подготовку» помогает программный модуль технологического извлечения схемы ACE (Automated Circuit Extraction). В противоположность традиционным схемотехническим подходам, рассмотренным выше, в технологии извлечения схемы замещения используются топологические модели. Специальный механизм выполняет автоматическое разбиение структуры на отдельные части, которые могут быть представлены с помощью заранее определённых моделей, рассчитываемых с учётом всех особенностей топологии. Такой метод идеально подходит для СВЧ-проектов, где простые схемотехнические модели (замкнутые формы) не могут обеспечить качественное моделирование проводников, а также для высокоплотных печатных плат, где проявляются эффекты, связанные с близким расположением проводников. Технология ACE обеспечивает на порядок большее быстродействие по сравнению с традиционными численными электродинамическими методами благодаря более эффективному разбиению и расширенному набору моделей распределённых и многосвязных линий. То есть вместо того, чтобы использовать метод конечных элементов (FEM) или метод моментов (Method of Moments — MoM) для анализа произвольной геометрии, здесь используются схемотехнические элементы, моделируемые с применением оптимизированного электродинамического вычислителя, что даёт существенный прирост в быстродействии.

Опыт показывает, что применение данной технологии обеспечивает значительно бóльшую скорость моделирования по сравнению с электродинамическими методами оценки готовой топологии. В отличие от традиционных электромагнитных вычислителей, технология ACE создаёт частотно-зависимые схемотехнические модели непосредственно из геометрического представления анализируемой структуры, без необходимости прямого решения уравнений Максвелла [4].

Таким образом, можно провести более строгий анализ полученной топологии путём добавления в схему (см. рис. 2) всего лишь двух дополнительных блоков — блока EXTRACT, устанавливающего условия моделирования, и блока STACKUP, описывающего топологические свойства моделируемой структуры. На рис. 5 показана топология ПФ после применения модуля извлечения схемы ACE, собранной из замкнутых форм элементов (см. рис. 2). Цифрами 1 и 2 отмечены порты, т. е. источни-

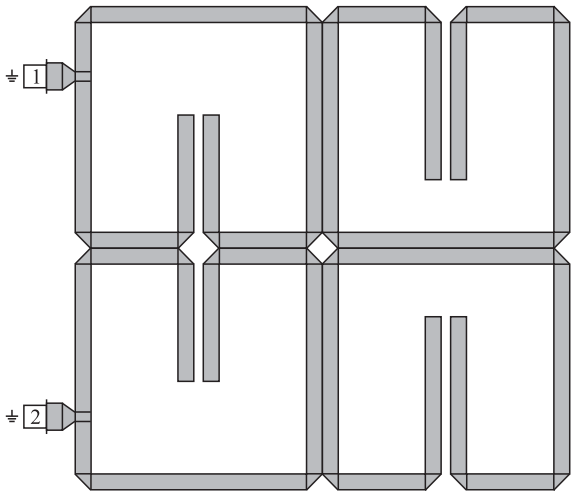


Рис. 5. Топология полосового фильтра после применения модуля извлечения схемы ACE

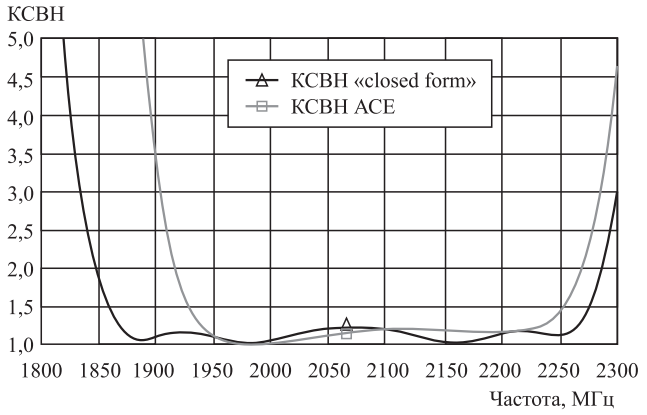


Рис. 6. Зависимость КСВН полосового фильтра, собранного из замкнутых форм элементов и рассчитанного с применением модуля ACE

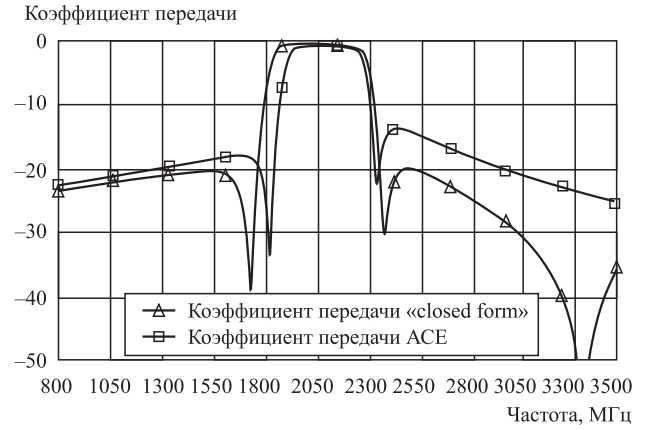


Рис. 7. Зависимость коэффициента передачи полосового фильтра, собранного из замкнутых форм элементов и рассчитанного с применением модуля ACE

ки/приёмники сигнала, подаваемого на вход и снимаемого с выхода модели. Зависимость КСВН и коэффициента передачи, полученная при моделировании с применением модуля ACE, показана на рис. 6 и 7.

Для сравнения на этих же графиках представлены результаты расчёта топологии ПФ, выполненной из элементов в замкнутой форме. Как видно из графиков (см. рис. 6 и 7), наблюдаются заметные расхождения между расчётами, выполненными с применением замкнутых форм элементов, и расчётами, выполненными с применением модуля ACE. Такая ситуация связана с тем, что при моделировании с применением технологии ACE учитывается гораздо больше эффектов, чем при моделировании с использованием элементов «closed form».

Технология оптимизации топологии полосового фильтра. Для получения заданных характеристик ПФ (см. таблицу) можно воспользоваться модулем оптимизации (рис. 8), который в автоматическом режиме подберёт необходимые параметры топологии ПФ. На рис. 9 и 10 представлены характеристики ПФ после проведения оптимизации.

Полученная модель учитывает толщину слоя металлизации и потери в проводниках. Основным упрощением для ускорения процесса расчёта является бесконечная «земля» и бесконечный слой диэлектрика.

Следующий шаг — подготовка модели макетной платы. Особенность этой модели в том,

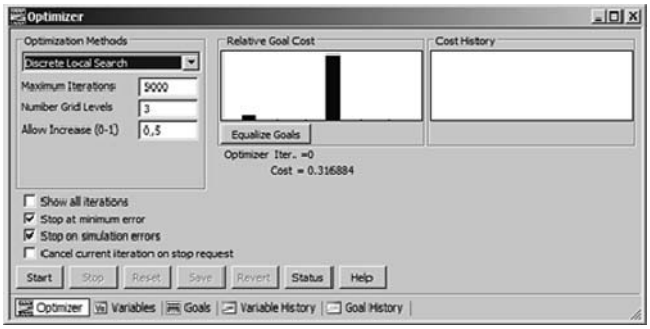


Рис. 8. Диалоговое окно модуля оптимизации среды AWR DE

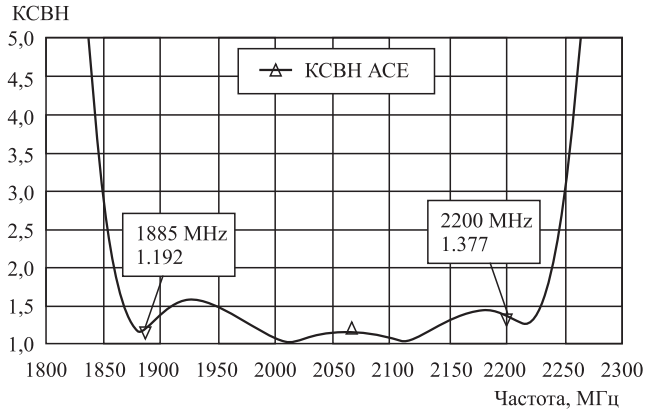


Рис. 9. Изменение расчётного КСВН полосового фильтра после проведения оптимизации с применением модуля ACE

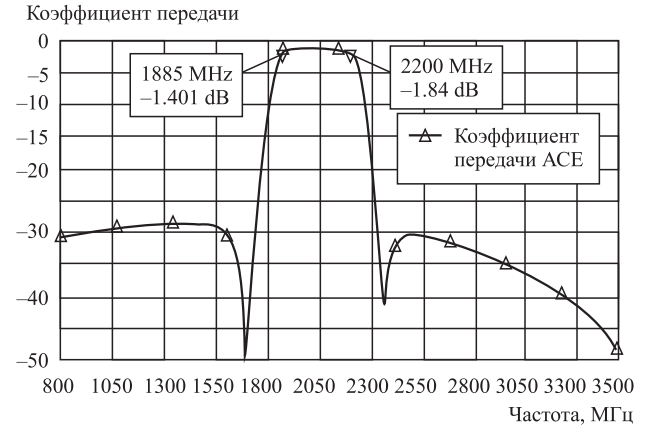


Рис. 10. Изменение расчётного коэффициента передачи полосового фильтра после проведения оптимизации с применением модуля ACE

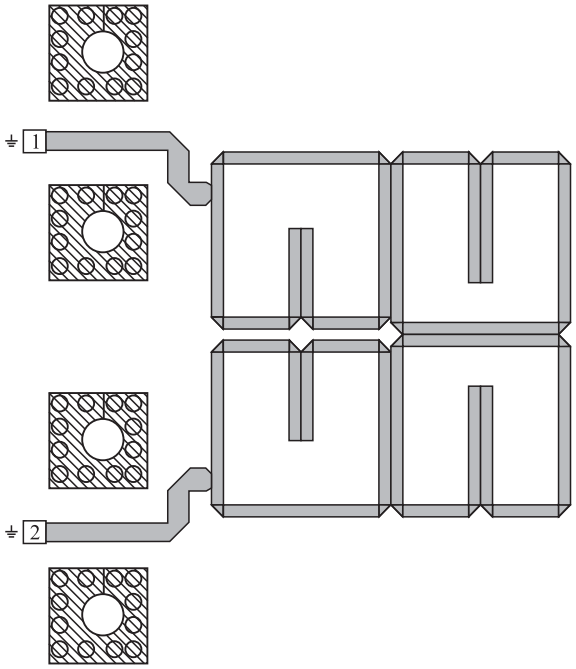


Рис. 11. Топология полосового фильтра после добавления посадочных мест для КМПП

что она учитывает посадочные места для коаксиально-микрополосковых переходов (КМПП) и подводящие МПЛ от КМПП к ПФ. КМПП необходимы для того, чтобы подключить макетную плату ПФ к измерительному оборудованию (в данном случае это ВАЦ — векторный анализатор цепей). Топология ПФ будет выглядеть, как показано на рис. 11.

