

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

- Воронина И. Е.** Количественные оценки при моделировании языковой системы..... 5
- Гатчин Ю. А., Донецкая Ю. В., Комарова И. Б.** Алгоритмы автоматизации проектирования изделий приборостроения 11
- Дроздов В. Н., Шефер Е. А.** Математические основы цифрового автотипного растривания..... 19

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- Титенко Е. А., Семенихин Е. А.** Быстродействующий арбитр обработки запросов большой разрядности 24
- Малинин А. А., Иванова Н. Ю.** Разработка универсальной модели электронного архива конструкторской документации с применением методологии IDEF 29
- Манылов И. В.** Оценка точности распознавания классов при автоматизированной обработке аэрофотоснимков 35

ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

- Емельянцева Г. И., Блажнов Б. А., Лочехин А. В., Степанов А. П.** Выработка курса интегрированной навигационной системой на базе микромеханических датчиков..... 40

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Петунин В. И., Фрид А. И.** Метод построения адаптивных логико-динамических систем автоматического управления с селекторами..... 49
- Кабанов С. А., Никулин Е. Н., Якушев Б. Э., Якушева Д. Б.** Оптимальное управление перемещением груза мостовым краном 56

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

- Абдуллин А. А., Толмачев В. А.** Система регулирования скорости двухмассового механизма с использованием наблюдателя 66
- Галайдин П. А., Мустафаев Ю. Н., Мустейкис А. И.** Измерение скорости процессов в детонационных трубах с использованием ионизационных регистраторов..... 72

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Городецкий А. Е., Дорошенко М. С., Тарасова И. Л., Коняхин И. А. Анализ погрешностей системы управления автоколлиматора с активной компенсацией... 76

Белов Н. П., Гайдукова О. С., Панов И. А., Патяев А. Ю., Смирнов Ю. Ю., Шерстобитова А. С., Яськов А. Д. Лабораторный спектрофотометр для ультрафиолетовой области спектра 81

ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

Пилипенко Н. В., Казарцев Я. В. Оптимальное планирование эксперимента при идентификации процессов теплообмена сенсоров теплового потока..... 88

Демин А. В., Сорокин А. В., Гордеев Д. М., Белянский М. А., Птицына А. С., Шалковский А. Г., Чуриков А. Б., Смолин А. С. Авиационный тепlopеленгатор..... 93

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Безгодов А. А., Бухановский А. В. Виртуальный полигон для исследования экстремальной динамики морских объектов на нерегулярном волнении 98

Лебедько Е. Г., Серикова М. Г. Анализ распределения интервалов между выбросами случайного процесса и возможность построения систем ближней оптической локации с шумовой синхронизацией 100

SUMMARY (перевод Ю. И. Копилевича)..... 102

CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

- Voronina I. E.** Quantitative Estimates in Natural Language Modeling 5
- Gatchin Yu. A., Donetskaya J. V., Komarova I. B.** Algorithms of Instrument-Making Products Design Automation..... 11
- Drozdov V. N., Shefer E. A.** Mathematical Principles of Digital Halftoning 19

COMPUTING TECHNIQUE

- Titenko E. A., Semenikhin E. A.** High-Performance High-Capacity Arbitrator of Demand Processing..... 24
- Malinin A. A., Ivanova N. Yu.** Development of General Model of Electronic Archive of Engineering Documents with the Use of IDEF Methods 29
- Manylov I. V.** Estimate of Type Recognition Accuracy of Automated Processing of Aerial Photographs..... 35

GYROSCOPIC AND NAVIGATION SYSTEMS

- Emelyantsev G. I., Blazhnov B. A., Lochekhin A. V., Stepanov A. P.** Course Evaluation in Integrated Navigation System on the Base of Micromechanical Sensors 40

INSTRUMENTS AND SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL

- Petunin V. I., Frid A. I.** Method of Construction of Adaptive Automatic Control Logic-Dynamic System with Selector..... 49
- Kabanov S. A., Nikulin E. N., Yakushev B. E., Yakusheva D. B.** Optimal Control Over Load Movement with Bridge Crane..... 56

ELECTRONIC AND ELECTROMAGNETIC DEVICES

- Abdullin A. A., Tolmachev V. A.** Speed Control System of Two-Mass Mechanism Using Coordinates Observer..... 66
- Galaydin P. A., Mustafaev Yu. N., Musteykis A. I.** Process Speed Measurement in Detonation Tubes Using Ionization Detectors 72

OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Gorodetskiy A. E., Doroshenko M. S., Tarasova I. L., Konyakhin I. A.** Error Analysis of Autocollimator Control System with Active Compensation 76
- Belov N. P., Gaydukova O. S., Panov I. A., Patyaev A. Yu., Smirnov Yu. Yu., Sherstobitova A. S., Yaskov A. D.** Laboratory Spectrophotometer for Ultraviolet Spectral Region 81

HEAT REGIMES AND RELIABILITY OF INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Pilipenko N. V., Kazartsev Ya. V.** Optimal Design of Experiment on Heat Exchange Processes Identification in Heat Flow Sensors 88

Demin A. V., Sorokin A. V., Gordeev D. M., Belyansky M. A., Ptitsyna A. S., Shalkovskiy A. G., Churikov A. B., Smolin A. S. Airborne Heat Direction Finder.....	93
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------

BRIEF NOTES

Bezgodov A. A., Boukhanovsky A. V. Virtual Proving Ground for Studying of Extreme Dynamics of Marine Objects at Irregular Sea Waves.....	98
Lebedko E. G., Serikova M. G. Probability Distribution of Level-Crossing Intervals for Gaussian Random Process and Possible Construction of Near-Field Laser Location System with Noise Synchronization	100
SUMMARY	102

Editor-in-Chief E. B. Yakovlev

И. Е. ВОРОНИНА

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ОЦЕНКИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЯЗЫКОВОЙ СИСТЕМЫ

Рассматривается задача количественного оценивания сочетаемости языковых единиц при проведении исследований в области формализации естественного языка.

Ключевые слова: компьютерная лингвистика, обработка естественного языка, сочетаемость языковых единиц, компьютерное моделирование языковых объектов.

Для языкознания характерно соперничество системно-классификационного (номотетического) и индивидуально-идиографического методов [1]. Первый используется естественными и техническими науками и ориентирован на выявление в исследуемом материале основных закономерностей, которые могут быть представлены в виде упрощенных (обедненных), но легко формализуемых схем. Второй подход используется для полного описания отдельно взятого объекта или его свойства, имеющего особое значение для понимания сущности всего явления.

На начальном этапе развития так называемой инженерной лингвистики с логико-лингвистическими исчислениями появилось большое количество системных лингвистических исследований. Но анализ неудач на пути создания систем автоматической обработки текста показал, что естественный язык (ЕЯ) является открытой коммуникативной системой. Разумным компромиссом вышеупомянутых подходов могло бы послужить создание набора исследовательских инструментов, которые бы, с одной стороны, были ориентированы на поиск закономерностей, выявление и формализацию правил ЕЯ, а затем и на их программное подтверждение, с другой — не отвергали исследовательских методик языковедов-традиционалистов. Для выработки, выявления тенденций, способных непосредственно повлиять на принятие решения, количественных характеристик исследовательского процесса необходимы однозначные критерии количества.

Глобальная цель всех проводимых лингвистических исследований — „постичь“ структуру языка. Уровни структуры языка — это синтаксические предложения, слова, морфемы, фонемы. Изучать язык можно путем анализа и синтеза, ибо выявленные правила синтеза могут способствовать проведению анализа, и наоборот. Все языковые уровни характеризуются наличием базовых элементов. Так, например, на комбинаторику фигур (букв и слогов) накладываются ограничения в сочетаемости простых знаков — морфем. В свою очередь, комбинаторика морфем ограничивается сочетаемостью знаков более высокого порядка — слов. Затем, по мере развертывания текста, на комбинаторику слов накладываются ограничения в сочетаемости словосочетаний и предложений, а на них — экстралингвистические композиционно-сюжетные ограничения [2]. Тем самым выявляется направление укрупнения лингвистических

объектов. Речь идет о выявлении и программном подтверждении правил сочетаемости языковых единиц.

Выявлению правил может способствовать наличие программно реализованного набора инструментов, позволяющего максимально автоматизировать данный процесс. Актуальность проводимых исследований определяется тем, что правила сочетаемости языковых единиц не только играют важную роль при синтезе текста, но и могут лечь в основу анализаторов разного уровня (морфемно-морфологического, синтаксического, семантического). Ни одно из известных решений для создания анализаторов (наиболее результативные относятся к области морфологии и синтаксиса) не получило общего признания. Вот почему исследования в этом направлении могут представлять профессиональный интерес. Традиционно любая формализация подразумевает наличие совокупности правил, позволяющих строить описание объекта на декларативном или функциональном уровне. По сути дела, эти правила позволяют ответить на вопрос „как можно“ (построить, описать, сделать и т.д.). Возможен подход к формализации, основанный на системе правил „как нельзя“ [3, 4]. Правила вида „как нельзя“ разбиваются на группы. Каждая группа правил определяет фильтр. Каждый фильтр — это подсистема запретов на сочетаемость структурных единиц, весь предлагаемый инструментарий ориентирован на применение опыта и интуиции исследователя, подкрепляемых использованием математических оценок для принятия решения в случае недостаточно определенной сочетаемости структурных единиц.

Рассмотрим задачу построения лексических цепочек на заданном языковом уровне. Предлагается формулировать правила в виде запретов на сочетаемость базовых единиц каждого языкового уровня. Формулировать правила могут только эксперты, т.е. выбор, обоснование и оценка решений не могут быть выполнены на основании точных расчетов вследствие их качественной новизны и сложности. Принятие решений обычно предполагает, что информация, используемая для их обоснования, достоверна и надежна. Но для задач, которые по своему характеру являются качественно новыми, это предположение либо заведомо не реализуется, либо в момент принятия решения его не удастся доказать. Основные трудности обусловлены неполнотой имеющейся информации или ее недостаточно высоким качеством.

В недостаточно определенных ситуациях исследователь может самостоятельно оценить возможности сочетания тех или иных структурных единиц. Эта оценка может носить лингвистический характер. Явное сходство с анкетами, которые заполняют респонденты в ходе социальных исследований, позволяет взять за основу методы детерминационного анализа [5], а также воспользоваться идеями, изложенными в работе [6].

В нашем случае первичные эмпирические данные будут представлять собой совокупность отображений вида $E \rightarrow X_i, i \in 1, \dots, n$, где E — множество объектов, X_i — множество значений переменной x_i, i — индекс, нумерующий переменные, участвующие в эмпирическом исследовании или эксперименте. Используется всего одна переменная $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$: x_1 — да, x_2 — нет, x_3 — не знаю, x_4 — скорее да, чем нет, x_5 — скорее нет, чем да.

Полученную функцию можно представить в виде табл. 1. Множество строк — это множество исследуемых объектов: слов (как сочетаний морфем), словосочетаний, предложений и любых других объектов, для которых уместны подобные оценки.

Таблица 1

Представление функции	
Объекты	Оценка
$e^{(1)}$	$x^{(1)}$
$e^{(2)}$	$x^{(2)}$
\dots	\dots
$e^{(k-1)}$	$x^{(k-1)}$
$e^{(k)}$	$x^{(k)}$

Множества E , X_i , $i \in 1, \dots, n$, дискретны и конечны, что является прямым следствием их номинальности. При использовании предложенного метода учитывается процесс коммуникации (диалога), поэтому проводимые измерения являются номинальными, или качественными.

Рассматриваются объекты уровня n , обеспечивающие универсальность контекста. Для каждого из этих объектов определяется значение переменной x , таким образом, задается отображение $E \rightarrow X_j$, $j \in 1, \dots, n$. При этом значение переменной x задается путем опроса. Исследователь принимает решение самостоятельно, используя собственный опыт и интуицию.

Вторым шагом будет являться выделение тех составляющих объекта, сочетание которых представляет интерес. Сочетаемость, собственно говоря, и определяется правилом ЕСЛИ a , ТО b ($a \rightarrow b$). Здесь a — это утверждение вида $\text{Comp}_1 \& \text{Comp}_2$, где Comp_1 и Comp_2 — те составляющие объекта, о сочетаемости или несочетаемости которых надо принять решение; b — утверждение о том, что такое сочетание имеет место.

Следует заметить, что в нашем случае правило на самом деле имеет вид: ЕСЛИ a , ТО возможно b ($a \rightarrow b$).

Интерпретация правила: *сочетаемость* (<фиксированная единица (объект) уровня $n - 1$ > И <единица (объект) уровня $n - 1$ >) *имеет место с определенной долей уверенности*.

Для большей наглядности, не изменяя семантику правила, будем записывать его следующим образом: $\text{Comp}_1 \rightarrow \text{Comp}_2$, или, при необходимости, $\text{Comp}_1 \xrightarrow{x_i} \text{Comp}_2$, когда подразумевается степень уверенности x_i .

В зону определенности попадают отображения со значениями переменной x_1 и x_2 , все остальные — в зону неопределенности.

Лингвистические оценки (значения переменной X) наделяются весами (коэффициентами уверенности). При этом шкала весов должна быть настраиваемой. Настройки должен осуществлять сам исследователь. Фиксируются лишь диапазоны для каждой из переменных зоны неопределенности: 0, ..., 1. Вполне понятно, что коэффициент „1“ соответствует значению „ДА“, а „0“ — „НЕТ“. Далее, используя интенсивность каждого правила и соответствующий весовой коэффициент, можно получить усредненную картину по всем исследуемым объектам. Исследователь может интуитивно установить пороговое значение, которое должен превысить полученный результат, для того чтобы считаться положительным и чтобы исследователю начать поиски объяснения сочетаемости, используя собственные знания и опыт. Если поиски увенчаются успехом, то будет получено очередное правило, которое в дальнейшем станет составляющей фильтра.

Учитывая вышеизложенное, можно считать, что имеется качественная шкала рассматриваемого показателя X , подобно [6]. Эта шкала может стать количественной при задании весовых коэффициентов. Поскольку у нас под объектом понимается сочетаемость двух структурных составляющих, можно сопоставить одной из альтернатив выбор (предпочтение) конкретного объекта. Полученные результаты могут быть сведены в таблицу, где на пересечении строки и столбца можно поставить либо 1, либо 0, что будет означать наличие или отсутствие оценки x_i (табл. 2).

Таблица 2

Оценки сочетаемости						
Переменная	Comp_1	Comp_2	...	Comp_j	...	Comp_m
x_1						
x_3						
x_3						
x_4						
x_5						
Итого						

Оценки сочетаемости. Итоговое значение для каждого столбца будет представлять собой суммарный вес каждого правила, а выделенная итоговая строка представляет результаты распределения по шкале X .

Если обозначить через $q(x_i)$ значение весового коэффициента для переменной x_i , а количество объектов, для которых было определено значение переменной x_i как $N(x_i)$, то каждый элемент строки „итого“ будет содержать величину

$$S_{\text{Comp}_j} = \sum_{i=1}^k q(x_i) N^{(j)}(x_i), \quad (1)$$

где k — количество переменных, участвующих в эмпирическом обследовании (в данном случае $k = 5$).

Строго говоря, существует лишь один случай, когда имеется полная и однозначная определенность: это те ситуации, когда значение x есть „ДА“, т.е. речь идет о x_1 . При этом можно вынести точный вердикт о сочетаемости структурных единиц. Однако такой случай очень редок, поскольку работа происходит в условиях изучения объекта, эволюционирования модели, когда полная формализация правил образования объекта (модели) еще не прошла.

Заметим, что предполагается

$$\sum_{x_i \in X} q(x_i) = 1. \quad (2)$$

Введем некоторые обозначения. $\text{Sel}(\text{Comp}_j)$ — это множество, состоящее только из тех переменных x_i , которые были задействованы в эмпирическом обследовании для компонента Comp_j :

$$\text{Sel}(\text{Comp}_j) \subset X = \bigcup_{i=1}^k x_i. \quad (3)$$

Напомним, что $N(e)$ — это общее количество правил универсального контекста, т.е. практически это количество исследованных объектов уровня n . При проведении исследования на сочетаемость представляется разумным фиксировать один из компонентов (тот, в отношении которого надо принять решение о его сочетаемости или несочетаемости с какими-либо другими компонентами). Обозначим его как $\text{Comp}_{\text{fixed}}$. Можно сказать, что изучение поведения $\text{Comp}_{\text{fixed}}$ является *целью* исследования. В таком случае общее количество правил вида $\text{Comp}_{\text{fixed}} \rightarrow \text{Comp}_j, j \in 1, \dots, m$ (m — количество компонентов, которые проверяются на сочетаемость с $\text{Comp}_{\text{fixed}}$), совпадет с $N(e)$. Сюда войдут правила и с отрицательным заключением (в случае положительного заключения ответ однозначен и дальнейшие действия теряют смысл). Заключение „НЕТ“ не приводит к прекращению процесса исследования и отбрасыванию Comp_j как возможного претендента на сочетаемость, поскольку данное заключение выносится в отношении объекта более высокого уровня (универсального контекста). Количество правил, когда $\text{Comp}_{\text{fixed}}$ с той или иной долей уверенности демонстрировал тип поведения Comp_j , есть $\sum_{\text{Sel}(\text{Comp}_j)} N^{(j)}(x_i)$. Тогда суммарная интенсивность правил для отдельного

компонента Comp_j есть

$$I_{\Sigma}(\text{Comp}_{\text{fixed}} \rightarrow \text{Comp}_j) = \sum_{\text{Sel}(\text{Comp}_j)} N^{(j)}(x_i) / N(e), \quad (4)$$

суммарная интенсивность состоит из интенсивностей правил

$$\text{Comp}_{\text{fixed}} \xrightarrow{x_i} \text{Comp}_j,$$

причем каждая переменная x_i имеет свой вес $q(x_i)$.

Назовем *взвешенной интенсивностью* правила с переменной x_i произведение интенсивности и весового коэффициента данного правила:

$$I_{W_i} = N(x_i)/N(e) - q(x_i) = I \left(\text{Comp}_{\text{fixed}} \xrightarrow{x_i} \text{Comp}_j \right) - q(x_i), \forall i \in 1, \dots, k, \forall j \in 1, \dots, m,$$

тогда суммарная взвешенная интенсивность будет следующей:

$$I_{\sum W} = \sum_i I_{W_i} / N(e) = \frac{\sum_{\text{Sel}(\text{Comp}_j)} N^{(j)}(x_i) q(x_i)}{N(e)} = S/N(e). \quad (5)$$

Исследователь сам может установить пороговое значение, сравнение с которым позволит отсеять часть претендентов на сочетаемость, оставив материал для размышления и изучения. Принятие решения будет заключаться в формулировке правила сочетаемости (фильтра).

Но и отвергнутый материал может быть исследован. Визуализация распределения по значимости каждого правила, т.е. взвешенных интенсивностей I_{W_i} , позволит получить картину, которая может косвенно быть полезна при принятии решения.

Для оценивания на основе вычислительного эксперимента был создан программный инструментарий, позволяющий:

- создавать персональный отчет для каждого исследователя, в котором накапливаются экспертные оценки (веса) рассматриваемых сочетаний слов;
- настраивать весовые коэффициенты, приписываемые элементам качественной шкалы;
- просматривать, добавлять, удалять оценки для соответствующих словосочетаний;
- на основе полученных результатов для списка заданных словосочетаний рассматривать его как набор альтернатив и оценивать указанный выше критерий для каждого из словосочетаний, что устанавливает транзитивные отношения между значениями критерия для каждого словосочетания из списка.

В качестве примера вычислительного эксперимента можно привести обработку словосочетаний со словом „свобода“. Источником информации послужил „Морфемно-морфонологический словарь языка А. С. Пушкина“ [7], цель: выбрать наиболее подходящие словосочетания исходя из экспертных оценок.

Указав часть речи, авторы получили список подходящих слов для изучения сочетаемости с исходным словом (в данном случае — список прилагательных). После проведения экспертизы, задания весовых коэффициентов, порогового значения получены следующие результаты для неформализованной сочетаемости (табл. 3). Принятие решения основано исключительно на субъективных экспертных оценках при полном отсутствии правил формирования словосочетаний.

Таблица 3

Результаты обработки с пороговым значением 2,5

Критерий	Comp _{fixed}	Comp _j
4	СВОБОДА	ЖЕЛАННЫЙ
3,85	СВОБОДА	БЕСКОРЫСТНЫЙ
3,7	СВОБОДА	БЕЗЗАКОННЫЙ
3,7	СВОБОДА	НЕВЫМЫШЛЕННЫЙ
3,65	СВОБОДА	НЕСОМНЕННЫЙ
3,6	СВОБОДА	КРАЕУГОЛЬНЫЙ
3,5	СВОБОДА	ЗАМЕШАННЫЙ
3,5	СВОБОДА	МЕРЗКИЙ
3,5	СВОБОДА	ОПЫТНЫЙ
2,65	СВОБОДА	ЗАВЕТНЫЙ

Продолжение таблицы 3

Критерий	Comp _{fixed}	Comp _j
2,5	СВОБОДА	ЗАСЛУЖЕННЫЙ
2,5	СВОБОДА	ДОЛГОВЕЧНЫЙ
2,5	СВОБОДА	НЕМИНУЕМЫЙ
2,5	СВОБОДА	ПРОНЗИТЕЛЬНЫЙ
2,5	СВОБОДА	НЕОБЪЯТНЫЙ

Представленный пример иллюстрирует подход к отбору исследовательского материала для того, чтобы попытаться сформулировать правила сочетаемости. И если в случае сочетаемости слов важность экспертных оценок не так очевидна, то при изучении сочетаемости морфем в словообразовательных процессах [8] значимость экспертизы весьма понятна.

Следует заметить, что не требуется затрат на сбор и обобщение знаний специалистов: программный инструмент ориентирован на отдельного эксперта и помогает найти необходимое решение, предоставляющим возможность оценивания достоверности по апостериорным данным. Эту оценку можно использовать в качестве априорных данных для дальнейших экспертиз при создании языковых фильтров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пиотровский Р. Г.* Лингвистический автомат (в исследовании и непрерывном обучении). СПб: Изд-во РГПУ, 1999. 256 с.
2. *Пиотровский Р. Г.* Инженерная лингвистика и теория языка. Л.: Наука, 1979. 112 с.
3. *Воронина И. Е.* Компьютерное моделирование лингвистических объектов. Воронеж: Изд.-полиграф. центр Воронежского гос. ун-та, 2007. 177 с.
4. *Воронина И. Е.* Актуальность моделирования лингвистической среды // Мат. Междунар. науч. конф. „Проблемы компьютерной лингвистики – 2009“. Воронеж: Изд.-полигр. центр Воронежского гос. ун-та, 2009.
5. *Чесноков С. В.* Детерминационный анализ социально-экономических данных. М.: Наука, 1982. 168 с.
6. *Жаке-Лагрез Э.* Применение размытых отношений при оценке предпочтительности распределенных величин // Статистические модели и многокритериальные задачи принятия решений. М.: Статистика, 1979. С. 168—183.
7. *Кретов А. А., Матвеева Л. Н.* Морфемно-морфонологический словарь языка А. С. Пушкина: ок. 23 000 слов. Воронеж: Центрально-Черноземное книжное изд-во, 1999. 208 с.
8. *Воронина И. Е.* Использование программных средств моделирования словообразовательных процессов в научно-исследовательской и педагогической практике // Проблемы компьютерной лингвистики: сб. науч. тр. Воронеж: Изд.-полиграф. центр Воронежского гос. ун-та, 2008. Вып. 3. С. 42—62.

Сведения об авторе

Ирина Евгеньевна Воронина

— канд. техн. наук; Воронежский государственный университет, кафедра программного обеспечения и администрирования информационных систем; E-mail: irina.voronina@gmail.com

Рекомендована кафедрой
программного обеспечения и
администрирования информационных систем

Поступила в редакцию
18.02.11 г.

Ю. А. ГАТЧИН, Ю. В. ДОНЕЦКАЯ, И. Б. КОМАРОВА

АЛГОРИТМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Рассматриваются алгоритмы автоматизации проектирования изделий для формирования и редактирования электронной структуры изделий, табличных документов и загрузки технических документов.

Ключевые слова: автоматизация проектирования, электронная структура изделий, табличный документ, технический документ, PDM-система.

Введение. Тенденции развития современных систем автоматизации проектирования (САПР), при всевозрастающей роли систем управления данными об изделиях (PDM-систем), требуют разработки новых алгоритмов для решения задач автоматизации проектирования изделий.

Как показывает практика, все больше руководителей предприятий и проектных организаций стремится к применению PDM-систем для управления данными об изделиях на каждом этапе их жизненного цикла, что позволяет улучшить качество выпускаемой документации, повысить качество изделий, сократить цикл выпуска изделий, следовательно, уменьшить их себестоимость. Одним из объектов, используемых для управления данными об изделиях, является электронная структура изделий (ЭСИ). Ее формирование — итерационный процесс, осуществляемый на каждом этапе жизненного цикла изделия [1], важнейшим этапом которого является проектирование, так как именно на нем определяется состав изделия и разрабатываются табличные и технические документы, необходимые для выпуска и эксплуатации изделий. Для данного актуален вопрос не только формирования ЭСИ, но и ее применения для формирования и загрузки в PDM-систему документов.

Анализ существующих САПР, выявил несколько особенностей (функций) процесса автоматизации проектирования изделий:

- 1) формирование и редактирование ЭСИ на основе данных проектирования и изменения электрических схем с учетом изменения элементной базы данных;
- 2) формирование табличных документов (перечней элементов, спецификаций и ведомостей) на основе данных, получаемых из ЭСИ;
- 3) возможность загрузки в ЭСИ технических документов.

Существующие возможности САПР не позволяют автоматизировать указанные функции в полной мере, что приводит к дублированию действий разработчиков, увеличению времени разработки и проверки документации.

В настоящей статье рассматриваются алгоритмы автоматизации проектирования изделий для решения следующих задач: формирования и редактирования ЭСИ при проектировании электрических схем изделий или их составных частей, применения ЭСИ с целью формирования и редактирования табличных документов, загрузки в PDM-систему технических документов. Также в статье рассматривается специфика работы с элементной базой данных.

Описание процесса проектирования изделий. Процесс проектирования и редактирования изделий приборостроения включает следующие этапы.

1. Выбор элементной базы. Осуществляется с использованием нескольких источников: отраслевые перечни элементов, справочные листы от фирм-производителей и так называемые перечни, формируемые главными конструкторами, разрабатывающими изделия.

На выбор того или иного элемента схемы влияют ограничения на его применение, поэтому учитываются такие параметры, как обозначение изделия и дата выдачи технического задания (ТЗ) на его разработку, ограничение применимости элемента и ограничение по ТЗ.

2. Проектирование электрической схемы. Указывается количество используемых в схеме элементов и обозначается позиция каждого экземпляра элемента, помещенного в схему. Таким образом, формируется следующая совокупность данных об элементе: наименование, количество элементов и их позиционное обозначение. В дальнейшем эта информация может использоваться в качестве исходной для формирования ЭСИ и перечней элементов.

Однако при проектировании и редактировании электрических схем и перечней элементов возникают сложности в обеспечении соответствия содержания ЭСИ данным электрической схемы и перечня элементов.

3. Конструирование изделия и его составных частей. Эта процедура, как правило, ведется средствами высокоуровневых САПР сквозного проектирования. На этом этапе разрабатываются модели и чертежи деталей и сборочных единиц изделий, что позволяет формировать ЭСИ непосредственно по данным сборки моделей.

На этом этапе разрабатываются спецификации, содержащие конструкторские и электро-монтажные разделы, включающие в себя информацию обо всех модификациях изделия (групповые спецификации). При этом возникают сложности в части обеспечения соответствия спецификации содержанию ЭСИ, поскольку происходит неоднократный ввод одной и той же информации по несколько раз (включение в ЭСИ документов, добавление материалов и т.п.).

4. Разработка технической документации (инструкции, паспорта, технические условия, ведомости и пр.). Эти документы также являются частью ЭСИ и должны быть введены в структуру разрабатываемого изделия. На данном этапе необходимо обеспечить связь документа и того элемента ЭСИ, представляющего изделие или его составную часть, для которого этот документ был разработан, причем связь должна сохраняться и при корректировке такого документа.

Проанализировав разрабатываемую документацию на изделие, можно сделать вывод о том, что при проектировании изделия разрабатываются документы, представляемые в табличном виде — табличные документы (перечни элементов, спецификации, ведомости и пр.) и технические, содержащие текстовую и графическую информацию (технические условия, паспорта и пр.). Перечислим основные сложности, возникающие при проектировании изделий приборостроения:

- многократный ввод повторяющейся информации в табличные документы и ЭСИ;
- невозможность автоматизации управления данными из элементной базы данных;
- невозможность оперативного изменения ЭСИ при изменении табличных документов;
- невозможность автоматизации процесса создания связей между техническими документами и соответствующими элементами ЭСИ;
- невозможность автоматизированного контроля правильности заполнения атрибутов в технических документах при их сохранении в PDM-системе.

Перечисленные сложности обусловили особенности разработки алгоритмов для автоматизации проектирования изделий приборостроения. При разработке алгоритмов были проанализированы свойства объекта, которые необходимо учитывать для решения поставленной задачи.

На основе результатов анализа была предложена структура базы данных, были описаны объекты, необходимые для формирования ЭСИ в PDM-системе, для каждого вида объектов был определен ряд атрибутов, которые следует учитывать в рассматриваемых алгоритмах.

Алгоритмы для автоматизации проектирования изделий. Рассматриваемые алгоритмы могут быть разделены на несколько видов, по числу решаемых ими задач, для работы: с элементными базами данных, с ЭСИ, с табличными и техническими документами.

Для автоматизации работ с элементными базами данных разработан алгоритм, представленный на рис. 1. Его исходными данными являются: полное имя пользователя (fullname), обозначение и наименование проектируемого изделия (object_name, object_number).

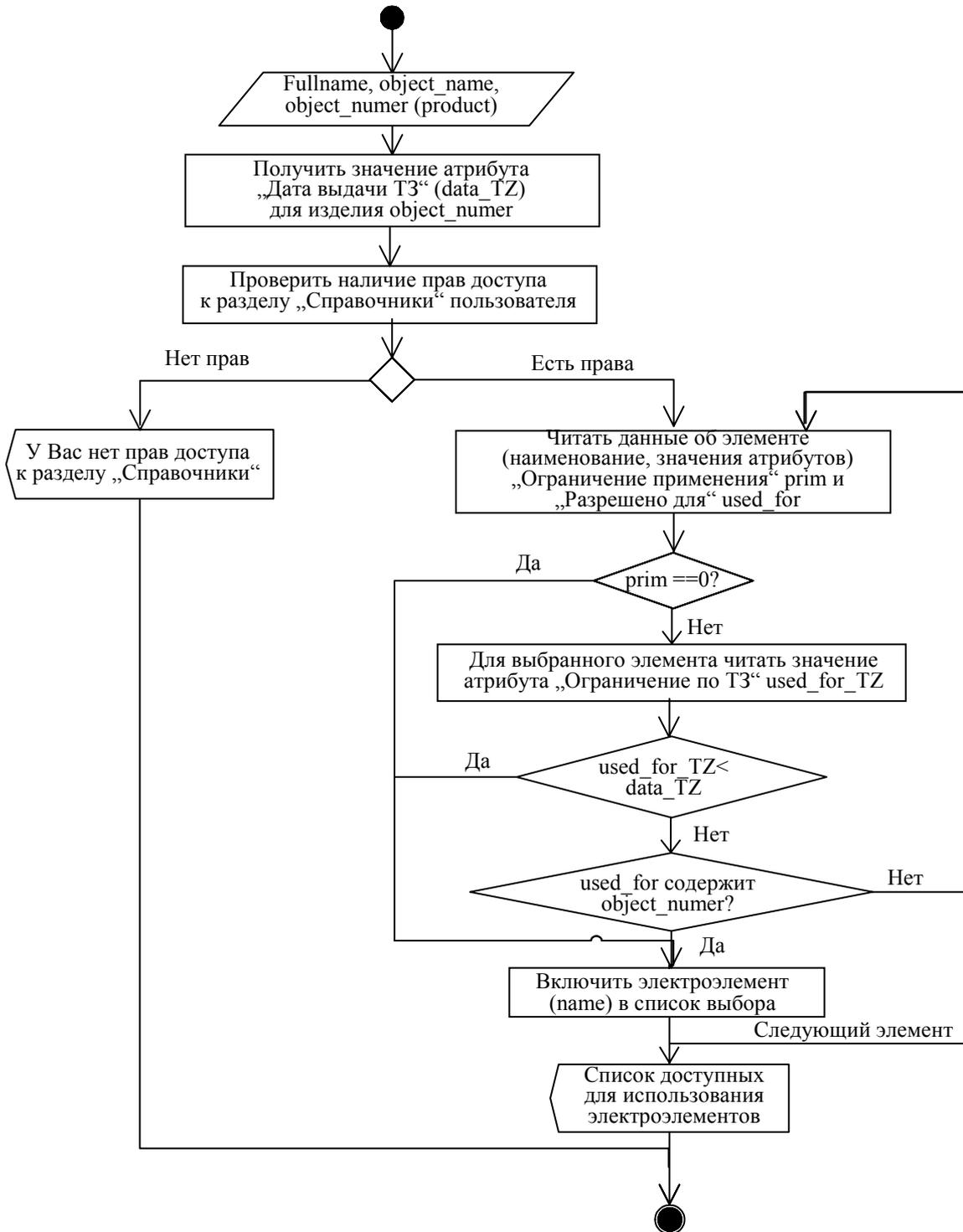


Рис. 1

Алгоритм позволяет сформировать список только из тех элементов, которые могут быть применены для проектирования изделия. Для этого анализируются значения атрибутов „Ограничение применения“ (причина, по которой невозможно применение элемента), „Ограничение по ТЗ“ (указывается дата выдачи ТЗ, после которой невозможно применение элемента)

и „Разрешено для“ (перечень обозначений изделий, для которых возможно применение элемента). При выполнении анализа прежде всего осуществляется проверка значения атрибута „Ограничение применения“.

Если значение атрибута не введено, то информация об элементе (его наименование) попадает в список элементов, которые можно использовать для проектирования электрической схемы изделия; если введено, осуществляется проверка атрибута „Ограничение по ТЗ“. Чтобы элемент можно было использовать для проектирования изделий, дата, указанная в атрибуте „Ограничение по ТЗ“ не должна быть более поздней, чем указанная в атрибуте „Дата выдачи ТЗ“. При выполнении этого условия проверки информация об элементе попадает в список элементов, которые можно использовать для проектирования электрической схемы изделия.

В случае невыполнения условия производится проверка наличия изделия в перечне значений атрибута „Разрешено для“. Если совпадение в значениях зафиксировано, наименование элемента помещается в список элементов, используемых для проектирования электрической схемы изделия. В ином случае элемент пропускается и анализируется следующий элемент. При корректировке электрической схемы, перечня элементов или спецификации проводится анализ элементов, включенных в ЭСИ по аналогичному алгоритму с цветовым выделением тех из них, наименования которых не соответствуют наименованию элемента в ЭСИ.

Алгоритм формирования ЭСИ по данным проектирования электрической схемы приведен на рис. 2. В процессе проектирования схемы информация обо всех элементах, включенных в нее, сохраняется в буферной зоне (XML-файл), которая и обрабатывается предлагаемым алгоритмом.

Каждой записи, помещенной в буферную зону, ставится в соответствие объект типа „Элемент ЭСИ“, который и является составной частью электронной структуры проектируемого изделия. При добавлении объекта „Элемент ЭСИ“ в структуру одним из элементов связи будут являться значения атрибутов „Количество“ и „Позиционное обозначение“, являющихся атрибутами связи.

Исходными данными алгоритма формирования табличных документов (рис. 3) являются: полное имя пользователя, обозначение и наименование проектируемого изделия и вид формируемого документа (`document_type`).

В зависимости от выбранного вида документа формируется его основная надпись (штамп) в соответствии с требованиями ГОСТ на этот вид документа и ГОСТ 2.104 [2]. Атрибуты основной надписи документа (наименование и обозначение) формируются на основе наименования и обозначения изделия или его составной части с добавлением вида документа и буквенного обозначения вида документа соответственно (см. требования ГОСТ 2.102 [3]). Также производится выборка из ЭСИ тех данных, которые должны быть помещены в документ, и выполняется их сортировка в соответствии с разделом, в котором они должны быть размещены. При размещении такого документа в PDM-системе осуществляется его добавление в структуру изделия или его составной части в зависимости от того, для какой составной части изделия был сформирован табличный документ. Корректировка табличного документа осуществляется по аналогичному алгоритму.