Анализ возможностей использования численных методов. Так как в топологии появились элементы, не имеющие описания в терминах моделей закрытых форм, а именно — посадочные места под КМПП, то модуль ACE не может быть применён для расчёта характеристик такой модели. Но поскольку модель представляет собой набор диэлектрических слоёв с проводящими элементами между ними (печатная плата), то обосновано применение модуля, реализующего метод моментов (MoM) для планарных структур. В среде NI AWR DE этот модуль носит название AXIEM.

Решающее устройство AXIEM использует метод моментов (MoM) [5] для расчёта токов на проводниках, которые могут быть расположены на различных слоях диэлектриков. Диэлектрические слои имеют бесконечную протяжённость в плоскости *X*—*Y*. Для анализа AXIEM использует сетку на всех поверхностях проводника, включая боковые стороны. При анализе рассчитываются токи в направлении *X*, *Y* и *Z*. Способность определять токи на всех поверхностях позволяет выполнить точный анализ толстых проводников (т. е. проводников с ненулевой толщиной) [6]. На рис. 12 изображена топология ПФ в AXIEM с сеткой разбиения.

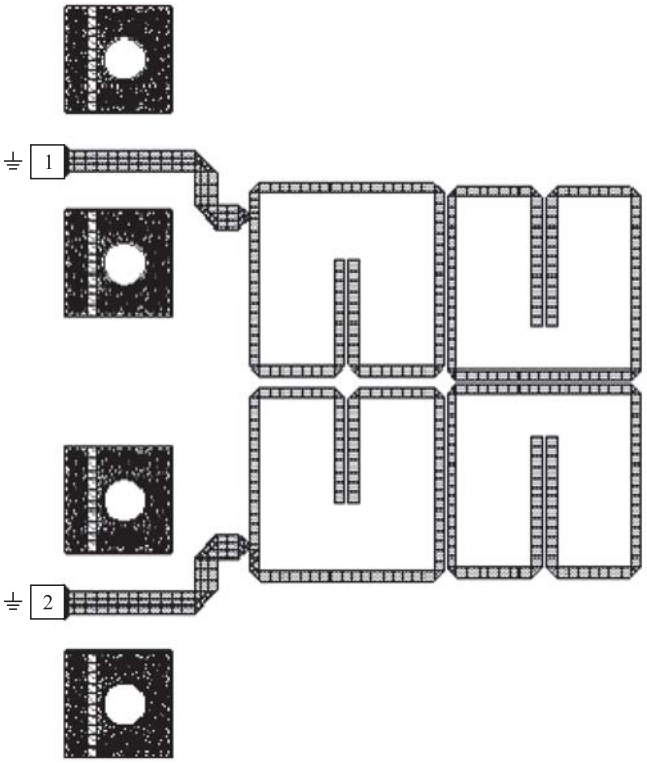


Рис. 12. Топология полосового фильтра в AXIEM после добавления сетки разбиения

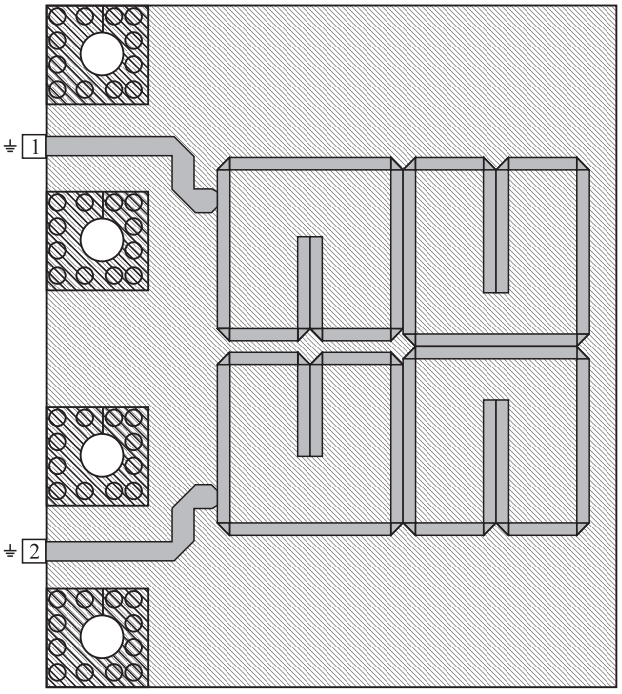


Рис. 13. Топология полосового фильтра после добавления «земляного» слоя конечного размера

Поскольку макетная плата ПФ не может иметь бесконечную протяжённость «земляного» слоя, то на следующем этапе в модель вводится «земляной» проводник конечных размеров (рис. 13). Расчёт модели с «землёй» конечных размеров также может быть выполнен с применением AXIEM. Однако при этом размерность задачи будет существенно больше, чем для модели (см. рис. 12). Для сравнения, модель на рис. 12 имеет 3250 неизвестных переменных, а модель на рис. 13 — 105 223. При равных условиях расчёт модели на рис. 12 выполнялся 1 мин 32 с, а модели на рис. 13 — 2 ч 43 мин 54 с.

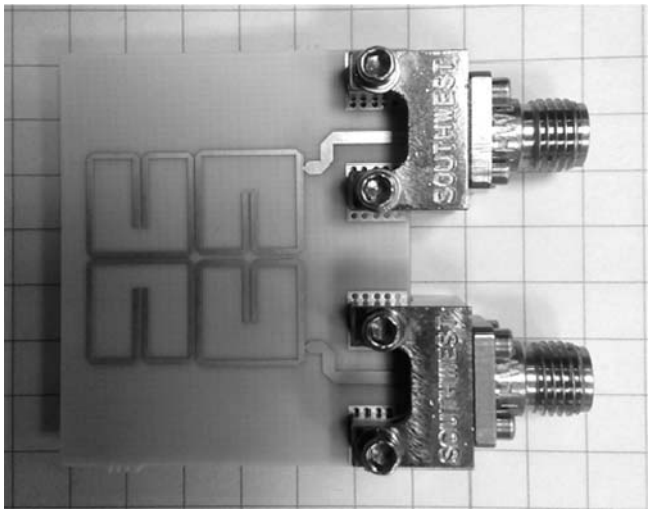


Рис. 14. Внешний вид макетной платы полосового фильтра с установленными КМПП (292-04A-5, Southwest Microwave)

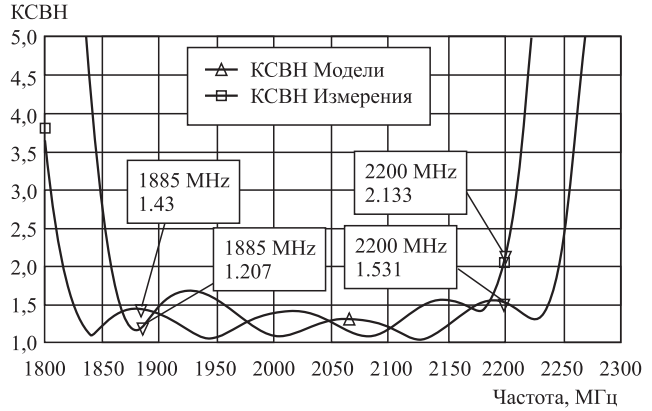


Рис. 15. Зависимость КСВН полосовых фильтров от частоты, полученная при моделировании и после проведения измерений макетной платы

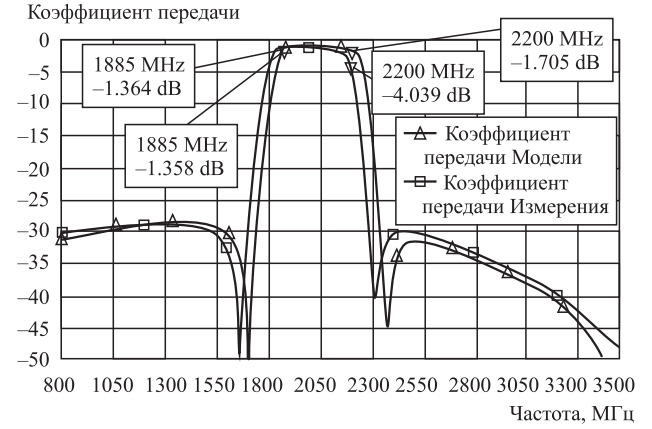


Рис. 16. Зависимость коэффициента передачи полосового фильтра от частоты, полученная при моделировании и после проведения измерений макетной платы

Таким образом, в начальном приближении рассчитывается упрощённая модель — данный подход экономит время и машинные ресурсы, позволяя провести оценочный анализ синтезированной структуры ПФ в кратчайшие сроки.

В принципе, по имеющимся данным, для модели ПФ уже можно изготовить макет (рис. 14), измерить его характеристики и оценить отличие модели от реального макета (рис. 15 и 16). Как видно из графиков, характеристики реального макетного образца смещены вниз по частоте относительно характеристик математической модели. Это может быть связано с тем, что при моделировании не были учтены технологические допуски на элементы топологии ПФ, допуски на параметры диэлектрической подложки ПФ (толщину подложки, значение диэлектрической проницаемости материала — RO4003C), а также допуски на толщину слоёв металлизации. Все эти расчёты возможно выполнить, однако следует учитывать, что для их проведения (например, методом Монте-Карло) понадобится несколько сотен расчётных итераций (обычно, не менее 100 для каждого параметра).

Так как время расчёта модели составляет более 2,5 ч, для учёта допусков на длину и ширину МПЛ, зазоры между резонаторами, толщину слоя металлизации, разброс параметров подложки потребуется более 1250 ч, т. е. более 50 сут. При этом изготовить макетную плату можно в течение 2...3 дней. Таким образом, на определённой стадии проектирования гораздо быстрее изготовить макетный образец и измерить его характеристики, чем проводить серию расчётов. Если подобные расчёты всё-таки потребуется провести, необходимо располагать мощными вычислительными ресурсами, которые дадут возможность осуществить моделирование в более короткие сроки.

Следует отметить, что в рассматриваемой модели, расчёт которой выполнен в AXIEM, остается ещё одно существенное допущение —

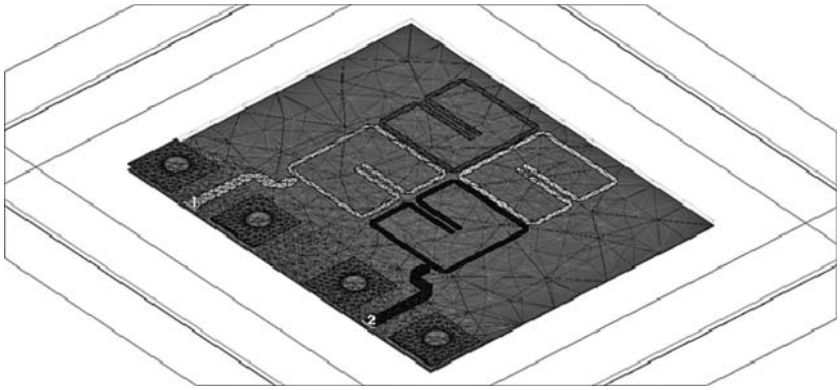


Рис. 17. Топология макетной платы полосового фильтра в ANALYST после добавления сетки разбиения

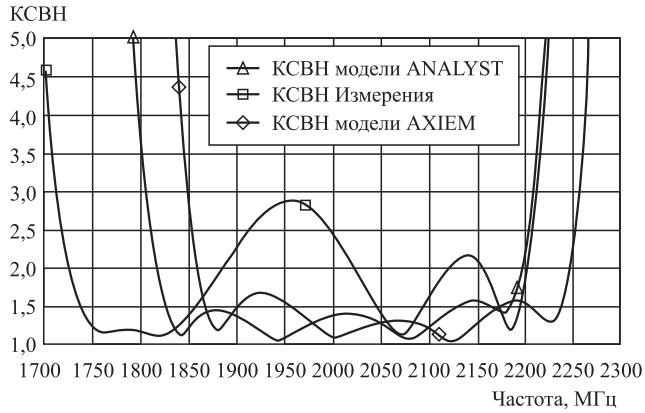


Рис. 18. Зависимость КСВН полосового фильтра от частоты, полученная при моделировании и после проведения измерений макетной платы

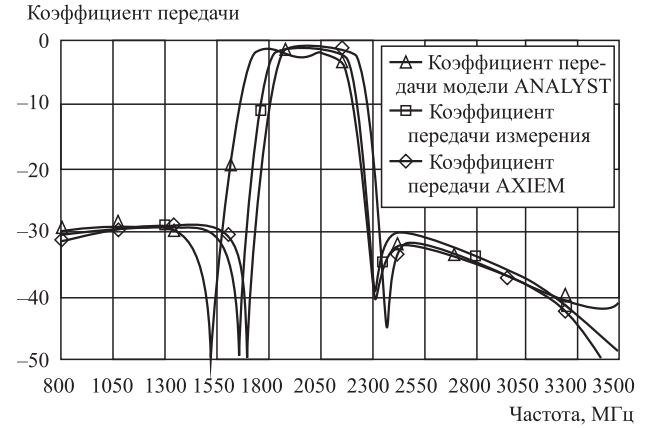


Рис. 19. Изменения коэффициента передачи полосового фильтра, полученные при моделировании и после проведения измерений макетной платы

диэлектрик представлен бесконечным слоем, а на этапе моделирования не учитывались КМПП. Все эти допущения были сделаны для упрощения модели. Кроме того, в рамках реализованного в AXIEM метода моментов подобные расчёты выполнить просто невозможно. Однако в последних версиях NI AWR DE появился модуль ANALYST, реализующий метод конечных элементов (FEM), который позволяет провести моделирование макетной платы ПФ с диэлектрической подложкой конечных размеров (рис. 17), а также учесть влияние КМПП на проектируемую структуру [7].

На рис. 18 представлен график КСВН для топологии макетной платы ПФ, полученный при моделировании с использованием AXIEM, ANALYST, а также в результате обмера макетного образца (см. рис. 14).

На рис. 19 представлен график изменений коэффициента передачи для топологии макетной платы ПФ, полученный при моделировании с использованием AXIEM, ANALYST, а также в результате обмера макетного образца (см. рис. 14).

Из рис. 18 и 19 видно, что наилучшее соответствие результатам измерений демонстрирует модель ПФ, рассчитанная в AXIEM.

Заключение. Таким образом, цепочка, при которой происходит последовательная передача модели, «замкнутые формы» → ACE → AXIEM → ANALYST (при необходимости) позволяет провести полное моделирование разрабатываемого устройства с последовательным уточнением модели, повышением точности и постоянным контролем корректности расчётов.

Описанный подход может быть применён не только к распределённым пассивным структурам, но и к схемам, включающим модели сосредоточенных элементов (конденсаторы, индуктивности, резисторы), модели активных элементов (диоды, транзисторы), а также к антеннам и антенным решёткам [8, 9]. При проектировании возможно проведение смешанного моделирования, т. е. модель устройства может включать элементы, рассчитанные схемотехническими, электродинамическими и нелинейными методами (например, методом гармонического баланса), что позволяет обеспечить максимальную гибкость при проектировании и оптимальное соотношение скорости и точности расчётов [10].

Библиографические ссылки

1. **Hong J.-S.** Microstrip Filters for RF/Microwave Applications. Wiley, 2011. 656 p.

2. **Гупта К., Гардж Р., Чадха Р.** Машинное проектирование СВЧ-устройств. М.: Радио и связь, 1987. 432 с.

3. **Курушин А.А.** К вопросу о точности расчёта программ электродинамического моделирования СВЧ-устройств // Современная электроника. № 8. 2013. С. 68—71.

4. **Потапов Ю.В.** Технология экстракции паразитных параметров для моделирования межсоединений // Технологии в электронной промышленности. № 6. 2007. С. 72—76.

5. **Gibbson D.** The Method of Moments in Electromagnetics. NY: Chapman&Hall CRC. 2008. 594 p.

6. **Дмитриев Е.Е.** Основы моделирования в Microwave Office 2009 [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.eurointech.ru/products/AWR/Dmitriev_mwo_2009_1.pdf (дата обращения: 16.06.2017).

7. **Янтенен Я.** Оптимизация перехода от коаксиального коннектора в микрополосковую линию // Современная электроника. № 2. 2016. С. 2—4.

8. **Борзов А.Б. и др.** Сверхширокополосная спиральная антенна в печатном исполнении для импульсных приемопередающих модулей систем ближней радиолокации // Антенны. 2014. № 10. С. 21—24.

9. **Лихоеденко К.П., Серегин Г.М., Сучков В.Б.** Сверхширокополосная антенная решётка для импульсной бортовой системы ближней радиолокации // Спецтехника и связь. 2015. № 3 С. 29—34.

10. **Данн Д., Литун В.** Методы электромагнитного моделирования в разработке радиочастотных интегральных схем // Современная электроника. № 3. 2017. С. 2—7.

Ссылка для цитирования

Лихоеденко К.П., Ревуцкий С.Д., Серегин Г.М., Сучков В.Б., Каракулин Ю.В. Современные технологии автоматизированного проектирования сверхвысокочастотных устройств // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 11. С. 510—517.

УДК 681.511

К.А. Неусыпин, д-р техн. наук, проф., **Лифей Чжан, Цяоцу Ху, Кай Шэнь**
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

shenkaichn@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ОЦЕНИВАНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Рассмотрена задача определения точности оценивания погрешностей инерциальных навигационных систем в условиях вертикального полёта летательных аппаратов. Представлена схема коррекции навигационных систем с помощью алгоритма оценивания. Исследована точность оценивания нестационарного адаптивного фильтра Калмана при изменении высоты полёта летательного аппарата. Проведено моделирование алгоритмов оценивания с использованием данных лабораторных экспериментов с навигационными системами АИСТ-350 и Ц-060К. В моделях алгоритма оценивания использованы различные значения ускорения силы тяжести.

Ключевые слова: летательный аппарат; инерциальная навигационная система; алгоритм оценивания; высота полёта; точность оценивания.

The problem of the estimating accuracy determination for inertial navigation systems errors in the conditions of vertical flight of aircraft is considered. A scheme for correcting navigation systems using an estimation algorithm is represented. The accuracy of the estimation of the non-stationary adaptive Kalman filter with the altitude change of an aircraft flight is researched. Modeling of estimation algorithms through the use of laboratory experiment data with navigation systems AIST-350 and Ts-060K is carried out. In the models of the estimation algorithm, different values of gravity acceleration are used.

Keywords: aircraft; inertial navigation system; evaluation algorithm; altitude of flight; accuracy of estimation.