На рис. 4 представлен алгоритм загрузки технических документов в PDM-систему. Алгоритм позволяет считать (если это возможно) из свойств документа значения атрибутов, необходимых для формирования записи о документе в базе данных PDM-системы, загрузить эти атрибуты в PDM-систему, сформировать имя файла в соответствии с требованиями и поместить оформленный технический документ в структуру изделия или его составной части.

При изменении технического документа используется аналогичный алгоритм, позволяющий сохранять связь документа с соответствующим элементом ЭСИ.

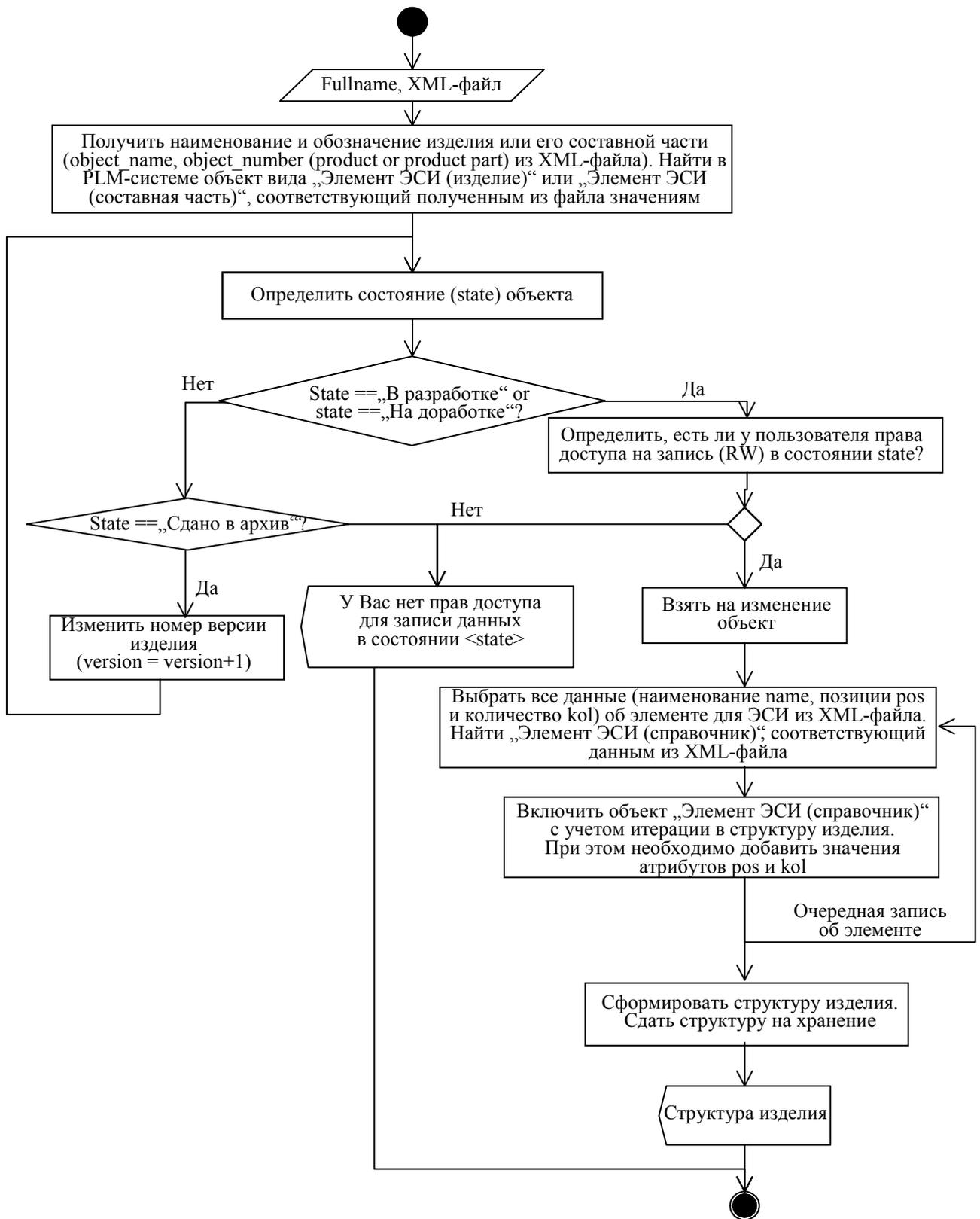


Рис. 2

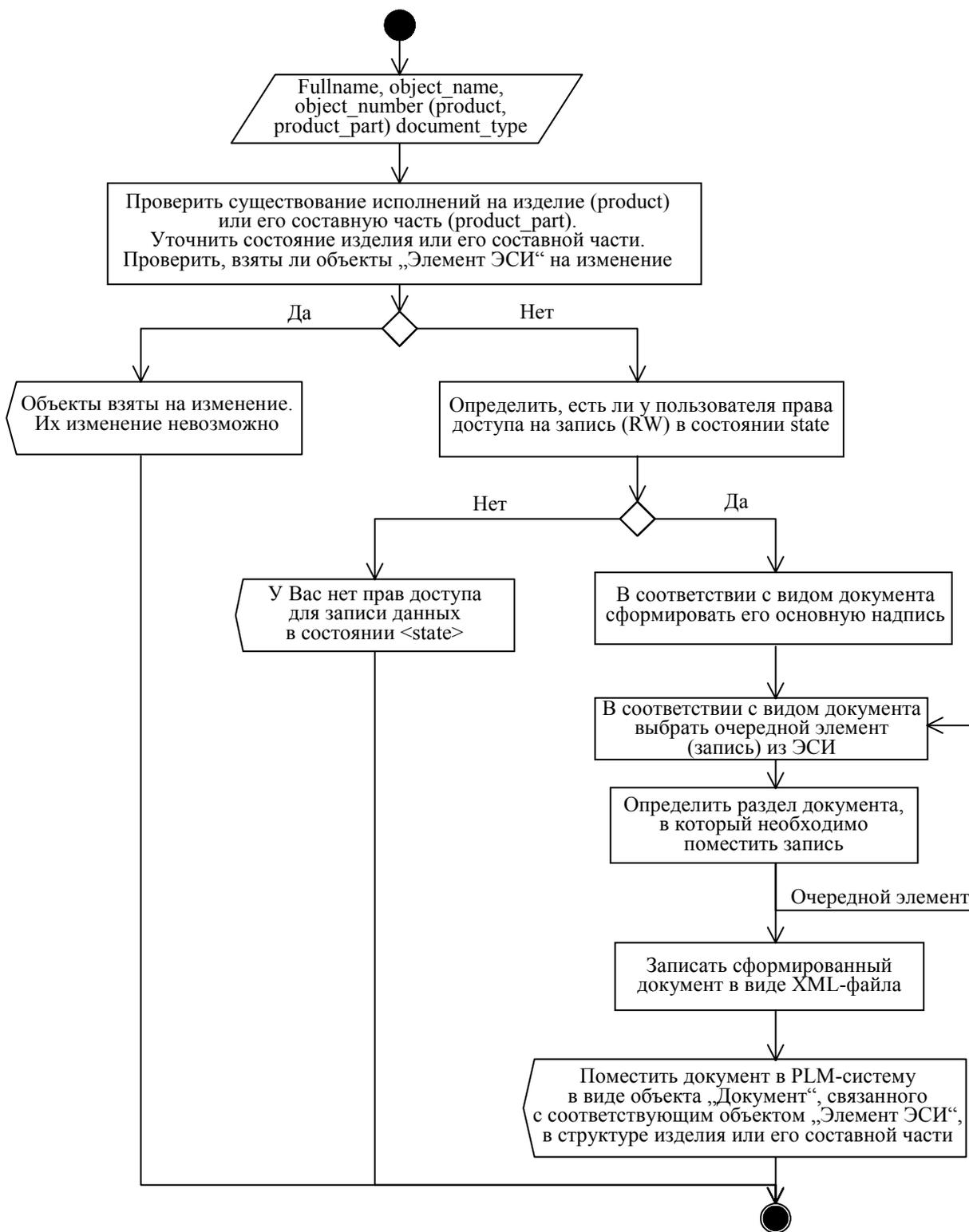


Рис. 3

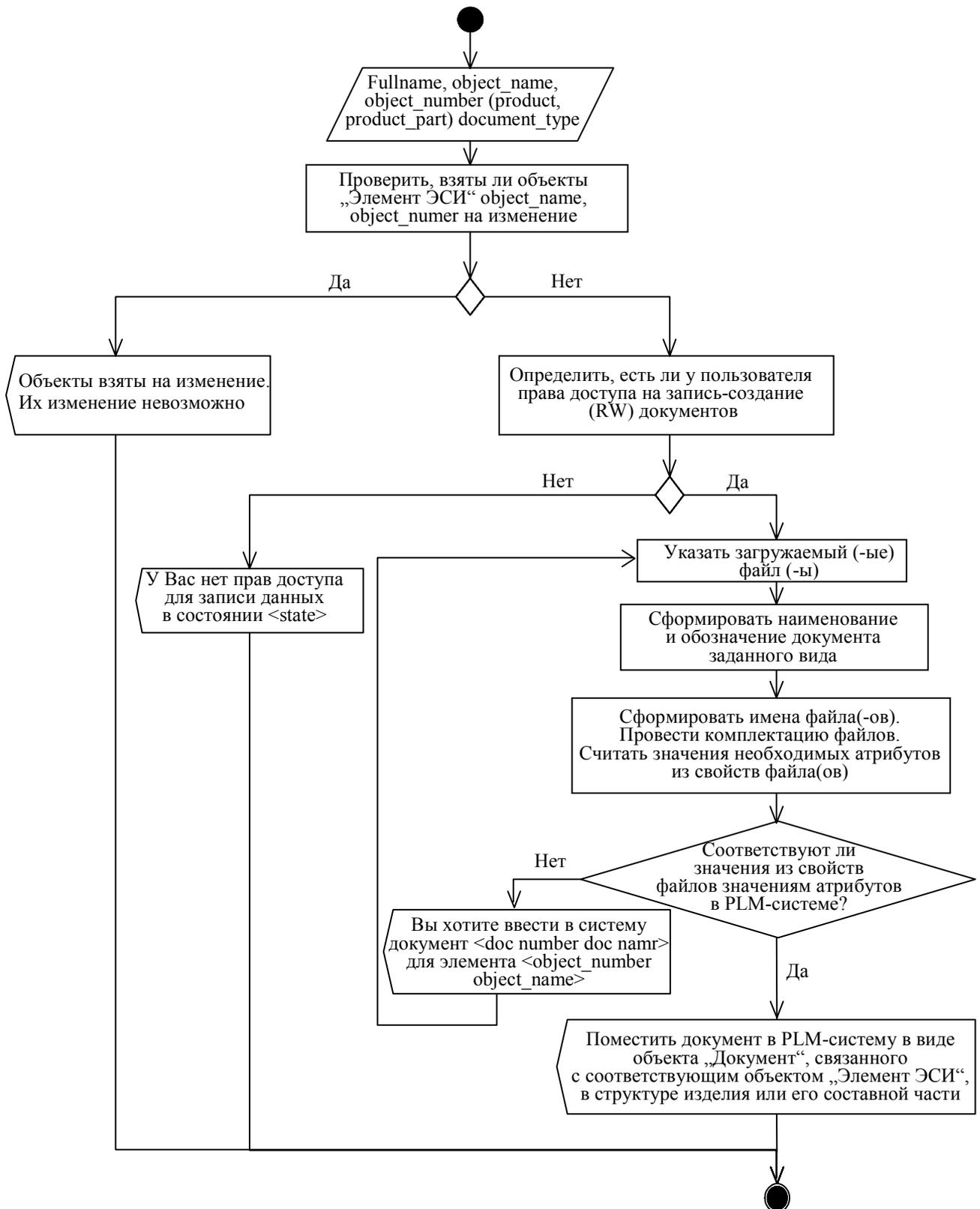


Рис. 4

Заключение. Рассмотренные алгоритмы позволили автоматизировать процесс проектирования изделий приборостроения в части формирования и редактирования электронной структуры изделия и его составных частей, использования электронных структур для формирования и редактирования табличных документов, а также загрузки в систему управления жизненными циклами изделий технических документов. Разработанные алгоритмы также позволили решить задачу выбора элементов для проектирования изделий и контроля за изменениями в элементной базе данных в процессе модификации изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баженов А. Г., Гутнер И. Е., Донецкая Ю. В., Карташев Е. Н. Полное электронное описание изделий // Матер. IX Всеросс. науч.-практич. конф. ИНТЕРМЕХ-ПРАКТИК „Информационные технологии в судостроении — 2008“. СПб: „Северная верфь“, 2008. С. 48—49.
2. ГОСТ 2.104-2006 ЕСКД. Основные надписи.
3. ГОСТ 2.102-68 ЕСКД. Виды и комплектность конструкторской документации.
4. Ключарев А. А., Матьяш В. А., Щекин С. В. Структуры и алгоритмы обработки данных: Учеб. пособие. СПб: ГУАП, 2003. 172 с.

Сведения об авторах

- Юрий Арменакович Гатчин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем; E-mail: gatchin@mail.ifmo.ru
- Юлия Валерьевна Донецкая** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем; ассистент; E-mail: donetskaya_julia@mail.ru
- Ирина Борисовна Комарова** — студентка; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем; E-mail: birdkolibry@mail.ru

Рекомендована кафедрой
проектирования компьютерных систем

Поступила в редакцию
18.01.10 г.

В. Н. ДРОЗДОВ, Е. А. ШЕФЕР

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЦИФРОВОГО АВТОТИПНОГО РАСТРИРОВАНИЯ

Исследована проблема замены непрерывно изменяющегося потока электромагнитного излучения, отраженного от подложки с нанесенным поглощающим фильтром, двухуровневым сигналом. Рассмотрены различные методы бинаризации сигнала. Получены результаты растривания изображения различными методами.

Ключевые слова: цифровая обработка изображений, автотипное растривание, преобразование спектров.

Введение. Глаз, с помощью которого человек получает порядка 80 % информации об окружающем мире, принимает поток электромагнитного излучения $\Phi(x)$, измеряемый в ваттах, $\Phi(\cdot)$ — непрерывная функция, а x — векторный аргумент, имеющий две пространственные координаты. Полиграфическая продукция, ориентированная на пристальное рассматривание (иллюстрации), должна обеспечивать надлежащее распределение в пространстве потока электромагнитного излучения.

Существенную роль в производстве печатной продукции играет компьютер. Поток электромагнитного излучения как особая форма существования материи не может быть непосредственно введен в компьютер, оперирующий с числами, представленными двоичным кодом. Однако непрерывная функция $\Phi(x)$ как элемент линейного пространства может быть разложена по базисным векторам

$$\Phi(x) = \alpha_1 \varphi_1(x) + \alpha_2 \varphi_2(x) + \dots + \alpha_k \varphi_k(x) + \dots \quad (1)$$

Этот ряд бесконечен в силу бесконечной размерности пространства непрерывных функций. В (1) базисные функции $\varphi_i(x)$ являются некоторыми стандартными потоками электромагнитного излучения, а α_i , амплитуды этих функций, могут быть представлены числами. Множество чисел α_i , как известно [1], является спектром $\Phi(x)$ в базисе $\{\varphi_i(x)\}$. Набор чисел, представляющий спектр, уже может быть введен в компьютер.

В полиграфии при оцифровывании изображений используются исключительно ортогональные базисы. Коэффициенты ортогонального базиса α_i вычисляются по известной формуле [2]

$$\alpha_i = \frac{\langle \Phi(x), \varphi_i(x) \rangle}{\|\varphi_i(x)\|^2} = \frac{\int_X \Phi(x) \varphi_i(x) dx}{\int_X \varphi_i^2(x) dx}, \quad (2)$$

где X — область задания $\Phi(x)$.

Не останавливаясь на специфике различных базисов [1, 3, 4], отметим, что в технологии обработки изображения используется только сдвиговый базис. Теоретически базисными сдвиговыми функциями являются δ -функции Дирака, однако практически для ряда (1) используются физически реализуемые приближения δ -функций, в результате чего ряд получается конечным с последним слагаемым $\alpha_k \varphi_k(x)$. Технический процесс получения спектра $\{\alpha_i\}$ в сдвиговом базисе называется сканированием; процесс, представленный выражением (2), в этом случае реализуется аппаратурой сканирования.

На рис. 1, *a* представлено изображение, на рис. 1, *б* — поток электромагнитного излучения, отраженный от этого изображения. Выбрано такое изображение, что отраженный поток излучения представляет собой сумму базисных функций различной амплитуды. Эти базисные функции являются физически реализуемой аппроксимацией δ -функций. На рис. 1, *в* представлен график спектра потока излучения.

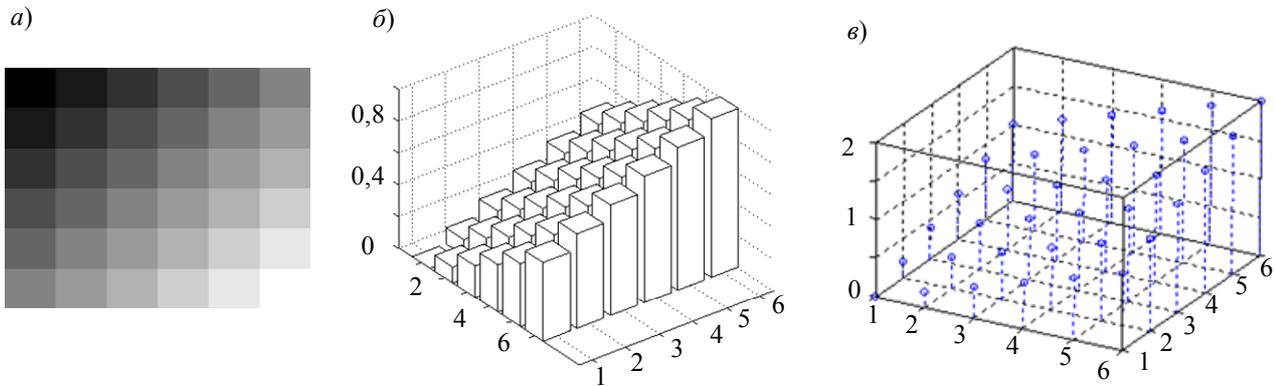


Рис. 1

Обработанный компьютером спектр потока излучения представляет собой двумерный массив чисел. Отметим, что в спектре $\{\alpha_i\}$ не содержится сведений о виде базисных функций, породивших этот спектр.

Основной результат. После преобразований спектра необходимо вывести информацию из компьютера, т.е. сгенерировать поток электромагнитного излучения по имеющемуся спектру. В цифровом телевидении [4], например, эта задача решается с использованием элементарных излучателей потока, интенсивность которого можно изменять в соответствии с коэффициентом α_i .

Формирование потока электромагнитного излучения, отраженного от печатной продукции, происходит за счет изменения интенсивности отраженного от подложки потока, дважды прошедшего через поглощающий фильтр — краску. Коэффициент поглощения потока излучения, согласно закону Ламберта—Бугера [5], определяется толщиной красочного слоя. Однако многие способы печати позволяют наносить на подложку слой краски только постоянной толщины [5—7]. В этом случае возникает проблема замены ряда (1), состоящего из модулированных по амплитуде базисных функций $\varphi_i(x)$, на сумму базисных функций $\psi_i(x)$, амплитуды которых β_i могут принимать только значение „0“, что соответствует запечатанному участку подложки, или „1“, что соответствует пробельному элементу. При этом новый ряд

$$\Phi(x) = \beta_1\psi_1(x) + \beta_2\psi_2(x) + \dots + \beta_m\psi_m(x) \quad (3)$$

должен быть эквивалентным в некотором смысле конечному ряду (1), математически это означает построение на основании массива $\{\alpha_i\}$, состоящего из чисел $0 \leq \alpha_i \leq 1$, эквивалентного массиву $\{\beta_i\}$, состоящему из чисел $\beta_i = 0 \vee 1$. Такой способ расположения элементов массива $\{\beta_i\}$ в растровой ячейке называется автотипным растриванием.

В качестве базисных функций $\psi_i(x)$ при выводе информации, так же как и при вводе, выбирается приближение δ -функций, только при вводе площадь $\varphi_i(x)$ определяется разрешением сканирующего устройства, а при выводе площадь $\psi_i(x)$ — устройства печати.

В этом случае можно рассмотреть следующие алгоритмы построения массива $\{\beta_j\}$ по исходному массиву $\{\alpha_i\}$.

Пусть формат выводимого изображения равен $a \times b$ и разрешение устройства печати равно Δ . В этом случае размер массива $\{\beta_j\}$ будет следующим:

$$M \times N = \frac{a}{\Delta} \times \frac{b}{\Delta}.$$

На основании массива $\{\alpha_i\}$ формируется массив амплитуд $\{\bar{\alpha}_j\}$ размера $M \times N$. Если размер исходного массива $\{\alpha_i\}$ меньше требуемого, то недостающие элементы массива $\{\bar{\alpha}_j\}$ вычисляются с использованием какого-либо метода интерполяции.

Наиболее простое правило построения спектра $\{\beta_j\}$ по массиву $\{\bar{\alpha}_j\}$ состоит в том [8], что если $\bar{\alpha}_j \leq 0,5$, то соответствующему элементу β_j присваивается значение „0“, а число $\bar{\alpha}_j$ добавляется к следующему числу $\bar{\alpha}_{j+1}$.

При $\bar{\alpha}_j > 0,5$ соответствующему элементу β_j присваивается значение „1“, а число $1 - \bar{\alpha}_j$ добавляется к следующему числу $\bar{\alpha}_{j+1}$. Это так называемый метод диффузии ошибки, характеризуемый низкой помехоустойчивостью к отклонениям параметров процесса печати от номинальных значений.

Предпочтение отдается таким правилам построения спектра $\{\beta_j\}$, которые обеспечивают компактное группирование базисных функций $\psi_i(x)$. С этой целью элементы массивов $\{\beta_j\}$ и $\{\bar{\alpha}_j\}$ объединяются в группы (растровые ячейки) размером $p \times p$, где p выбирается таким образом, чтобы выполнялось условие $\Delta p < L$, L — максимальное расстояние между двумя точками, которые орган зрения человека воспринимает слитно, как одну точку. В каждой растровой ячейке массива $\{\bar{\alpha}_j\}$ подсчитывается сумма $n = \sum \bar{\alpha}_j$, полученное число n заменяется числоимпульсным кодом. Эти равные единицы коэффициенты размещаются в соответствующей растровой ячейке массива $\{\beta_j\}$. Способ размещения единичных коэффициентов в каждой растровой ячейке может быть разнообразным. В настоящее время наибольшее распространение получил такой метод размещения единичных значений в растровой ячейке, когда печатающий элемент (нулевые значения коэффициентов) расположен в центре растровой ячейки [5, 6]. Назовем этот метод классическим растрированием.

Известен случайный метод расположения единиц в растровой ячейке [6] — это стохастическое растрирование. Можно таким способом расположить единичные элементы, чтобы минимизировать расстояние между решетчатыми функциями β_j и $\bar{\alpha}_j$ в каждой растровой ячейке [9]. Такой метод бинаризации назван D-алгоритмом.

На рис. 2, *a* в качестве примера приведен результат растрирования некоторого изображения методом диффузии ошибки, *b* — классическим методом, *в* — стохастическим методом, *г* — с помощью D-алгоритма. Линиатура $\frac{1}{L}$ на рисунке выбрана малой для того, чтобы продемонстрировать различия изображений, полученных с помощью методов растрирования.

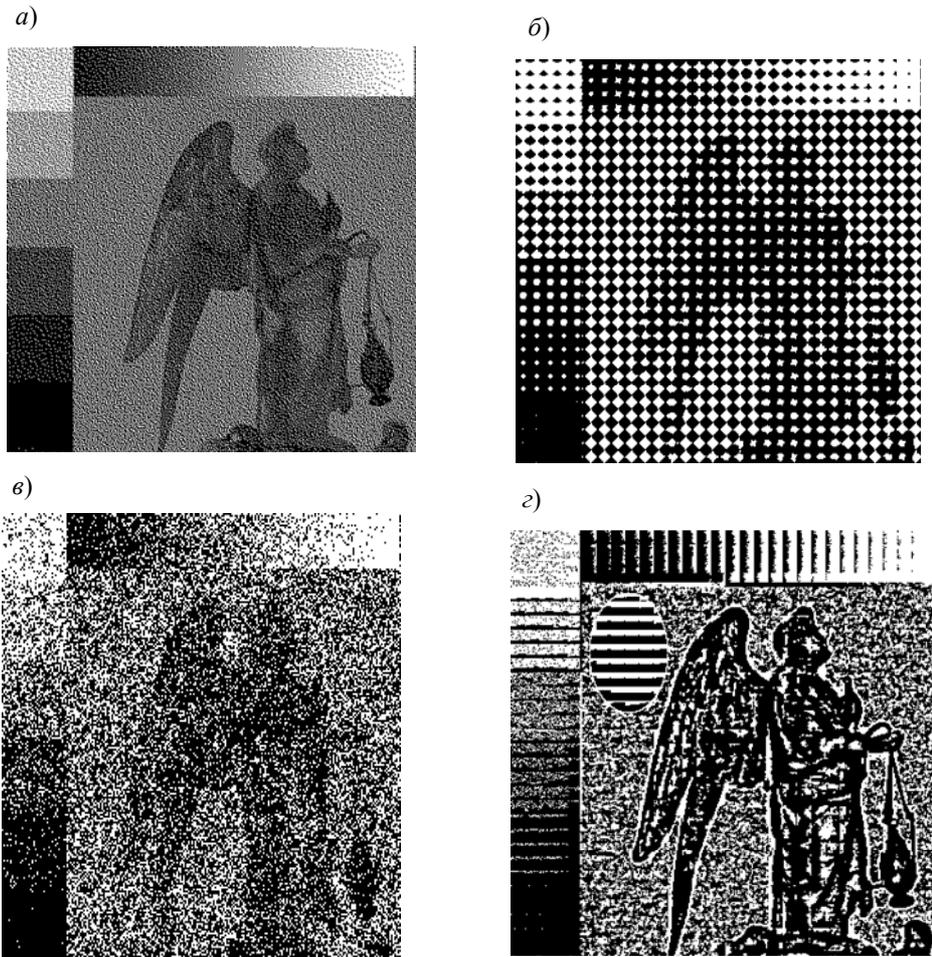


Рис. 2

Проанализировав эти результаты, можно сказать, что при растривании изображений, содержащих много контуров, лучше использовать D-алгоритм бинаризации. Широкоимпульсная модуляция подходит в случае растривания изображения, имеющего плавные переходы тона. В отношении метода диффузии ошибки и стохастического метода можно сказать, что они отличаются низкой помехоустойчивостью, которая возникает в процессе печати при отклонении параметров.

Заключение. Приведенные примеры показывают, что выбор правила построения спектра $\{\beta_j\}$ существенным образом влияет на качество воспроизведения изображения. Представляется возможным на основании предложенного подхода разрабатывать различные методы растривания, т.е. различные способы размещения n единичных коэффициентов в каждой растровой ячейке массива $\{\beta_j\}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ярославский Л. П. Цифровая обработка сигналов в оптике и галографии. Введение в цифровую оптику. М.: Радио и связь, 1987. 296 с.
2. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. М.: Наука, 1966. 576 с.
3. Потапов А. А., Пахомов А. А., Никитин С. А., Гуляев Ю. В. Новейшие методы обработки изображений. М.: Физматлит, 2008. 496 с.
4. Птачек М. Цифровое телевидение. Теория и практика. М.: Радио и связь, 1990. 528 с.

5. *Шашилов Б. А.* Цвет и цветовоспроизведение. М.: Книга, 1986. 280 с.
6. *Киптхан Г.* Энциклопедия по печатным средствам информации. Технология и способы производства. М.: МГУП, 2003. 1280 с.
7. *Кузнецов Ю. В.* Технология обработки изобразительной информации. СПб: Петербургский институт печати, 2002. 312 с.
8. *Floyd W., Steinberg L.* An adaptive algorithm for spatial grey scale // Proc. Soc. of Information Display. 1976. Vol. 17. P. 75—77.
9. *Горбачев В. Н., Дроздов В. Н., Яковлева Е. С.* Один алгоритм бинаризации полутоновых изображений // Дизайн, материалы, технология. 2009. № 2. С. 63—71.

Сведения об авторах

- Валентин Нилович Дроздов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна, кафедра автоматизированного полиграфического оборудования; зав. кафедрой;
E-mail: vndrozdov@uprint.spb.ru
- Елена Александровна Шефер** — Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна, кафедра автоматизированного полиграфического оборудования; инженер; E-mail: sh68@hotmail.ru

Рекомендована кафедрой
автоматизированного
полиграфического оборудования

Поступила в редакцию
21.06.10 г.

Е. А. ТИТЕНКО, Е. А. СЕМЕНИХИН

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ АРБИТР ОБРАБОТКИ ЗАПРОСОВ БОЛЬШОЙ РАЗРЯДНОСТИ

Предложен способ параллельно-конвейерной обработки запросов большой разрядности, описана техническая реализация арбитра.

Ключевые слова: *арбитр, конвейер, параллельные вычисления.*

Введение. Производительность вычислительных систем с массовым параллелизмом (многомашинные комплексы и многопроцессорные системы) определяется, прежде всего, согласованной работой коллектива процессоров над решением задач, имеющих альтернативные или множественные варианты выполнения [1]. Общая производительность таких систем зависит от многих факторов: типа модели вычислений, количества процессоров и их наращиваемости, ресурсной поддержки распараллеливания, организации памяти, обработки конфликтов за общий ресурс, организации системы коммутации, синхронизации готовности процессов по данным и др. [2].

В настоящей работе рассматривается задача согласования работы множества процессоров, направленного на уменьшение времени разрешения конфликтов между процессорами, запрашивающими общий ресурс. Общим ресурсом можно считать, например, разделяемую оперативную память, общую кэш-память, единый коммутатор-распределитель, ассоциативную память и др. При ограниченном объеме общего ресурса возникает задача выделения приоритетного запроса и первоочередного предоставления ресурса процессору, выставившему такой запрос. Для решения данной задачи проектируется аппаратный быстродействующий арбитр на основе таких принципов, как параллелизм и конвейеризация вычислений в пределах операционной части устройства-арбитра.

Постановка задачи и цель работы. Аппаратный быстродействующий арбитр рассматривается как единое устройство (черный ящик), получающее на вход запросы (вектор запросов) и выдающее после обработки двоичное слово подтверждений (вектор подтверждений), содержащее единственную логическую „1“ для найденного приоритетного запроса. В работе принимается модель вычисления приоритетной логической „1“ в соответствии со статическими весами запросов, которые выставляют процессоры на получение общего ресурса. Отличительная особенность проектируемого быстродействующего арбитра связана с ориентацией на большую разрядность двоичного слова запросов n ($n > 64$) и созданием технического решения, обеспечивающего эффективный поиск приоритетной логической „1“ за счет обработки не весовых двоичных данных.

Общий подход к решению. Предлагаемый подход к проектированию быстродействующего арбитра заключается в разработке структуры устройства, в котором процесс выделения приоритетной (старшей) логической „1“ из входного двоичного слова запросов разби-

вается на ряд пространственно распределенных процессов поиска приоритетной логической „1“ в каждом из выделенных локальных слов. Данные локальные слова последовательно примыкают друг к другу, образуя двоичное слово запросов. Особенность подхода состоит в том, что разбиение происходит автоматически, вычисляется начальное значение (стартовая точка) для каждого отдельного процесса, что определяет их самостоятельность и позволяет параллельно обрабатывать локальные слова.

Проектирование быстродействующего арбитра. На рис. 1 приведена общая схема процесса арбитража при большой разрядности двоичного слова запросов n . В работе предлагается двухуровневая организация процесса арбитража: на первом уровне выполняется вычисление стартовых точек по входному двоичному слову запросов. Двоичное слово запросов разрядностью в n бит разбивается на g групп (локальных слов), каждая группа разрядностью r бит. Данный процесс получил название „сжатие двоичного слова запросов“.



Рис. 1

Сжатое слово запросов разрядностью g бит подлежит обработке параллельным арбитром, схема которого для малых значений разрядности известна [3, 4] и не является предметом рассмотрения настоящей статьи.

Работа параллельного арбитра заключается в выделении приоритетной логической „1“ в сжатом g -разрядном слове запросов. Все биты полученного g -разрядного сжатого слова запросов являются стартовыми точками для параллельно выполняемых процессов арбитража второго уровня вычислений. На втором уровне осуществляется параллельная обработка локальных слов разрядностью r бит и формируется выходное двоичное слово подтверждений разрядностью n бит. Для параллельно-конвейерной обработки локальных слов разбитое по g группам значение входного двоичного слова запросов передается в параллельно-последовательный арбитр вместе с вычисленными стартовыми точками на первом уровне. В целом данная общая схема арбитража определяет конвейеризованную структуру вычислений, т.е. разбиение общего процесса вычислений на более мелкие уровни, совмещение во времени их

выполнения и выделение для каждого уровня структурно самостоятельного функционального узла [5].

Структурная схема быстродействующего арбитра приведена на рис. 2 и содержит:

- 1) входной n -разрядный регистр запросов (РгЗАПР);
- 2) r -разрядные элементы ИЛИ для сжатия двоичного слова запросов по g группам и получения сжатого g -разрядного слова запросов;
- 3) параллельный арбитр (ПАРБ), обрабатывающий g -разрядное слово запросов;
- 4) параллельно-последовательный арбитр — итеративную сеть арбитража (СЕТЬ) для выполнения параллельно-последовательного процесса арбитража по g группам, каждая группа разрядностью r бит;
- 5) выходной регистр двоичного слова подтверждений (РгПОДТВ) разрядностью n бит.

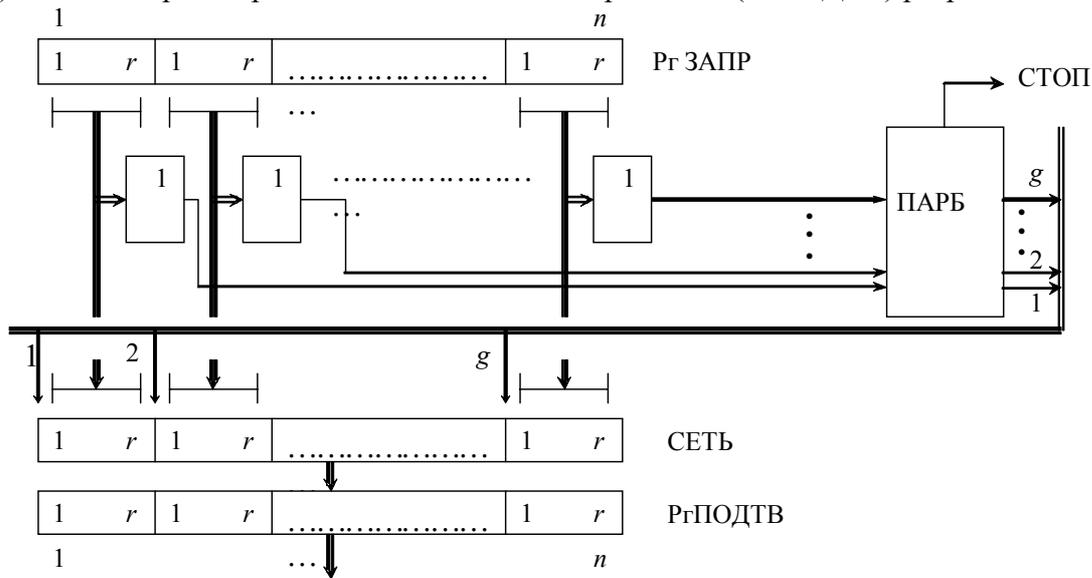


Рис. 2

При обнаружении нулевого значения сжатого слова запросов на ПАРБ быстродействующий арбитр выдает сигнал СТОП, прекращая обработку текущего двоичного слова запросов. При ненулевом значении сжатого g -разрядного слова запросов осуществляется его обработка в функциональном узле ПАРБ. Особенность ПАРБ в том, что за счет нерегулярности схемы время вычислений в данном функциональном узле не зависит от разрядности g , оно определяется временем обработки $\tau = \text{const}$ одного разряда. На выходе ПАРБ формируется промежуточное g -разрядное слово стартовых точек, содержащее единственную логическую „1“ в j -й позиции. Выделенная логическая „1“ в j -й позиции инициирует обработку j -й группы разрядностью r бит из входного слова запросов на параллельно-последовательном арбитраже. Таким образом, промежуточное g -разрядное слово стартовых точек является вторым операндом для параллельно-последовательного арбитра, принимающим на обработку как первый операнд r -разрядные группы из входного двоичного слова запросов (рис. 2).