Введение. При разработке систем управления перспективными динамическими объектами, в частности летательными аппаратами (ЛА), их качество в большой степени определяется совершенством измерительных систем, параметрами информационно-измерительных сигналов, используемых для управления. В качестве измерительных систем атмосферных ЛА используют различные гироскопические навигационные системы, инерциальные

навигационные системы (ИНС) и др. Для повышения точности ИНС комплексируют с глобальными спутниковыми навигационными системами (GPS, ГЛОНАСС), разнообразными радиолокационными системами (РЛС) и др. [1, 2]. Современные ИНС имеют различные конструкции. Бесплатформенные ИНС приобретают всё бóльшую популярность, но ИНС с гиростабилизированной платформой (ГСП) отличаются надёжностью и хорошо отработаны на практике, поэтому продолжают успешно использоваться на ЛА.

Измерительные сигналы ИНС имеют погрешности, обусловленные конструктивными особенностями и условиями функционирования ЛА. Алгоритмическая коррекция навигационных систем [1] обычно осуществляется с помощью алгоритмов оценивания [3]. Алгоритмы оценивания применяются для компенсации погрешностей в выходном сигнале ИНС [2, 3].

В алгоритмах оценивания используются математические модели исследуемых процессов, в частности модели погрешностей ИНС [2, 3]. При вертикальном перемещении ЛА параметры моделей изменяются, что приводит к изменениям качественных характеристик моделей и, соответственно, меняется точность оценивания алгоритма. Таким образом, при изменении высоты полёта точность оценки погрешностей корректируемой ИНС будет различной.

При использовании навигационных сигналов корректируемой ИНС в системе управления ЛА необходимо иметь достоверную информацию о её точности на всём исследуемом интервале полёта. В практических приложениях при использовании автономных ИНС вводятся поправки в структуру системы или в выходной сигнал, с помощью которых осуществляются учёт и коррекция изменившихся параметров. Корректируемые ИНС обладают более высокой точностью и для учёта меняющихся параметров используют нестационарную модель алгоритма оценивания в схеме коррекции. Однако изменение параметров модели приводит к изменению её качественных характеристик, например, изменяется степень наблюдаемости переменных состояния [3, 4], что в свою очередь приводит к изменению точности оценивания [4—6]. Поэтому исследование точности алгоритма оценивания в зависимости от меняющихся параметров модели исследуемого процесса, например высоты полёта ЛА, является важной и актуальной задачей.

Схема коррекции инерциальной навигационной системы. При функционировании ИНС в режиме коррекции от внешних измерительных систем обычно используется компенсация её погрешностей с помощью алгоритмов оценивания. В автономном режиме работы ИНС применяются прогнозирование и последующая компенсация погрешностей в выходном сигнале системы.

Структурная схема ИНС, корректируемой внешней измерительной системой с алгоритмом оценивания, представлена на рис. 1.

Рассмотрим дискретное линейное уравнение, описывающее динамический объект, например, изменение погрешностей ИНС:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \Phi_{k+1,k}\mathbf{x}_k + \mathbf{G}_{k+1,k}\mathbf{w}_k, \qquad (1)$$

где $\mathbf{\Phi}_{k+1,k}$ — $(n \times n)$-матрица объекта; $\mathbf{x}_k$ — n-вектор состояния; $\mathbf{G}_{k+1,k}$ — $(n \times r)$-матрица входа; $\mathbf{w}_k$ — r-вектор входного возмущения.

Входные возмущения предполагаются r-мерным дискретным аналогом гауссовского белого шума с нулевым математическим ожиданием и известной ковариационной матрицей $\mathbf{M}[\mathbf{w}_j\mathbf{w}_k^T] = \mathbf{Q}_k\delta_{j,k}$, где $\mathbf{Q}_k$ — неотрицательно определённая матрица размерности $(r \times r)$; δ_{jk} — символ Кронекера, означающий $\delta_{j,k} = \begin{cases} 1, \text{если } j = k, \\ 0, \text{если } j \neq k; \end{cases}$ T — символ транспонирования.

Часть вектора состояния измеряется следующим образом:

$$\mathbf{z}_{k+1} = \mathbf{H}_{k+1}\mathbf{x}_{k+1} + \mathbf{v}_{k+1}, \qquad (2)$$

где $\mathbf{z}_{k+1}$ — m-вектор измерений; $\mathbf{x}_{k+1}$ — n-вектор состояния; $\mathbf{H}_{k+1}$ — $(m \times n)$-матрица измерений; $\mathbf{V}_{k+1}$ — m-вектор ошибок измерения.

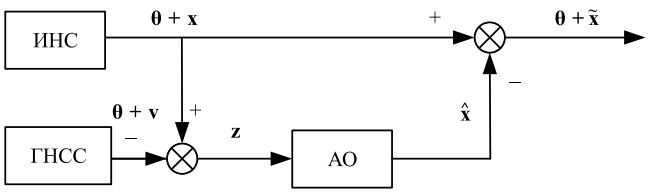


Рис. 1. Структурная схема коррекции ИНС с алгоритмом оценивания:

ГНСС — глобальная навигационная спутниковая система; АО — алгоритм оценивания; $\boldsymbol{\theta}$ — истинная навигационная информация; $\mathbf{x}$ — вектор погрешностей ИНС; $\mathbf{v}$ — вектор погрешностей ГНСС; $\mathbf{z}$ — вектор измерений; $\hat{\mathbf{x}}$ — оценка вектора погрешностей ИНС; $\tilde{\mathbf{x}}$ — ошибки оценивания погрешностей ИНС

Ошибки измерений предполагаются m-мерным дискретным аналогом гауссовского белого шума, для которого $\mathbf{M}[\mathbf{v}_{k+1}] = 0$ и $\mathbf{M}[\mathbf{v}_j \mathbf{v}_{k+1}^T] = \mathbf{R}_{k+1}\delta_{j,k+1}$, где $\mathbf{R}_{k+1}$ — неотрицательно определённая матрица размерности ($m \times m$).

Ошибки измерения (иначе измерительный шум) и входные возмущения (иначе входной шум) некоррелированы: $\mathbf{M}[\mathbf{v}_j \mathbf{w}_k^T] = 0$ при любых значениях j и k.

Начальное значение вектора состояния полагаем гауссовским случайным вектором с нулевым математическим ожиданием, не зависящим от входных возмущений ошибок измерений: $\mathbf{M}[\mathbf{x}_0 \mathbf{w}_k^T] = 0$, $\mathbf{M}[\mathbf{x}_0 \mathbf{v}_{k+1}^T] = 0$ для любого значения k.

Адаптивный алгоритм оценивания, способный функционировать в условиях отсутствия достоверной статистической информации о входном и измерительном шумах с жёсткой обратной связью по обновляемой последовательности, имеет вид

$$\begin{aligned}
&\hat{\mathbf{x}}_{k+1} = \mathbf{\Phi}_{k+1,k}\hat{\mathbf{x}}_k + \mathbf{K}_{k+1}\boldsymbol{\upsilon}_{k+1};\\
&\boldsymbol{\upsilon}_{k+1} = \mathbf{z}_{k+1} - \mathbf{H}_{k+1}\mathbf{\Phi}_{k+1,k}\hat{\mathbf{x}}_k;\\
&\mathbf{P}_{k+1,k} = \mathbf{\Phi}_{k+1,k}\mathbf{P}_k\mathbf{\Phi}_{k+1,k}^T + \mathbf{K}_{k+1}\boldsymbol{\upsilon}_{k+1}\boldsymbol{\upsilon}_{k+1}^T\mathbf{K}_{k+1}^T;\\
&\mathbf{K}_{k+1} =\\
&= \begin{cases} \mathbf{P}_{k+1,k}\mathbf{H}_{k+1}^T\mathbf{M}[\boldsymbol{\upsilon}_{k+1}\boldsymbol{\upsilon}_{k+1}^T]^{-1} \text{ при} \\ \operatorname{diag}\{\mathbf{M}[\boldsymbol{\upsilon}_{k+1}\boldsymbol{\upsilon}_{k+1}^T]\} > \operatorname{diag}(\mathbf{H}_{k+1}\mathbf{P}_{k+1,k}\mathbf{H}_{k+1}^T); \\ \mathbf{P}_{k+1,k}\mathbf{H}_{k+1}^T[\mathbf{H}_{k+1}\mathbf{P}_{k+1,k}\mathbf{H}_{k+1}^T]^{-1} \text{ при} \\ \operatorname{diag}\{\mathbf{M}[\boldsymbol{\upsilon}_{k+1}\boldsymbol{\upsilon}_{k+1}^T]\} \leqslant \operatorname{diag}(\mathbf{H}_{k+1}\mathbf{P}_{k+1,k}\mathbf{H}_{k+1}^T); \end{cases} \qquad (3)\\
&\mathbf{P}_{k+1} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k+1}\mathbf{H}_{k+1})\mathbf{P}_{k+1,k}.
\end{aligned}$$

Вычисление математического ожидания в адаптивном алгоритме производится в соответствии со следующей формулой:

$$M[\boldsymbol{\upsilon}_k \boldsymbol{\upsilon}_k^T] = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k}(\boldsymbol{\upsilon}_j \boldsymbol{\upsilon}_j^T). \qquad (4)$$

Адаптивный фильтр Калмана эффективно работает при отсутствии достоверной априорной информации о входном и измерительном шумах.

При проведении исследований точности оценивания в условиях изменения высоты полёта необходимо использовать алгоритм, способный функционировать в условиях отсутствия информации о $\mathbf{Q}_k$ и $\mathbf{R}_{k+1}$, так как неправильный выбор $\mathbf{Q}_k$ и $\mathbf{R}_{k+1}$ может существенно влиять на точность коррекции ИНС.

На практике в алгоритмическом обеспечении ИНС, как правило, используются упрощённые уравнения погрешностей ИНС. Рассмотрим уравнения погрешностей ИНС [3, 5, 6]:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{\Phi}_{k+1,k}\mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k. \qquad (5)$$

Здесь

$$\mathbf{x}_k = [\delta V_E \ \delta V_N \ \Phi_E \ \Phi_N \ \Phi_H \ \varepsilon_E \ \varepsilon_N \ \varepsilon_H]^T;$$

$$\mathbf{w}_k = [B_E \quad B_N \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad w_E \quad w_N \quad w_H]^T;$$

$$\mathbf{\Phi}_{k+1,k} =$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -gT & a_N T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & gT & 0 & -a_E T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{T}{R} & 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 \\ \frac{T}{R} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 \\ \frac{T}{R}\operatorname{tg}\varphi & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-\mu T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-\mu T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-\mu T \end{bmatrix},$$

где δV_E, δV_N — ошибки ИНС в определении скорости; Φ_E, Φ_N, Φ_H — углы отклонения ГСП относительно сопровождающего трёхгранника; ε_E, ε_N, ε_H — скорости дрейфов ГСП; φ — широта местоположения; R — радиус Земли; g — ускорение силы тяжести; a_E, a_N — горизонтальные ускорения объекта, на котором установлена ИНС; μ — средняя частота изменения случайного дрейфа ГСП; B_E, B_N — смещение нулей акселерометров; w_E, w_N, w_H — возмущающие внешние воздействия; T — период дискретизации.

Пренебрегая перекрестными связями, можно записать уравнения ошибок ИНС отдельно для каждого информационного канала.

Уравнение ошибок ИНС в этом случае для одного из горизонтальных информационных каналов будет иметь вид (5), где

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix} \delta V_k \\ \Phi_k \\ \varepsilon_k \end{bmatrix}; \quad \mathbf{w}_k = \begin{bmatrix} B_k \\ 0 \\ w_k \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{\Phi}_{k+1,k} = \begin{bmatrix} 1 & -gT & 0 \\ \frac{T}{R} & 1 & T \\ 0 & 0 & 1-\mu T \end{bmatrix};$$

B_k — смещение нуля акселерометра; w_k — дискретный аналог белого гауссовского шума.

Уравнение измерений имеет вид (2), где $\mathbf{H}_k = [1 \quad 0 \quad 0]$.

Результаты моделирования нестационарных ошибок ИНС с нестационарным адаптивным фильтром Калмана. Одним из популярных критериев наблюдаемости является критерий Калмана [7, 8], который отличается простотой и широко используется в практических приложениях.

Пусть объект описывается уравнениями вида

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{G}\mathbf{w}(t); \quad (6)$$

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{H}\mathbf{x}(t) + \mathbf{v}(t), \quad (7)$$

где $\mathbf{A}$ — $(n \times n)$-матрица системы; $\mathbf{x}$ — n-вектор состояния; $\mathbf{G}$ — $(n \times r)$-матрица входного возмущения; $\mathbf{w}$ — r-вектор возмущения; $\mathbf{z}$ — m-вектор измерений; $\mathbf{v}$ — m-вектор измерительного шума; $\mathbf{H}$ — $(m \times n)$-матрица измерений.

Система уравнений (6) и (7) называется полностью наблюдаемой [7] на интервале времени $[t_0, t_1]$, если вектор состояния $\mathbf{x}_0 = \mathbf{x}(t_0)$ можно определить по известному вектору измерений $\mathbf{z}(t)$.

Проверку наблюдаемости можно осуществить, воспользовавшись критерием полной наблюдаемости Калмана [8]. Система уравнений (6) и (7) является полностью наблюдаемой, если ранг матрицы наблюдаемости $\mathbf{O}$ равен порядку системы n, т. е. если измерения $\mathbf{z}(t)$ содержат достаточную информацию для определения $\mathbf{x}(t_0)$.

Матрица наблюдаемости $\mathbf{O}$ имеет вид [7]

$$\mathbf{O} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} \\ \mathbf{HA} \\ \cdots \\ \mathbf{HA}^{n-1} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

В случае когда ранг матрицы наблюдаемости меньше порядка системы, то по измерениям $\mathbf{z}(t)$ можно оценить лишь часть вектора состояния $\mathbf{x}(t)$.

Теперь рассмотрим линейную нестационарную систему, для которой вектор состояния в этом случае удовлетворяет уравнению вида

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{G}(t)\mathbf{w}(t), \quad (9)$$

а уравнение измерений имеет вид

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{H}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{v}(t), \quad (10)$$

где $\mathbf{A}(t)$, $\mathbf{G}(t)$, $\mathbf{H}(t)$ — линейные нестационарные матрицы.

Система уравнений (9) и (10) называется вполне наблюдаемой в момент t, если можно определить состояние системы $\mathbf{x}(t_0)$ из наблюдения выходной функции $\mathbf{z}(t)$ на интервале времени $[t_0, t_1]$.

В большинстве практических случаев размер вектора $\mathbf{z}(t)$ меньше, чем размер вектора $\mathbf{x}(t)$, т. е. $m < n$ и уравнение (10) представляет собой систему m уравнений с n неизвестными. Поэтому значение вектора $\mathbf{z}(t)$ в момент t не даёт достаточной информации для восстановления вектора $\mathbf{x}(t)$. Кроме того, необходимо учитывать информацию о векторе $\mathbf{z}(t)$ на отрезке $[t_0, t_1]$.

Рассмотрим нестационарную систему уравнений (9) и (10).

Вектор $\mathbf{z}(\tau)$ в момент $\tau \in [t_0, t]$ можно представить в виде

$$\mathbf{z}(\tau) = \mathbf{H}(\tau)\mathbf{\Phi}(\tau, t)x(t), \quad (11)$$

где $\mathbf{\Phi}(\tau, t)$ — переходная матрица нестационарной системы (9).

Введём матрицу грамиана наблюдаемости $\mathbf{N}(t, t_0)$ [7, 10, 11]:

$$\mathbf{N}(t, t_0) = \int_{t_0}^{t} \mathbf{\Phi}^T(\tau, t)\mathbf{H}^T(\tau)\mathbf{H}(\tau)\mathbf{\Phi}(\tau, t)d\tau. \quad (12)$$

Для наблюдаемости системы уравнений (9) и (10) необходимо и достаточно существование момента $t_0 < t$, для которого матрица $\mathbf{N}(t, t_0)$ положительно определена, т. е. $\det\mathbf{N} \neq 0$ [4, 7].

Азимутальный дрейф является слабонаблюдаемым и может быть эффективно оценён только на интервале времени 1,5...2 ч. Слабонаблюдаемые компоненты вектора состояния хотя и являются формально наблюдаемыми, на практике не подвергаются обработке посредством алгоритмов оценивания, так как их оценку можно осуществить лишь на довольно больших интервалах функционирования системы. Поэтому компоненты вектора состояния системы обычно подразделяют на «хорошо» наблюдаемые, которые подлежат оцениванию, слабонаблюдаемые и ненаблюдаемые компоненты.

Итак, исследуем задачу оценивания «хорошо» наблюдаемых компонент вектора состояния. С увеличением высоты полёта точность оценивания у нестационарных систем может изменяться. Моделирование проведено с различными параметрами матрицы модели ал-

горитма оценивания — разными значениями ускорения силы тяжести g, что соответствует изменению высоты полёта ЛА h. В качестве алгоритма оценивания использован нестационарный адаптивный фильтр Калмана. Таким образом, исследовано влияние параметра g на качество оценивания.

Проведено моделирование алгоритмов оценивания с использованием данных лабораторных экспериментов с навигационными системами АИСТ-350 и Ц-060К. Эти системы относятся к разным классам точности. Реальная система была установлена на неподвижном основании, поэтому выходной сигнал является погрешностью ИНС в определении скорости и использован в качестве измерения для фильтра Калмана.

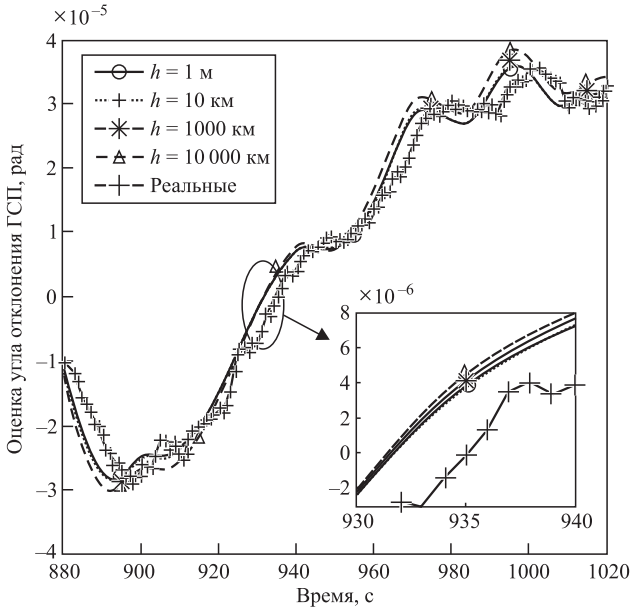


Рис. 2. Оценка угла отклонения ГСП реальной системы ИНС, полученная с помощью линейного нестационарного фильтра Калмана при разных значениях *h*

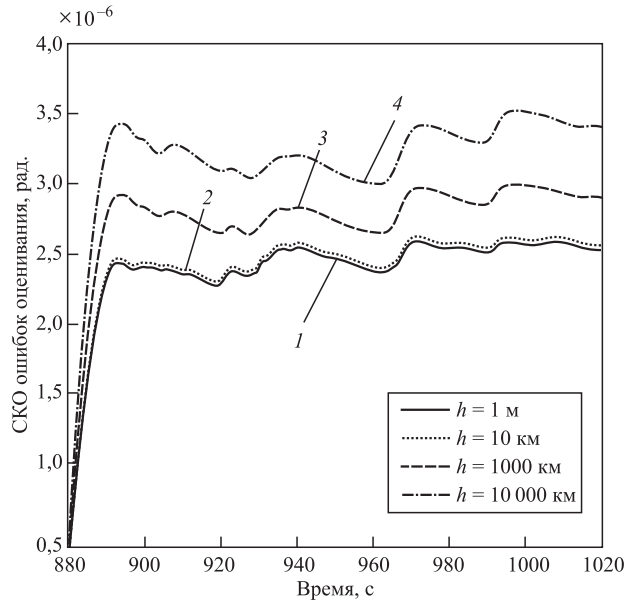


Рис. 3. СКО ошибок оценивания с помощью линейного нестационарного фильтра Калмана при разных значениях *h*:
1 — $h = 1$ м; *2* — $h = 10^4$ м; *3* — $h = 10^5$ м; *4* — $h = 10^6$ м

Теперь проанализируем изменение степени наблюдаемости в зависимости от изменения ускорения силы тяжести (или высоты полёта ЛА) в пространстве. В 1971 г. на ассамблее Международного союза геофизики и геодезии была рекомендована формула нормального значения ускорения силы тяжести [2]:

$$g_0 = 9,780318(1 + 0,0053024\sin^2\varphi - 0,0000059\sin^2 2\varphi), \quad (13)$$

или

$$g_0 = 9,7803185(1 + 0,005278895\sin^2\varphi + 0,000023462\sin^4\varphi), \quad (14)$$

где φ — широта местоположения.