Параллельно-последовательный арбитр организован как комбинационная схема — итеративная сеть арбитража (СЕТЬ), осуществляющая последовательное выделение приоритетной логической „1“ в пределах группы начиная со значения стартовой точки. Если значение j -й стартовой точки нулевое ($j = 1 - g$), то СЕТЬ формирует нулевое значение j -й группы в составе выходного двоичного слова подтверждений. Среди стартовых точек существует такая k -я точка ($k \in 1 - g$), имеющая значение логической „1“, которая задает в СЕТИ последовательный процесс арбитража в пределах k -й группы.

Итеративная сеть арбитража (рис. 3) представляет собой одномерный массив n ячеек, разбитых на g групп по r разрядов в каждой группе. С точки зрения нисходящего проекти-

рования ячейка $Я_i$ ($i = 1 - n$) СЕТИ представляется черным ящиком, имеющим три входа и три выхода (рис. 4). Работа СЕТИ по выделению приоритетной логической „1“ основана на параллельной работе g групп ячеек и последовательном поиске старшей логической „1“ в пределах каждой группы.

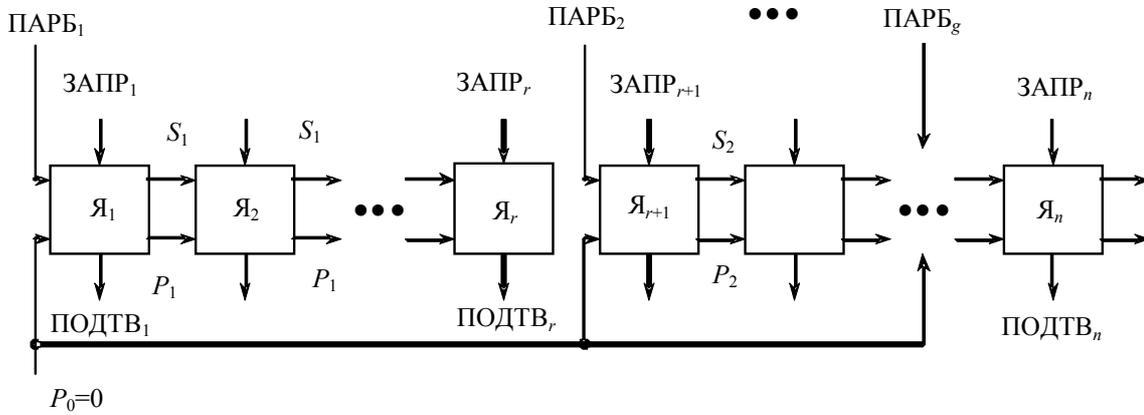


Рис. 3

Функционирование отдельной ячейки обработки бита двоичного слова запросов $ЗАПР_i$ с учетом значения стартовой точки, вычисляемой ПАРБ для j -й группы ($j = 1 - g$), сводится к вычислению бита выходного двоичного слова подтверждений $ПОДТВ_i$ ($i = 1 - n$). Работа ячейки $Я_i$ описывается таблицей истинности (S_{j-1} — входной бит инициализации поиска приоритетной логической „1“ в j -й группе, причем $S_0 = ПАРБ_j$ — стартовая точка поиска для j -й группы; S_j — выходной бит инициализации поиска приоритетной логической „1“ в j -й группе, P_{j-1} — входной признак обнаружения приоритетной логической „1“ в j -й группе, $P_0 = 0$ для всех g групп; P_j — выходной признак обнаружения приоритетной логической „1“ в j -й группе).

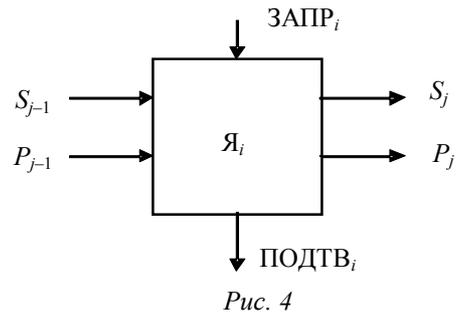


Рис. 4

Таблица истинности ячейки поиска приоритетной логической „1“

№	S_{j-1}	P_{j-1}	$ЗАПР_i$	S_j	P_j	$ПОДТВ_i$
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	0	0	0
2	0	1	0	0	0	0
3	0	1	1	0	0	0
4	1	0	0	1	0	0
5	1	0	1	1	1	1
6	1	1	0	1	1	0
7	1	1	1	1	1	0

Данная таблица имеет следующую интерпретацию. При $S_{j-1} = 0$ (первые четыре строки таблицы) поиск приоритетной логической „1“ не инициализируется, поэтому формируются нулевые значения P_j и $ПОДТВ_i$. При $S_{j-1} = 1$ поиск по j -й группе инициализируется, значение выходного бита $ПОДТВ_i$ определяется значением признака обнаружения приоритетной логической „1“ в данной группе, т.е. значением P_{j-1} . Если такой признак не был установлен в „1“, то $ПОДТВ_i = ЗАПР_i$ (четвертая и пятая строки по номерам таблицы). Одновременно с

этим (при $ЗАПР_i = 1$) выходной признак устанавливается как $P_j = 1$, запрещая тем самым последующее выделение логических „1“ в выходном слове подтверждений в пределах j -й группы (последние две строки таблицы).

Заключение. Таким образом, в результате проектирования разработан быстродействующий арбитр, ориентированный на обработку двоичных слов запросов большой разрядности ($n > 64$) и позволяющий совместить во времени процесс выделения приоритетной логической „1“ за счет организации пространственно распределенных по длине двоичного слова запросов параллельно-конвейерных вычислений. Данное устройство может найти применение в потоковых вычислительных системах [6], в ассоциативных процессорах числовой и символьной обработки данных [1, 7], в информационно-поисковых системах и системах обработки знаний при разрешении конфликтов [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корнеев В. В. Следующее поколение суперкомпьютеров // Открытые системы. 2008. № 8. С. 14—19.
2. Хорошевский В. Г. Архитектура вычислительных систем. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2005. 512 с.
3. Потемкин И. С. Функциональные узлы цифровой автоматики. М.: Энергоатомиздат, 1988. 320 с.
4. Самофалов К. Г. и др. Цифровые ЭВМ. Теория и проектирование. Киев: Выш. школа, 1989. 423 с.
5. Кравец О. Я., Подвальный Е. С., Титов В. С., Ястребов А. С. Архитектура вычислительных систем с элементами конвейерной обработки: Учеб. пособие. СПб: Политехника, 2009. 152 с.
6. Стемповский А. Л., Левченко Н. Н., Окунев А. С., Цветков В. В. Параллельная потоковая вычислительная система — дальнейшее развитие архитектуры и структурной организации вычислительной системы с автоматическим распределением ресурсов // Информационные технологии. 2008. № 10. С. 2—7.
7. Воеводин В. В., Воеводин Вл. В. Параллельные вычисления. СПб: БХВ-Петербург, 2002. 599 с.
8. Фельдман В. М. Вычислительная система реального времени для реализации программ управления сложными объектами // Информационные технологии. 2009. № 2. С. 2—8.

Сведения об авторах

- Евгений Анатольевич Титенко** — канд. техн. наук, доцент; Курский государственный технический университет, кафедра программного обеспечения вычислительной техники; E-mail: bossjohn@mail.ru
- Евгений Анатольевич Семенухин** — аспирант; Курский государственный технический университет, кафедра программного обеспечения вычислительной техники; E-mail: bossjohn@mail.ru

Рекомендована кафедрой
программного обеспечения
вычислительной техники

Поступила в редакцию
04.06.10 г.

А. А. МАЛИНИН, Н. Ю. ИВАНОВА

РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОННОГО АРХИВА КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОЛОГИИ IDEF

Разработана модель электронного архива, согласно методике, описанной в ГОСТ Р 50.1.028–2001. Приведены требования, предъявляемые к архивам конструкторской документации в приборостроении, а также рекомендованы направления развития этой модели.

Ключевые слова: электронный архив, IDEF, функциональная модель.

Постановка задачи. Задача проектирования электронного архива конструкторской документации (ЭАКД) входит в общую задачу синтеза систем, состоящую из двух подзадач: построения структуры системы и дизайна основных компонентов структуры системы.

Очевидно, что первая подзадача формулируется в зависимости от общей системной задачи и определяет общую будущую функциональность системы и функции отдельных блоков [1]. Следует исходить из того, что на начальной стадии проектирования достаточно полно представлены входные и выходные данные, программный аппарат системы еще не известен. Также следует учитывать, что основное назначение ЭАКД — обработка документопотоков, поэтому логично в основу структуры системы заложить принцип распределения и трансформации потоков информации в системе.

Полученная таким образом картина распределения позволяет сформировать структуру системы, так как информационным потокам соответствуют программные модули: функциональные блоки, с помощью которых формируются модули, и внутренняя логика этих модулей, которыми она определяется. Таким образом, начальный этап синтеза состоит в

- определении типовых структур первого уровня;
- построении аппарата оптимальной декомпозиции исходных структур второго и последующих уровней.

Однако все проблемы синтеза могут быть решены только после рассмотрения основных операций, выполняемых в ЭАКД, типовых процессов, происходящих в системе и наиболее характерных режимов их функционирования [2].

Особенности работы с документами САПР. При проектировании специализированных систем, которые будут учитывать особенности САПР и создаваемых ими документов, необходимо прежде всего выявить специфику предметной области [3]. В результате анализа источников, программного обеспечения и бумажного варианта документооборота на конструкторских предприятиях был сделан ряд выводов:

- электронный документооборот в САПР — это комплекс взаимосвязанных модулей, которые обеспечивают ведение документации по проекту от начала до конца;
- в системах автоматизированного проектирования крайне важна большая гибкость и настраиваемость документов под конкретные нужды предприятия [4];
- электронные системы автоматизированного проектирования должны быть оснащены справочниками, легкообновляемыми и доступными для разных категорий пользователей [5];
- каждый электронный документ может быть объектом простейших операций — ознакомления, визирования и автоматической регистрации;
- каждый документ может иметь несколько версий, и каждый документ может быть главным (родительским) для другого документа;

- некоторые типы документов должны обладать возможностью постановки на контроль исполнения;
- каждый документ должен иметь конечный набор прав доступа, которые разграничивают его область видимости и доступности для конкретных пользователей и групп;
- к любому документу САПР может быть обеспечен доступ через сеть Интернет с использованием подсистем защиты и верификации пользователей;
- пользователь, ответственный за документ, должен в любой момент времени знать, где находится документ, его статус и состояние;
- значительные объемы графической информации САПР могут храниться отдельно в специальных структурах для более быстрого доступа к ним;
- любой документ в системе должен иметь персональный идентификатор, который не изменяется в процессе работы и обязательно указывается во всех документах, связанных с данным;
- ни один документ не может быть полной копией другого — их персональные идентификаторы должны различаться;
- документ может состоять из нескольких объектов разных форматов;
- процедуры поиска должны осуществлять поиск и выборку документов по заданным критериям в оптимальные сроки.

Все вышеперечисленные особенности должны быть учтены при разработке структуры, в которой соблюдается правило единственности подхода и единственности исполнения [6]. Работа с любыми документами выполняется аналогичным образом как на пользовательском, так и на программном уровне.

Функциональная модель. Опишем модель электронного архива, согласно ГОСТ Р 50.1.028–2001 „Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования“.

На вход системы поступают информационные потоки:

- запросы прав на чтение/запись данных или документов;
- объектные запросы открытых интерфейсных методов ЭАКД;
- широковещательные сообщения о появлении новых данных или документов;
- данные об объектах;
- данные о структуре объектов;
- файлы.

Управляющим воздействием являются нормативные документы, регламентирующие работу в ЭАКД, а для некоторых процессов, рассматриваемых далее при декомпозиции функциональной модели, управляющее воздействие формируется другими процессами ЭАКД.

Исполнительным механизмом являются ресурсы и персонал предприятий, а также программные и аппаратные средства. В результате управляющего воздействия на входящие информационные потоки и работы исполнительных механизмов на выходе ЭАКД формируются документы (проекты, комплекты, их атрибуты).

Функциональная модель ЭАКД представлена на рис. 1 в виде древовидной структуры, узлами которой являются процессы. Иерархия этой структуры соответствует иерархии процессов функционирования ЭАКД.

Декомпозиция 1-го уровня функциональной модели ЭАКД, выполненная согласно методике IDEF0, приведена на рис. 2. Этот уровень декомпозиции включает следующие процессы:

- импорт и экспорт электронных документов;
- ведение архива электронной документации;
- ведение объектной модели технической документации;
- администрирование;
- функционирование объектных сервисов.



Рис. 1

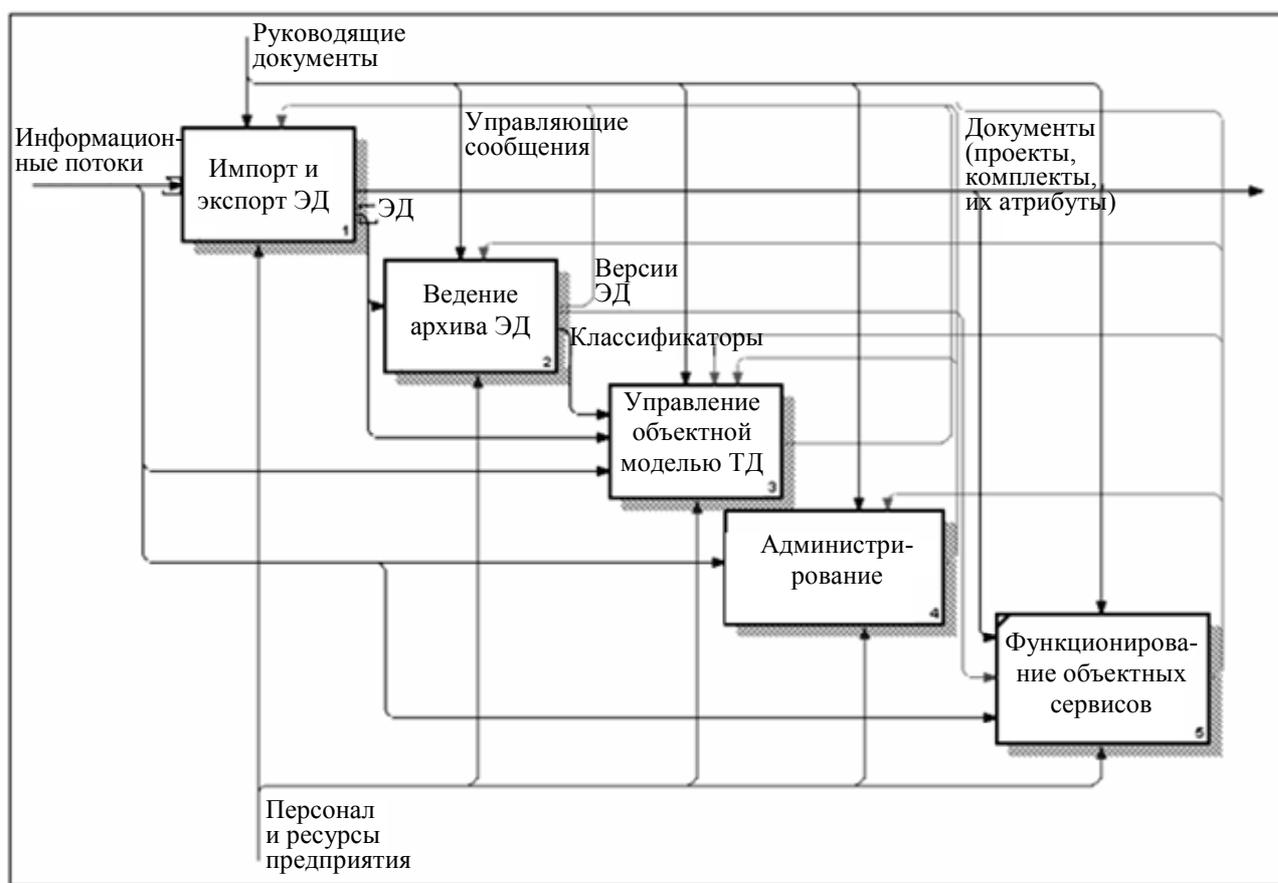


Рис. 2

На вход процесса „Импорт и экспорт электронных документов“ поступают следующие информационный потоки:

- запросы прав на чтение/запись данных или документов;
- данные о документах, в том числе вводимые в диалоговом режиме;
- файлы;
- нормативно-справочная информация (НСИ).

Управляющее воздействие на процесс импорта/экспорта информации оказывают нормативные документы, а также управляющие сигналы, поступающие по линиям обратной связи от следующих процессов:

- ведение архива;
- управление объектной моделью;
- администрирование;
- функционирование объектных сервисов.

При импорте данных в ЭАКД автоматизируются следующие процессы:

- анализ и преобразование поступающих данных;
- проверка целостности и корректности поступающих данных;
- формирование атрибутивных данных электронных документов (ЭД),
- запись файлов в БД ЭАКД.

При экспорте данных из ЭАКД производится анализ поступившего запроса, по результатам которого формируются экспортируемые данные.

В процессе экспорта и импорта для всех процессов формируются управляющие воздействия в виде сигналов, поступающие по линиям обратной связи от процессов, приведенных на рис. 2.

На вход процесса „Ведение архива электронной документации“ поступают следующие сигналы и данные:

- запросы прав на чтение/запись данных или документов;
- объектные запросы открытых интерфейсных методов, публикуемых ЭАКД;
- выходные данные процесса импорта — электронные документы.

Управляющее воздействие на процесс ведения архива информации оказывают нормативные документы, а также управляющие сигналы, поступающие по линиям обратной связи от следующих процессов:

- импорт/экспорт;
- управление объектной моделью;
- администрирование;
- функционирование объектных сервисов.

Выходными сигналами и данными процесса ведения архива являются:

— управляющие сигналы — широковещательные сообщения для организации линий обратной связи по управляющему воздействию для следующих процессов: импорт/экспорт, управление объектной моделью, администрирование, функционирование объектных сервисов;

— информация классификаторов для процесса ведения объектной модели;

— информация о версиях документов для процесса функционирования объектных сервисов.

При ведении архива в ЭАКД автоматизируются следующие процессы:

- ведение классификаторов;
- ведение картотеки проектов;
- хранение и управление версиями ЭД;
- поиск ЭД.

На вход процесса управления объектной моделью технической документации (ТД) поступают:

- запросы прав на чтение/запись данных или документов;
- объектные запросы открытых интерфейсных методов, публикуемых ЭАКД;
- выходные данные процесса импорта.

При управлении объектной моделью в ЭАКД автоматизируются следующие процессы:

- синтаксический анализ;
- ведение объектной модели;
- предоставление селективного доступа.

На вход процесса администрирования поступают:

- запросы прав на чтение/запись данных или документов;
- объектные запросы открытых интерфейсных методов, публикуемых ЭАКД.

На выходе процесса администрирования формируются управляющие воздействия в виде сигналов для передачи по линиям обратной связи процессам, приведенным на рис. 2.

При администрировании в ЭАКД выполняются следующие процессы:

— установка прав администраторов. При этом в качестве исполнительного механизма выступают администратор ЭАКД и программно-аппаратные средства его рабочего места;

— установка прав групп и пользователей. При этом в качестве исполнительного механизма выступают администратор ЭАКД и программно-аппаратные средства его рабочего места, администраторы подразделений и программно-аппаратные средства их рабочих мест (администратор ЭАКД вправе контролировать работу администраторов подразделений, при необходимости выполнять ее и переназначать группы и пользователей, внесенные администраторами подразделений; последние не имеют возможности отменять административных действий администратора ЭАКД);

— пользователь одной группы может выполнять различные роли в различных разделах информации ЭАКД, причем эти роли, с одной стороны, могут быть связаны с правами доступа, с другой — группового распределения, недостаточно. При этом в качестве исполнительного механизма выступают администратор ЭАКД и программно-аппаратные средства его рабочего места, администраторы подразделений и программно-аппаратные средства их рабочих мест.

Важным процессом ЭАКД является функционирование объектных сервисов. Объектные сервисы должны обеспечивать объектное взаимодействие подсистем ЭАКД между собой и с внешними системами.

Входными данными и сигналами процесса функционирования объектных сервисов являются выходные данные процессов администрирования, ведения архива, экспорта/импорта, управления объектной моделью.

Управляющим воздействием процессов администрирования и функционирования объектных сервисов являются:

- положения нормативных документов, регламентирующих работу ЭАКД;
- управляющие сообщения, поступающие по линиям обратной связи от других процессов, приведенных на рис. 2.

Направления применения и развития модели ЭАКД. Как видно, функциональная модель не накладывает ограничений на технологии и способы разработки конечных приложений, поэтому решение о работе с теми или иными средствами разработки, СУБД, драйверами доступа к данным, компиляторами, операционным системами принимается отдельно в каждом конкретном случае.

Разработка функциональной модели позволяет решить первую подзадачу синтеза систем — построение структуры — и описать функциональные требования к их основным компонентам.

Таким образом, в статье сформулирована задача проектирования электронного архива конструкторской документации, описаны особенности работы с документами, созданными в

САПР, рассмотрены информационные потоки, их трансформация и взаимодействие с процессами системы.

Описан лишь первый уровень декомпозиции функциональной модели. Из поставленной задачи следует, что степень детализации модели должна быть достаточной для построения структуры системы и дизайна основных компонентов структуры системы. Непосредственной программной реализацией обычно занимаются специалисты, не задействованные в разработке функциональной модели. Поэтому должна исключаться неоднозначная трактовка принципов функционирования декомпозиции процессов. Тем не менее это не означает, что нижние уровни модели должны содержать только атомарные операции — такая степень детализации в большинстве случаев нецелесообразна с точки зрения эффективности использования ресурсов.

Уже на этапе моделирования системы можно оценить экономическую эффективность внедрения ЭАКД — предлагается применить методику расчета дисконтированной прибыли — результата, приведенного к единому времени с использованием норматива приведения, численно равного процентной ставке [7]. Указанная методика позволит оценить сроки окупаемости, направления повышения эффективности работы предприятия и как следствие — целесообразность разработки и внедрения ЭАКД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Норенков И. П.* Основы автоматизированного проектирования. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 333 с.
2. *Фролов В. Н., Львович Я. Е., Меткин Н. П.* Автоматизированное проектирование технологических процессов и систем производства РЭС. М.: Высш. школа, 1991. 462 с.
3. *Гавердовский А.* Концепция построения систем автоматизации документооборота // Открытые системы. 1997. № 1.
4. *Петров А., Галин И.* Электронная эксплуатационная документация: технологии и программные средства разработки и сопровождения // САПР и графика. 2002. № 11.
5. *Иваненчук А. Ю., Малинин А. А.* Структура и функциональные особенности электронных архивов // 4-я Конф. молодых ученых. СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. 116 с.
6. *Норенков И. П., Кузьмик П. К.* Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 319 с.
7. *Непомнящий Е. Г.* Инвестиционное проектирование: Учеб. пособие. Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2004. 139 с.

Сведения об авторах

- Алексей Анатольевич Малинин** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем; E-mail: a.malinin@gmail.com
- Наталья Юрьевна Иванова** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем; доцент; E-mail: ivnatur@gmail.com

Рекомендована кафедрой
проектирования компьютерных систем

Поступила в редакцию
08.02.10 г.

И. В. МАНЫЛОВ

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ РАСПОЗНАВАНИЯ КЛАССОВ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКЕ АЭРОФОТОСНИМКОВ

Сравниваются алгоритмы расчета евклидова расстояния и расчета расстояния Махаланобиса с целью повышения точности дешифровки аэрофотоснимков, используемых для оценки состояния сельскохозяйственных земель.

Ключевые слова: аэрофотоснимок, сельское хозяйство, цифровая классификация, дешифровка, анализ изображений, автоматизация.

В последнее время возросла потребность в достоверной информации о состоянии земель сельскохозяйственного назначения и в оценке их использования как для обеспечения деятельности агропромышленных предприятий, так и с целью охраны окружающей среды. Многие хозяйства по-прежнему отдают предпочтение полевым исследованиям и ручной дешифровке снимков, однако эти методы имеют целый ряд недостатков, к основным из которых можно отнести следующие:

- высокий субъективизм результатов, т.е. зависимость от опыта и предпочтений дешифровщика;
- низкая скорость получения результатов дешифровки;
- возрастающая стоимость дешифровки, связанная с увеличением площади сельскохозяйственных земель или количества снимков [1].

Алгоритмы автоматизированной дешифровки средствами вычислительной техники облегчают обработку и анализ информации, повышают скорость и достоверность результатов. Поэтому автоматизированная дешифровка является наиболее перспективной и востребованной в сегодняшнее время.

Чтобы выделить на аэрофотоснимке структуры площадей или обнаружить изменения, необходимо анализировать характеристики пространственного распределения пикселей изображения. В настоящее время одним из наиболее разработанных методов такого анализа является классификация объектов изображения.

Задача классификации — формализованная, в ней присутствует множество объектов, разделенных по некоторым признакам на классы. Задано конечное множество объектов (выборка), для которых известно, к каким классам они относятся, принадлежность остальных объектов неизвестна. Требуется построить алгоритм, позволяющий классифицировать произвольный объект из исходного множества.

Алгоритм расчета расстояния между объектами является ключевым элементом задачи классификации (от него зависит, к какому классу будет отнесена исследуемая точка аэрофотоснимка), алгоритм оценивает несходство, или расстояние между объектами [2].

При проведении съемки сверхлегкими летательными аппаратами, как правило, используется только три канала информации в видимом диапазоне спектра, но разрешение этих снимков значительно выше, чем при съемке из космоса. Поэтому далее в статье будут рассмотрены два алгоритма классификации именно аэрофотоснимков, полученных с высоты 1—3 км и имеющих три канала информации: красный, зеленый и синий (R , G и B) — алгоритмы расчета евклидова расстояния и расчета расстояния Махаланобиса.

Выбор данных алгоритмов обусловлен тем, что формула расчета евклидова расстояния — одна из самых простых и широко применяемых для расчета расстояния в N -мерном

пространстве, а формула расчета расстояния Махаланобиса — одна из самых сложных. Первый алгоритм требует значительно меньше вычислительных ресурсов, чем второй.

Для классификации аэрофотоснимков будем использовать метод классификации с обучением. Для этого перед проведением классификации необходимо выбрать на исходном снимке эталонные области (обучающие выборки) и присвоить им класс. Количество классов зависит от того, сколько областей необходимо получить на результирующем снимке. Такой подход позволяет не учитывать при сравнении алгоритмов расчета режимы съемки.

Для каждой обучающей выборки предварительно рассчитывается центр тяжести по следующей формуле:

$$\mu_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m X_{ji}, \quad (1)$$

где m — количество точек в обучающей выборке; i — канал аэрофотоснимка.

Рассчитывается расстояние между центром тяжести обучающей выборки и исследуемой точкой аэрофотоснимка [3].

Алгоритм расчета евклидова расстояния. Наиболее простым алгоритмом расчета является евклидово расстояние, которое вычисляется по формуле:

$$D(X_j, X_i) = \sqrt[2]{\sum_{k=1}^N (X_{ki} - X_{kj})^2}, \quad (2)$$

где N — размерность пространства; X_{ki} , X_{kj} — значения объектов i и j в k -м измерении.

Для снимков с тремя каналами R , G , B имеем:

$$D(X_j, X_i) = \sqrt[2]{(X_{Ri} - X_{Rj})^2 + (X_{Gi} - X_{Gj})^2 + (X_{Bi} - X_{Bj})^2}, \quad (3)$$

где X_{Ri} , X_{Rj} — значение канала R объекта i и j ; X_{Gi} , X_{Gj} — значение канала G объекта i и j ; X_{Bi} , X_{Bj} — значение канала B объекта i и j .

Как видно из формулы алгоритма расчета евклидова расстояния, не учитывается ориентация точек обучающей выборки в пространстве [4]. Для обучающих выборок, которые состоят из точек, равноудаленных от центра тяжести, это не имеет значения. Но для реальных обучающих выборок, в которых присутствуют точки с разными значениями цветовых составляющих R , G , B , это приводит к увеличению количества неверно классифицированных областей аэрофотоснимков.

В качестве примера возьмем две обучающие выборки X_1 и X_2 (луг и дорога). Взаимное расположение точек обучающей выборки в трехмерном пространстве R , G и B показано на рис. 1: указана произвольная точка N и два расстояния $D(N, X_1)$ и $D(N, X_2)$, вычисленные по формуле (3). Расстояние $D(N, X_1)$ меньше расстояния $D(N, X_2)$, и точка N будет классифицирована как класс X_1 . Видно, что точка N находится ближе к классу X_2 и должна быть отнесена к нему. Такая ошибка классификации вызвана тем, что обучающие выборки имеют эллипсоидное распределение точек в пространстве.

Алгоритм расчета расстояния Махаланобиса. Для более точной классификации аэрофотоснимков необходимо учитывать размеры области, занимаемой точками обучающей выборки, и ориентацию этой области в пространстве. Такой алгоритм впервые был сформулирован индийским статистиком Махаланобисом в 1936 г. и называется расстоянием Махаланобиса [5].

Как видно из формулы алгоритма расчета евклидова расстояния, не учитывается ориентация точек обучающей выборки в пространстве [4]. Для обучающих выборок, которые состоят из точек, равноудаленных от центра тяжести, это не имеет значения. Но для реальных обучающих выборок, в которых присутствуют точки с разными значениями цветовых составляющих R , G , B , это приводит к увеличению количества неверно классифицированных областей аэрофотоснимков.

В качестве примера возьмем две обучающие выборки X_1 и X_2 (луг и дорога). Взаимное расположение точек обучающей выборки в трехмерном пространстве R , G и B показано на рис. 1: указана произвольная точка N и два расстояния $D(N, X_1)$ и $D(N, X_2)$, вычисленные по формуле (3). Расстояние $D(N, X_1)$ меньше расстояния $D(N, X_2)$, и точка N будет классифицирована как класс X_1 . Видно, что точка N находится ближе к классу X_2 и должна быть отнесена к нему. Такая ошибка классификации вызвана тем, что обучающие выборки имеют эллипсоидное распределение точек в пространстве.

Для более точной классификации аэрофотоснимков необходимо учитывать размеры области, занимаемой точками обучающей выборки, и ориентацию этой области в пространстве. Такой алгоритм впервые был сформулирован индийским статистиком Махаланобисом в 1936 г. и называется расстоянием Махаланобиса [5].

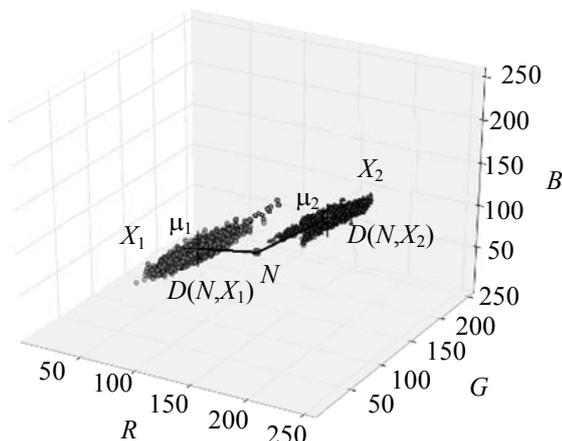


Рис. 1

Формально расстояние Махаланобиса от многомерного вектора $\mathbf{X}=(X_1, X_2, X_3, \dots, X_N)^T$ до множества со средним значением $\mu=(\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_N)^T$ и матрицей ковариации \mathbf{S} определяется следующим образом:

$$D_M(X) = \sqrt{(X - \mu)^T \mathbf{S}^{-1} (X - \mu)}, \quad (4)$$

где $D_M(X)$ — расстояние Махаланобиса.

Ковариационная матрица в теории вероятностей — это матрица, составленная из попарных ковариаций элементов двух случайных векторов и являющаяся обобщением дисперсии для многомерной случайной величины. Собственные векторы и собственные числа этой матрицы позволяют оценить размеры и форму облака распределения такой случайной величины, аппроксимировав его эллипсоидом. Из рис. 1 видно, что аппроксимация эллипсоидом очень хорошо описывает массив точек обучающих выборок X_1 и X_2 .

Расстояние Махаланобиса — это расстояние между заданной точкой и центром тяжести, деленное на ширину эллипсоида в направлении заданной точки. Если матрица ковариации является единичной, то расстояние Махаланобиса становится равным расстоянию Евклида. Если матрица ковариации диагональная (но необязательно единичная), то получившаяся мера расстояния равна нормализованному евклидовому расстоянию.

Оценка эффективности алгоритмов расчета расстояния. Для оценки эффективности алгоритмов было разработано программное обеспечение, которое позволяет производить классификацию объектов на аэрофотоснимках с использованием вышеописанных алгоритмов и оценивать точность распознавания классов.

Результаты классификации по алгоритму расчета евклидова расстояния отражены на рис. 2, а, по алгоритму Махаланобиса — на рис. 2, б.

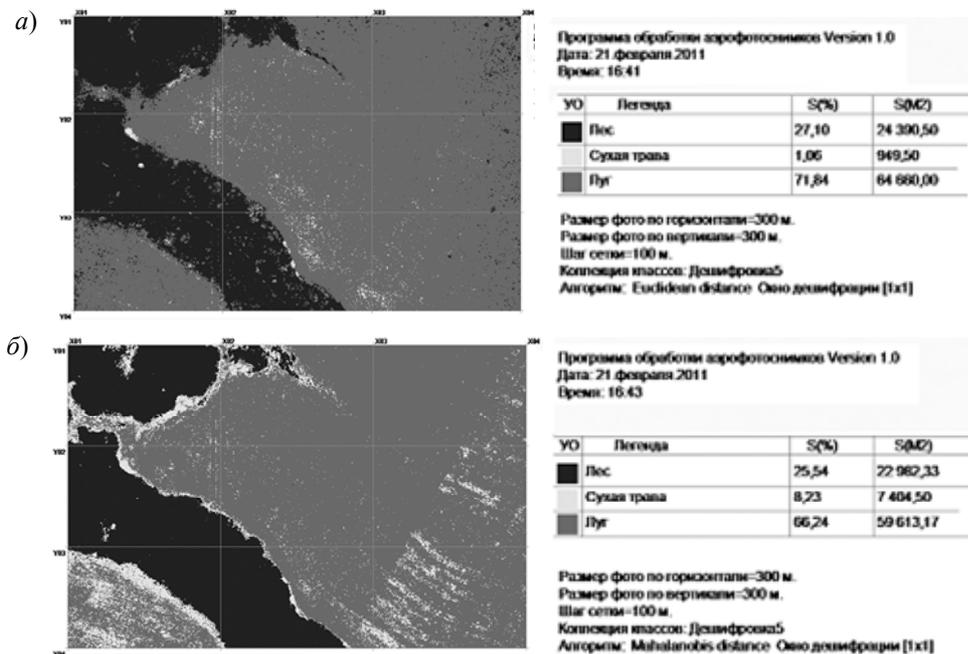


Рис. 2

Для оценки точности классификации фрагмент, показанный на рис. 2, был обработан в программе MultiSpec с использованием тех же обучающих выборок. Это обработанное фото было использовано в качестве эталона при оценке точности классификации по двум алгоритмам: построения матрицы ошибок и расчета индекса каппа-статистики.

Матрица ошибок формируется следующим образом: элемент X_{kl} матрицы ошибок равен числу пикселей класса k , распознанных как класс l . Элемент матрицы X_{kk} равен числу пикселей класса k , распознанных как класс k . Число правильно классифицированных пикселей предполагается на диагонали матрицы. На основе матрицы ошибок при обобщении результатов

правильно классифицированных точек был использован так называемый индекс каппа-статистики, вносящий поправку на случайность, он вычисляется по формуле [6]:

$$K = \frac{Z \sum_k \sum_l X_{kl} - \sum_{k=1, l=1}^m S_k T_l}{Z^2 - \sum_{k=1, l=1}^m S_i T_j}, \quad (5)$$

где Z — общее число пикселей; m — число классов; $S_k = \sum_{l=1}^m x_{kl}$ — сумма элементов k -строки;

$T_l = \sum_{k=1}^m x_{kl}$ — сумма элементов l -го столбца.

Дополнительно рассчитывается и общая точность распознавания классов (ii) по следующей формуле:

$$P_c = \frac{\sum_i X_{ii}}{Z}. \quad (6)$$

Кроме этого используется степень согласованности сравниваемых снимков на основе индекса каппа-статистики, представленная в таблице [7].

Критерии согласованности данных классификации

K	Согласованность
<0	Нет согласованности
$0-0,20$	Незначительная
$0,21-0,40$	Слабая
$0,41-0,60$	Умеренная
$0,61-0,80$	Значительная
$0,81-1,00$	Высокая

Результаты оценки точности классификации по алгоритму расчета евклидова расстояния приведены на рис. 3, а, по алгоритму Махаланобиса — на рис. 3, б.

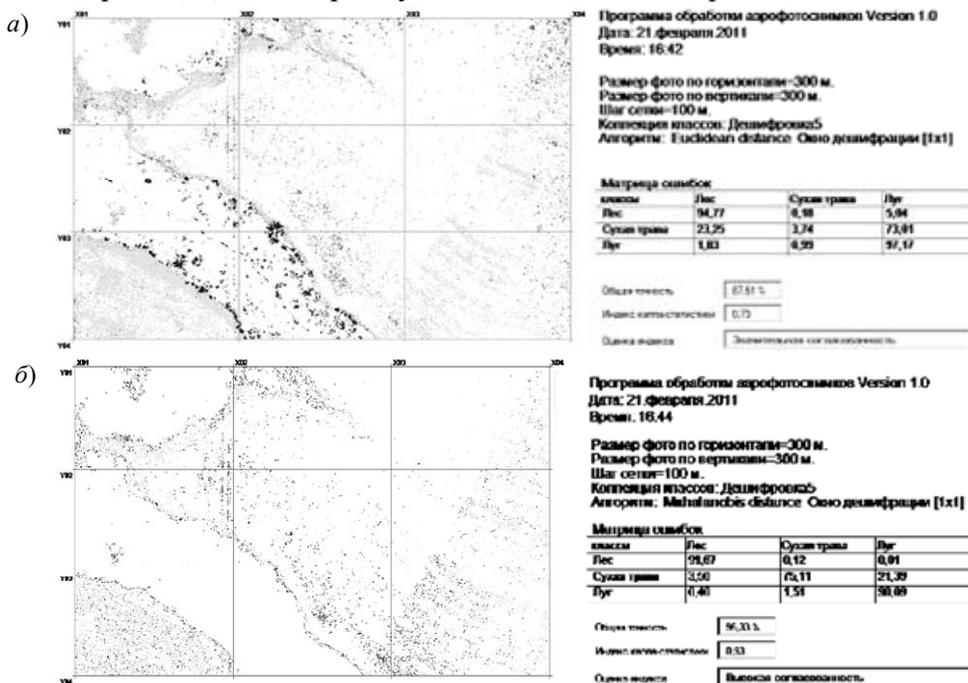


Рис. 3

Анализ матрицы ошибок показывает, что точность распознавания класса „сухая трава“ при использовании алгоритма расчета евклидова расстояния составляет всего 3,74 %, при использовании алгоритма Махаланобиса точность повышается до 75,11 %. Точность распознавания классов „лес“ и „луг“ при использовании алгоритма Махаланобиса также выше.

Для алгоритма Махаланобиса индекс каппа-статистики составил 0,93, а для евклидова расстояния всего 0,73. Следовательно, при обработке аэрофотоснимка алгоритмом Махаланобиса точность распознавания классов на 20 % лучше, чем при использовании алгоритма расчета евклидова расстояния.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что алгоритм Махаланобиса более эффективен для классификации аэрофотоснимков реальных объектов, он позволяет значительно повысить точность дешифровки различных объектов при прочих равных условиях проведения аэрофотосъемки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вандышева Н. В., Василенко Г. И., Гуров А. Ф. Мониторинг сельскохозяйственных земель на базе разно-масштабных спутниковых данных // Исследование земли из космоса. 2003. № 3. С. 73.
2. Орешкина Л. В. Обнаружение и распознавание класса объектов на многозональных изображениях дистанционного зондирования // Информатика. 2005. № 2. С. 80.
3. Пятницкий М. А. Распознавание образов и биоинформатика [Электронный ресурс]: <http://bioinformatics.ru/Data-Analysis/patrecog_bioinf.html>.
4. Методы кластерного анализа [Электронный ресурс]: <<http://kpi.ua/do/work/RGR/DATAMINING/clusteranalysismethods.html>>.
5. Расстояние Махаланобиса [Электронный ресурс]: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Расстояние_Махаланобиса>.
6. Заславский А. А., Пригарина Т. А. Оценка согласованности субъективных классификаций при заданных классах // Социология: методология, методы и математическое моделирование. 1993—1994. № 3—4. С. 90.
7. Курбанов Э. А. Оценка зарастания земель запаса республики Марий Эл по данным дистанционного зондирования [Электронный ресурс]: <<http://csfm.marstu.net/>>.

Сведения об авторе

Игорь Владимирович Маньолов

— Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра микро- и нанотехнологий аэрокосмического приборостроения; E-mail: igorman1@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
микро- и нанотехнологий
аэрокосмического приборостроения

Поступила в редакцию
24.12.10 г.

ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 656.2

Г. И. ЕМЕЛЬЯНЦЕВ, Б. А. БЛАЖНОВ, А. В. ЛОЧЕХИН, А. П. СТЕПАНОВ

ВЫРАБОТКА КУРСА ИНТЕГРИРОВАННОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ НА БАЗЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Рассматривается задача определения параметров ориентации объекта при интеграции данных инерциального измерительного модуля на микромеханических датчиках и мультиантенной приемной аппаратуры спутниковой навигационной системы при запуске интегрированной системы ориентации и навигации в условиях подвижного объекта, которая сводится к задаче начальной выставки и калибровки измерительного модуля. Приведены результаты обработки данных переходных испытаний опытного образца (разработка ЦНИИ „Электроприбор“).

Ключевые слова: микромеханические инерциальные датчики, интегрированная система ориентации и навигации, спутниковая навигационная система.

Введение. В работе [1] рассматривались схема построения и алгоритмы работы бескарданного гироскопического компаса на электростатическом гироскопе и микромеханических датчиках для применения в системах навигации подводных аппаратов. Было показано, что для реализации режима начальной выставки и калибровки коэффициентов модели дрейфов электростатического гироскопа в условиях подвижного объекта необходимо привлечение эталонных данных о параметрах ориентации (по курсу и углам качки). Требуемые значения параметров ориентации при надводном положении подводного аппарата вырабатываются в рамках интегрированной системы ориентации и навигации (ИСОН) при совместной обработке данных инерциального измерительного модуля (ИИМ) на микромеханических датчиках (ММД) и мультиантенной приемной аппаратуры (ПА) спутниковой навигационной системы (СНС).

Решение задачи определения углов качки при интеграции данных ИИМ на ММД и ПА СНС не представляет особой сложности [2], достаточно информации о скоростных измерениях от ПА СНС. Проблемой является выработка курса с требуемой точностью вследствие значительного уровня погрешностей (порядка 0,1—0,01 °/с) микромеханических гироскопов (ММГ). Для ее преодоления в настоящее время и привлекается мультиантенная ПА СНС с фазовыми измерениями.

Существуют различные схемы построения ПА СНС с фазовыми измерениями и разнесенными антеннами, например, интегрированная система Seapath 200 [3] норвежской фирмы Seatex AS для морских судов, которая использует мультиантенную ПА СНС с фазовыми измерениями на несущей частоте. Из отечественных разработок следует выделить аналогичную ПА СНС МРК-11 (разработка Красноярского государственного технического университета и НИИ радиотехники).

В современных GPS-компасах используется автономная выработка параметров ориентации объекта с определенной дискретностью. При этом требуется решение проблемы неоднозначности фазовых измерений. Известны различные способы решения данной проблемы [4, 5]. Все они требуют одновременной обработки фазовых измерений от группировки навигационных спутников (НС), а также достаточно сложного программного обеспечения. В предлагаемой работе проблема неоднозначности фазовых измерений ПА СНС решается с опорой на данные ИИМ на ММД.

Постановка задачи, исходные положения. Рассмотрим задачу определения параметров ориентации объекта при интеграции данных ИИМ на ММД и мультиантенной ПА СНС при запуске ИСОН в условиях подвижного объекта, которая сводится к задаче начальной выставки и калибровки ИИМ. При оценке точности ИСОН используются реальные данные мореходных испытаний ИИМ на ММД и мультиантенной ПА СНС.

В состав ИСОН входят ИИМ на ММД (разработки ЦНИИ „Электроприбор“) приемники СНС (ОАО „РИРВ“ и фирмы Ashtech). Бескарданный ИИМ (рис. 1) состоит из корпуса, платы чувствительных элементов (ЧЭ), на которой размещены гироскопы и акселерометры фирмы Analog Devices (ADXRS150 и ADXL105): ММГ с дрейфом уровня 0,1 °/с и ММА с уровнем погрешности 0,03 м/с², обеспечивающая электроника, а также платы, содержащей контроллер на базе сигнального процессора TMS320F2812, осуществляющего обработку навигационной информации.

Первые и вторые разности фазовых измерений ПА СНС формируются с помощью двух пространственно разнесенных антенн (опорной A_0 и A_1) и двух подключенных к ним приемников Ashtech G12 и „Котлин“.

Алгоритмы реального времени, реализованные в вычислителе ИИМ, позволяют решать задачи ориентации и навигации с частотой 100 Гц при поступлении данных от ПА СНС с частотой до 10 Гц. Алгоритмы реального времени, реализованные в приемниках СНС, позволяют решать задачу определения координат, скорости и времени по сигналам СНС с частотой 1 Гц. Для решения в ИСОН задачи ориентации объекта измерения фазы сигнала от обоих приемников СНС осуществлялись на частоте 10 Гц. Сигнал с частотой 1 Гц из Ashtech G12 подавался в ИИМ для обеспечения синхронизации информационных потоков.

Алгоритмическое обеспечение задачи совместной обработки данных ИИМ и ПА СНС
Скоростные измерения:

$$z_{V_i}(t_{k+1}) = [\nabla S_i^u(t_{k+1}) - \nabla S_i^c(t_{k+1})] / dT, \quad (1)$$

где $\nabla S_i^c(t_{k+1})$, $i = E, N, H$ — приращения декартовых координат объекта в проекциях на географические оси, измеряемые в доплеровском канале ПА СНС с интервалом

$dT = t_{k+1} - t_k = 1$ с; $\nabla S_i^u(t_{k+1}) = \int_{t_k}^{t_{k+1}} V_i^u(\tau) d\tau$ — приращения декартовых координат, вычисляемые по данным ИИМ о составляющих вектора линейной скорости V_i^u движения объекта, приведенных к точке размещения на объекте опорной A_0 антенны ПА СНС.



Рис. 1

Соотношения (1) могут быть приведены к виду:

$$z_{V_i}(t_{k+1}) = \Delta V_i(t_k + dT/2) - \delta \left[\nabla S_i^c(t_{k+1}) \right] / dT = \Delta V_i(t_{k+1}) - v_{V_i}(t_{k+1}), \quad (2)$$

где ΔV_i — погрешности ИИМ по составляющим вектора линейной скорости; $\delta \left[\nabla S_i^c(t_{k+1}) \right] / dT$ — погрешности доплеровского канала ПА СНС; $v_{V_i}(t_{k+1}) = [\Delta V_i(t_{k+1}) - \Delta V_i(t_k + dT/2)] + \delta \left[\nabla S_E^c(t_{k+1}) \right] / dT$ — реальные шумы скоростных измерений.

Позиционные измерения:

$$\left. \begin{aligned} z_\varphi(t_{k+1}) &= \varphi^u(t_{k+1}) - \varphi^c(t_{k+1}) = \Delta\varphi(t_{k+1}) + v_\varphi(t_{k+1}), \\ z_\lambda(t_{k+1}) &= \lambda^u(t_{k+1}) - \lambda^c(t_{k+1}) = \Delta\lambda(t_{k+1}) + v_\lambda(t_{k+1}), \\ z_h(t_{k+1}) &= h^u(t_{k+1}) = \Delta h(t_{k+1}) + v_h(t_{k+1}), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $\varphi^j, \lambda^j, h^j$ ($j = u, c$) — географические координаты места объекта (широта, долгота и высота), вычисляемые соответственно по данным ИИМ, приведенные к точке размещения на объекте A_0 и СНС; $\Delta\varphi, \Delta\lambda, \Delta h$ — погрешности ИИМ по координатам; $v_\varphi(t_{k+1}) = -\delta\varphi^c(t_{k+1})$, $v_\lambda(t_{k+1}) = -\frac{1}{\cos\varphi(t_{k+1})} \delta W^c(t_{k+1})$ — погрешности дальномерного канала ПА СНС; $v_h(t_{k+1})$ — динамическая составляющая вертикальной качки морского надводного объекта (с точностью до превышения геоида).

Для вторых разностей измеренных (по данным двух приемников СНС) значений фазовых измерений имеем [6]:

$$\nabla s_{i,i+1}^z = s_i^z - s_{i+1}^z, \quad (4)$$

где s_i^z — вычисленное по измерениям разности фаз сигнала НС_i на разнесенные антенны значение направляющего косинуса орта \mathbf{s}_i (задающего направление на НС_i).

Следует заметить, что формирование вторых разностей фазовых измерений необходимо для исключения влияния расхождения шкал времени опорных генераторов у двух приемников СНС.

С другой стороны, располагая данными о декартовых координатах точки размещения на объекте опорной антенны, значениями параметров ориентации (K — курс, ψ , θ — углы качки) и соответственно матрицы ориентации $\mathbf{C}_h^o(K, \psi, \theta)$ объекта, полученными от ИИМ, а также известными координатами НС_i в гринвичской системе координат (от ПА СНС), можно рассчитать направляющие косинусы орта \mathbf{s}_i в гринвичской \mathbf{s}_{ie} , географической \mathbf{s}_{ih} и связанной \mathbf{s}_{io} с объектом системах координат [6], а также сформировать затем расчетное значение направляющего косинуса орта \mathbf{s}_i :

$$s_i^R = (\mathbf{b}_o)^T \mathbf{s}_{io}, \quad (5)$$

где \mathbf{b}_o — значения направляющих косинусов вектора \mathbf{b} в связанных с объектом осях

$$\mathbf{b}_o = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{(x_{A_1} - x_{A_0})^2 + (y_{A_1} - y_{A_0})^2 + (z_{A_1} - z_{A_0})^2}} \begin{bmatrix} x_{A_1} - x_{A_0} \\ y_{A_1} - y_{A_0} \\ z_{A_1} - z_{A_0} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Здесь $[x_{A_1}, y_{A_1}, z_{A_1}]^T$, $[x_{A_0}, y_{A_0}, z_{A_0}]^T$ — известные декартовы координаты точки расположения антенн A_1 , A_0 относительно центра масс объекта в связанных осях.

Для вторых разностей расчетных значений фазовых измерений получим

$$\nabla s_{i,i+1}^R = s_i^R - s_{i+1}^R. \quad (7)$$

Сравним расчетные и измеренные значения вторых разностей фазовых измерений и сформируем искомые разностные измерения

$$z_{i,i+1} = \nabla s_{i,i+1}^R - \nabla s_{i,i+1}^z, \quad (8)$$

которые содержат погрешности решения ИИМ задачи ориентации объекта (погрешности ΔC_h^o матрицы ориентации, однозначно связанные с погрешностями аналитического построения географического сопровождающего трехгранника, α, β, γ ; где α — погрешность по курсу, β, γ — погрешности построения вертикали места), погрешности $\Delta b_y, \Delta b_z$ ориентации базы \mathbf{b} относительно связанных с объектом осей, неоднозначности вторых разностей фазовых измерений $(\lambda_{i+1}\eta_{i+1} - \lambda_i\eta_i)/|\mathbf{b}|$ (где λ_i — длина волны излучаемого НС_i сигнала, η_i — целое число длин волн — собственно неоднозначность в фазовых измерениях) и шумы измерений.

Если начальные погрешности ИИМ по навигационным параметрам и параметрам ориентации объекта малы (например, по курсу — порядка 10° при использовании магнитных датчиков, по углам качки — 3°), допустима линеаризация измерений (8). Предварительная обработка разностных измерений (8) заключается в исключении исходной неоднозначности фазовых измерений с точностью до одной длины волны.

Поскольку известно, что составляющая измерений, обусловленная погрешностями ИИМ, вместе с шумами при расстоянии между антеннами до нескольких метров составляет менее одной длины волны излучаемого НС_i сигнала в значениях приведенного измерения $z_{i,i+1}|\mathbf{b}|$, то, исключив целое число $(\eta_{i+1} - \eta_i)$ из значения $z_{i,i+1}|\mathbf{b}|/\lambda_{i+1}$ и оставив его дробную часть $\tilde{z}_{i,i+1}|\mathbf{b}|/\lambda_{i+1}$, можно уменьшить из восстановленных измерений $\tilde{z}_{i,i+1}$ неоднозначность фазовых измерений до уровня одной длины волны плюс $\delta\lambda_{i+1}\eta_i/|\mathbf{b}|$, где $\delta\lambda_{i+1} = \lambda_{i+1} - \lambda_i$ — разность длин волн излучаемых НС_i сигналов. Остаточная неоднозначность фазовых измерений в пределах одной длины волны включается в число оцениваемых параметров. Следует заметить, что для обеспечения устойчивости процедуры нахождения оценок погрешностей ориентации из измерений (8) необходимо на каждом шаге формирования измерений значениям $\nabla s_{i,i+1}^z$, содержащим неоднозначности фазовых измерений, присваивать такой же знак, как и у значений $\nabla s_{i,i+1}^R$.

Значения $\tilde{z}_{i,i+1}$ вместе с разностными измерениями по навигационным параметрам (1), (3) поступают для последующей обработки с использованием алгоритмов обобщенного фильтра Калмана (ФК). Оценки, вырабатываемые в ФК, поступают в обратную связь для коррекции погрешностей параметров ориентации, навигационных параметров и коррекции измерений $\tilde{z}_{i,i+1}$, а также компенсации погрешностей гироскопов и акселерометров.

При разнесении двух антенн ПА СНС в осях объекта (база установлена по поперечной оси x_o) номинальные \mathbf{b}_o^m и приборные \mathbf{b}_o значения направляющих косинусов вектора \mathbf{b} в связанных с объектом осях будут равны

$$\mathbf{b}_o^m = \begin{bmatrix} b_x^m \\ b_y^m \\ b_z^m \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b}_o = \mathbf{b}_o^m + \Delta\mathbf{b}_o, \quad \Delta\mathbf{b}_o = \begin{bmatrix} \Delta b_x \\ \Delta b_y \\ \Delta b_z \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где $\Delta\mathbf{b}_o$ — погрешности орта \mathbf{b}_o . Значения b_y, b_z уточнялись по результатам обработки измерений (8), а составляющая b_x определялась из условия нормирования орта \mathbf{b}_o , т.е. $(b_x)^2 + (b_y)^2 + (b_z)^2 = 1$.

Таким образом, линеаризованные разностные измерения (8) могут быть представлены в следующем виде:

$$\begin{aligned} z_{i,i+1} = & \left[b_N(s_{iE} - s_{(i+1)E}) - b_E(s_{iN} - s_{(i+1)N}) \right] \alpha + \\ & + \left[b_H(s_{iN} - s_{(i+1)N}) - b_N(s_{iH} - s_{(i+1)H}) \right] \beta + \left[b_E(s_{iH} - s_{(i+1)H}) - b_H(s_{iE} - s_{(i+1)E}) \right] \gamma + \\ & + (s_{iy} - s_{(i+1)y})\Delta b_y + (s_{iz} - s_{(i+1)z})\Delta b_z + \Delta Cf_{(i+1)-i} + v_{zi}, \end{aligned} \quad (10)$$

где b_E, b_N, b_H — направляющие косинусы вектора-базы \mathbf{b} в географических осях, т.е. элементы вектора-строки $\left[b_E, b_N, b_H \right] = (\mathbf{b}_h)^T = (\mathbf{C}_h^o \mathbf{b}_o)^T$; $s_{ij}, s_{(i+1)j}$ ($j = E, N, H$) и $s_{ij}, s_{(i+1)j}$ ($j = x, y, z$) — элементы ортов $\mathbf{s}_{ih}, \mathbf{s}_{io}$ (направляющие косинусы орта \mathbf{s}_i НС_{*i*} относительно соответственно географических осей и осей объекта); $\Delta Cf_{(i+1)-i}$ — погрешности, обусловленные остаточной неоднозначностью вторых разностей фазовых измерений для пары спутников НС_{*i+1*} и НС_{*i*}; v_{zi} — шумы измерений (в том числе шумы ПА СНС) и составляющие, обусловленные погрешностями определения координат места объекта и эфемеридной информации НС_{*i*}.

Расчетная модель погрешностей. При формировании расчетной модели погрешностей ИСОН и привлечении вторых разностей фазовых измерений от трех пар НС использовались следующие аппроксимации:

— смещения нулей гироскопов $\Delta\bar{\omega}_x, \Delta\bar{\omega}_y, \Delta\bar{\omega}_z$ и акселерометров $\Delta\bar{a}_x, \Delta\bar{a}_y, \Delta\bar{a}_z$, изменения систематических составляющих погрешностей масштабных коэффициентов ММГ $\Delta M_{gx}, \Delta M_{gz}, \Delta M_{gz}$ от запуска к запуску, погрешности Δb_j ($j = y, z$) были аппроксимированы (из-за отсутствия достоверных данных об их спектральном составе) соответствующими винеровскими процессами;

— погрешности $\Delta Cf_{(i+1)-i}$ были описаны „скачкообразными“ случайными величинами, дисперсия которых восстанавливается до начальной неопределенности при фиксации „скачка“ в измерениях $\tilde{z}_{i,i+1}$;

— шумы измерений аппроксимированы дискретными белыми шумами с известными дисперсиями на частоте формирования измерений.

В этом случае расчетная модель погрешностей ИСОН будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \Phi_{k+1/k} \mathbf{x}_k + \Gamma_{k+1} \mathbf{w}_k, \\ \mathbf{z}_{k+1} &= \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{x}_{k+1} + \mathbf{v}_{k+1}, \end{aligned} \quad (11)$$

где

$$\mathbf{x}^T = \left[\alpha \quad \beta \quad \gamma \quad \Delta V_E \quad \Delta V_N \quad \Delta V_H \quad \Delta \varphi \quad \Delta \lambda \quad \Delta h \quad \Delta \bar{\omega}_x \quad \Delta \bar{\omega}_y \quad \Delta \bar{\omega}_z \quad \Delta \bar{a}_x \right. \\ \left. \Delta \bar{a}_y \quad \Delta \bar{a}_z \quad \Delta M_{gx} \quad \Delta M_{gy} \quad \Delta M_{gz} \quad \Delta b_y \quad \Delta b_z \quad \Delta Cf_{4_1} \quad \Delta Cf_{5_2} \quad \Delta Cf_{6_3} \right] \quad (12)$$

— вектор состояния системы; $\Phi_{k/k+1}$ — переходная на интервале dT формирования измерений матрица состояния системы; $\Gamma_{k+1} \cong \Phi_{k+1} dt$ — матрица, определяющая влияние вектора входных шумов \mathbf{w}_k с ковариациями \mathbf{Q}_k ; \mathbf{H}_{k+1} — матрица измерений, соответствующая уравнениям (2), (3) и (10); \mathbf{v}_{k+1} — шумы измерений с матрицей ковариаций \mathbf{R}_k .

Для отбраковки недостоверных измерений использовался безынерционный алгоритм контроля, основанный на анализе невязки разностных измерений, т.е. анализе превышения разностных измерений (с учетом факта включения оценок в обратную связь на каждом шаге обработки измерений) допустимых значений, рассчитываемых по текущим значениям ковариационной матрицы ошибок оценок.

Формирование пар НС для фазовых измерений. Как следует из соотношения (10), точность оценивания погрешности α и, следовательно точность выработки ИСОН курса, зависит от значения функционала

$$f(\alpha) = \left[b_N (s_{iE} - s_{(i+1)E}) - b_E (s_{iN} - s_{(i+1)N}) \right], \quad (13)$$

где $s_{iN} = \cosh_i \cos Az_i$, $s_{iE} = \cosh_i \sin Az_i$ (здесь h_i — высота НС_{*i*}, Az_i — азимут НС_{*i*}). Очевидно, что желательно иметь максимальное значение функционала $f(\alpha)$.

Рассмотрим частный случай движения: $K = 0$. Тогда при поперечном расположении базы по оси x_o $b_N = 0$, $b_E = 1$. Максимум функционала $f(\alpha)$, учитывая, что $s_{iN} = \cosh_i \cos K$, $s_{iE} = \cosh_i \sin K$, получим при условиях:

— значения высоты НС, выбранные из наблюдаемой группировки, должны быть минимальны;

— $s_{iN} = 1$ (max), если азимут НС_{*i*} равен нулю, т.е. направление на НС_{*i*} должно быть ортогонально базе;

— $s_{(i+1)N} = -s_{iN}$, азимут НС_{*i+1*} должен быть равен 180° .

Итак, для общего случая движения объекта выбор НС должен соответствовать следующим требованиям:

— значения высоты НС, полученные из наблюдаемой группировки для формирования вторых разностей фазовых измерений, должны быть минимальны;

— азимуты НС должны быть $Az \cong K$, $Az \cong K + 180^\circ$, чтобы направления на НС были ортогональны базе;

— различие в азимутах НС из одной пары должно быть близко к 180° .

Результаты мореходных испытаний. Испытания проводились на Ладожском озере 24.07.09 г. При этом использовались измерения фазы от двух приемников — Ashtech G12 и „Котлин“ (ОАО РИРВ). Приемные антенны СНС были расположены на судне на базе около 3,4 м по поперечной оси.

Разностные фазовые линеаризованные измерения (8) для трех пар НС, навигационные измерения (1) и (3), а также данные ИИМ обрабатывались в камеральном режиме. При обработке:

— отбраковка недостоверных результатов измерений от ПА СНС производилась в соответствии с критерием, учитывающим текущие значения ковариационной матрицы ошибок оценок;

— при скачках в разностных фазовых измерениях для пары спутников более чем на $0,3$ длины волны производился частичный перезапуск фильтра Калмана по погрешности $\Delta C f_{(i+1)-i}$, соответствующей данному измерению;

— в качестве эталонных значений курса и угла бортовой качки использовались данные, полученные путем обработки всех видимых НС с исключением неоднозначности фазовых измерений по методу, изложенному в [5];

— запись массива данных ИИМ (текущих значений сигналов ММГ и ММА) производилась на частоте 100 Гц;

— начальная погрешность ИИМ по курсу составляла около 30° .

Результаты испытаний представлены на рис. 2, 3. На рис. 2, *а* приведены погрешности ориентации при произвольном формировании пар НС_{*i*} (ΔK — погрешность по курсу, $\Delta\theta$ — погрешность по углу бортовой качки, ψ — значения угла килевой качки), *б* — то же, участок хода прямым курсом.

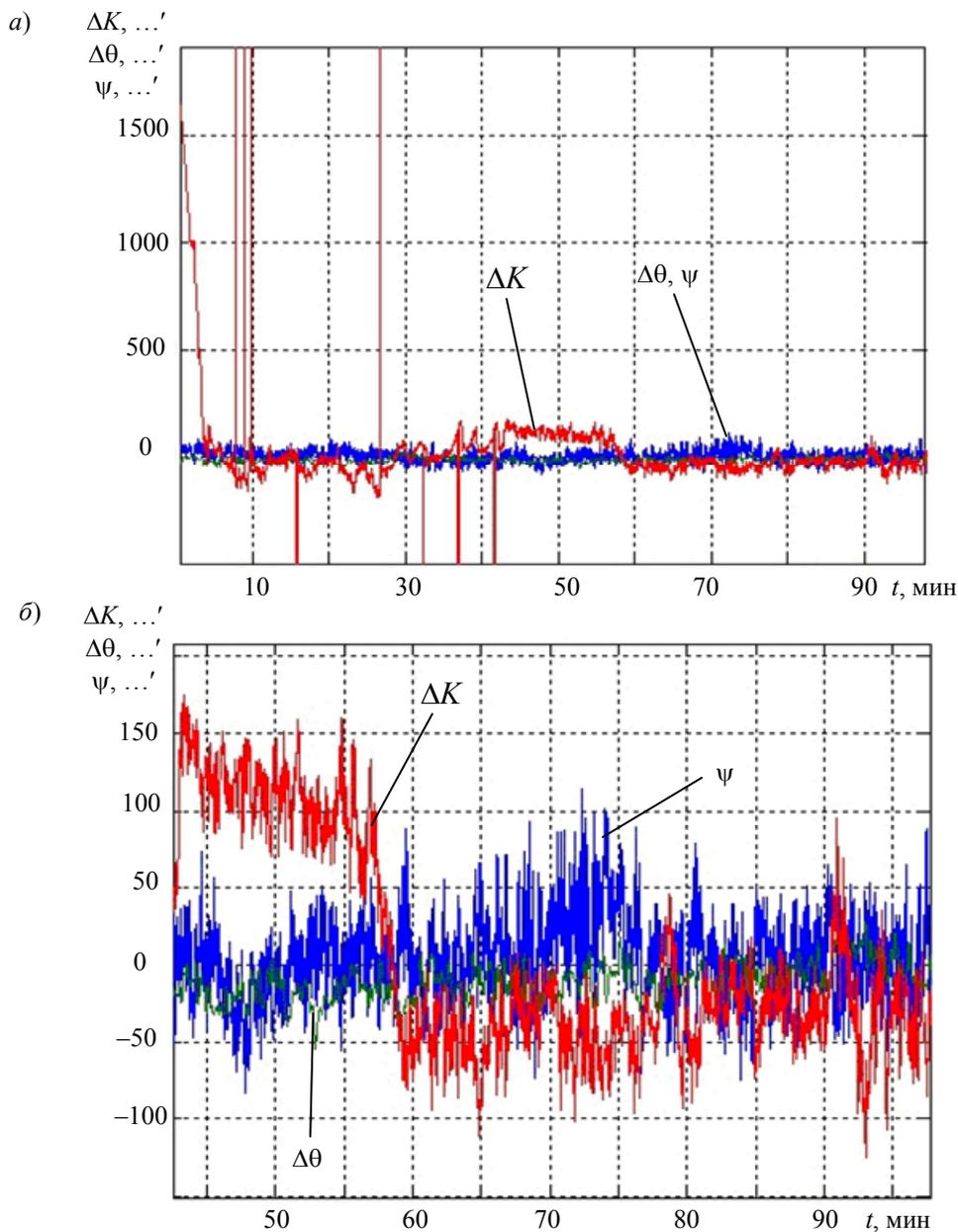


Рис. 2

На рис. 3 представлены погрешности ориентации при формировании пар $НС_i$, согласно анализу функционала (13), участок хода прямым курсом.

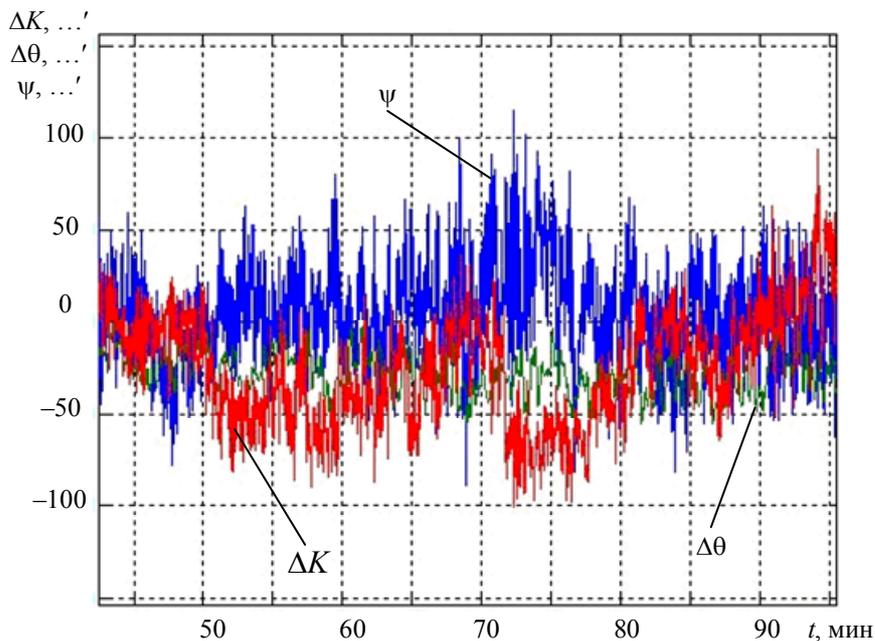


Рис. 3

Выводы

1. Результаты решения задачи ориентации объекта в рассматриваемой схеме построения ИСОН подтверждают эффективность используемых методов. Предлагаемое решение допускает перерывы в поступлении фазовых измерений от ПА СНС и позволяет эффективно обеспечивать отбраковку недостоверных результатов измерений.

2. Используемая процедура исключения неоднозначности фазовых измерений существенно проще традиционных поисковых алгоритмов, требующих перебора целого числа периодов и приводящих к значительным вычислительным затратам.

3. Допускается значительная начальная неопределенность по курсу, что может быть обеспечено применением магнитного датчика. При этом время переходного процесса лежит в пределах 3—4 мин.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (№ 10-08-00904а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емельянец Г. И., Лочехин А. В. Начальная выставка и калибровка бескарданного гироскопа на электростатическом гироскопе и микромеханических датчиках // Науч.-технич. вестн. СПбГУ ИТМО. 2009. № 5 (63). С. 62—69.
2. Блажнов Б. А., Волынский Д. В., Емельянец Г. И., Несенюк Л. П., Степанов А. П. Интегрированная инерциально-спутниковая система ориентации и навигации с микромеханическим инерциальным модулем. Результаты испытаний на автомобиле // Гироскопия и навигация. 2008. № 4 (63). С. 77.
3. Интегрированная система Seapath 200. Product Manuals – Seapath 200. Precise Heading, Attitude and Position. Seatex AS. Trondheim, Norway, 1998.
4. Степанов О. А., Кошаев Д. А. Исследование методов решения задачи ориентации с использованием спутниковых систем // Гироскопия и навигация. 1999. № 2 (25). С. 30—55.
5. Блажнов Б. А., Кошаев Д. А. Определение относительной траектории движения и углов ориентации по фазовым спутниковым измерениям и данным микромеханического гироскопа // Гироскопия и навигация. 2009. № 4 (67). С. 15—33.

6. Емельянцеv Г. И., Блажнов Б. А., Степанов А. П. Об использовании фазовых измерений для задачи ориентации в интегрированной инерциально-спутниковой системе // Гироскопия и навигация. 2010. № 1 (68). С. 12—16.

Сведения об авторах

- Геннадий Иванович Емельянцеv** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра информационно-навигационных систем; E-mail: Emel@mail.ifmo.ru
- Борис Александрович Блажнов** — канд. техн. наук; „ЦНИИ «Электроприбор»“, Санкт-Петербург; старший научный сотрудник; E-mail: office@eprib.ru
- Алексей Владимирович Лочехин** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра информационно-навигационных систем; E-mail: alex@infom.su
- Алексей Петрович Степанов** — „ЦНИИ «Электроприбор»“, Санкт-Петербург; инженер 1-й категории; E-mail: office@eprib.ru

Рекомендована кафедрой
информационно-навигационных систем

Поступила в редакцию
11.05.10 г.

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.51

В. И. ПЕТУНИН, А. И. ФРИД

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНЫХ ЛОГИКО-ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С СЕЛЕКТОРАМИ

Рассматривается задача управления многомерным объектом с одним управляющим воздействием на режимах селективного выбора каналов системы. Показано, что эффективным средством построения таких логико-динамических систем является применение алгоритмов адаптации. Рассмотрены вопросы синтеза систем управления. Приведены результаты моделирования.

Ключевые слова: многомерный объект управления, селектор каналов, система автоматического управления, логико-динамическая система, адаптация.

Введение. В системах автоматического управления (САУ) сложных технических объектов, например газотурбинных двигателей (ГТД), в которых число управляющих воздействий меньше числа управляемых величин, для формирования управления часто используются логические элементы — селекторы сигналов, изменяющие структуру системы в зависимости от ее состояния [1, 2]. Обычно применяется принцип селектирования, согласно которому регулируется значение параметра двигателя, наиболее приблизившееся к величине, определяемой программой регулирования. Такое селектирование реализуется с помощью алгебраических селекторов (АС), функции преобразования которых имеют вид: $U = \min(U_1, U_2, \dots, U_m)$ при ограничении параметров сверху или $U = \max(U_1, U_2, \dots, U_m)$ при ограничении снизу, где U_i — входные, а U — выходной сигналы. Аналогичные задачи могут решаться и в САУ летательными аппаратами, например, для ограничения предельных параметров полета [3].