Значение ускорения силы тяжести от изменения высоты имеет вид

$$g = g_0 - 0,000003086h, \quad (15)$$

где h — высота полёта ЛА.

Полученное значение приблизительно совпадает с ускорением свободного падения. При более точных расчётах необходимо использовать одну из моделей гравитационного поля Земли, дополнив её соответствующими поправками.

Результаты моделирования приведены на графиках степеней наблюдаемости, оценок погрешностей ИНС и среднеквадратичных отклонений (СКО) ошибок оценивания (рис. 2 и 3).

Результаты моделирования показали, что с увеличением высоты полёта ЛА снижается точность оценивания погрешностей ИНС с помощью нестационарного адаптивного фильтра Калмана.

Выводы. По результатам моделирования можно утверждать, что при увеличении высоты полёта ЛА точность оценивания погрешностей ИНС уменьшается, следовательно, точность корректируемой ИНС снижается.

Повышение точности алгоритма оценивания [12—14] при увеличении высоты полёта можно осуществить путём использования в фильтре Калмана модели с повышенной характеристикой степени наблюдаемости.

Библиографические ссылки

1. **Андреев В.Д.** Теория инерциальной навигации. Корректируемые системы. М.: Наука, 1967. 697 с.

2. **Джанджгава Г.И., Августов Л.И., Бабиченко А.В. и др.** Навигация летательных аппаратов в околоземном пространстве. М.: ООО «Научтехлитиздат», 2015. 529 с.

3. **Неусыпин К.А**. Современные системы и методы наведения, навигации и управления летательными аппаратами. М.: Изд-во МГОУ, 2009. 500 с.

4. **Шэнь Кай, Неусыпин К.А.** Критерий степени наблюдаемости переменных состояния нестационарных систем // Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 6. С. 10—16.

5. **Кузовков Н.Т., Карабанов С.В., Салычев О.С.** Непрерывные и дискретные системы управления и методы идентификации. М.: Машиностроение, 1978. 224 с.

6. **Шэнь Кай, Пролетарский А.В., Неусыпин К.А.** Исследование алгоритмов коррекции навигационных систем летательных аппаратов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. 2016. № 2. С. 28—39.

7. **Воронов А.А.** Устойчивость, управляемость, наблюдаемость. М.: Наука, 1979. 335 с.

8. **Kalman R.E., Ho Y.C., Narendra K.S.** Controllability of linear dynamical systems // Contributions to the Theory of Differential Equations. 1963. Vol. I. № 2. P. 189—213.

9. **Chen Z.** Local observability and its application to multiple measurement estimation // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 1991. Vol. 38. № 6. P. 491—496.

10. **Shen Kai, Neusypin K.A., Proletarsky A.V.** On state estimation of dynamic systems by applying scalar estimation algorithms // Proceedings of 2014 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference. August 8−10, 2014. Yantai, China. P. 124—129.

11. **Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Власов С.В.** Алгоритмические способы повышения точности автономных навигационных систем // Труды ФГУП НПЦАП. Системы и проборы управления. 2010. № 3. С. 68—74.

12. **Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Власов С.В.** Методы повышения точности автономных навигационных систем // Автоматизация и современные технологии. 2011. № 2. С. 14—18.

13. **Буй Ван Кыонг, Неусыпин К.А.** Алгоритмический способ повышения точности навигационных систем // Автоматизация и современные технологии. 2005. № 7. С. 11—15.

Ссылка для цитирования

Неусыпин К.А., Чжан Лифей, Ху Цяоцу, Шэнь Кай. Исследование точности оценивания погрешностей инерциальной навигационной системы при вертикальном перемещении летательного аппарата // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 11. С. 517—522.

Требования по оформлению библиографических ссылок

Список литературных источников, на которые делаются ссылки в тексте статьи, составляется в порядке цитирования и оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1—2003 и ГОСТ Р 7.0.5—2008 (указываются фамилии и инициалы авторов, точное название книги или сборника, издательство, год и место издания, количество страниц в книге, а для журнальных статей — фамилии и инициалы авторов, название статьи, название, год выхода и номер журнала, страницы размещения статьи). При ссылке на электронные ресурсы обязательно указывать дату обращения, например, 26.06.2017. Ссылки на иностранную литературу даются на языке первоисточника без сокращений. Согласно требованиям зарубежных баз данных, список литературных источников необходимо также транслитерировать на латинский шрифт (фамилия и инициалы авторов, название источника публикации и место издания), при этом технические сокращения должны быть переведены с использованием общепринятых обозначений (номер — N, том — V., страницы — P. и т. п.). Для транслитерации русскоязычных наименований можно воспользоваться сервисом http.//translit.ru/.

УДК 004.81

В.А. Шахнов, д-р техн. наук, проф., **Л.А. Зинченко,** д-р техн. наук, проф.,
Е.В. Резчикова, канд. техн. наук, доц., **В.В. Макарчук,** канд. техн. наук, доц.
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана),
Б.С. Сорокин
(Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова)
lzinchenko@mail.ru

К ПРОБЛЕМЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ В НАНОИНЖЕНЕРИИ

Предложен подход к построению моделей процессов в динамических системах, ориентированных на применение в наноинженерии. Показано, что использование подходов когнитивной информатики и концепции часов прогона модели позволяет формализовать описание взаимодействия пользователя и наносистемы.

Ключевые слова: наноинженерия; темпоральные модели; интеллектуальные системы.

An approach for constructing processes models in dynamical systems oriented to application in nanoengineering is proposed. It is shown that the use of cognitive informatics approaches and the concept of model run hours allows to formalize the description of user interaction and nanosystems.

Keywords: nanoengineering; temporal models; intellectual systems.

Введение. По оценкам ведущих экспертов, нанотехнологии являются одним из наиболее перспективных направлений научно-технического прогресса. В работе [1] Э. Дрекслер обратил внимание на переход в ближайшем будущем от фундаментальных исследований в области нанотехнологий к началу их практического применения. Он также подробно рассмотрел проблемы проектирования наносистем, вызванные их вероятностной природой.

Проблемы проектирования в наноинженерии значительно усложняются при переходе к проектированию распределённых наносистем [2, 3] из-за необходимости взаимодействия с группой отдельных наносистем. Эта задача в настоящее время приобретает всё большее значение в связи с исследованиями в области создания распределённых наносистем, например «умной пыли» [2, 3].

Термин искусственный интеллект (*Artificial Intelligence*, *AI*) был предложен Дж. Маккарти в 1956 г. [4]. Однако его определение не было связано с пониманием интеллекта человека, а было предназначено для оценки логических способностей искусственной системы. В связи с этим в первые десятилетия после введения данного понятия исследования в области искусственного интеллекта сосредоточились на применении формальной логики для формализации процесса мышления.

Трудности формализации многих практически важных задач привели к разработке эволюционных вычислений (1957 г.) и теории нечёткой логики (1965 г.), а также к последующему формированию теории вычислительного интеллекта (*Computational Intelligence, CI*) [4], которая в настоящее время включает три основных раздела: нечёткая логика; нейронные сети; эволюционные вычисления.

Необходимо отметить, что теории искусственных нейронных сетей и эволюционных вычислений развивались практически параллельно с теорией искусственного интеллекта. Первые работы по нейронным сетям и эволюционным вычислениям относятся к 50-м гг. прошлого столетия, поэтому их можно рассматривать как две составные части исследований в области формализации рассуждений.

Несмотря на все достоинства алгоритмов вычислительного интеллекта [4], трудности с решением многих практически важных задач привели к поиску новых подходов к формализации мышления.

Когнитивные вычисления (*Cognitive Computing*) [5] являются одним из перспективных подходов к созданию машин, обладающих

когнитивными способностями. Когнитивные компьютеры позволяют реализовать идеи формализуемого интеллекта (*Machinable Intelligence, MI*) [5], обрабатывающего знания аналогично тому, как современные компьютеры могут обрабатывать данные.

В статье рассматриваются вопросы построения моделей, описывающих взаимодействие пользователя в мезомире и автономной наносистемы. При моделировании и проектировании инфокоммуникационных систем в наноинженерии в связи с ограниченностью коммуникационных каналов человека рамками мезомира возникает проблема корректной передачи информации между мезо- и микромирами. Одним из возможных способов решения этой задачи является использование подходов когнитивной информатики и концепции часов прогона модели.

Модели процессов в динамических системах в наноинженерии. В работе [5] были сформулированы теоретические положения когнитивной информатики. Было показано, что фундаментальные понятия материи (M) и энергии (E) используются для моделирования физического мира (*the Physical World, PW*). Различные модели информации (I) используются для моделирования абстрактного мира (*the Abstract World, AW*). Таким образом, была отмечена двойственная природа окружающей нас действительности (*the Natural World*, *NW*), в которой параллельно существуют физический и абстрактный миры и которая может быть математически описана следующим образом [5]:

$$NW = PW \| AW = F(I, M, E),$$

где знак $\|$ означает параллельное существование физического и абстрактного миров; F — функция, устанавливающая отношения между информацией, энергией и материей.

Связи между физическим и абстрактным мирами играют критическую роль в сознании человека. При этом модели информации служат звеном, связывающим физический и абстрактный миры (рис. 1). В работе [5] предложена математическая модель информация—материя—энергия I—M—E.

Рис. 1. Связь между физическим и абстрактным миром

В работе [6] предложены подходы к построению абстрактного интеллекта (*Abstract Intelligence*, αI), которые могут послужить основой построения единой теории интеллекта, включающей естественный (*Natural Intelligence*, *NI*), искусственный (*AI*), формализуемый (*MI*) и вычислительный интеллект (*CI*).

Математическая модель общего абстрактного интеллекта *(the Generic Abstract Intelligence Model*, *GAIM*) [6] базируется на понятиях данные, информация, знание и поведение.

Когнитивная модель информации [6] базируется на понятиях данные D и информация I как входных переменных, получаемых на основе системы восприятия человека, а также информация I и действия A, которые могут рассматриваться как выходные переменные, проявляющиеся в том или ином поступке человека. В предложенном Й. Вангом [5, 6] подходе все разнородные явления в мозге человека классифицируются следующим образом: знания (K); поведение (B); опыт (E); навыки (S).

Классификация выполняется в зависимости от типа входной и выходной информации.

В когнитивной модели информации, приведённой в работе [6], явление в мозге человека рассматривается как знание K в случае обработки информации на входе и выходе:

$$K : I \to I$$

и как навык S в случае обработки действий на входе и выходе:

$$S : A \to A.$$

В когнитивной модели информации [6] явление рассматривается как поведение B в случае обработки входной информации при условии действия на выходе:

$$B : I \to A$$

и как опыт E для случая действия на входе и информации на выходе:

$$E : A \to I.$$

Модель абстрактного интеллекта [6] включает в себя четыре соотношения:

$$\alpha I \triangleq J_p : D \to I;$$

$$\| J_c : I \to K;$$

$$\|J_i : I \to B;$$

$$\|J_r : D \to B,$$

где J_p — ощущающий интеллект; J_c — когнитивный (познавательный) интеллект; J_i — инструкция; J_r — рефлексивный интеллект.

Данные в модели *GAIM* определяются в количественной форме [6]. Преобразование осуществляется функцией r_d, которая преобразует внешний сигнал M в закодированную последовательность S_k:

$$D \triangleq r_d : M \to S_k,$$

в которой параметр k определяется выбранной системой кодирования.

Информация I в модели *GAIM* определяется как интерпретация данных функцией r_i, которая преобразует данные D в концепт C:

$$I \triangleq r_i : D \to C.$$

Отметим, что функция r_i является комбинацией операций алгебры концептов $\Re_{CA}$ [6].

Абстрактный концепт c в модели *GAIM* определяется следующим образом:

$$c \triangleq (O, A, R^c, R^i, R^o),$$

где O — непустое конечное множество объектов концептов из универсального множества концептов рассматриваемой среды Θ: $O = \{O_1, O_2, ..., O_m\}$; A — непустое конечное множество атрибутов из универсального множества атрибутов рассматриваемой среды Θ: $A = \{A_1, A_2, ..., A_n\}$; R^c — непустое конечное множество внутренних отношений $R^c \subseteq O \times A$; R^i — непустое конечное множество входных отношений $R^i \subseteq C' \times c$; C' — множество внешних концептов из рассматриваемой среды Θ; R^o — непустое конечное множество выходных отношений $R^o \subseteq c \times C'$.

Знание K в модели *GAIM* представляет собой преобразование концептов функцией r_k, которая преобразует исходный концепт C_0 во все соответствующие концепты:

$$K \triangleq r_k : C_0 \to \left(\bigtimes_{i=1}^{n} C_i \right).$$

Функция r_k также является комбинаций операций алгебры концептов $\Re_{CA}$ [6].

В модели *GAIM* полное знание определяется множеством концептов, иерархически связанных между собой с помощью операций алгебры концептов $\Re_{CA}$.

Поведение B в модели *GAIM* определяется как интерпретация функцией r_b мотивации Mv в некоторое действие P:

$$B \triangleq r_b : Mv \to P.$$

Мотивация Mv вызывается внешними стимулами, событиями или внутренними эмоциями, представляемыми в модели множеством событий, а также логикой внутреннего развития

$$E_g = \{e_1, e_2, ..., e_k\}.$$

В работе [6] показано, что искусственный, вычислительный и формализуемый интеллекты являются частными случаями абстрактного интеллекта:

$$CI \subseteq MI \subseteq AI \subseteq NI \subseteq \alpha I.$$

Несмотря на все достоинства *GIAM*-модели абстрактного интеллекта [6], она описывает только обработку данных и информации в мезомире.

В эволюционной теории познания отмечается, что наши познавательные способности в ходе эволюции были приспособлены только к миру «средних размеров» (мезокосмосу). Согласно концепции Г. Фоллмера [7] когнитивной нишей человека является мезокосмос. Такие категории, как материя, пространство, время, и классическая физика оказываются некорректными в мирах, к которым каналы восприятия информации человеком не приспособлены. Весьма спорной экстраполяцией является утверждение, что успешное использование классических компьютеров, базирующихся на принципах машины Тьюринга, для решения задач мира «средних размеров» может быть расширено для микромира и для мира космоса. Именно это ограничение познавательных способностей человека при исследовании микромира было отмечено в статье Р. Фейнмана [8].

Как следствие этого, использование математической модели, предложенной в работе [5], при решении задач наноинженерии сталкивается с проблемой её применения для микромира. Для разрешения этой задачи в работе [9] предложена модифицированная модель информация—материя—энергия. Необходимо отметить, что в частных случаях при приме-

нении информационных технологий в наноинженерии может быть использована модель, приведённая в работе [5]. Однако в общем случае необходимо использовать модель, приведённую в работе [9]. Это объясняется тем, что построить детерминированные отношения между физическими и информационными параметрами исследуемой наносистемы в общем случае не представляется возможным из-за вероятностной природы физических явлений в микромире.

Далее в статье предлагаются подходы, позволяющие преодолеть описанные выше проблемы построения инфокоммуникационных систем для применения в наноинженерии.

При моделировании инфокоммуникационных систем в традиционных подходах основное внимание уделяется передаче информации по многомодальным каналам [10]. При этом передача информации рассматривается только для случая, когда и приёмник, и передатчик находятся в мезомире.

Каналы, по которым передаётся информация между пользователем и наносистемой, являются более сложными, поскольку пользователь отправляет и получает информацию на мезоуровне, тогда как наносистема работает на микроуровне. На рис. 2 показан рассматриваемый в статье сценарий взаимодействия пользователя с наносистемой. В этом случае инфокоммуникационная система преобразует данные D_{md} и информацию I_{md} на мезоуровне в данные D_{nd} и информацию I_{nd} на микроуровне:

$$D_{md} \to D_{nd};$$
$$I_{md} \to I_{nd},$$

а данные D_{nu} и информацию I_{nu} на микроуровне в данные D_{mu} и информацию I_{mu} на мезоуровне:

$$D_{nu} \to D_{mu};$$
$$I_{nu} \to I_{mu}.$$

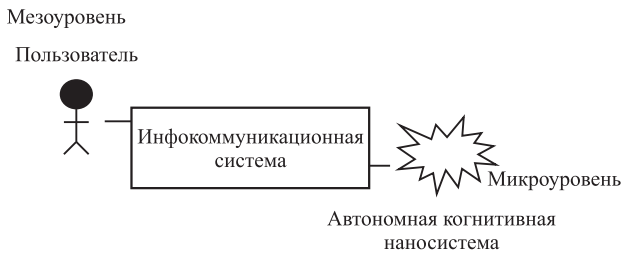


Рис. 2. Сценарий взаимодействия пользователя с наносистемой

Согласно *GAIM*-модели [6] и модели, предложенной в работе [10], модель инфокоммуникационной системы для решения задач наноинженерии в случае взаимодействия пользователя с наносистемой предлагается определять следующим образом:

$$D_{md} \triangleq r_{dd} : M_m \to S_{km} \to S_{kn};$$
$$I_m \triangleq r_{id} : D_{md} \to C_{nn};$$
$$D_{nu} \triangleq r_{du} : M_n \to S_{kn} \to S_{km} \to M_m;$$
$$I_n \triangleq r_{iu} : D_{nu} \to C_m;$$
$$K \triangleq r_k : C_0 \to \left(\bigtimes_{i=1}^{n} C_i \right);$$
$$B \triangleq r_b : Mv \to P,$$