Такие САУ, использующие логику упорядоченного выбора и имеющие динамическую часть в виде регуляторов и объекта управления, называются логико-динамическими системами [2].

В САУ с алгебраическими селекторами структура и динамические характеристики объекта управления обычно различаются для отдельных каналов. Это приводит к тому, что структура и параметры регуляторов в различных каналах на входе АС будут разными. При этом нарушаются условия переключения каналов, возникают „забросы“ регулируемых величин, ухудшается качество САУ.

Следовательно, возникает необходимость адаптации логико-динамических САУ с АС на режимах переключения каналов к изменениям структуры системы.

САУ с селектором каналов управления. В САУ с АС на режимах переключения можно рассматривать работу только двух селектируемых каналов, поэтому рассмотрим САУ с АС двух каналов управления (рис. 1). Важным информативным параметром для АС и, следовательно

для САУ, является разность его входных сигналов, т.е. выходных сигналов селективируемых каналов [2]:

$$\varepsilon = U_1 - U_2,$$

знак которой говорит о включении того или иного канала, а величина ε — о близости к моменту селективирования.

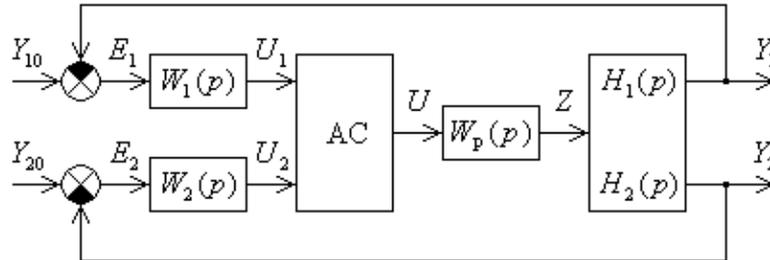


Рис. 1

Рассмотрим САУ ГТД как двумерного объекта с одним управляющим воздействием, в которой используется алгебраический селектор минимального сигнала. Первый канал этой САУ является каналом управления, определяющим режим работы объекта по выходной координате Y_1 , его заданная величина Y_{10} зависит от времени. Второй канал — канал ограничения, его заданная величина Y_{20} является постоянной и определяет максимальный режим работы объекта по координате Y_2 . ГТД имеет различные динамические характеристики по разным выходным координатам относительно расхода топлива. Передаточные функции ГТД:

— в первом канале

$$H_1(p) = \frac{Y_1(p)}{Z(p)} = K_1 \frac{A_1(p)}{B(p)};$$

— во втором канале

$$H_2(p) = \frac{Y_2(p)}{Z(p)} = K_2 \frac{A_2(p)}{B(p)},$$

где p — оператор преобразования Лапласа; K_1, K_2 — коэффициенты передачи; $A_1(p), A_2(p), B(p)$ — полиномы, зависящие от вида объекта. Примем, что порядок $A_1(p)$ меньше, чем порядок $B(p)$, а порядок $A_2(p)$ равен порядку $B(p)$. Такое математическое описание характерно, например, для динамических характеристик ГТД по частоте вращения ротора $Y_1 = n$ и температуре газа за турбиной $Y_2 = T_T^*$ при изменении расхода топлива в камере сгорания $Z = G_T$. Здесь звездочка в T_T^* обозначает температуру полного торможения потока газа.

Передаточная функция изодромного регулятора, общего для обоих каналов,

$$W_p(p) = K_p \frac{T_p p + 1}{p(T_p + 1)}.$$

Передаточные функции регуляторов первого $W_1(p)$ и второго $W_2(p)$ каналов выбираются исходя из заданных требований к динамическим характеристикам каждого из них.

Это можно сделать следующим образом. Потребуем, чтобы передаточные функции отдельных разомкнутых каналов без учета запаздывания измерителей координат удовлетворяли равенствам:

$$W_1(p) = W_1(p)W_p(p)H_1(p) = W_{M1}(p); \quad (1)$$

$$W_2(p) = W_2(p)W_p(p)H_2(p) = W_{M2}(p), \quad (2)$$

где $W_{M1}(p)$ и $W_{M2}(p)$ — передаточные функции эталонных моделей разомкнутых каналов.

Если передаточные функции разомкнутых каналов выбрать в виде

$$W_1(p) = W_2(p) = W_M(p), \quad (3)$$

то для получения необходимого качества регулирования выходных координат регуляторы, согласно (1) и (2), должны иметь следующие передаточные функции:

$$W_1(p) = \frac{W_M(p)}{W_p(p)H_1(p)};$$

$$W_2(p) = \frac{W_M(p)}{W_p(p)H_2(p)}.$$

При этом инерционность датчиков должна быть скорректирована так, чтобы измерители параметров были безынерционными.

Следовательно, $W_1(p) \neq W_2(p)$, и САУ не сможет обеспечить необходимые динамические характеристики при переключении каналов.

Как было отмечено выше, обычно применяется принцип селективного регулирования, согласно которому регулируется параметр ГТД, наиболее приблизившийся к величине, определяемой программой регулирования. Следовательно, для получения необходимого качества регулирования переключение селектора должно происходить в момент равенства рассогласований между текущими значениями выходных координат и их задающими значениями, т.е. в момент равенства сигналов перед регуляторами $E_1 = E_2$. Проведенный анализ показывает, что регулятор температуры газа является инерционным по отношению к регулятору частоты вращения ротора ГТД, поэтому селектор переключается с канала частоты вращения ротора на канал температуры газа с запаздыванием. В результате происходит „заброс“ по температуре газа.

Задача построения адаптивной САУ с селектором каналов. Рассматриваемые логико-динамические САУ являются системами с переменной структурой, поэтому решение задачи их адаптации возможно на основе алгоритмов самоорганизации каналов.

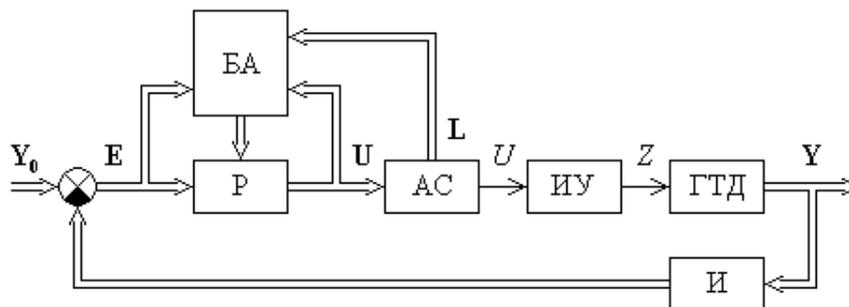


Рис. 2

На рис. 2 приведена обобщенная структурная схема такой системы, где И — измерители выходных координат; P — регуляторы отдельных каналов управления; БА — блок адаптации; E — вектор сигналов рассогласования каналов управления; U — вектор входных сигналов AC; U — выходной сигнал AC; L — вектор логического выходного сигнала AC.

При работе логико-динамической САУ ГТД с АС селектор каналов замыкает один из них, оставляя остальные разомкнутыми. Поэтому при работе САУ на режимах ограничения выходных координат задача адаптации системы может быть решена за счет самонастройки разомкнутых каналов и определенного согласования условий переключения. Это позволяет обеспечить необходимые динамические характеристики включаемого канала и качества САУ в целом [2].

Эффективность предложенных алгоритмов подтверждена моделированием рассмотренных САУ ГТД с помощью пакета Simulink системы Matlab.

Адаптивная САУ двумерного объекта управления. На рис. 3 представлена структурная схема адаптивной САУ ГТД. В САУ определяется разность сигналов на выходе селекторов минимального и максимального сигналов

$$\varepsilon = U_{\min} - U_{\max} = U_{\text{зам}} - U_{\text{раз}},$$

где $U_{\text{зам}}$ — выходной сигнал регулятора замкнутого канала; $U_{\text{раз}}$ — выходной сигнал регулятора разомкнутого канала.

На выходе логического устройства (ЛУ) формируется логический сигнал L , определяющий замкнутый канал САУ

$$L = \begin{cases} 1 & \text{при } U = U_1; \\ 0 & \text{при } U = U_2. \end{cases}$$

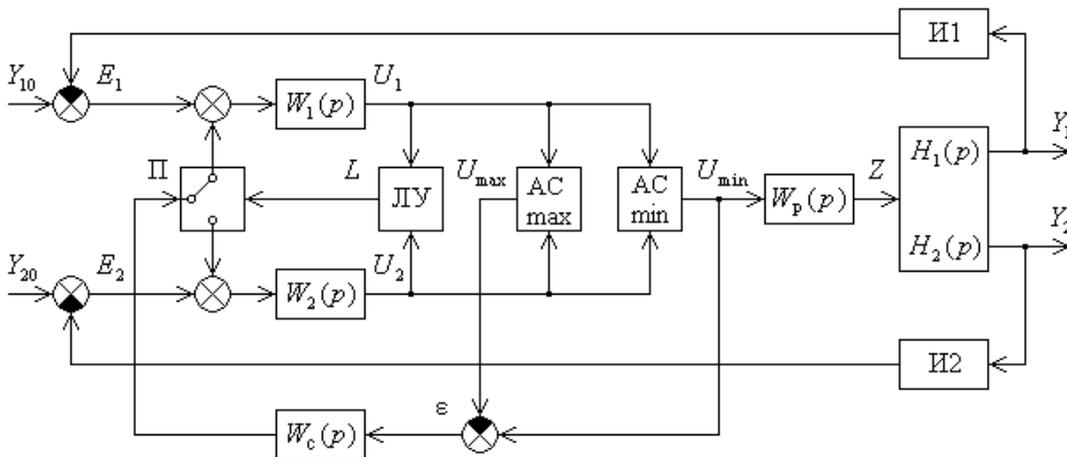


Рис. 3

Сигнал ε через блок согласования $W_c(p)$ и переключатель Π поступает на вход соответствующего регулятора разомкнутого канала с помощью суммирующих элементов, что определяется состоянием переключателя в соответствии с сигналом L логического устройства. Так как $\varepsilon < 0$, то этот сигнал уменьшает задающее воздействие разомкнутого канала и тем самым корректирует момент переключения каналов.

Как было отмечено выше, регуляторы частоты вращения ротора и температуры газа имеют разные динамические характеристики, в результате чего условие переключения селектора минимального сигнала $U_1 = U_2$ отличается от необходимого условия переключения САУ — равенства рассогласований между текущими значениями выходных координат и их задающими воздействиями $E_1 = E_2$.

Следовательно, необходимо согласование этих условий. Как известно [4], согласование поведения отдельных каналов САУ возможно за счет введения контура управления их относительным движением. В данном случае оно обеспечивается за счет введения

контура адаптации — сигнальной самонастройки по разности сигналов ε на выходе регуляторов с воздействием на задающее воздействие разомкнутого канала системы. Это позволяет построить САУ ГТД, адаптивную к изменению ее структуры при переключении каналов селектором.

Пусть замкнутым является канал регулирования частоты вращения ротора, т.е. первый канал. Тогда выход контура сигнальной самонастройки включен с помощью первого суммирующего элемента на вход регулятора температуры газа — второго разомкнутого канала.

Сигнал на выходе регулятора частоты вращения ротора

$$U_1 = W_1(p)E_1,$$

сигнал на выходе регулятора температуры газа

$$U_2 = \frac{W_2(p)}{1 + W_2(p)W_c(p)} E_2 + \frac{W_c(p)W_2(p)}{1 + W_2(p)W_c(p)} U_1,$$

тогда разность сигналов на выходе регуляторов

$$\varepsilon = \Delta U = U_1 - U_2 = \frac{W_1(p)}{1 + W_2(p)W_c(p)} E_1 - \frac{W_2(p)}{1 + W_2(p)W_c(p)} E_2.$$

При $W_c(p) = K$ и достаточно большой величине K получаем

$$\varepsilon \rightarrow 0; \quad U_2 \rightarrow U_1,$$

или

$$\begin{aligned} U_1 - U_2 &= \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{W_1(p)}{1 + W_2(p)W_c(p)} E_1 - \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{W_2(p)}{1 + W_2(p)W_c(p)} E_2 \cong \\ &\cong m(E_1 - E_2), \end{aligned}$$

где m мало.

Таким образом, за счет работы контура сигнальной самонастройки момент переключения селектора минимального сигнала $U_1 = U_2$ приближается к условию переключения каналов по ошибкам каналов $E_1 = E_2$. Это позволяет ликвидировать заброс и обеспечить необходимое качество переходного процесса при замыкании и включении в работу регулятора температуры газа.

Аналогичные процессы характерны для САУ и при переключении селектора с замкнутого канала температуры газа на канал частоты вращения ротора.

На рис. 4 приведены результаты моделирования переходных процессов в САУ двухвального ГТД при переключении каналов: a — с канала частоты вращения ротора вентилятора на канал температуры газа, b — с канала температуры газа на канал частоты вращения ротора вентилятора, с контуром и без контура адаптации, при этом выходные координаты ГТД n_v и T_T^* представлены в относительных единицах $Y = \Delta Y / Y_{\max}$. Результаты моделирования рассмотренной САУ ГТД при задающих воздействиях каналов $Y_{\text{упр}0} = 0,25t$, $Y_{\text{отр}0} = 0,8$ и выполнении условия (3) показывают, что при прямом и обратном переключении каналов селектором качество переходных процессов включаемого канала существенно улучшается при введении контура адаптации. САУ сохраняет заданное качество при изменении структуры, т.е. является адаптивной.

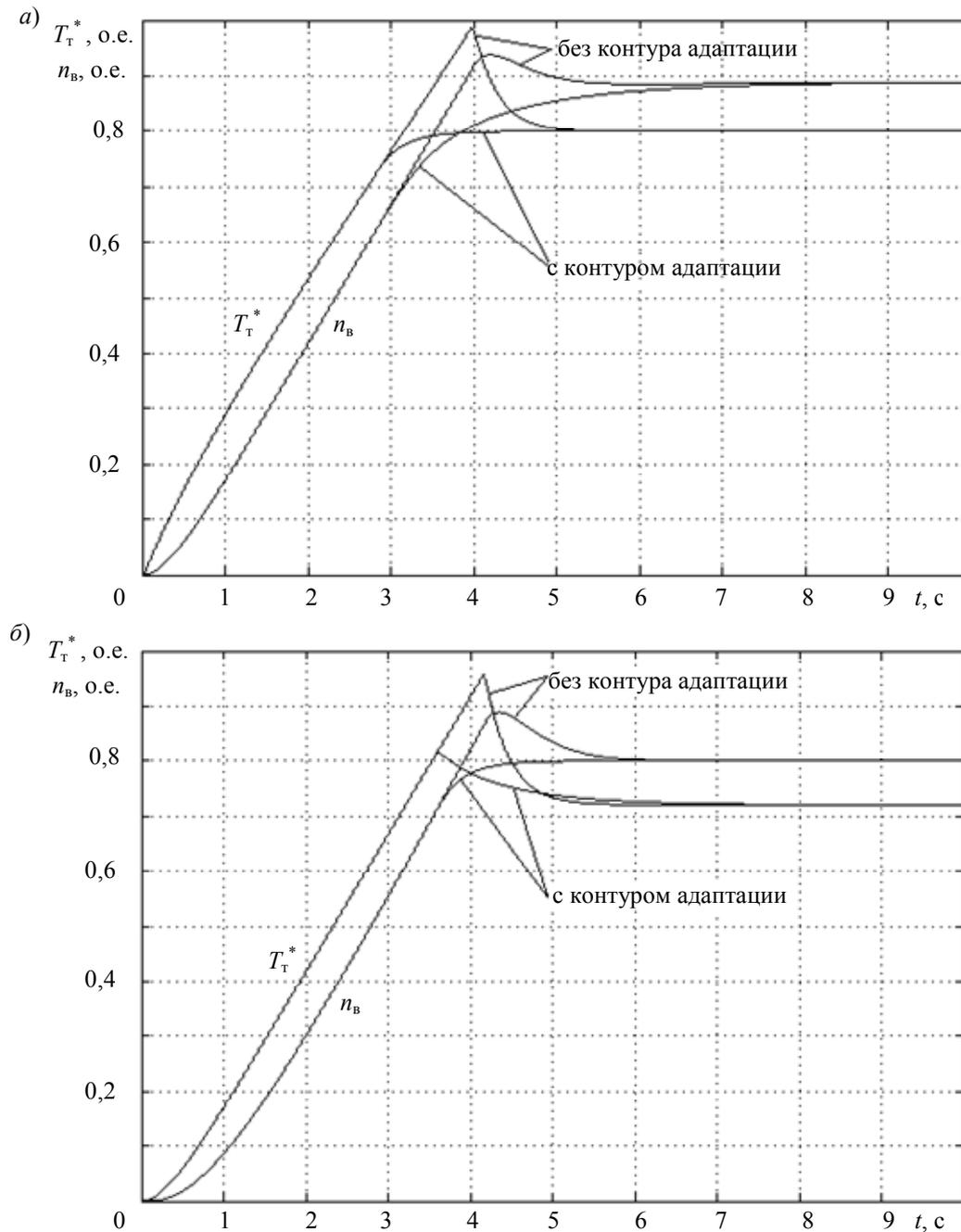


Рис. 4

Адаптивная САУ многомерного объекта управления. Аналогичный подход используется при построении адаптивной САУ многомерного объекта управления с одним регулирующим воздействием. На рис. 5 приведена структурная схема адаптивной САУ ГТД, поясняющая данный подход. В каждом канале управления определяется разность сигналов на выходе регуляторов

$$\varepsilon_i = U_{\min} - U_i.$$

Сигнал ε_i через блок согласования $W_c(p)$ поступает на вход соответствующего регулятора канала с помощью суммирующего элемента. Контур сигнальной самонастройки работает во всех N каналах. Если i -й канал разомкнут, то $\varepsilon_i < 0$, и этот сигнал уменьшает задающее воздействие данного разомкнутого канала, тем самым корректируя момент пере-

ключения каналов; если замкнут, т.е. является ведущим, то $\varepsilon_i = 0$, и этот сигнал не меняет задающее воздействие данного замкнутого канала.

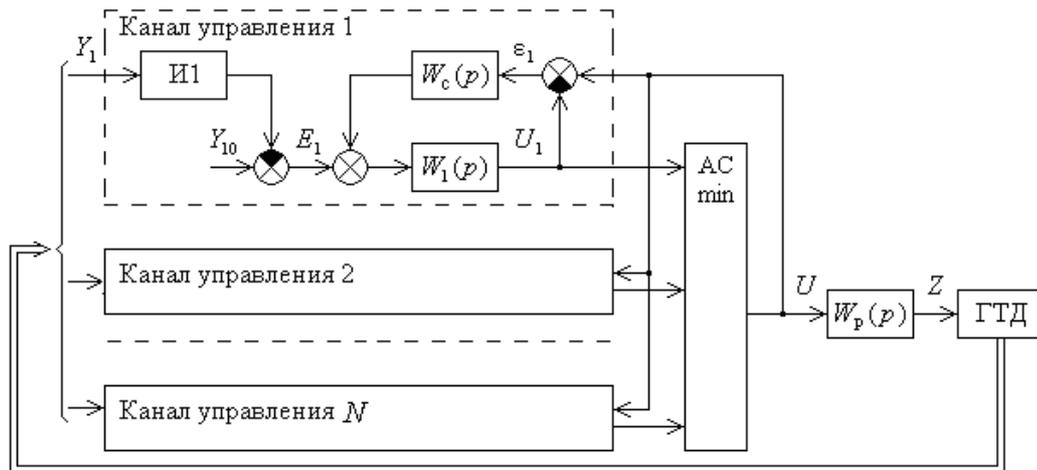


Рис. 5

На рис. 6 приведены результаты моделирования переходных процессов в САУ двухвального ГТД при управлении расходом топлива, при этом выходные координаты ГТД: частота вращения ротора компрессора n_k , частота вращения ротора вентилятора n_b и температура газа за турбиной T_T^* также представлены в относительных единицах. Результаты моделирования рассмотренной САУ ГТД при задающих воздействиях каналов: $n_{k0} = 0,3t$, $n_{b0} = 0,8$, $T_{T0}^* = 0,8$ и выполнении условия (3) показывают, что за время протекания переходного процесса замкнутым был канал n_k , затем T_T^* и в конце — n_b . Качество переходного процесса включаемого канала существенно улучшается при введении контура адаптации — оно соответствует эталонным процессам отдельных каналов. САУ сохраняет заданное качество при изменении структуры, т.е. является адаптивной.

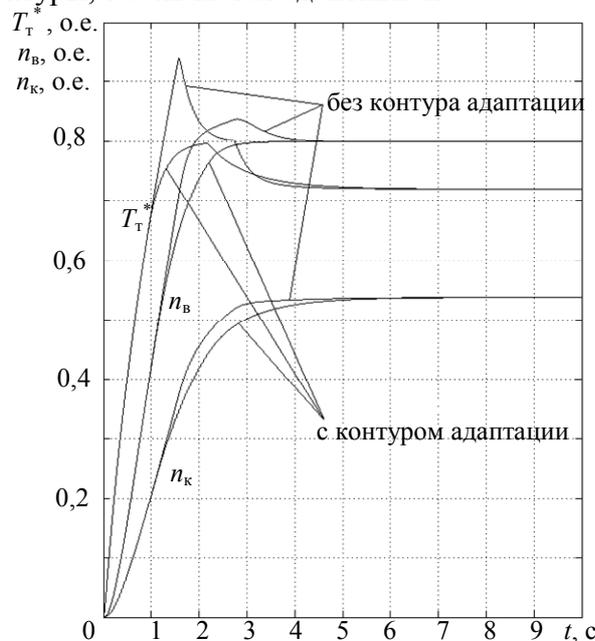


Рис. 6

Заключение. Таким образом, применение рассмотренного метода адаптации логико-динамических САУ ГТД с селекторами каналов позволяет существенно улучшить динамические характеристики таких систем управления и тем самым увеличить ресурс работы двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Интегральные системы автоматического управления силовыми установками самолетов / Под ред. А. А. Шевякова. М.: Машиностроение, 1983. 283 с.
2. Петунин В. И. Принципы построения логико-динамических систем автоматического управления газотурбинными двигателями // Вестн. УГАТУ. 2003. Т. 4, № 1. С. 78—87.
3. Петунин В. И. Синтез систем автоматического управления летательными аппаратами с автоматами ограничений предельных параметров // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 10. С. 18—24.
4. Мирошник И. В. Согласованное управление многоканальными системами. Л.: Энергоатомиздат, 1990. 128 с.

*Сведения об авторах***Валерий Иванович Петунин**

— канд. техн. наук, доцент; Уфимский государственный авиационный технический университет, кафедра авиационного приборостроения; E-mail: petunin_vi@mail.ru

Аркадий Исаакович Фрид

— д-р техн. наук, профессор; Уфимский государственный авиационный технический университет, кафедра вычислительной техники и защиты информации; E-mail: arkfrid@mail.ru

Рекомендована кафедрой
авиационного приборостроенияПоступила в редакцию
04.02.11 г.

УДК 62-505.3

С. А. КАБАНОВ, Е. Н. НИКУЛИН, Б. Э. ЯКУШЕВ, Д. Б. ЯКУШЕВА
**ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ ГРУЗА
МОСТОВЫМ КРАНОМ**

Рассматривается задача управления перемещением груза мостовым краном с использованием различных методов оптимизации. Исследуется сходимость итерационной процедуры при решении краевой задачи. Представлены результаты численного моделирования.

Ключевые слова: мостовой кран, принцип максимума, прогнозирующая модель.

Мостовой кран является неотъемлемой частью оборудования любого предприятия в сфере обрабатывающей промышленности, зачастую единственным устройством, позволяющим перемещать тяжелые предметы в ограниченном пространстве промышленного цеха. Однако из конструктивных особенностей мостового крана (невозможности жесткой фиксации тяжелого груза в процессе перемещения) вытекает существенный недостаток — трудность точного позиционирования груза вручную. Гибкая подвеска обуславливает возможность раскачивания груза как в процессе перемещения, так и в момент остановки в месте назначения. В связи с этим возникает проблема автоматизации управления тележкой мостового крана с целью обеспечения перевода захвата с грузом в заданное положение и его позиционной стабилизации. Учитывая актуальность проблемы, целесообразно оценить возможность реализации оптимальной динамики перемещения груза [1—3].

Разработку алгоритмов оптимального управления осложняет необходимость обеспечения сходимости итерационных процедур решения соответствующих краевых задач. Ввиду того что вычислительные трудности быстро возрастают при усложнении математической модели динамики крана, в настоящей статье рассматривается система дифференциальных уравнений, полученная при упрощающих предположениях: длина троса подвески груза постоянна

во время движения (внутренняя связь системы стационарна), угловые отклонения подвеса от вертикали малы, масса груза не изменяется.

При этих допущениях уравнения Лагранжа 2-го рода для рассматриваемой системы приобретают вид [3]

$$\begin{aligned} (M + m)\ddot{s} - ml\ddot{\theta} &= F, \\ -\ddot{s} + l\ddot{\theta} &= -g\theta, \end{aligned}$$

где M, m — масса тележки и груза; s — горизонтальная координата крана; θ — угловое отклонение подвеса; $l = \text{const}$ — длина подвеса; F — сила, управляющая положением тележки крана.

Принимая в качестве переменных вектора состояния: x_1 (текущий угол отклонения подвеса груза от вертикали), $x_2 = dx_1/dt$, $x_3 = s/l$, $x_4 = dx_3/dt$ при горизонтальных координатах, определяющих текущее и конечное положение груза соответственно s и s_f , получаем систему уравнений модели объекта в виде [1—3]

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}, \tag{1}$$

где $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]$, $\mathbf{A} = [a_{ij}]$ — (4×4)-матрица. Элементы матрицы \mathbf{A} , кроме $a_{12} = 1$, $a_{21} = -a$, $a_{34} = 1$, $a_{41} = -c$, равны нулю; $\mathbf{B}^T = [0 \ b/u_{\max} \ 0 \ b/u_{\max}]$, $a = bg/l$, $b = (m + M)/M$, $c = mg/(lM)$, g — ускорение свободного падения, $u = u_{\max}F/[l(m + M)]$ — безразмерное управление ($i = \overline{1, 4}; j = \overline{1, 4}$).

Требуется обеспечить перевод системы из начального состояния $\mathbf{x}^T(t_0) = [0 \ 0 \ 0 \ 0]$ в конечное $\mathbf{x}^T(t_f) = [0 \ 0 \ s_f \ 0]$ при ограничении на управление $|u_{\max}| \leq 0,75$.

Представляет интерес в рамках одного исследования сопоставить результаты численных экспериментов с данной моделью, выполненных на основе различных алгоритмов оптимизации.

В настоящей статье рассматриваются возможности определения оптимального воздействия на тележку мостового крана с использованием различных методов оптимизации:

— на основании решения краевой задачи, вытекающей из принципа максимума Л. С. Понтрягина;

— алгоритма управления с фиксированной программой прогноза движения;

— алгоритма последовательной оптимизации по иерархии критериев качества.

1. Будем решать задачу перевода системы (1) из начального положения в конечное при ограничениях на управление вида $|u| \leq u_{\max}$ и минимизации критерия $I = V_f(x, t_f) + \int_{t_0}^{t_f} dt$

(задача максимального быстрогодействия). Здесь $V_f(\mathbf{x}, t_f) = \frac{1}{2} \Delta \mathbf{x}^T \rho \Delta \mathbf{x}$, $\Delta \mathbf{x} = \mathbf{x}(t_f) - \mathbf{x}_f$,

$\rho = \text{diag}(\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4)$ — матрица весовых коэффициентов, \mathbf{x}_f — заданный вектор. Канонические уравнения имеют вид [1—3]

$$\dot{x}_i = \frac{\partial H}{\partial p_i}, \quad \dot{p}_i = -\frac{\partial H}{\partial x_i}, \quad (i = \overline{1, 4}). \tag{2}$$

Здесь $H = \mathbf{p}^T (\mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}) + 1$ — гамильтониан системы, \mathbf{p} — вектор сопряженных переменных.

На интервале $t \in [t_0, t_f]$ интегрированием системы (1) с начальными условиями $x_i(t_0) = x_{i0}$, $p_i(t_0) = p_{i0}$ определяются $x_i(t_f)$ при значении u , принятом, согласно принципу максимума ($i = \overline{2, 4}$)

$$u = \begin{cases} -u_{\max}, & p_2 + p_4 > 0, \\ u_{\max}, & p_2 + p_4 < 0. \end{cases} \tag{3}$$

Оптимизация движения механической системы основана на решении краевой задачи (2), (3).

Здесь, согласно теореме А. А. Фельдбаума об n интервалах для устойчивой системы [3], в соответствии с порядком модели предусматривается четыре интервала постоянства управления. Таким образом, воспроизводится реальная процедура ручного управления, особенно наглядно представляемая набором кусочно-постоянных функций.

Как известно, для большинства задач управления, представляющих практический интерес, затруднительно получить аналитическое решение в замкнутой форме. Но и их численное решение также сопряжено со значительными трудностями. Существует несколько методов численного решения, но их объединяет одна проблема: сходимость к приемлемому в рамках поставленной задачи результату напрямую связана с удачным выбором начального приближения.

В данном случае краевая задача (2), (3) решается методом Ньютона [4—7]. На первом шаге итерационного алгоритма задается вектор начальных условий, включающий компоненты вектора $\mathbf{x}(t_0)$, а также вектора сопряженных переменных $\mathbf{p}(t_0)$.

В соответствии с условиями трансверсальности вводится функция невязок выполнения граничных условий

$$\varphi(p_0^{(0)}) = [(p(t_f) - \rho \Delta x)^T H(t_f)]^T.$$

В алгоритме при исходных значениях констант $p_i(t_0) = C_i$ ($i = \overline{1,4}$), $t_f = C_5$ интегрированием системы (2) вычисляются значения $x_i(t_f)$ на правом конце интервала и выполняются переключения управления в соответствии с условиями (3). Затем последовательно задаются приращения к каждой из взятых с 1-го приближения констант $C_i^{(1)} = C_i + \Delta_i$ ($i = \overline{1,4}$), а также приращение к начальному значению t_f .

Вычисляется функция невязки и численно определяется матрица частных производных Якоби ($p_{05} = t_f$):

$$\Phi_{p_0^{(0)}} = \left\{ \frac{\partial \varphi_i}{\partial p_{0j}} \right\} \quad (i, j = \overline{1,5}).$$

Здесь элементы i -й ($i = \overline{1,4}$) строки матрицы $\Phi_{p_0^{(0)}}$ получаются следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi_i}{\partial p_{01}} &= \frac{\varphi_i[p_{01} + \Delta p_{01}, p_{02}, p_{03}, p_{04}, t_f] - \varphi_i(p_0, t_f)}{\Delta p_{01}}, \\ \frac{\partial \varphi_i}{\partial p_{02}} &= \frac{\varphi_i[p_{01}, p_{02} + \Delta p_{02}, p_{03}, p_{04}, t_f] - \varphi_i(p_0, t_f)}{\Delta p_{02}}, \\ \frac{\partial \varphi_i}{\partial p_{03}} &= \frac{\varphi_i[p_{01}, p_{02}, p_{03} + \Delta p_{03}, p_{04}, t_f] - \varphi_i(p_0, t_f)}{\Delta p_{03}}, \\ \frac{\partial \varphi_i}{\partial p_{04}} &= \frac{\varphi_i[p_{01}, p_{02}, p_{03}, p_{04} + \Delta p_{04}, t_f] - \varphi_i(p_0, t_f)}{\Delta p_{04}}, \\ \frac{\partial \varphi_i}{\partial p_{05}} &= \frac{\varphi_i[p_{01}, p_{02}, p_{03}, p_{04}, t_f + \Delta t_f] - \varphi_i(p_0, t_f)}{\Delta t_f}. \end{aligned}$$

Пятая строка будет иметь вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi_5}{\partial p_{01}} &= \frac{H[p_{01} + \Delta p_{01}, p_{02}, p_{03}, p_{04}, t_f] - H(p_0, t_f)}{\Delta p_{01}}, \\ \frac{\partial \varphi_5}{\partial p_{02}} &= \frac{H[p_{01}, p_{02} + \Delta p_{02}, p_{03}, p_{04}, t_f] - H(p_0, t_f)}{\Delta p_{02}}, \\ \frac{\partial \varphi_5}{\partial p_{03}} &= \frac{H[p_{01}, p_{02}, p_{03} + \Delta p_{03}, p_{04}, t_f] - H(p_0, t_f)}{\Delta p_{03}}, \\ \frac{\partial \varphi_5}{\partial p_{04}} &= \frac{H[p_{01}, p_{02}, p_{03}, p_{04} + \Delta p_{04}, t_f] - H(p_0, t_f)}{\Delta p_{04}}, \\ \frac{\partial \varphi_5}{\partial t_f} &= \frac{H[p_{01}, p_{02}, p_{03}, p_{04}, t_f + \Delta t_f] - H(p_0, t_f)}{\Delta t_f}. \end{aligned}$$

В соответствии с формулой Тейлора следующее приближение для вектора \mathbf{p}_0 определяется, согласно соотношению:

$$C_0^{(1)} = C_0^{(0)} - s \varphi_{C_0^{(0)}}^{-1} \varphi(C_0^{(0)}),$$

где $s \in (0, 1]$ — скалярный множитель, используемый для улучшения сходимости метода [4, 6, 7]. Таким образом, получается набор констант интегрирования на каждую следующую итерацию метода Ньютона:

$$\begin{pmatrix} C_1^{(n)} \\ C_2^{(n)} \\ C_3^{(n)} \\ C_4^{(n)} \\ C_5^{(n)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_1^{(n-1)} \\ C_2^{(n-1)} \\ C_3^{(n-1)} \\ C_4^{(n-1)} \\ C_5^{(n-1)} \end{pmatrix} - s \varphi_{C_0^{(n-1)}}^{-1} \begin{pmatrix} p_1(t_f^{(n-1)}) - \rho_1[x_1(t_f^{(n-1)}) - x_{1f}] \\ p_2(t_f^{(n-1)}) - \rho_2[x_2(t_f^{(n-1)}) - x_{2f}] \\ p_3(t_f^{(n-1)}) - \rho_3[x_3(t_f^{(n-1)}) - x_{3f}] \\ p_4(t_f^{(n-1)}) - \rho_4[x_4(t_f^{(n-1)}) - x_{4f}] \\ H(t_f^{(n-1)}) - 0 \end{pmatrix}.$$

На каждом шаге проверяется условие $\|\varphi(\mathbf{p}_0^{(n)}, t_f^{(n)})\| < \varepsilon$, невыполнение которого возвращает к первому шагу алгоритма. Здесь $\varepsilon > 0$ — заранее выбираемая любая малая положительная величина. В качестве нормы φ можно принять, например

$$\sqrt{\sum_{i=1,5} \varphi_i^2(\mathbf{p}_0^{(n)})}.$$

Вычисления производились при следующих исходных данных: $M = 20$ т; $m = 10$ т; $l = 3$ м; $a = 4,9 \text{ с}^{-2}$; $c = 1,635 \text{ с}^{-2}$; $u_{\max} = 0,75 \text{ с}^2$; $s_f/l = 1,706$; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Численная реализация приведенного алгоритма показала, что, не имея приемлемых предварительных оценок компонента C_i ($i = \overline{1,4}$), а также t_f , сложно рассчитывать на получение искомого результата.

Рассматривая численные результаты решения краевой задачи, вытекающей из принципа максимума, целесообразно оценить эффективность и чувствительность решения к точности задания начального приближения для искомых значений C_i . В работе [2] указывается, что в случае применения, например, метода стрельбы для получения решения требуется, чтобы начальное приближение отличалось от конечного результата на несколько процентов. Только в этом случае гарантируется сходимость итерационной процедуры решения краевой задачи. Полученные на основе использования описанного выше алгоритма результаты численных экспериментов подтверждают высокие требования к точности выбора начального приближения.

2. Эффективным инструментом выбора начальных приближений для постоянных интегрирования может служить какой-либо альтернативный метод оптимизации, также использующий фиксированную программу параметрического управления. В частности, при решении краевой задачи можно воспользоваться значениями сопряженных переменных $p_i(t_0)$, полученными при реализации алгоритма с прогнозирующей моделью, основанного на минимизации функционала А. А. Красовского [1, 8]. В результате применения этого алгоритма можно получить начальные условия для сопряженных переменных.