где M_m — сигнал на уровне мезомира; M_n — сигнал на уровне микромира; r_{dd} — функция, преобразующая внешний сигнал M_m на мезоуровне в закодированную последовательность S_{km} на мезоуровне с последующим преобразованием в закодированную последовательность S_{kn} на микроуровне; S_{km} — закодированная последовательность на мезоуровне; S_{kn} — закодированная последовательность на микроуровне; r_{du} — функция, преобразующая внешний сигнал M_n на микроуровне в закодированную последовательность S_{kn} на микроуровне с последующим преобразованием в закодированную последовательность S_{km} на мезоуровне и последующим преобразованием в сигнал M_m на мезоуровне; C_m — концепт на мезоуровне, $C_m \triangleq (O_m, A_m, R_m^c, R_m^i, R_m^0)$, O_m — непустое конечное множество объектов концептов из универсального множества концептов рассматриваемой среды Θ на мезоуровне, $O_m = \{O_{m1}, O_{m2}, ..., O_{mm}\}$, A_m — непустое конечное множество атрибутов из универсального множества атрибутов рассматриваемой среды Θ на мезоуровне, $A_m = \{A_{m1}, A_{m2}, ..., A_{mn}\}$, R_m^c — непустое конечное множество внутренних отношений на мезоуровне, $R_m^c \subseteq O_m \times A_m$, R_m^i — непустое конечное множество входных отношений на мезоуровне, $R_m^i \subseteq C'_m \times C_m$, C'_m — множество внешних концептов из рассматриваемой среды Θ на мезоуровне, R_m^0 — непустое конечное множество выходных отношений на мезоуровне, $R_m^0 \subseteq C_m \times C'_m$; C_{nn} — концепт на микроуровне, $C_{nn} \triangleq (O_n, A_n, R_n^c, R_n^i, R_n^0)$, O_n — непустое конечное множество объектов концептов из универсального множества концептов рассматриваемой среды Θ на микроуровне, $O_n = \{O_{n1}, O_{n2}, ..., O_{nm}\}$, A_n — непустое конечное множество атрибутов из универсального множества атрибутов рассматриваемой среды Θ на микроуровне, $A_n = \{A_{n1}, A_{n2}, ..., A_{nn}\}$, R_n^c — непустое конечное множество внутренних отношений на микроуровне, $R_n^c \subseteq O_n \times A_n$, R_n^i — непустое конечное множество входных отношений на микроуровне, $R_n^i \subseteq C'_n \times C_{nn}$, C'_n — множество внешних концептов из рассматриваемой среды Θ на микроуровне, R_n^0 — непустое конеч-

ное множество выходных отношений на микроуровне, $R_n^0 \subseteq C_{nn} \times C'_n$; r_{id} — функция, которая преобразует данные D_{md} на мезоуровне в концепт C_{nn} на микроуровне; r_{iu} — функция, которая преобразует данные D_{nu} на микроуровне в концепт C_m на мезоуровне.

Заметим, что в общем случае объёмы информации на мезоуровне и микроуровне будут различаться аналогично преобразованию сигнала при перекодировке. В связи с этим важным является сохранение смысла сообщения как на мезо-, так и на микроуровнях.

Общим недостатком и моделей, приведённых в работах [5, 6], и моделей, рассмотренных в работе [7], является то, что время рассматривается как внутренняя сущность этих моделей, что приводит к невозможности их применения в наноинженерии в связи с вероятностным характером процессов в наносистемах.

Использование концепции часов прогона модели, приведённой в работе [11], позволяет рассматривать время как бесконечную последовательность натуральных чисел *Gck* (глобальные часы). В этом подходе время трактуется как внешняя сущность, не связанная со скоростью выполнения циклов. Необходимо отметить, что основной проблемой при моделировании процессов в динамических системах в наноинженерии является различная скорость обработки информации пользователем и наносистемой. Объединение пользователя и наносистемы в единую инфокоммуникационную систему приводит к созданию новой необратимой инфокоммуникационной системы, а использование концепции часов прогона модели [11] позволяет преодолеть проблему разновременного существования пользователя и наносистемы, используя различные локальные часы для пользователя и наносистемы.

Заключение. Рассмотрены вопросы применения теории абстрактного интеллекта при решении задач наноинженерии. Показано, что в связи с использованием различных моделей, применяемых при описании физических процессов в мезомире и микромире, необходима модификация модели абстрактного интеллекта таким образом, чтобы учесть особенности физических процессов в мезомире и микромире.

Рассмотрены вопросы моделирования процессов в динамических системах в наноинженерии. Показано, что использование концепции часов прогона модели позволяет описать взаимодействие пользователя и наносистемы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ 15-29-01115 офи-м.

Библиографические ссылки

1. **Drexler E.** Toward Integrated Nanosystems: Fundamental Issues in Design and Modeling // J. of Computational and Theoretical Nanoscience. 2006. No. 1. Vol. 3. P. 1—10.

2. **Shakhnov V., Zinchenko L., Kosolapov I.** Simulation of Distributed MOEMS for Smart Environments // Pr. of 2014 10th Intern. Conf. on Advanced Semiconductor Devices & Microsystems (ASDAM 2014). Smolenice, October 20—22, 2014, Slovak University of Technology in Bratislava. IEEE. 2014. P. 201—204.

3. **Shakhnov V., Makarchuk V., Zinchenko L., Verstov V.** Heterogeneous Knowledge Representation for VLSI Systems and MEMS Design // Pr. of 2013 IEEE 4th Intern. Conf. on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom 2013). Budapest, December 2—5, 2013, MTA SZTAKI, BME TMIT, Obuda University. IEEE. 2014. P. 189—194.

4. **Бионические** информационные системы / В.В. Курейчик и др.; под ред. Л.А. Зинченко, В.М. Курейчика, В.Г. Редько. М.: Физматлит, 2011. 286 с.

5. **Wang Y.** The Theoretical Framework of Cognitive Informatics // Intern. J. of Cognitive Informatics and Natural Intelligence. 2007. No. 1. Vol. 1. P. 1—27.

6. **Wang Y.** On Abstract Intelligence: toward a unified theory of Natural, Artificial, Machinable, and Computational Intelligence // Intern. J. of Software Science and Computational Intelligence. 2009. No. 1. Vol. 1. P. 1—17.

7. **Фоллмер Г.** Эволюционная теория познания. М.: Русский двор, 1998. 252 с.

8. **Feynman R.** Simulating physics with computers // Intern. J. of Theoretical Physics. 1982. No. 21. P. 467—488.

9. **Shakhnov V.A., Zinchenko L.A., Rezchikova E.V.** Simulation and Visualization in Cognitive Nanoinformatics // Intern. J. of Mathematics and Computers in Simulation. 2017. Vol. 8. P. 141—147.

10. **Baranyi P., Csapo A.** Definition and synergies of cognitive infocommunications // Acta Polytechnica Hungarica. 2012. Vol. 9. P. 67—83.

11. **Виньков М.М., Фоминых И.Б.** Рассуждения о знаниях и проблема логического всеведения. Ч. 2. Введение темпорального параметра в метаязык // Искусственный интеллект и принятие решений. 2014. № 1. С. 3—10.

Ссылка для цитирования

Шахнов В.А., Зинченко Л.А., Резчикова Е.В., Макарчук В.В., Сорокин Б.С. К проблеме моделирования динамических систем в наноинженерии // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 11. С. 523—527.

ПО СТРАНИЦАМ ЖУРНАЛОВ

Передаточные функции и структурно-параметрические модели электромагнитоупругих актюаторов нано- и микроперемещений для мехатронных систем. *Вестник машиностроения.* 2018. № 7.

На основании решения волнового уравнения построена обобщенная структурно-параметрическая модель электромагнитоупругого актюатора, получены его передаточные функции для мехатронных систем. Определено влияние геометрических и физических параметров, а также внешней нагрузки на его статические и динамические характеристики в системе управления.

Концепция интеллектуального построения маршрута беспилотных транспортных средств с использованием облачных технологий и дополненной реальности в условиях Арктики и Крайнего Севера. *Вестник машиностроения.* 2018. № 7.

Разработана концепция построения маршрута беспилотного транспортного средства для условий Крайнего Севера и Арктики с применением элементов искусственного интеллекта и беспилотных летательных аппаратов.

Исследование технологических параметров правки и мощности главного привода листовой правильной машины. *Заготовительные производства в машиностроении.* 2018. Т. 16. № 7.

Представлены методика расчёта технологических параметров правки и методика расчёта потребляемой мощности электродвигателя главного привода при правке толстых стальных листов на роликовой правильной машине (РПМ), позволяющие повысить точность расчётов мощности электродвигателя на 10...15 % при модернизации агрегатов правки. Приведена блок-схема алгоритма расчёта параметров правки, мощности электродвигателя, а также изгибающих моментов для РПМ.

Исследование эволюции микроструктуры гранулируемого никелевого сплава системы Ni—Cr—Mo—Al—Co в процессе горячего изостатического прессования и последующей термической обработки. *Заготовительные производства в машиностроении.* 2018. Т. 16. № 7.

Представлена эволюция микроструктуры никелевого сплава системы Ni—Cr—Mo—Al—Co при горячем изостатическом прессовании (ГИП) и последующей термической обработке. Рассмотрено влияние режимов ГИП на структуру получаемой заготовки. Установлено, что при проведении ГИП при температуре ниже температуры полного растворения γ-фазы формируется заготовка с наследованными границами от гранул. Показано изменение формы упрочняющей фазы при термической обработке, проанализирован химический состав.

К вопросу моделирования процесса плазменного поверхностного упрочнения в среде Visual-Environment 8.6. *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2018. Т. 14. № 7.

Определено влияние различных способов электромеханической обработки на структуру и твёрдость титанового сплава ВТ22. Представлены результаты исследования структуры упрочнённых поверхностей и измерения их твёрдости по глубине изделий. Приведены рекомендации по выбору способов обработки различных деталей.

Оптимальное управление пьезоактюатором нано- и микроперемещений. *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2018. Т. 14. № 7.

Определены выражения функции управления и линии переключения для оптимального управления пьезоактюатором при продольном пьезоэффекте. Получено оптимальное управление пьезоактюатором нано- и микроперемещений.

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу «Пресса России» — 27838) или непосредственно в издательстве по e-mail: realiz@mashin.ru, на сайте www.mashin.ru (без почтовых наценок, с любого месяца, со своего рабочего места); телефон для справок: (495) 785-60-69

Сдано в набор 30.08.2018.
Подписано в печать 18.10.2018.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.

Отпечатано в ООО «Канцлер»
150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.
Оригинал-макет: ООО «Адвансед солюшнз».
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Перепечатка материалов из журнала «Автоматизация. Современные технологии» возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала. При перепечатке материалов ссылка на журнал «Автоматизация. Современные технологии» обязательна. За содержание рекламных материалов ответственность несёт рекламодатель