В рассматриваемом случае релейное управление с выбранным по теореме А. А. Фельдбаума фиксированным количеством интервалов постоянства предполагает возможность оптимизировать моменты переключения. Для этого в качестве управляющих параметров дополнительно вводятся производные $\dot{t}_k = w_k$ (здесь t_k — моменты переключения управления и завершения движения, $k = \overline{1,4}$; $t_4 = t_f$ [1, 3]).

Введение управлений моментами переключений добавляет к системе (1) уравнения

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{w}, \quad (4)$$

где $\dot{\mathbf{y}}^T = [\dot{t}_1 \ \dot{t}_2 \ \dot{t}_3 \ \dot{t}_4]$, $\mathbf{w}^T = [w_1 \ w_2 \ w_3 \ w_4]$. Таким образом, вводится расширенный вектор фазовых переменных $\mathbf{x}_p = [\mathbf{x}^T \ \mathbf{y}^T]^T$.

Критерий качества целесообразно принять в виде функционала Красовского

$$I = V_f(\mathbf{x}, t_f) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} (\mathbf{w}^T \mathbf{k}^{-2} \mathbf{w} + \mathbf{w}_0^T \mathbf{k}^{-2} \mathbf{w}_0) d\tau,$$

где $V_f(\mathbf{x}, t_f) = \frac{1}{2} \Delta \mathbf{x}^T \boldsymbol{\rho} \Delta \mathbf{x}$, $\Delta \mathbf{x} = \mathbf{x}(t_f) - \mathbf{x}_f$, $\boldsymbol{\rho} = \text{diag}(\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4)$, $\mathbf{k} = \text{diag}(k_1, k_2, k_3, k_4)$ — матрицы весовых коэффициентов и коэффициентов усиления соответственно, которые первоначально определяются по принципу равных вкладов максимальных отклонений и уточняются в процессе моделирования.

Гамильтониан задачи имеет вид

$$H = \mathbf{p}^T \dot{\mathbf{x}}_p + \frac{1}{2} \mathbf{w}^T \mathbf{k}^{-2} \mathbf{w} + \frac{1}{2} \mathbf{w}_0^T \mathbf{k}^{-2} \mathbf{w}_0, \quad (5)$$

где $\mathbf{p} = [\mathbf{p}_x^T \ \mathbf{p}_y^T]^T$ — вектор множителей Лагранжа; \mathbf{w} , \mathbf{w}_0 — векторы текущих и оптимальных управлений моментами переключения и завершения движения t_k ($k = \overline{1,4}$).

Система уравнений для сопряженных переменных примет вид

$$\dot{\mathbf{p}}_x^T = -\frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}}, \quad \dot{\mathbf{p}}_y^T = -\frac{\partial H}{\partial \mathbf{y}}.$$

Применение критерия Красовского позволяет заменить решение двухточечной краевой задачи решением задачи Коши для прогнозирующей модели (система (2), (4) с нулевым управлением $\mathbf{w} = 0$):

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \quad \dot{x}_2 = -ax_1 + x_5 [1 - 2\theta(t - t_1) + 2\theta(t - t_2) - 2\theta(t - t_3)], \\ \dot{x}_3 &= x_4, \quad \dot{x}_4 = -cx_1 + x_5 [1 - 2\theta(t - t_1) + 2\theta(t - t_2) - 2\theta(t - t_3)], \\ \dot{t}_1 &= 0, \quad \dot{t}_2 = 0, \quad \dot{t}_3 = 0, \quad \dot{t}_f = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь $x_5 = u$, $\theta(t - t_i)$ — единичная функция ($i = \overline{1,3}$).

Сначала в прямом времени интегрируется система (6), а затем совместно с (6) в обратном времени на интервале оптимизации производится интегрирование системы уравнений для сопряженных переменных

$$\begin{aligned} \dot{p}_1 &= ap_2 + cp_4, \dot{p}_2 = -p_1, \dot{p}_3 = 0, \dot{p}_4 = -p_3, \dot{p}_{t_1} = -2x_5\delta(t-t_1)(p_2 + p_4), \\ \dot{p}_{t_2} &= 2x_5\delta(t-t_2)(p_2 + p_4), \dot{p}_{t_3} = -2x_5\delta(t-t_3)(p_2 + p_4), \end{aligned} \quad (7)$$

где $\delta(t-t_i)$ — дельта-функция.

Интегрирование системы (7) в обратном времени по траектории свободного движения выполняется при начальных условиях на правом конце $p_i(t_f)$, которые определяются из условий трансверсальности $p(t_f) = \left(\frac{\partial V_f}{\partial x}\right)^T$ по невязкам конечного вектора состояния, вычисленного посредством интегрирования прогнозирующей модели (6) на интервале оптимизации $[t, t_f]$. Здесь $p_i(t_f) = \rho_i(x_i(t_f) - x_{if})$ ($i = \overline{1,4}$). При этом $p_{t_i}(t) = 2(-1)^i u_{\max} [p_2(t_i) + p_4(t_i)]$ ($i = \overline{1,3}$), $p_{t_4}(t) = H(t_f)$ [3].

Управления определяются, согласно соотношениям

$$w_k = -k_k^2 p_{t_k} \quad (k = \overline{1,4}),$$

которые следуют из условия минимизации гамильтониана (5) по параметрам управления $\frac{\partial H}{\partial w_k} = 0$.

Длительность цикла ограничивается сверху величиной Δt_{\max} — допустимой дискретностью управления процессом, а снизу — Δt_{\min} — производительностью ЭВМ, осуществляющей вычисления в режиме реального времени.

Результаты расчетов по определению компонентов вектора состояния и управления при $\rho_1 = 0,1$; $\rho_2 = 0,7$; $\rho_3 = 0,4$; $\rho_4 = 0,4$; $\rho_5 = 0,1$; $\rho_6 = 0,001$; $k_1 = 0,1$; $k_2 = 0,1$; $k_3 = 0,1$; $k_{t_f} = 2,0$ приведены на рис. 1. Алгоритм позволяет эффективно удовлетворять всем краевым условиям, наиболее точно — по координатам прихода x_3 и углу отклонения подвеса x_1 .

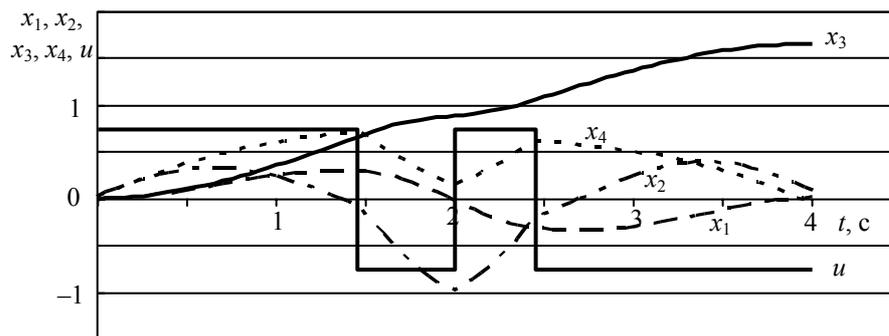


Рис. 1

Более гибкий вариант алгоритма можно получить, предположив возможность управления интенсивностью силового воздействия u_{\max} . В этом случае к системе (1) кроме (2) следует добавить уравнение $\dot{\mathbf{u}}_{\max} = \mathbf{v}$, где $\mathbf{u}_{\max} = (u_{\max 1} \ u_{\max 2} \ u_{\max 3} \ u_{\max 4})^T$ — вектор интенсивностей силовых воздействий ($i = \overline{1,4}$), $\mathbf{v} = (v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_4)^T$ — вектор управления величинами $u_{\max i}$.

Приведенное решение дает физически оправданное начальное приближение констант интегрирования для краевой задачи. В качестве начальных значений указанных констант для данной задачи можно принять следующие:

$$\begin{aligned} p_1(0) = C_1 = 0,346; p_2(0) = C_2 = -0,158; p_3(0) = C_3 = 0,146; \\ p_4(0) = C_4 = 0,138. \end{aligned} \quad (8)$$

Полученное выше время доставки груза $t_f = 4,04$ в назначенную точку используется как начальная оценка оптимального времени для принципа максимума. Решение краевой задачи методом Ньютона [7], при выбранном таким образом начальном приближении, показывает приемлемую и достаточно равномерную сходимость к искомому результату за 25 итераций с нормой невязки $\|\varphi(\mathbf{p}_0^{(n)})\| = 0,798$. В результате итерационного процесса получается следующий набор констант интегрирования при $t_f = 3,879$ с: $C_1 = -0,022 19$; $C_2 = 0,064 49$; $C_3 = -0,233 38$; $C_4 = -0,453 85$.

В точке прихода фазовые переменные имеют следующие значения $x_1 = -0,056$; $x_2 = -0,1564$; $x_3 = 1,780$; $x_4 = 0,0966$. Графики изменения управления и фазовых переменных приведены на рис. 2.

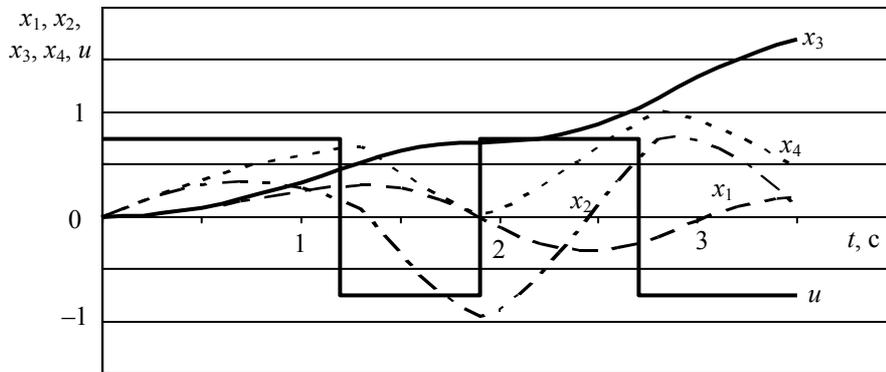


Рис. 2

Алгоритм с фиксированной программой прогноза движения может служить как основным инструментом для получения оптимального по критерию Красовского управления перемещением груза, так и вспомогательным — для определения начальных значений сопряженных переменных при решении краевой задачи принципа максимума методом Ньютона.

3. С учетом трудностей, возникающих при попытке удовлетворения всего набора краевых условий задачи с одинаковой точностью, необходимо разделять условия по уровню значимости. В подобной ситуации эффективной является последовательная оптимизация движения механической системы по иерархии критериев оптимальности на основе использования прогнозирующей модели. Возможно введение приоритетов точности удовлетворения граничным условиям по разным компонентам вектора состояния и соответственно выработки управления. При решении рассматриваемой задачи применяется упрощенный двухуровневый вариант алгоритма, изложенного в работе [3].

Динамика управляемого процесса описывается системой уравнений для вектора состояния (1), дополненных уравнением

$$(\dot{x}_5 \ \dot{x}_6)^T = u, \quad (9)$$

$$u = u_1 + u_2, \quad (10)$$

где $x_6 = t_f$, а управления u_1 и u_2 минимизируют соответственно следующие целевые функционалы I_1, I_2 :

$$I_i = V_{f_i}(\mathbf{x}, t_f) + \int_{t_0}^{t_f} f_{0i}(\mathbf{x}, t) dt,$$

$$V_{f1}(x, t_f) = \frac{1}{2} \rho_3 (x_3(t_f) - x_{3f})^2,$$

$$V_{f2}(x, t_f) = \frac{1}{2} \rho_1 (x_1(t_f) - x_{1f})^2 + \frac{1}{2} \rho_2 (x_2(t_f) - x_{2f})^2 + \frac{1}{2} \rho_4 (x_4(t_f) - x_{4f})^2 + \frac{1}{2} \rho_5 t_f^2,$$

где $f_{01}(\mathbf{x}, t) = 0$, $f_{02}(\mathbf{x}, t) = u_2^T k^2 u_2 + u_{20}^T k^{-2} u_{20}$, $k = \text{diag}(k_5, k_6)$, ρ_i ($i = \overline{1, 5}$) и k_5, k_6 — заданные коэффициенты.

На первом уровне оптимизации итеративным путем из условия минимума критерия I_1 подбирается оптимальное начальное значение x_5^0 управляющего фактора x_5 , с которым выполняется интегрирование системы (1), (9) при $u_1 = 0$, $u_2 = 0$ на интервале времени $[t, t_f]$. Затем производится вычисление значений сопряженных переменных $p_i(t_f)$ по невязкам выполнения краевых условий $p_i(t_f) = \rho_i (x_i(t_f) - x_{if})$. При найденных граничных значениях $\mathbf{x}(t_f)$, $\mathbf{p}(t_f)$ осуществляется совместное интегрирование систем (1), (9) и сопряженной системы в обратном времени на интервале $[t_f, t]$ с последующим получением значений $\mathbf{p}(t)$.

Управление 1-го уровня может быть вычислено различными способами. В данном случае используется упрощенный алгоритм коррекции его начального значения на ближайший интервал управляемого движения длительностью Δt

$$\mathbf{u}_1 = \left(\frac{x_5^0 - x_5^t}{\Delta t} \ 0 \right)^T,$$

где $x_5^t = x_5(t)$. Вычисление x_5 производится любым численным методом итерационным путем из условия $x_3 = x_{3f}$ при некотором начальном оценочном значении времени прихода t_f , x_5^t на первом шаге решения принимается равным начальному значению x_5 , а на последующих — получается из решения задачи Коши для уравнения $\dot{x}_5 = u$, в которой за начальное значение принимается x_5 с предыдущего шага.

Импульс, обеспечивающий механической системе быстрое действие, получается согласно соотношению

$$p_t = H_M + \rho_6 t_f,$$

где ρ_6 — весовой коэффициент, $H_M = p_1 x_2 + p_2 (-a x_1 + x_5) + p_3 x_4 + p_4 (-c x_1 + x_5)$ — гамильтониан, соответствующий неуправляемому движению модели.

Управление 2-го уровня имеет вид

$$\mathbf{u}_2 = (-k_5 p_5 \ -k_6 p_t)^T.$$

Таким образом, искомое управление получается как сумма управлений, определяемых на 1-м и 2-м уровнях.

С управлением, вычисленным согласно (10), производится интегрирование системы (1), (9) на один шаг Δt вперед. После этого все описанные процедуры повторяются при уточненном значении момента конца интервала. Получаемое управление представляет собой кусочно-постоянную функцию на каждом промежутке времени Δt . Для сглаживания кривых изменения скоростей (x_2, x_4) применяется специальный способ вычисления управляющего фактора x_5 . Он определяется как среднее арифметическое значений x_5 , вычисленных для движения на два последовательных шага вперед (при этом первый шаг по траектории проходит виртуально

с управлением, вычисленным согласно описанному выше алгоритму, а для второго управление только вычисляется, но последующее управляемое перемещение не осуществляется). С этим значением x_5 осуществляется один шаг по траектории управляемого движения. Затем вся процедура повторяется.

Результаты вычислений по указанному алгоритму при $\rho_1 = 0,1$; $\rho_2 = 0,0$; $\rho_3 = 10$; $\rho_4 = -30$; $\rho_5 = 0,1$; $\rho_6 = 0,001$; $k_5 = 1,0$; $k_6 = 0,001$ представлены на рис. 3. Шаг вычислений $\Delta t = 0,05$ с. В точке прихода при $t_f = 3,85$ с зафиксированы следующие значения фазовых переменных: $x_1 = 0,1097$; $x_2 = -0,0579$; $x_3 = 1,6208$; $x_4 = 0,6907$.

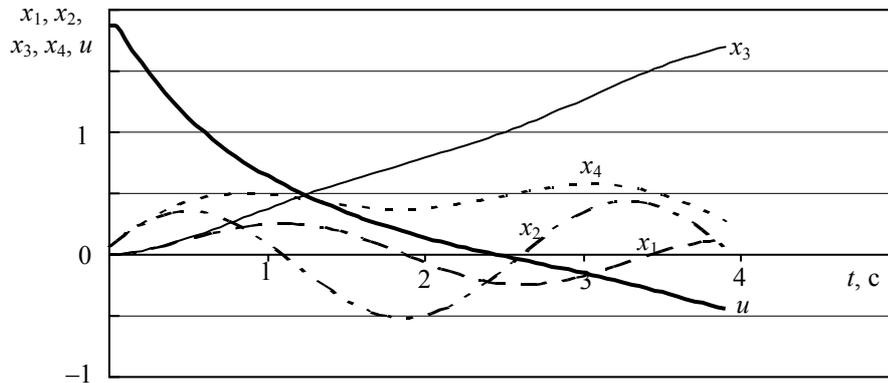


Рис. 3

В статье исследованы возможности построения оптимального управления тележкой мостового крана с использованием различных методов оптимизации. Показано, что алгоритм управления с заданной программой прогноза движения может служить как основным инструментом для получения оптимального по критерию Красовского управления перемещением груза, так и вспомогательным — для нахождения начальных значений сопряженных переменных при решении краевой задачи принципа максимума для максимального быстродействия методом Ньютона.

Исследования, описанные в настоящей статье, выполнены по гранту Российского фонда фундаментальных исследований № 09-08-008-29.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.
2. Troch I. Parametrisierung – Ein Werkzeug zur Berechnung optimaler Steuerungen // Automatisierungstechnik AT. 1990. Bd 38. N 6. S. 230—236.
3. Кабанов С. А. Управление системами на прогнозирующих моделях. СПб. Изд-во СПбГУ, 1997. 200 с.
4. Кабанов С. А. Оптимизация динамики систем при действии возмущений. М.: Физматлит, 2008. 200 с.
5. Кабанов Д. С. Оптимальное управление ядерным реактором с учетом случайных возмущений // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 5. С. 27—30.
6. Якушева Д. Б. Решение навигационной задачи Цермело при линейно-вихревой структуре течения // Процессы управления и устойчивость: Тр. 40-й Междунар. науч. конф. СПб: Издат. дом СПбГУ, 2009. С. 91—96.
7. Федоренко Р. П. Приближенное решение задач оптимального управления. М.: Наука, 1978. 488 с.
8. Кабанов С. А., Якушев Б. Э. Использование неклассического критерия оптимальности в задаче управления работой подъемно-транспортного оборудования // Докл. 55-й конф. СПбГАСУ. Ч. I. СПб: Изд-во СПбГАСУ, 1998. С. 63—65.

Сведения об авторах

Сергей Александрович Кабанов

— д-р техн. наук, профессор; Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“ им. Д. Ф. Устинова, кафедра систем обработки информации и управления; E-mail: kaba-sa@mail.ru

- Евгений Николаевич Никулин** — д-р техн. наук, профессор; Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“ им. Д. Ф. Устинова, кафедра средств поражения и боеприпасов; E-mail: enikulin@onixmail.ru
- Борис Эдуардович Якушев** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, кафедра теоретической механики; E-mail: yakushev.spb@mail.ru
- Дарья Борисовна Якушева** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет, кафедра информационных систем; E-mail: dariayakusheva@gmail.com

Рекомендована кафедрой
систем обработки информации и управления

Поступила в редакцию
14.12.09 г.

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 681.5.11

А. А. АБДУЛЛИН, В. А. ТОЛМАЧЕВ

СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ДВУХМАССОВОГО МЕХАНИЗМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАБЛЮДАТЕЛЯ

Рассмотрена трехконтурная скоростная подсистема следящего электропривода системы наведения телескопа с двухмассовой исполнительной осью и дополнительной обратной связью по наблюдаемой скорости второй массы. Предложена векторно-матричная математическая модель подсистемы, проведен ее синтез и исследовано влияние ошибок наблюдателя на статические и динамические характеристики подсистемы.

Ключевые слова: следящий электропривод, исполнительная ось, двухмассовый механизм, скоростная подсистема, наблюдатель координат, математическая модель.

Введение. Объектом исследования в настоящей работе является следящий электропривод азимутальной оси опорно-поворотного устройства большого телескопа ТИ-3,12 м, упрощенная конструктивная схема которого описана в работе [1], где отмечено, что угломестная и азимутальная оси опорно-поворотного устройства (ОПУ) являются нежесткими.

Следящие электроприводы осей, как правило, строятся по структурной схеме с подчиненным регулированием параметров, при этом верхняя граница полосы пропускания частот, определяющая динамические ошибки слежения, при наличии лишь датчиков угла и скорости только двигателя (первой массы) ограничивается нижней из частот механических резонансов оси и коэффициентом соотношения масс [2].

Расширение полосы пропускания системы в условиях нежесткости осей ОПУ возможно при введении дополнительных обратных связей по скорости и углу поворота второй массы. Последнее может быть достигнуто либо установкой соответствующих датчиков на обеих массах, либо использованием наблюдателей неизмеряемых датчиками координат.

В проведенной работе исследовалась трехконтурная скоростная подсистема следящего электропривода азимутальной оси со структурной схемой, представленной на рис. 1.

Первый внешний контур регулирования скорости содержит интегральный (И) регулятор скорости, на входе которого напряжение $U_{3\Omega}$, пропорциональное заданному значению скорости входного конца исполнительной оси ОПУ, сравнивается с напряжением U_{Ω} , формируемым датчиками скоростей масс оси ОПУ. Комбинация коэффициентов $K_1=1$, $K_2=0$, $K_3=0$ соответствует системе с обратной связью только по сигналу датчика скорости двигателя; комбинация $K_1\neq 0$, $K_2=0$, $K_3\neq 0$ — системе с обратными связями по сигналу датчика скорости двигателя и по сигналу датчика скорости второй массы; комбинация $K_1\neq 0$, $K_2\neq 0$, $K_3=0$ — системе с обратными связями по сигналу датчика скорости двигателя и по сигналу наблюдателя

скорости второй массы механизма. Здесь полагается, что коэффициенты передачи датчиков скорости масс и наблюдателя одинаковы и равны K_Ω .

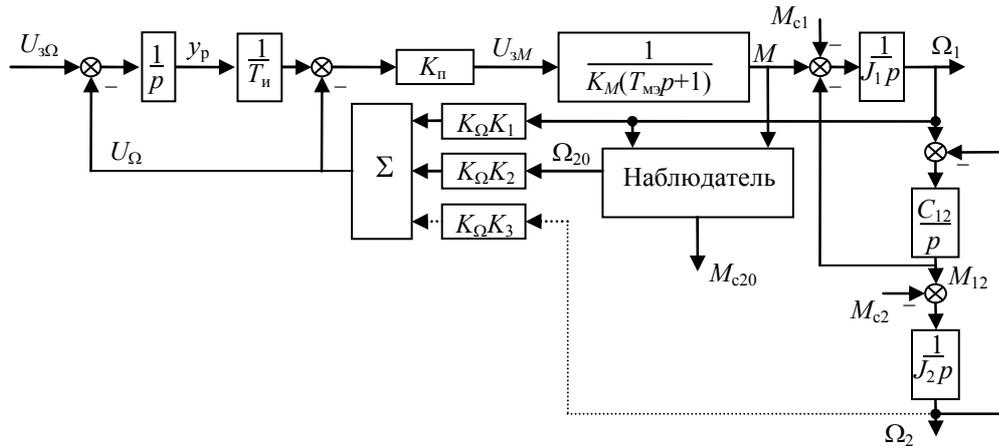


Рис. 1

Выходной сигнал регулятора с постоянной времени интегрирования T_{ii} является напряжением задания для внутреннего контура регулирования скорости, содержащего пропорциональный регулятор с коэффициентом передачи $K_{п}$. Такое двухконтурное построение скоростной подсистемы при настройке каждого из контуров на „технический оптимум“ позволяет снизить перерегулирование при реакции на скачок сигнала задания до 4,3 % относительно перерегулирования (43 %) в двухконтурной скоростной подсистеме с ПИ-регулятором скорости и настройкой на „симметричный оптимум“ [3]. Выходной сигнал U_{3M} регулятора скорости внутреннего контура является сигналом задания для контура регулирования электромагнитного момента двигателя. В работе [4] показано, что синхронный электромеханический преобразователь с датчиком положения ротора, инвертором напряжения и контурами регулирования фазных токов на этапе моделирования может быть представлен эквивалентным контуром регулирования электромагнитного момента с передаточной функцией апериодического звена первого порядка с постоянной времени T_{M2} . Методика синтеза регуляторов контуров рассматриваемой подсистемы с обратной связью только по скорости вала двигателя (первой массы) приведена в работе [5].

По данным разработчика ОПУ телескопа ТИ-3,12 м, расчетные параметры двухмассовой модели механизма азимутальной оси следующие: момент инерции первой массы $J_1=6600 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, второй массы — $J_2=197\,300 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, коэффициент жесткости $C_{12}=8,62\cdot 10^8$, момент нагрузки на валу двигателя $M_{c1}=800 \text{ Н}\cdot\text{м}$ типа „сухое трение“, момент нагрузки на второй массе — ветровой с заданной спектральной плотностью и максимальным значением до 3000 Н·м. Примем коэффициенты передачи датчиков момента и скорости равными соответственно $K_M=1,34 \text{ В/Н}\cdot\text{м}$, $K_\Omega=38,1 \text{ В}\cdot\text{с}$ и $T_{M2}=4\cdot 10^{-4} \text{ с}$. Тогда, используя методику синтеза, изложенную в работе [5], получим $K_{п}=201$, $T_{ii}=72\cdot 10^{-3} \text{ с}$. Полоса пропускания внешнего контура составляет $f_{п}=4,5 \text{ Гц}$ при переходном процессе, соответствующем настройке на „технический оптимум“ с временем $t_{п}=0,214 \text{ с}$ и перерегулированием 4,3 %.

Расширить полосу пропускания частот до значения $f_{п}=17,8 \text{ Гц}$ с сохранением эталонного качества переходного процесса, пересчитав параметры регуляторов контуров ($K_{п}=804$, $T_{ii}=18\cdot 10^{-3} \text{ с}$) в системе с обратной связью только по скорости двигателя, не удастся, поскольку при этом возрастает колебательность переходного процесса относительно эталонного.

Введение дополнительных обратных связей по сигналу идеального датчика скорости второй массы на вход контуров с $K_1=0,1$ и $K_3=0,9$ позволяет реализовать требуемую полосу пропускания частот скоростной подсистемы с сохранением расчетных параметров переход-

ного процесса. При отсутствии такого датчика возможен вариант с использованием наблюдателя скорости второй массы.

Структурная схема системы „двухмассовый механизм—наблюдатель“ представлена на рис. 2.

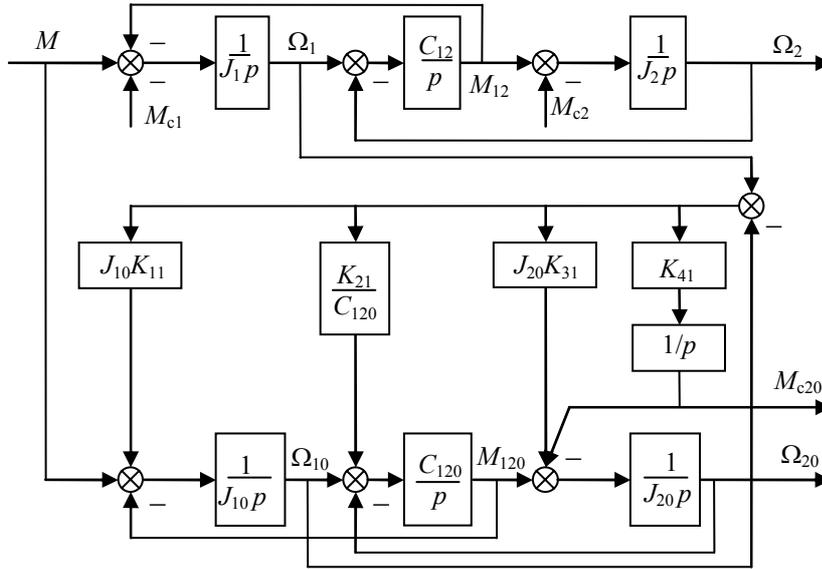


Рис. 2

Наблюдатель позволяет по измеренному электромагнитному моменту двигателя M и скорости вала двигателя Ω_1 восстанавливать скорость первой массы Ω_{10} , момент упругой связи M_{120} , скорость второй массы Ω_{20} и ветровой момент нагрузки на второй массе M_{c2} . В соответствии с работой [6] наблюдатель должен включать в себя четыре интегратора. На вход первого вводится сигнал управления в виде электромагнитного момента двигателя M и сигнал ошибки $(\Omega_1 - \Omega_{10})$, умноженный на коэффициент K_{11} , а на входы остальных интеграторов — только сигналы ошибки, взятые в масштабах, определяемых коэффициентами K_{21} , K_{31} , K_{41} . Эти коэффициенты определяют собственную динамику наблюдателя. Будучи рассчитанными по формулам

$$K_{11} = 2,6\omega_d, K_{21} = J_{10}(\omega_0^2 - 3,4\omega_d^2), K_{31} = 2,6\omega_d \frac{J_{10}}{J_{20}} \left(\frac{\omega_d^2}{\omega_0^2} - 1 \right), K_{41} = -\omega_d^4 \frac{J_{10}J_{20}}{C_{120}},$$

где ω_d — частота, определяющая быстродействие наблюдателя, а ω_0 — резонансная частота двухмассового механизма, они обеспечивают для распределения корней наблюдателя стандартную форму Баттерворта 4-го порядка [6]

$$p^4 + 2,6\omega_d p^3 + 3,4\omega_d^2 p^2 + 2,6\omega_d^3 p + \omega_d^4.$$

Для полинома 4-го порядка длительность затухания колебательного переходного процесса связана с частотой ω_d соотношением $t_{зат} \approx 6,8/\omega_d$.

В нашем случае $\omega_0 = 367 \text{ с}^{-1}$ и при моделировании принято $\omega_d = 1000 \text{ с}^{-1}$, при этом $K_{11} = 2,6 \cdot 10^3$, $K_{21} = -2,15 \cdot 10^{10}$, $K_{31} = 1,98 \cdot 10^4$, $K_{41} = -1,5 \cdot 10^{12}$.

Для приведенной на рис. 1 структурной схемы можно записать систему уравнений в матричной форме

$$\frac{d\mathbf{Y}}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{Y} + \mathbf{B}\mathbf{U},$$

где

$$\mathbf{Y}^T = [M \quad \Omega_1 \quad M_{12} \quad \Omega_2 \quad y_p \quad \Omega_{10} \quad M_{120} \quad \Omega_{20} \quad M_{c20}]$$

— вектор состояния, элементами которого являются соответственно электромагнитный момент двигателя, скорость первой массы (двигателя), момент упругой связи объекта, скорость

второй массы (вилки с трубой телескопа), выход интегратора второго внешнего контура регулирования скорости, восстанавливаемая скорость первой массы, восстанавливаемый момент упругости, восстанавливаемая скорость второй массы, восстанавливаемый момент нагрузки,

$$\mathbf{U}^T = [U_{3\Omega} \quad M_{c1} \quad M_{c2}]$$

— вектор внешних воздействий, элементами которого являются соответственно напряжение задания на входе внешнего контура регулирования скорости и моменты статической нагрузки на первой и второй массах,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{мэ}} & -\frac{K_1 K_\Omega K_\Pi}{T_{мэ} K_M} & 0 & -\frac{K_3 K_\Omega K_\Pi}{T_{мэ} K_M} & \frac{K_\Pi}{T_{и} K_M T_{мэ}} & 0 & 0 & -\frac{K_2 K_\Omega K_\Pi}{T_{мэ} K_M} & 0 \\ \frac{1}{J_1} & 0 & -\frac{1}{J_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{12} & 0 & -C_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{J_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -K_1 K_\Omega & 0 & -K_3 K_\Omega & 0 & 0 & 0 & -K_2 K_\Omega & 0 \\ \frac{1}{J_{10}} & K_{11} & 0 & 0 & 0 & -K_{11} & -\frac{1}{J_{10}} & 0 & 0 \\ 0 & K_{21} & 0 & 0 & 0 & C_{120} - K_{21} & 0 & -C_{120} & 0 \\ 0 & K_{31} & 0 & 0 & 0 & -K_{31} & \frac{1}{J_{20}} & 0 & -\frac{1}{J_{20}} \\ 0 & K_{41} & 0 & 0 & 0 & -K_{41} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

\mathbf{B} — прямоугольная (9×3)-матрица, содержащая три ненулевых элемента: $b_{21} = -1/J_1$, $b_{43} = -1/J_2$, $b_{51} = 1$.

Предложенная математическая модель позволяет анализировать процессы в исследуемой системе при трех различных вариантах обратных связей в зависимости от значений коэффициентов K_1 , K_2 и K_3 .

С использованием разработанной векторно-матричной модели скоростной подсистемы с наблюдателем было проведено математическое моделирование переходных процессов в системе и проанализировано влияние отклонения параметров наблюдателя от расчетных.

Ряд результатов моделирования иллюстрируются рис. 3, здесь: 1 — скорость вала двигателя Ω_1 , 2 — момент упругой связи механизма оси M_{12} , 3 — скорость второй массы Ω_2 , 4 — восстановленная наблюдателем скорость вала двигателя Ω_{10} , 5 — восстановленный момент упругой связи механизма оси M_{120} , 6 — восстановленная скорость второй массы Ω_{20} , 7 — наблюдаемый момент статической нагрузки M_{c20} , 8 — электромагнитный момент двигателя M , 9 — ветровой момент на второй массе M_{c2} , 10 — эталонная кривая изменения скорости, соответствующая настройке внешнего контура регулирования скорости на технический оптимум $\Omega_{эт}$. На графиках истинные значения всех скоростей увеличены в 20 000 раз, а истинные значения всех моментов уменьшены в 100 раз на рис. 3, а и в 1000 раз — на рис. 3, в.

Кривые на рис. 3, а, б иллюстрируют процессы в системе с обратной связью только по скорости первой массы ($K_1=1$, $K_2=0$, $K_3=0$). Система настроена по методике [5] из условия обеспечения полосы пропускания частот 4,5 Гц. Графики на рис. 3, а иллюстрируют процессы при реакции на скачок сигнала задания при нулевых моментах нагрузки на массах, графики на рис. 3, б — режим стабилизации скорости при наличии ветрового момента на второй массе с максимальным значением 3200 Н·м. Как видно, кривые процессов изменения скорости первой и

второй масс соответствуют эталонной кривой и практически совпадают (рис. 3, а). При этом восстанавливаемые наблюдателем с расчетными параметрами координаты механизма соответствуют истинным. В режиме стабилизации скорости (рис. 3, б) при воздействии ветрового момента максимальные отклонения скоростей масс от заданного значения превышают последнее. Следует заметить, что наблюдатель вполне точно воспроизводит ветровой момент.

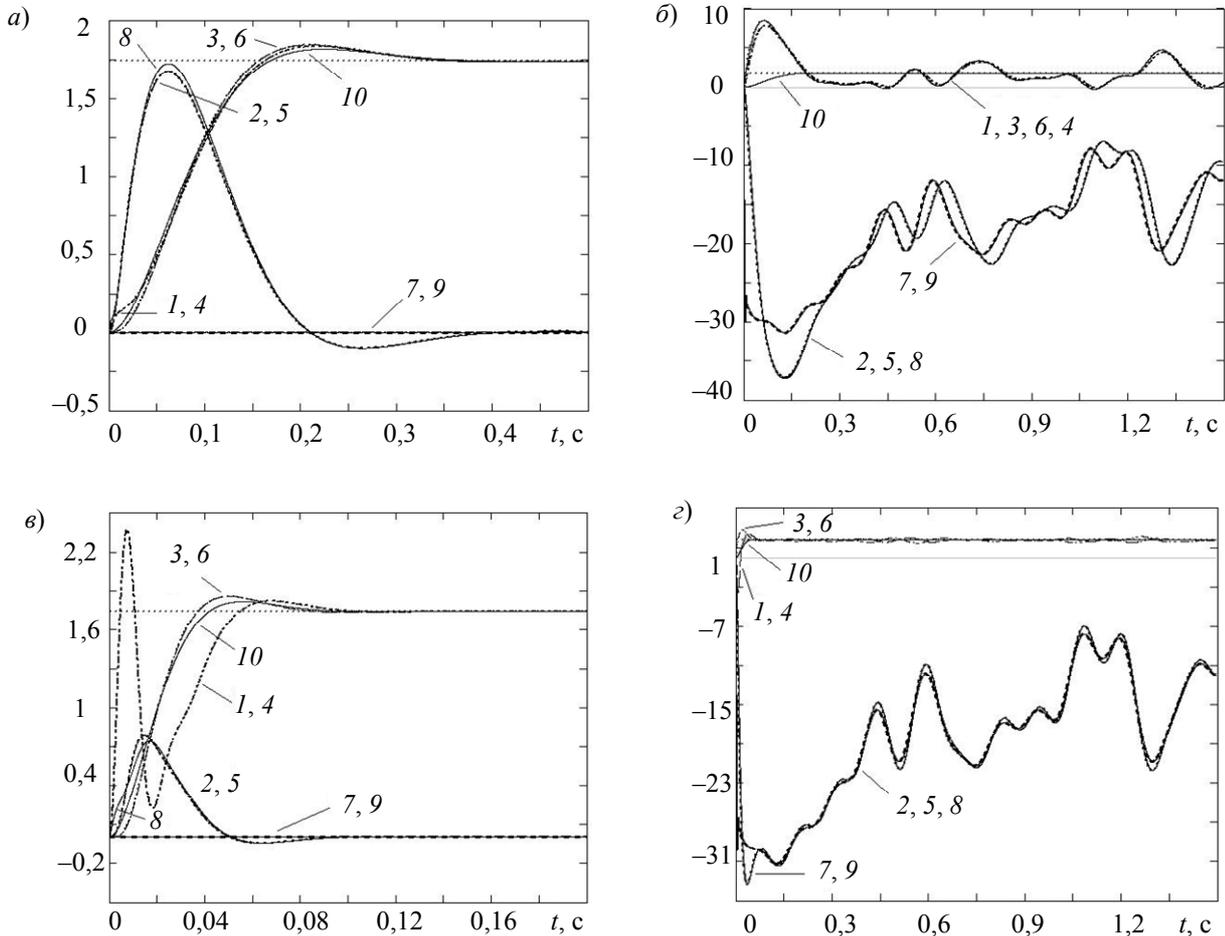


Рис. 3

Кривые на рис. 3, в, г иллюстрируют процессы в системе с обратными связями как по скорости первой массы, так и по восстановленной наблюдателем скорости второй массы ($K_1=0,1$; $K_2=0,9$; $K_3=0$). Система настроена по методике [5] из условия обеспечения полосы пропускания частот 17,8 Гц. Как видно, кривая процесса изменения скорости второй массы соответствуют эталонной (рис. 3, в) при вчетверо большем быстродействии. Процесс изменения скорости первой массы носит более колебательный характер по сравнению с предыдущим вариантом, что не является существенным для данной системы. При этом восстанавливаемые наблюдателем с расчетными параметрами координаты механизма соответствуют истинным. В режиме стабилизации скорости (рис. 3, г) при воздействии ветрового момента максимальные отклонения скорости масс от заданного значения снизились практически вчетверо. Следует заметить, что описанные процессы идентичны процессам в системе с датчиком скорости второй массы ($K_1=0,1$; $K_2=0$; $K_3=0,9$).

Проведенное моделирование показало, что

— отклонение параметров механизма J_1, J_2, C_{12} от расчетных, соответствующих параметрам наблюдателя J_{10}, J_{20}, C_{120} , более чем на 5 % может привести к потере устойчивости скоростной подсистемы, замкнутой по выходному сигналу наблюдателя;

— наличие момента нагрузки M_{c1} типа „сухое трение“ на валу двигателя (на первой массе) приводит к появлению ошибок в воспроизведении наблюдателем скорости второй

массы, момента упругой связи и ветрового момента на второй массе, а замыкание системы по координате наблюдателя приводит к потере ее устойчивости;

— подача на вход синтезированного наблюдателя истинного значения момента M_{c1} приводит к устранению указанных ошибок, а замыкание системы по наблюдаемой скорости эквивалентно замыканию ее по сигналу идеального датчика скорости второй массы.

Заключение. При полном соответствии параметров синтезированного наблюдателя и механизма введение обратной связи по наблюдаемой скорости второй массы в исследуемой структуре скоростной подсистемы может способствовать улучшению ее статических и динамических характеристик. Эффективность применения наблюдателя в системе с выбранной структурой в значительной степени связана с точностью идентификации параметров механизма оси и определения момента нагрузки на валу двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Исупов А. Н., Исупов К. С., Храмов С. Н.* Определение амплитудно-частотных характеристик альт-азимутального опорно-поворотного устройства крупногабаритного наземного телескопа // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 3. С. 38—44.
2. *Борцов Ю. А., Соколовский Ю. Г.* Автоматизированный электропривод с упругими связями. СПб: Энергоатомиздат, 1992. 288 с.
3. *Ключев В. И.* Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.
4. *Толмачев В. А., Антипова И. В., Фомин С. Г.* Математическая модель следящего электропривода оси опорно-поворотного устройства // Науч.-технич. вестн. СПбГУ ИТМО. 2007. № 44.
5. *Толмачев В. А.* Синтез следящего электропривода оси опорно-поворотного устройства // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 3. С. 68—72.
6. *Кузовков Н. Т.* Модальное управление и наблюдающие устройства. М.: Машиностроение, 1976.

Сведения об авторах

Артур Александрович Абдуллин

— студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем;
E-mail: artur.abdullin@gmail.com

Валерий Александрович Толмачев

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем; E-mail: tolmachev@ets.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой
электротехники и прецизионных
электромеханических систем

Поступила в редакцию
05.05.10 г.

П. А. ГАЛАЙДИН, Ю. Н. МУСТАФАЕВ, А. И. МУСТЕЙКИС

**ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ПРОЦЕССОВ
В ДЕТОНАЦИОННЫХ ТРУБАХ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИОНИЗАЦИОННЫХ РЕГИСТРАТОРОВ**

Использование управляемой детонации позволит создавать новые системы реактивного движения и энергетические установки. Для изучения процессов, происходящих в детонационной трубе, создан макет, в котором в качестве датчиков применены ионизационные регистраторы, а также эффективная схема измерения и фиксации полученных результатов.

Ключевые слова: ионизационный регистратор, детонация, измерение, проводимость, ударная волна, формирующий усилитель.

В настоящее время активно ведутся научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по использованию управляемой детонации в новых системах реактивного движения и других энергетических установках. Детонация — самый эффективный из всех возможных способов прямого сжигания вещества. По сравнению с прямоточным воздушно-реактивным двигателем с обычным горением двигатель, в котором использована детонация, способен обеспечить экономию топлива до 30 % [1].

Одной из главных проблем при создании импульсных детонационных двигателей (ИДД) является низкая детонационная способность топливно-воздушных смесей, пригодных для применения в летательных аппаратах (смеси пропана или керосина с воздухом). Эти смеси отличаются крайне высокой энергией инициирования детонации (порядка сотен килоджоулей), что не позволяет инициировать процесс детонации напрямую источником зажигания с мощностью, приемлемой для летательного аппарата. Использование подобных видов топлива в ИДД возможно только при использовании части топливно-воздушной смеси в процессе перехода медленного горения, инициируемого источником зажигания малой мощности, в детонацию в камере сгорания ИДД. Очевидно, что этот подход связан с потерей удельного импульса тяги двигателя, поэтому необходимо изучать влияние различных факторов на процесс превращения медленного горения в детонацию с целью минимизации преддетонационного расстояния и соответственно потерь удельного импульса тяги ИДД.

В классическом представлении детонация — это распространение по топливной смеси сложного трехмерного процесса, состоящего из детонационной волны и зоны реакции за ней. Детонационная волна распространяется по несгоревшей топливной смеси с постоянной скоростью, зависящей только от состава топливной смеси. Для представляющих практический интерес пропано-воздушной и керосино-воздушной смесей скорость распространения детонационной волны составляет примерно 1800 м/с [2, 3]. Достоверное измерение скорости горения и распространения детонации в детонационной трубе требует поиска оригинальных методов и способов.

Существует ряд способов измерения характеристик быстропеременных процессов. В настоящее время для точной регистрации скоростей процессов в детонационных трубах применяются методы

- фиксации распространения волн давления в детонационной камере с помощью акустических пьезоэлектрических датчиков давления;
- фиксации распространения фронта горения фотодатчиками;
- регистрации изменения показателя преломления газа (так называемый шпирен-метод, основанный на обнаружении оптических неоднородностей в прозрачных преломляющих средах и дефектов отражающих поверхностей, предложенный немецким ученым Теплером [4]).

Датчики акустического давления предназначены для измерения относительно малых уровней давления и имеют ограничения по температуре. Акустические датчики работают в диапазоне температур от -70 до $+200$ °С при воздействии избыточного медленноменяющегося давления до 0,2 МПа. Чувствительность датчика при изменении давления и температуры отклоняется на ± 30 %. Диапазон частот для данного типа датчиков составляет от 3 до 4000 Гц [5]. Эти ограничения приводят к механической неустойчивости при измерении скорости распространения детонации. Применение акустических датчиков показало, что данный метод неприемлем: после нескольких экспериментов датчики давления выходили из строя.

Использование оптического метода контроля позволяет получать достоверные результаты, однако при этом используется дорогостоящее измерительное оборудование, изменяющее сечение детонационной трубы. Кроме того, вследствие присутствия продуктов горения в детонационной камере изменяются и свойства канала оптического измерения [6]. Поэтому был выбран метод измерения, основанный на регистрации процессов ионизации.

Метод, описываемый в настоящей работе, заключается в фиксировании изменения электронной проводимости среды ионизационными регистраторами. В детонационной волне продукты горения, находящиеся под большим давлением при высокой температуре, сильно ионизированы и плотность электронов достигает 10^{17} — 10^{20} см $^{-3}$. При этом проводимость среды оказывается выше, чем проводимость полупроводников. В исходном состоянии пропано-воздушная и керосино-воздушная смеси являются хорошим изолятором. Эти свойства позволили разработать достаточно простые и эффективные ионизационные регистраторы (рис. 1).

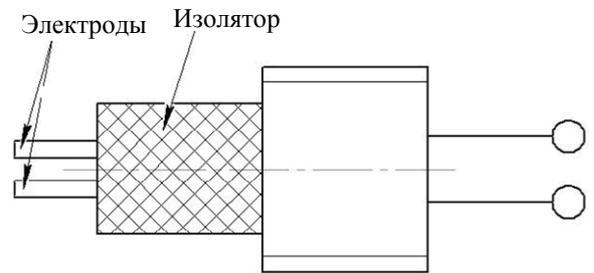


Рис. 1

Торцы двух электродов регистратора, вмонтированных в изолятор, устанавливаются в плоскости внутренней стенки детонационной трубы. Расстояние между электродами около 1 мм. Три ионизационных регистратора располагаются в детонационной трубе. На свечу подается электрический импульс, поджигающий горючую смесь в камере инициирования.

При прохождении фронта пламени по детонационной трубе ионизированный газ замыкает цепь между электродами, что приводит к резкому скачку напряжения в цепях регистраторов.

Ионизационные регистраторы соединены через конденсаторы малой емкости $C1$, $C2$ и $C3$ с входами формирующих усилителей. Конденсаторы предварительно заряжаются до напряжения питания через ограничивающие сопротивления $R1$, $R2$ и $R3$ (рис. 2).

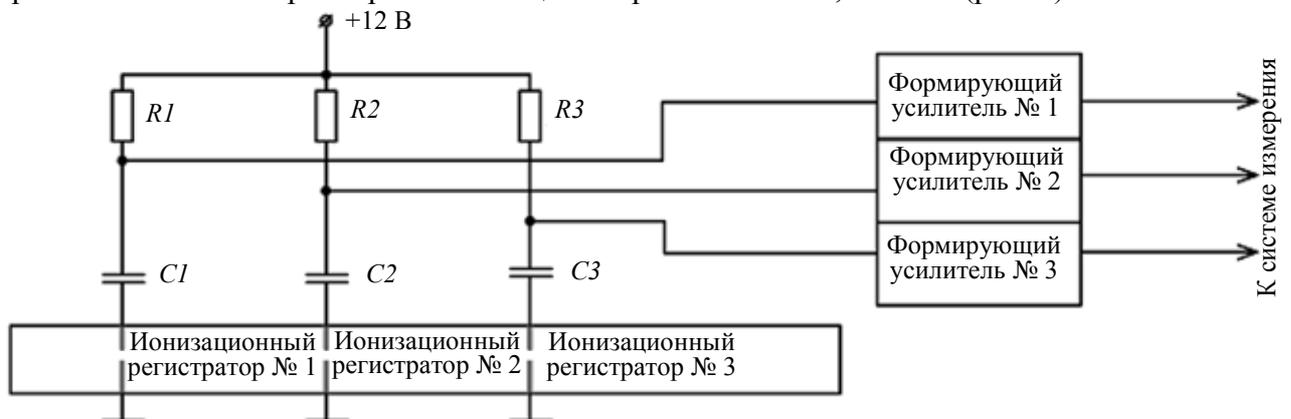


Рис. 2

В момент замыкания первого датчика ионизированным фронтом детонационной волны конденсатор $C1$ начинает разряжаться через ионизационный регистратор № 1 и входное сопротивление формирующего усилителя № 1. Возникает кратковременный (из-за малой

емкости конденсатора) импульс разрядного тока, который вызывает появление скачка напряжения на входе формирующего усилителя № 1. Параметры выходного сигнала (длительность, крутизна фронта нарастания) определяются значениями $R1$, $C1$ и степенью ионизации продуктов горения в детонационной трубе. Когда фронт детонации достигает ионизационных регистраторов № 2 и 3, аналогичные импульсы последовательно поступают на входы остальных формирующих усилителей.

Формирование сигналов осуществляется быстродействующими операционными усилителями с высоким входным сопротивлением и двухполярным питанием. Электрическая схема одного из формирователей приведена на рис. 3. Выход усилителя нагружен делителем $R4$.

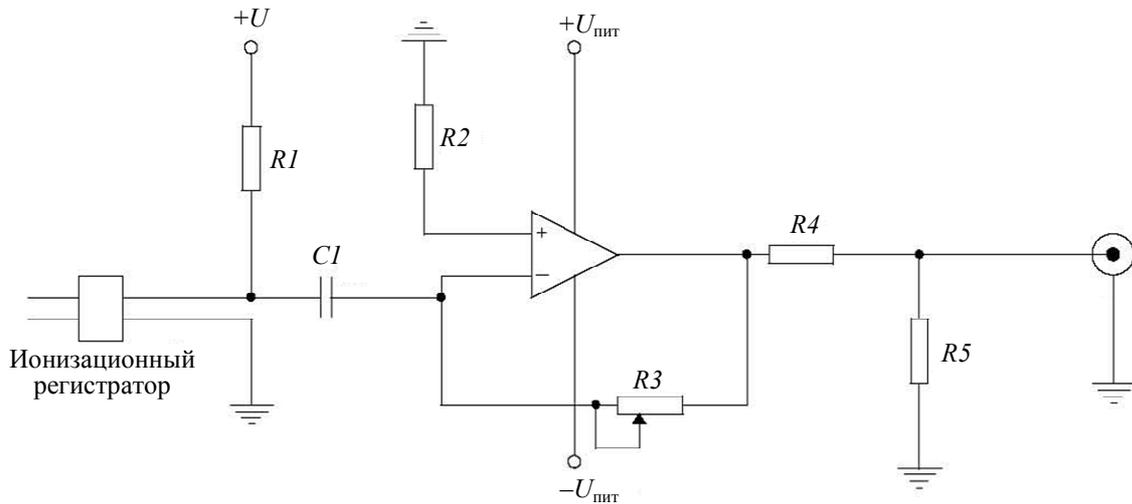


Рис. 3

Сигнал с резисторов $R5$ каждого из формирователей поступает на регистратор (см. рис. 2). Регистратор представляет собой персональный компьютер, в слоты расширения которого установлены три двухканальных быстродействующих (частота дискретизации 200 МГц)

осциллографа БОРДО 221 фирмы Аурус с единой схемой синхронизации, позволяющих фиксировать сигналы как в непрерывном, так и в ждущем однократном режиме. Синхронизирующий сигнал на запись поступает от схемы управления ионизирующей свечой.

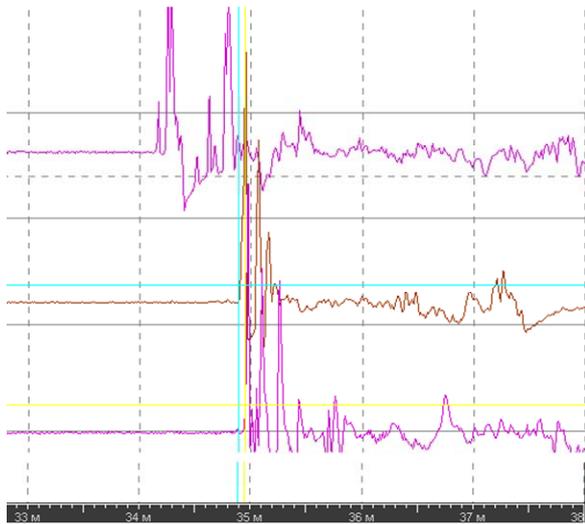


Рис. 4

На рис. 4 приведен пример осциллограммы показаний регистратора. Отчетливо виден пик напряжения в цепи при прохождении фронта ударной волны. Следующие за первым скачком колебания напряжения в цепи регистратора, регистрируемые за первым пиком, связаны с прохождением зоны турбулентного горения, следующей за фронтом пламени, в которой смесь имеет различную электронную проводимость. Измерив время между пиками сигналов и зная

расстояние между ионизационными регистраторами, можно вычислить скорость прохождения ударной волны.

Разработанный комплекс аппаратуры позволяет надежно и достоверно измерять скорость прохождения фронта ударной волны, что подтверждается многократными экспериментами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов С. М. Импульсное детонационное горение: новое поколение энергетических установок // Интеграл. 2008. № 3(41). С. 44—45.
2. Лоскутова Л. А., Егоров А. П., Козлов А. С. Определение скорости быстропротекающих процессов. Методические указания. СПб: СПбГТУ, 2002.
3. Даню Э., Фалемпа Ф., Кантен Г., Зито Р., Дебор Д. Импульсные детонационные двигатели: удельный импульс, сопла и входные устройства // Импульсные детонационные двигатели. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2006. С. 447—474.
4. Валуш Н. А. Растровые оптические приборы. М., 1966.
5. Богуш М. В. Оценка механической надежности пьезоэлектрических датчиков акустических давлений в рабочем диапазоне температур // Приборы. 2008. № 11.
6. Kowalkowski M., Matsutomi Y., Heister S. Flame Sensing in Pulsed Combustion Using Ion Probes, Diodes and Visual Indications // 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. & Exhibit. Denver, Colorado, 2009.

Сведения об авторах

- Павел Андреевич Галайдин** — д-р техн. наук, профессор; Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“ им. Д. Ф. Устинова, кафедра электротехники, Санкт-Петербург; E-mail: pag-N7@yandex.ru
- Юсиф Ниязович Мустафаев** — Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“ им. Д. Ф. Устинова, кафедра электротехники, Санкт-Петербург; доцент; E-mail: mustafaev@ss.ru
- Антон Иванович Мустейкис** — аспирант; Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“ им. Д.Ф. Устинова, кафедра электротехники, Санкт-Петербург; E-mail: a.musteykis@gmail.com

Рекомендована кафедрой
прикладной механики

Поступила в редакцию
15.04.10 г.

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 536.8:621.384

А. Е. ГОРОДЕЦКИЙ, М. С. ДОРОШЕНКО, И. Л. ТАРАСОВА, И. А. КОНЯХИН

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОКОЛЛИМАТОРА С АКТИВНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ

Представлен метод увеличения диапазона измерения автоколлиматора посредством активной компенсации угла поворота контрольного элемента. Проанализировано влияние системы автоматического управления на погрешности измерений. Обосновано использование гальванометрического привода в системе управления для уменьшения динамических погрешностей и времени измерения.

Ключевые слова: автоколлиматор, погрешность виньетирования, система автоматического управления, динамическая погрешность.

Для контроля углового положения крупногабаритных конструкций требуются измерительные системы, обеспечивающие высокую точность измерения при значительной рабочей дистанции и относительно широком диапазоне измерения. Например, для измерения углового положения элементов конструкции 70 метрового радиотелескопа РТ-70 (Суффа) для работы в миллиметровом диапазоне длин волн необходима малогабаритная углоизмерительная система с погрешностью измерения не более 1,5—2" при значительной рабочей дистанции до 20 м и диапазоне измерения 10—12'. Подобные системы необходимы также для решения многих задач в производственной и научной деятельности: контроля деформаций буровых платформ, доков, фундаментов электростанций и других крупногабаритных объектов.

При решении указанных задач эффективно использовать оптико-электронные автоколлимационные системы, обладающие высокой чувствительностью измерения [1]. Одним из главных факторов, затрудняющих автоколлимационные измерения при значительных (десятки метров) расстояниях до контролируемого объекта, является ограничение рабочих пучков оправами оптических элементов.

На объекте измерения располагается пассивный контрольный элемент (КЭ) — автоколлимационное зеркало, а на опорном объекте — приемно-излучающий блок — автоколлиматор (АК).

На рис. 1 приведена обобщенная структурная схема автоколлиматора. Излучение источника излучения 1, пройдя марку 2, установленную в фокальной плоскости объектива автоколлиматора 3, формируется в параллельный пучок лучей, падающий на КЭ в виде плоского зеркала 4. Отраженный пучок после прохождения в обратном ходе объектива 3 формирует в фокальной плоскости его бокового канала (образован светоделителем 5) изображение марки. Изображение марки строится на чувствительной площадке матричного фотоприемника 6.

При повороте плоского зеркала изменяется направление оси отраженного пучка, что приводит к пропорциональному смещению изображения на матричном фотоприемнике 6.

После обработки видеокладов с матрицы 6, соответствующих исходному и повернутому положению плоского зеркала 4, микропроцессорным блоком 7 определяется величина смещения изображения x , которая при известном фокусном расстоянии объектива f' позволяет рассчитать угол Θ поворота зеркала как

$$\Theta = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left(\frac{x}{f'} \right). \quad (1)$$

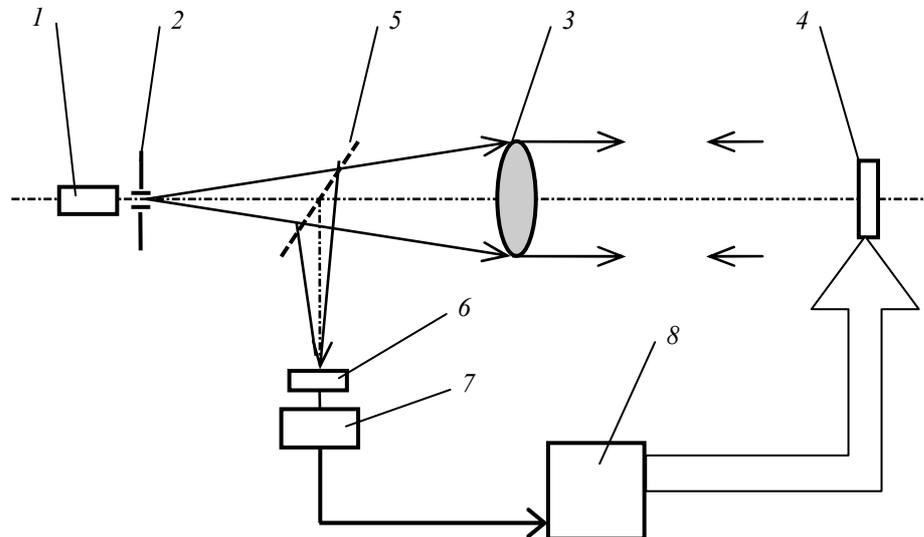


Рис. 1

Принципиальной особенностью автоколлимационного метода является смещение отраженного пучка относительно центра апертуры объектива автоколлиматора при повороте зеркала. Возникающее при этом виньетирование пучка, формирующее изображение марки, приводит к появлению погрешности измерения.

Алгоритмическая компенсация погрешности из-за виньетирования возможна, если при повороте зеркала, расположенного на расстоянии L , на угол Θ смещение отраженного пучка не превышает половины апертуры D объектива автоколлиматора [2]:

$$D/2 \geq L \operatorname{tg} 2\Theta. \quad (2)$$

Из этого условия следует, что при измерении типичных угловых деформаций крупногабаритных конструкций в диапазоне $10\text{--}20'$ рабочая дистанция автоколлиматора с апертурой $30\text{--}100$ мм не превышает нескольких метров, этого недостаточно для многих практических случаев. Например, при измерении угловых деформаций элементов радиотелескопа РТ-70 в диапазоне $12'$ при апертуре объектива 100 мм рабочая дистанция составляет $7,2$ м при требуемой величине 20 м.

Для увеличения рабочей дистанции при заданном диапазоне измерения (или наоборот, увеличения диапазона измерения на требуемой рабочей дистанции) может применяться активная компенсация отклонения пучка при повороте зеркала. В схему автоколлиматора включается система автоматического управления (САУ) 8 (см. рис. 1), которая в процессе измерения поворачивает плоское зеркало (например, с помощью электродвигателя отработки) в направлении, обратном повороту контролируемого объекта и удерживает отраженный пучок в пределах входной апертуры его объектива.

САУ запускается по сигналам, формируемым микропроцессорным устройством обработки 7, при смещении изображения марки на матричном фотоприемнике относительно положения, соответствующего отсутствию поворота контролируемого объекта. Обработка поворота плоского зеркала выполняется до момента восстановления исходного положения

изображения марки. При этом целесообразно связь между устройствами 7 и 8 осуществлять по беспроводному радиоканалу или инфракрасному каналу, в зависимости от расстояния между указанными устройствами.

Величина измеряемого угла Θ поворота зеркала в каждый момент времени равна сумме двух углов: Θ_1 , определяемого по выражению (1), и α , формируемого САУ. Непосредственно величина угла поворота α определяется элементом, интегрирующим компенсирующее воздействие на плоское зеркало, например, сельсином, механически связанным с электродвигателем отработки.

Таким образом, использование САУ позволяет преодолеть ограничение по диапазону измерения (или дистанции работы), определяемое условием (2).

Однако рассмотренный способ увеличения диапазона измерения требует создания высокоточной САУ углом поворота с обратной связью по положению отраженного пучка. При этом важной характеристикой системы является зависимость динамической погрешности измерения угла α , формируемого САУ, от времени измерения, т.е. времени поворота зеркала из начального положения в положение, соответствующее предельному углу поворота по условию (2). Быстродействие САУ должно быть достаточным для удержания отраженного пучка в области апертуры объектива при дальнейшем увеличении угла (полагаем скорость поворота зеркала вследствие поворота контролируемого объекта постоянной).

Рассмотрим динамические погрешности при использовании для компенсации поворота зеркала типичной САУ, построенной на основе электродвигателя постоянного тока со следующими параметрами: номинальная скорость $\omega_n = 314$ 1/с; номинальный момент $M = 0,3$ Н·м; номинальное напряжение $U_n = 220$ В; момент инерции $J = 2,93 \cdot 10^{-4}$ кг·м²; коэффициент момента $C_m = 0,73$ Н·м/А; коэффициент $C_e = U_n / \omega_n = 0,7$ В·с; постоянные времени $T_m = 2,6 \cdot 10^{-3}$ с и $T_e = 1,3 \cdot 10^{-6}$ с.

Структурная схема САУ показана на рис. 2, здесь используются следующие обозначения: $W_{рп}$ — передаточная функция регулятора перемещения, $W_{рс}$ — передаточная функция регулятора скорости, $K_{ЦАП}$ — коэффициент преобразования ЦАП, $K'_{АЦП}$ — коэффициент преобразования АЦП скорости двигателя, $K''_{АЦП}$ — коэффициент преобразования перемещения, K_y — коэффициент усиления усилителя, $K_{ред}$ — коэффициент редукции, p — оператор дифференцирования.

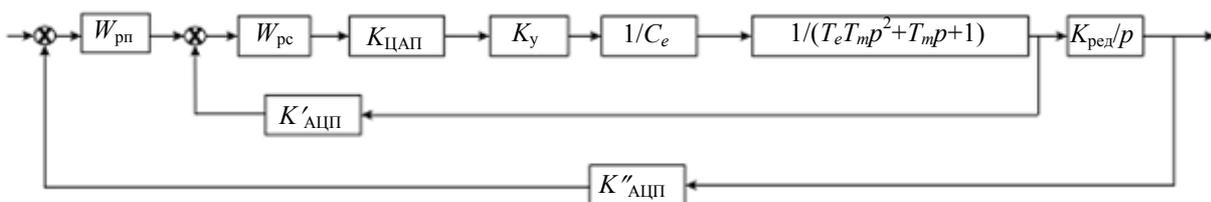


Рис. 2

В качестве регулятора скорости двигателя будем использовать пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) с передаточной функцией $W_{рс} = (K_3 p^2 + K_1 p + K_2)/p$ и следующей настройкой параметров: $K_1 = T_m$; $K_2 = 1$; $K_3 = T_m T_e$, обеспечивающей наилучшее управление скоростью двигателя. Разрядность n ЦАП и АЦП выбираем из условия получения погрешности преобразования не выше 0,01 %, а именно $2^n \geq 100/0,01$.

Положим $n = 14$, тогда при $x = 2 \cdot 10^{-2}$ м получим: $K_{ЦАП} = \frac{2U}{2^{14}} = 26,4 \cdot 10^{-3}$;

$$K'_{ЦАП} = \frac{2^{14}}{2\omega_n} = 26,089; \quad K''_{ЦАП} = \frac{2^{14}}{2x} = 4,1 \cdot 10^5.$$

Если в САУ использовать ЦАП со стандартным уровнем выходного напряжения 12 В, то $K_y = 220/12 = 18,7$. Коэффициент редукции $K_{ред}$ выбираем исходя из требуемой скорости перемещения плоского зеркала: $V_{ак} = 2000$ м/с, $K_{ред} = V_{ак}/\omega_n = 6,4$ м.

Анализ влияния настройки регулятора перемещения проводился с помощью компьютерного моделирования САУ. При этом анализировались регуляторы двух типов: пропорциональный ($W_{рп} = K_p$) и пропорционально-интегральный ($W_{рп} = K_p + K_i/p$). Результаты моделирования при $K_p = 10^{-4}$ (W_1), $K_i = 2 \cdot 10^{-5}$ (W_2) показаны на рис. 3.

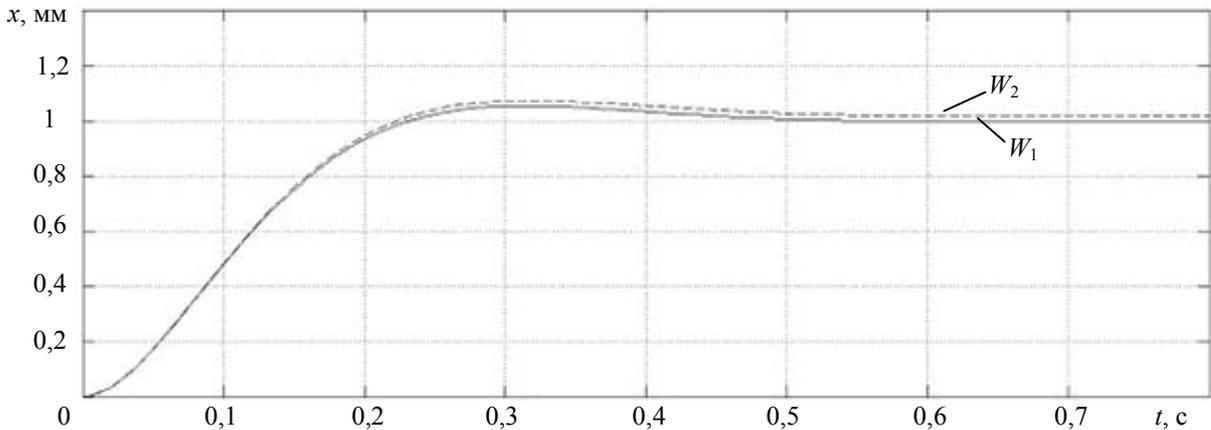


Рис. 3

Как показывает анализ приведенных графиков, при использовании стандартного двигателя в следящем режиме при времени измерения менее 0,5—0,6 с возможна большая динамическая погрешность.

Для уменьшения динамической погрешности и времени измерения требуется применение специализированного быстродействующего электропривода. В частности, в качестве быстродействующего электропривода можно использовать гальванометр, математическая линейная модель которого имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} I &= \frac{U - C_e p \alpha}{R(T_e p + 1)}, \\ \alpha &= \frac{k_1 I}{(c - k_2)(T_m^2 p^2 + 2\xi T_m p + 1)} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где α — угол поворота, $p = d/dt$, R и l — активное сопротивление электрической цепи с рамкой и ее индуктивность, $T_e = l/R$ — электромагнитная постоянная времени, J — момент инерции рамки, η и c — коэффициент демпфирования и жесткость пружины, $k_1 = C_m \alpha_0$, $k_2 = C_m I_0$, α_0 и I_0 — установившиеся значения угла и тока рамки, C_m — коэффициент момента, U — подводимое к рамке напряжение, $T_m = \sqrt{\frac{J}{c - k_2}}$ — механическая постоянная времени,

$\xi = \frac{\eta}{2T_m(c - k_2)}$ — коэффициент затухания.

Обычно у гальванометров значение T_e очень мало и им пренебрегают, значение затухания ζ лежит в пределах 0,4—0,6 и собственная частота $f = 1/2\pi T_m$ — в пределах 100—7000 Гц.

Введя обозначение $K = k_1/R(c - k_2)$ и полагая в модели (3) $T_e = 0$ и $C_e = 0$, ввиду их малости получим: $W_g = \alpha(p)/U(p) = K/(T_m^2 p^2 + 2\xi T_m p + 1)$. Тогда структурную схему САУ можно представить в виде, приведенном на рис. 4. При этом в САУ целесообразно использовать ПИД-регулятор с передаточной функцией:

$$W_p = K_1 + K_2 p + K_3/p, \quad (4)$$

где $K_3 = \omega_3/K\delta_d$, где δ_d — допустимая погрешность обработки синусоидального входного сигнала частотой ω_3 ($U = \sin \omega_3 t$, $\omega_3 < 1/T_m$), $K_2/K_3 = T_m^2$, $K_1/K_3 = 2\zeta T_m$.

На рис. 5 приведены результаты компьютерного моделирования САУ, построенной на базе гальванометра М004.3.5, имеющего следующие характеристики: полоса рабочих частот от 0 до 1700 Гц, максимально допустимый ток $I = 80$ мА, внутреннее сопротивление $R = 15$ Ом, чувствительность $S_A = 1,5$ рад/А, собственная частота $f = 3500$ Гц. Моделирование выполнялось для $T_m = 1/2\pi f_0 = 1/6,28 \cdot 3500 = 4 \cdot 10^{-5}$ с; $K = k_1/R(c - k_2) = S_A/R = 1,5/15 = 0,1$; $\zeta = 0,4$; $\delta_d = 0,001$; $\omega_3 = 100$ 1/с.

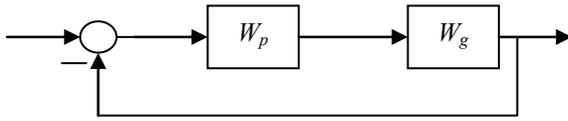


Рис. 4

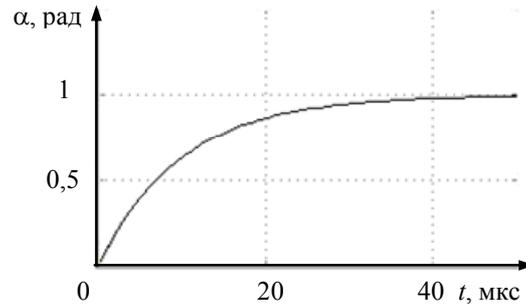


Рис. 5

Из результатов моделирования следует, что при времени измерения, большем 40 мкс, динамическая погрешность пренебрежимо мала. Такого быстродействия углоизмерительной системы вполне достаточно для определения угловых деформаций крупногабаритных конструкций.

Кроме приведенных гальванометрических электроприводов можно использовать приводы на основе соленоидов и электромагнитов, также имеющих высокое быстродействие. Для космических систем, работающих в условиях глубокого вакуума и сверхнизких температур (до 4 К), целесообразно использовать в САУ пьезоэлектрические приводы.

Таким образом, использование в САУ поворота КЭ стандартных электромагнитных двигателей для увеличения диапазона измерения возможно только при медленно изменяющихся углах поворота объектов измерения. При быстром изменении углов поворота объекта измерения целесообразно для увеличения диапазона измерения применять САУ на базе гальванометра либо перемещать падающий или отраженный луч, устанавливая по ходу луча управляемый от САУ оптико-электронный дефлектор.

Исследования по тематике статьи выполняются при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям РФ в рамках аналитической ведомственной целевой программы „Развитие научного потенциала высшей школы (2009—2010 годы)“ и федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джабиев А. Н., Коняхин И. А., Панков Э. Д. Автоколлимационные углоизмерительные средства мониторинга деформаций. СПб: СПбГИТМО(ТУ), 2000. 197 с.
2. Коняхин И. А., Лю Лэй. Компенсационный алгоритм автоколлимационных измерений повышенной точности // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2005. Вып. 18. С. 232—236.

Сведения об авторах

Андрей Емельянович Городецкий — д-р техн. наук, профессор; Институт проблем машиноведения РАН, лаборатория методов и средств автоматизации, Санкт-Петербург; E-mail: g27764@yandex.ru

- Максим Сергеевич Дорошенко** — Институт проблем машиноведения РАН, лаборатория методов и средств автоматизации, Санкт-Петербург; младший научный сотрудник; E-mail: m.s.doroshenko@gmail.com
- Ирина Леонидовна Тарасова** — канд. техн. наук; Институт проблем машиноведения РАН, лаборатория методов и средств автоматизации, Санкт-Петербург; старший научный сотрудник; E-mail: g17265@yandex.ru
- Игорь Алексеевич Коняхин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: igor@grv.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию
03.06.10 г.

УДК 535.345.1

Н. П. БЕЛОВ, О. С. ГАЙДУКОВА, И. А. ПАНОВ, А. Ю. ПАТЯЕВ,
Ю. Ю. СМИРНОВ, А. С. ШЕРСТОБИТОВА, А. Д. ЯСЬКОВ

ЛАБОРАТОРНЫЙ СПЕКТРОФОТОМЕТР ДЛЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

Рассмотрены конструктивные особенности и основные технико-эксплуатационные характеристики лабораторного спектрофотометра для измерения коэффициента пропускания различных объектов в ультрафиолетовой области спектра $\lambda = 200\text{—}400$ нм. Приводятся результаты апробации прибора на твердотельных оптических материалах, водных растворах фенолов и нефтепродуктов, а также рассматриваются возможности его использования для контроля химико-технологических производственных процессов (на примере отбельных производств в целлюлозно-бумажной промышленности).

Ключевые слова: ультрафиолетовая спектрофотометрия, оптические материалы, фотометрия фенолов и нефтепродуктов, оптика целлюлозы, теория Кубелки—Мунка.

Спектральные (спектрофотометрические) исследования в ультрафиолетовом диапазоне длин волн ($\lambda = 200\text{—}400$ нм) представляют существенный интерес для современной экологии (в частности, при определении концентраций фенолов и нефтепродуктов в воде [1]), биологии и медицины [2, 3], химии и химико-технологических производств [4], материаловедения и др.

Применяемые лабораторные приборы достаточно разнообразны по своим конструктивным и техническим характеристикам. Они могут быть построены как на основе монохроматоров традиционного типа (с поворотом плоской дифракционной решетки), что требует значительного времени для регистрации спектров, так и полихроматоров с плоскими или вогнутыми дифракционными решетками. Последние зачастую представляют собой малогабаритные модули с вводом оптического сигнала через оптическое моноволокно и, таким образом, являются скорее комплектующими узлами (спектральными датчиками) для приборов фотометрического типа. Многие из этих модулей имеют низкую чувствительность при длине волны $\lambda < 350$ нм.

В настоящей работе рассматриваются конструктивные особенности и основные технико-эксплуатационные характеристики лабораторного спектрометра на основе полихроматора, предназначенного для измерения спектров пропускания в области $\lambda = 200\text{—}400$ нм. Данный прибор имеет относительно высокую скорость регистрации спектров и приемлемую

чувствительность во всем указанном диапазоне длин волн. Внешний вид прибора представлен на рис. 1, а его оптическая система — на рис. 2.

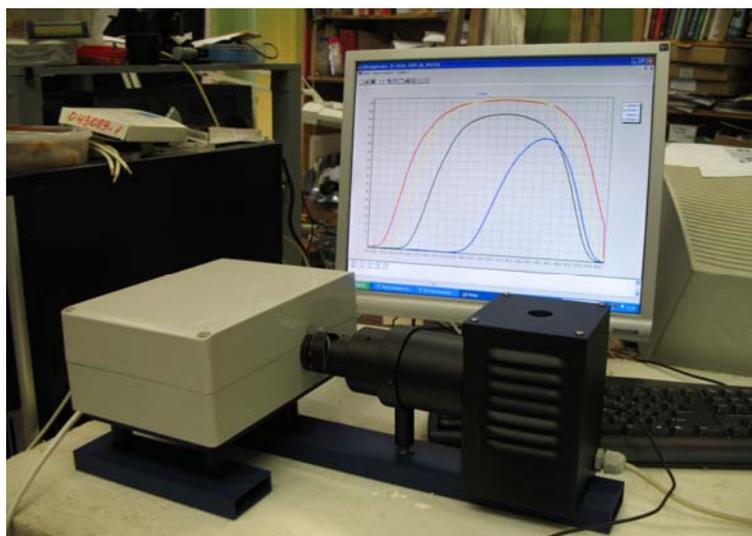


Рис. 1

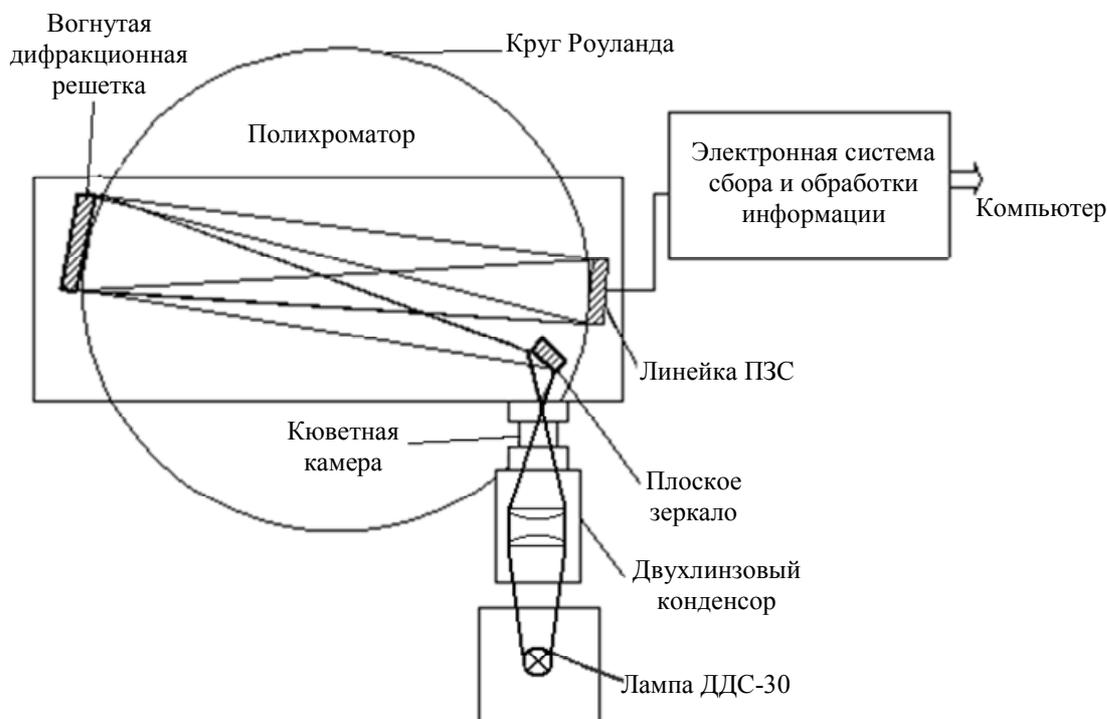


Рис. 2

В состав прибора входят осветитель с кюветной камерой для исследования твердотельных образцов и жидкостных проб, блок спектрометра, электронная система сбора и обработки данных измерений, а также программное обеспечение для обработки, вывода и хранения результатов измерений.

В осветителе использованы дейтериевая лампа ДДС-30 (при калибровке по длинам волн — ртутно-гелиевая лампа ДРГС-12) со стандартным блоком питания, а также двухлинзовый конденсор из плавленого кварца КУ-1, который передает изображение излучателя на входную щель полихроматора с увеличением $1,3^x$. Кюветная камера осветителя располагается непосредственно перед входной щелью блока спектрометра и рассчитана на использование твердотельных образцов (стекло или кристаллы) с размерами рабочей поверхности от 30×30 мм (или $\varnothing 42$ мм) и толщиной до 4 мм, а также стандартных жидкостных кювет сечением 10×10 или

6×10 мм с длиной прохода луча соответственно 10 и 6 мм, а также жидкостных кювет прокатного типа с длиной прохода луча 1,2 мм.

Блок спектрометра построен на основе полихроматора с классической трехсекционной нарезной вогнутой дифракционной решеткой (постоянная решетки $N = 600$ штр/мм, радиус ее кривизны 62,5 мм). Спектр пропускания формируется на круге Роуланда и регистрируется линейкой ПЗС HAMAMATSU S8377-256Q. Выходной сигнал ПЗС-линейки обрабатывается электронной системой сбора и обработки данных. Прилагаемое программное обеспечение позволяет выводить данные измерений в виде графиков, числовых массивов, а также осуществлять распечатку и хранение данных.

Измерения производятся по однолучевой схеме, которая предполагает калибровку по уровням 0 и 100 % пропускания. Для жидкостных проб калибровка уровня 100 % производится с использованием кювет, заполненных дистиллированной водой, что позволяет снизить влияние на результаты измерений эффектов рефракции в кювете, а также отражений на рабочих поверхностях ее входного и выходного окон.

Основные технико-эксплуатационные характеристики прибора:

- рабочий спектральный диапазон — 200—400 нм;
- предел спектрального разрешения — не хуже 3 нм;
- погрешность калибровки шкалы длин волн — не хуже 0,3 нм;
- погрешность измерения коэффициента отражения — не хуже 3 %;
- время регистрации одного спектра — 25 мс;
- питание от сети — 220 В, 50 Гц;
- передача данных через порт — RS 232;
- габаритные размеры — 700×250×180 мм.

Приведем некоторые примеры использования рассматриваемого спектрометра.

На рис. 3 сопоставлены измеренные спектральные зависимости коэффициентов пропускания некоторых ультрафиолетовых стекол серий УФС (а) и БС (б) с результатами расчетов тех же зависимостей, выполненных на основании методик и данных [5].

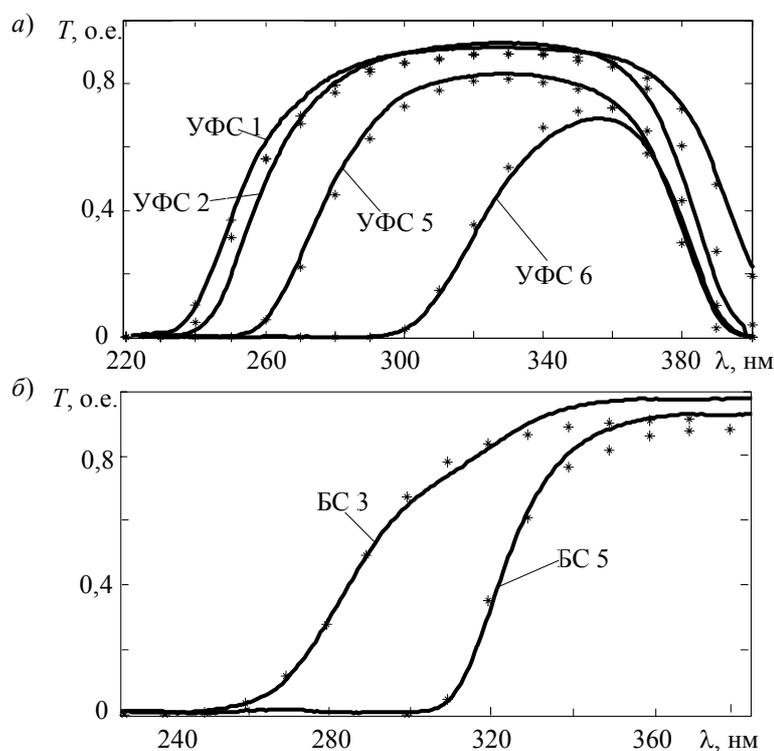


Рис. 3

Как видно из этого рисунка, сходимость экспериментальных (точки) и расчетных (кривые) зависимостей $T(\lambda)$ не хуже 0,05, что с учетом общей погрешности (в том числе данных, приводимых в работе [5]) вполне приемлемо. Удовлетворительные результаты были получены и при измерении спектров ультрафиолетового пропускания других твердотельных материалов, таких как кристаллы и оптическая керамика на основе ZnO и ZnS, широкозонных полупроводников GaN, AlN и их твердых растворов в виде пленок толщиной до 0,2 мм на подложках из лейкосапфира.

Одним из практически значимых приложений ультрафиолетовой спектрофотометрии является контроль качества воды с целью определения содержания в ней остаточных фенолов и их ароматических производных. Для пробных измерений были использованы водные растворы фенола, бензола, толуола и нефтепродуктов различной концентрации, полученные на основе государственных стандартных образцов (ГСО).

На рис. 4 приведены данные измерений спектров пропускания для водных растворов бензола (а: 1 — 0,5; 2 — 1 мг/л) и нефтепродуктов (б: 1 — 0,95; 2 — 2,50; 3 — 6,25; 4 — 12,50 мг/л) в кювете шириной 10 мм. Положение характерных особенностей в спектрах $T(\lambda)$ соответствовало положению, указанному в работах [6, 7]. Как видно из рис. 4, чувствительность прибора к содержанию бензола в воде находилась на уровне предельно допустимой концентрации (ПДК) и составила менее 0,5 мг/л, а по содержанию нефтепродуктов (по отдельным их составляющим) в целом была близка к ПДК и находилась на уровне 0,1 мг/л.

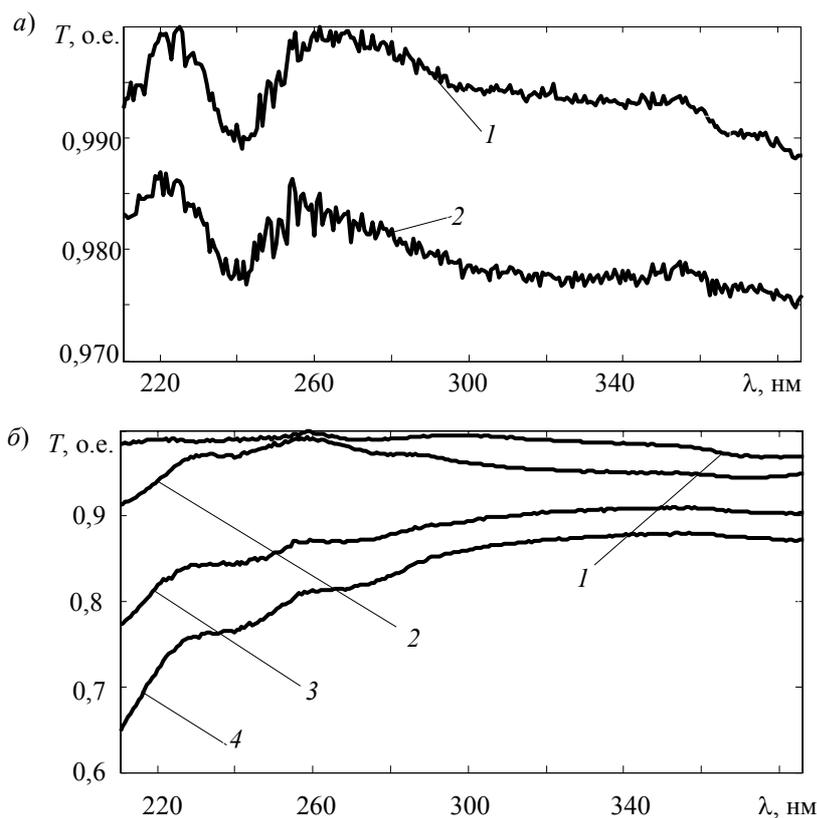


Рис. 4

Ультрафиолетовая спектроскопия может представлять существенный интерес как эффективное средство диагностики и контроля химико-технологических процессов (в том числе в производственных условиях). В качестве примера приведем результаты сопоставления спектров диффузного отражения $R(\lambda)$ отбеленной хлором целлюлозы (или характеризующего качество белины параметра белизны B), представленных в работе [8] для области длин волн

$\lambda = 380\text{—}760$ нм, с данными спектральных измерений в ультрафиолетовом диапазоне коэффициентов пропускания $T(\lambda)$ водных растворов, полученных при финишной промывке целлюлозной массы. Такие данные позволяют прогнозировать результаты беления целлюлозы (ее качество) на этапе хлорирования.

Согласно имеющимся представлениям, монотонное убывание коэффициентов отражения $R(\lambda)$ беленой целлюлозы в фиолетово-синей области видимого диапазона (так же как и параметра белизны B) обусловлено поглощением в остаточных лигнинах, которое приходится на ультрафиолетовую область спектра [9]. В известной нам научно-технической литературе такой сопоставительный анализ по определению спектров диффузного отражения $R(\lambda)$ целлюлозы в видимой области спектра с учетом ультрафиолетового поглощения остаточных лигнинов $T(\lambda)$ ранее не проводился.

В рамках теории Кубелки—Мунка [10] коэффициент отражения отливки (отпрессовки) образца целлюлозы при его толщине, исключая влияние на отражение, задается выражением:

$$R = 1 + \frac{K}{S} - \sqrt{\frac{K^2}{S^2} + \frac{2K}{S}}. \quad (1)$$

Здесь K и S — соответственно коэффициенты поглощения и рассеяния материала образца (L^{-1}).

Коэффициент рассеяния S , обусловленный переотражениями на границах целлюлозных волокон, определяется в основном показателем преломления волокна, который относительно слабо зависит от длины волны излучения. Таким образом, в первом приближении коэффициент рассеяния S можно принять постоянным по всему интересующему спектральному диапазону.

Спектральная зависимость коэффициента поглощения $K(\lambda)$ лигнинов определялась здесь по результатам измерений коэффициента пропускания $T(\lambda)$ фильтратов водных растворов, полученных из отбеленных целлюлозных масс с концентрацией 2,5 %. Вид измеренных спектров $T(\lambda)$ для области длин волн 200—400 нм представлен на рис. 5, а для трех проб с параметрами белизны $B = 40$ (1), 50 (2), 60 (3) %, при этом

$$K(\lambda) = -\frac{1}{x} \ln(T(\lambda)), \quad (2)$$

$x = 10$ мм — ширина кюветы.

Для оценки коэффициента поглощения в длинноволновой области спектра при $\lambda > 380$ нм спектральные зависимости $K(\lambda)$ на рис. 5, б представлялись в виде

$$K(\lambda) = \frac{A}{(\lambda^2 - \lambda_0^2)}, \quad (3)$$

где максимум поглощения A и его положение по шкале длин волн λ_0 считались подгоночными параметрами и определялись из экспериментальных данных. Предполагалось также, что шириной линии поглощения в первом приближении здесь можно пренебречь.

Проведенный на основании (3) анализ результатов (кривые) на рис. 5, б показал, что параметр λ_0 остается практически без изменений во всех исследованных пробах целлюлозы и составляет $\lambda_0 = 183$ нм, а максимум поглощения A связан линейной зависимостью с параметром белизны B (точки на рис. 5, б — расчет по (2)).

Коэффициенты диффузного отражения отбеленной целлюлозы, измеренные по методикам аналогично [8], сопоставлены на этом рисунке с данными расчетов по формулам (1)—(3). Как видно из данных рис. 5, в, рассчитанные (кривые) и экспериментальные (точки) спектры

$R(\lambda)$ находятся не только в полном качественном, но и достаточно удовлетворительном количественном соответствии.

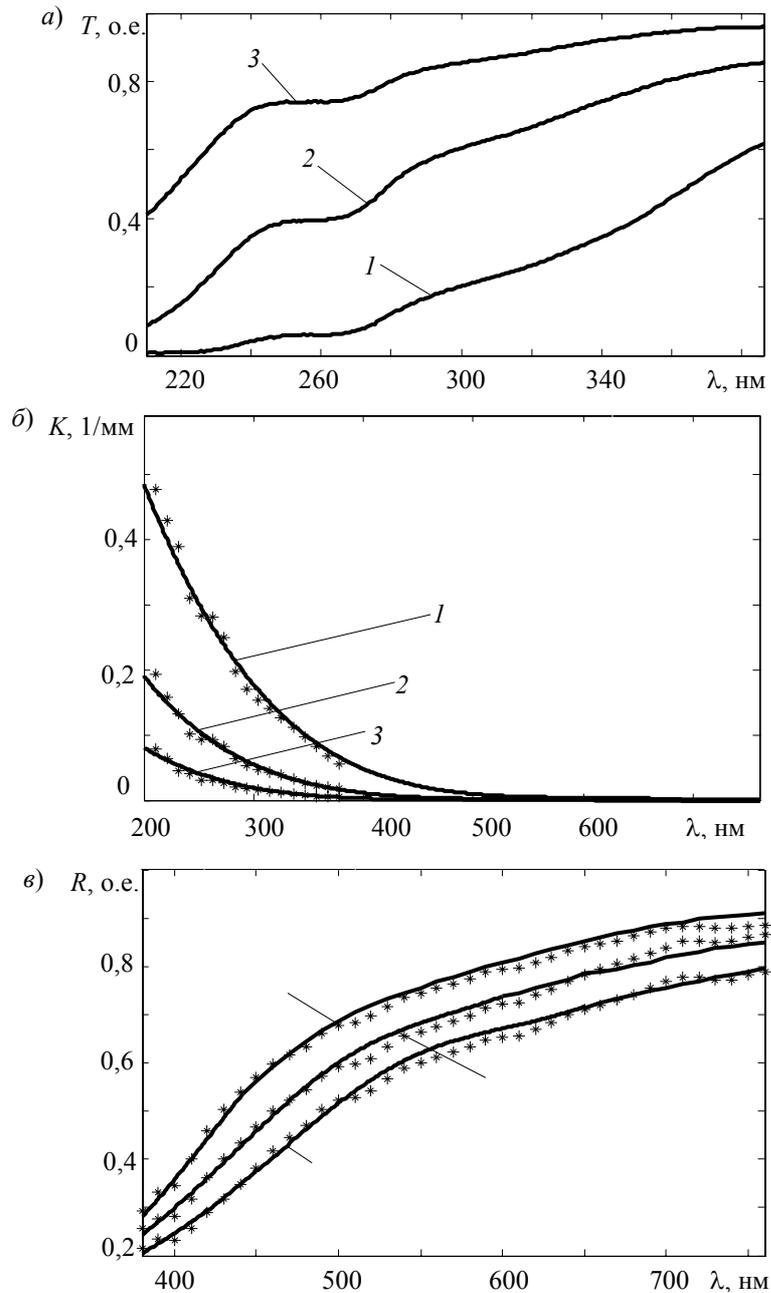


Рис. 5

На основании приведенных данных можно заключить, что рассматриваемый спектрофотометр обеспечивает возможность лабораторных исследований для большинства практически значимых приложений ультрафиолетовой спектроскопии. Кроме того, данный прибор может представлять существенный интерес как средство проведения опытно-конструкторских работ по созданию промышленного ультрафиолетового спектрометра, предназначенного для работы непосредственно в технологических потоках (включая выбор и апробацию оптических и оптоэлектронных элементов, оптимизацию оптических систем, отработку алгоритмов анализа данных измерений и др.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Столярова В. А.* Новый справочник химика и технолога. СПб, 2003. 255 с.
2. *Залесская Г. А., Маслова Т. О.* Спектры флуоресценции плазмы крови при ультрафиолетовом облучении *in vivo* // Журн. прикл. спектроскопии. 2010. Т. 77, № 4. С. 618—627.
3. *Коноплев Г. А.* Ультрафиолетовая спектрометрия жидких биологических сред и разработка методов анализа поликомпонентных сред. Дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2005. 151 с.
4. *Москвин А. Ф., Докторова Л. И.* Применение метода ультрафиолетовой спектроскопии в аналитическом контроле продуктов производства синтетического каучука. М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1976. 61 с.
5. Каталог цветного стекла. М.: Машиностроение, 1967. 63 с.
6. *Коробейничева И. К., Петров А. К., Контюг В. А.* Атлас спектров ароматических и гетероциклических соединений. Новосибирск: Наука, 1967. 170 с.
7. *Казицына Л. А., Куплетская Н. Б.* Применение УФ-, ИК- и ЯМР-спектроскопии в органической химии. М.: Высш. школа, 1971. 264 с.
8. *Белов Н. П., Покопцева О. К., Шерстобитова А. С., Яськов А. Д.* Влияние хлорсодержащих отбеливателей на спектры диффузного отражения света целлюлозой // Журн. прикл. спектроскопии. 2010. Т. 77, № 3. С. 470—473.
9. *Никитин В. М., Оболенская А. В., Щеголев В. П.* Химия древесины и целлюлозы. М.: Лесная промышленность, 1978. 368 с.
10. *Джадд Д., Вышецки Г.* Цвет в науке и технике. М.: Мир, 1978. 592 с.

Сведения об авторах

- Николай Павлович Белов** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники; старший научный сотрудник
- Ольга Сергеевна Гайдукова** — студентка; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники
- Игорь Алексеевич Панов** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники
- Александр Юрьевич Патяев** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники
- Юрий Юрьевич Смирнов** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники; E-mail: yuri.smirnov@bk.ru
- Александра Сергеевна Шерстобитова** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники; E-mail: ashev87@mail.ru
- Андрей Дмитриевич Яськов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники

Рекомендована кафедрой
твердотельной оптоэлектроники

Поступила в редакцию
25.08.10 г.

ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

УДК 536.62

Н. В. ПИЛИПЕНКО, Я. В. КАЗАРЦЕВ

ОПТИМАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА СЕНСОРОВ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА

Предложен метод оптимального планирования эксперимента на основе решения обратных задач теплопроводности при идентификации процессов теплообмена в сенсорах теплового потока. Метод позволяет разрабатывать конструкции сенсоров для измерения нестационарных тепловых потоков в соответствии с характеристиками, предусмотренными техническим заданием.

Ключевые слова: тепловой поток, сенсоры теплового потока, оптимальное планирование, идентификация тепловых процессов.

Введение. Современный уровень развития теории теплообмена, методов проектирования и экспериментальной отработки технических систем, а также технологических процессов предполагает использование системного подхода к их созданию, при этом важную роль играет моделирование процессов переноса тепла в различных конструкциях. Применение методов моделирования требует увязки математического и физического (экспериментального) моделирования процессов теплопереноса, тепловых режимов и результатов исследования технических объектов на различных этапах проектирования и испытаний [1].

Неотъемлемой частью моделирования является оптимальное планирование эксперимента. В литературе рассматриваются различные подходы к оптимальному планированию эксперимента при идентификации процессов теплообмена [2]. В настоящей работе оптимальное планирование включает разработку соответствующих техническому заданию сенсоров теплового потока, составление математических моделей процесса переноса и измерений, определение динамических характеристик и передаточных функций сенсоров, проведение имитационного моделирования с различными законами воздействия, оценку совместных доверительных областей искомых параметров.

Сенсоры, математические модели теплопереноса в них, результаты исследований. В качестве сенсоров рассмотрены высокотемпературные градиентные приемники теплового потока (ВПТП) [3].

На рис. 1 представлены общий вид (*a*), устройство (*б*) и топология (*в*) высокотемпературных приемников теплового потока (1 — платиновые термометры сопротивления, 2 — корундовая пластина, 3 — корпус, 4 — выводы, 5 — защитная пластина).

В корпусе 3 установлена корундовая подложка 2 с платиновыми термометрами сопротивления на ее поверхностях 1. Для получения необходимого номинала термометров сопротивления при их изготовлении к платине добавлялась тонко измельченная керамика, затем

смесь вжигалась в подложку, чем обеспечивалась высокая механическая прочность чувствительного элемента.

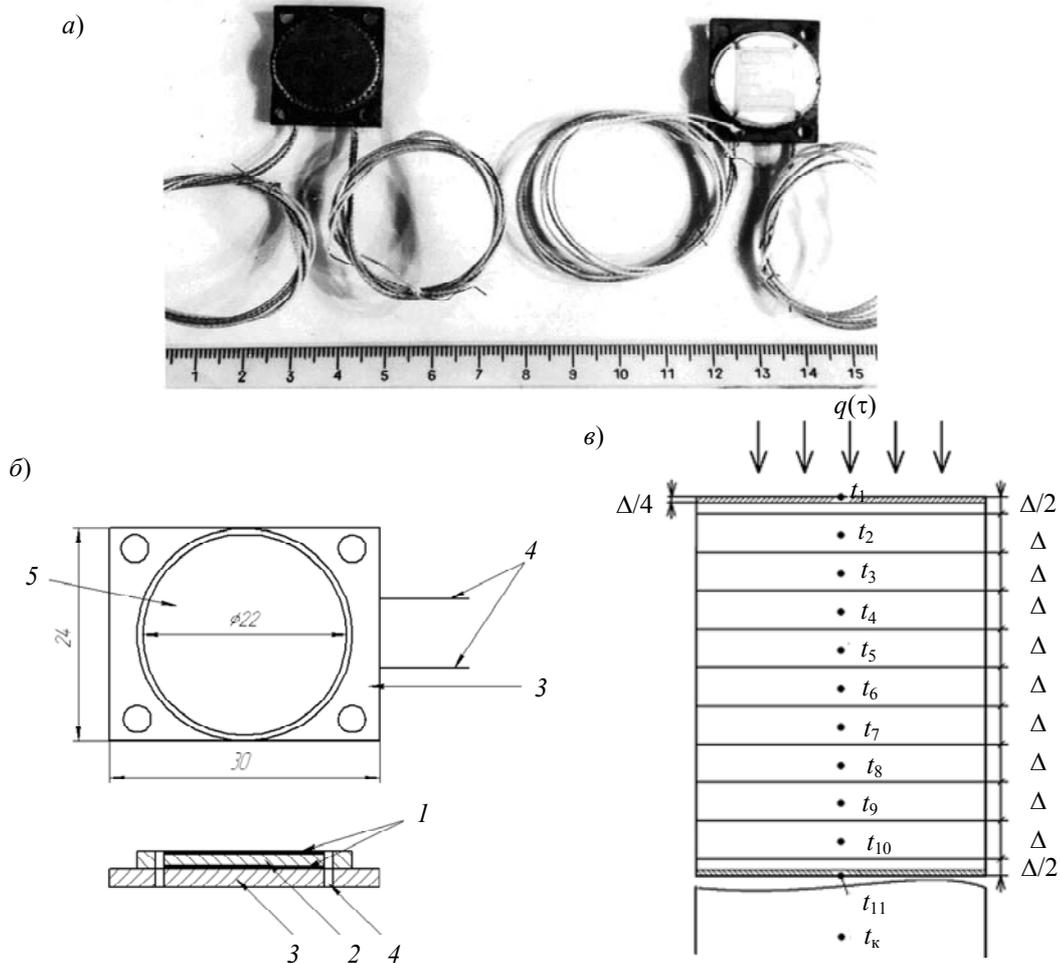


Рис. 1

Теплоперенос в ВПТП может быть описан системой обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка относительно составляющих t_i вектора состояния $\mathbf{T}(\tau)$, который в векторно-матричной форме имеет вид [3]:

$$\frac{d}{d\tau} \mathbf{T}(\tau) = \mathbf{F}\mathbf{T}(\tau) + \mathbf{G}\mathbf{U}(\tau). \quad (1)$$

При граничных условиях второго рода $q(\tau)$ векторы состояния $\mathbf{T}(\tau)$ и управления $\mathbf{U}(\tau)$, матрицы обратных связей \mathbf{F} и управления \mathbf{G} имеют вид [3]:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \frac{4\lambda_2}{\Delta^2(c_1\rho_1 + 3c_2\rho_2)} & \frac{4\lambda_2}{\Delta^2(c_1\rho_1 + 3c_2\rho_2)} & 0 & \bullet & \bullet & 0 \\ \frac{a}{\Delta^2} & \frac{2a}{\Delta^2} & \frac{a}{\Delta^2} & \bullet & \bullet & 0 \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ 0 & \bullet & \bullet & \frac{a}{\Delta^2} & \frac{2a}{\Delta^2} & \frac{a}{\Delta^2} \\ 0 & \bullet & \bullet & 0 & \frac{4\lambda_2}{\Delta^2(c_1\rho_1 + 3c_2\rho_2)} & \left(\frac{4\lambda_2}{\Delta^2(c_1\rho_1 + 3c_2\rho_2)} + \frac{4}{\Delta R_k(c_1\rho_1 + 3c_2\rho_2)} \right) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$G = \begin{bmatrix} \frac{4}{\Delta(c_1\rho_1 + 3c_2\rho_2)} & 0 & \bullet & 0 \\ 0 & \bullet & 0 & \frac{4}{\Delta R(c_1\rho_1 + 3c_2\rho_2)} \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{T} = [t_1 \quad t_2 \quad \bullet \quad t_{11}]^T, \quad \mathbf{U} = [q_1 \quad t_k]^T, \quad (3)$$

где q_1 — поток, поглощенный ВППП сверху; c_1, λ_1, ρ_1 и c_2, λ_2, ρ_2 — удельная теплоемкость, теплопроводность, плотность термометра и пластины соответственно; $a = \lambda_2 / c_2\rho_2$ — температуропроводность пластины; t_k — температура корпуса; Δ — толщина элементов пластины; R — контактное тепловое сопротивление между пластиной и корпусом.

Общее решение уравнения (1) может быть записано в виде

$$\mathbf{T}(\tau) = \Phi(\tau, \tau_0)\mathbf{T}(\tau_0) + \int_{\tau_0}^{\tau} \Phi(\tau, \Theta)G\mathbf{U}(\Theta)d\Theta, \quad (4)$$

где $\Phi(\tau, \tau_0)$ — переходная ($n \times n$)-матрица (матрица Коши, матрициант).

Переходная матрица $\Phi(\tau, \tau_0)$ характеризует внутренние тепловые связи в приемниках теплового потока (ППП), так как ее элементы представляют собой переходные за время $\Delta\tau = \tau - \tau_0$ процессы каждой составляющей вектора состояния от единичных возмущений по остальным его составляющим, протекающие в свободной системе ($U = 0$).

При численном решении уравнения (1), в соответствии с требованиями к его точности, устанавливается малый временной шаг $\Delta\tau$. Тогда матрица $\Phi(\tau, \tau_0)$ описывается следующим бесконечным рядом:

$$\Phi(\tau, \tau_0) = I + F\Delta\tau + \frac{1}{2!}F^2(\Delta\tau)^2 + \dots + \frac{1}{p!}F^p(\Delta\tau)^p, \quad (5)$$

где I — единичная матрица, а решение имеет вид [1]:

$$\mathbf{T}_{k+1} = \Phi\mathbf{T}_k + \frac{1}{2}(I + \Phi)G\mathbf{U}_k\Delta\tau, \quad (6)$$

где $\mathbf{T}_k = \mathbf{T}(\tau_k)$, $\mathbf{U}_k = \mathbf{U}(\tau_k)$, а $\tau_k = k\Delta\tau$, $k = 0, 1, 2, \dots$

Дифференциально-разностная модель в виде (1) описывает процесс нестационарного теплопереноса в ППП. При этом измерению подлежат либо значения температуры в отдельных точках, либо градиенты этих температур, либо среднеобъемные значения температуры чувствительных элементов. Эта информация, а также сведения о характере и величине погрешностей измерений отражаются в следующей математической модели измерений ППП:

$$\mathbf{Y}_k = \mathbf{H}\mathbf{T}_k + \boldsymbol{\varepsilon}_k, \quad (7)$$

где \mathbf{Y}_k и $\boldsymbol{\varepsilon}_k$ — векторы измерений и погрешностей измерений, \mathbf{H} — матрица измерений.

Полученные результаты матрицы обратных связей F , управления G и измерений \mathbf{H} позволяют, используя программный комплекс MatLab, установить все динамические характеристики ВППП, а именно: переходную, импульсно-переходную, логарифмические амплитудно- и фазочастотные характеристики, а также передаточную функцию W . В качестве примера на рис. 2 приводятся указанные характеристики для рассматриваемого ВППП (a — переходные, b — импульсно-переходная, v — логарифмические амплитудно- и z — фазочастотные характеристики ВППП без защитной пластины 1 и с защитной пластиной 2).

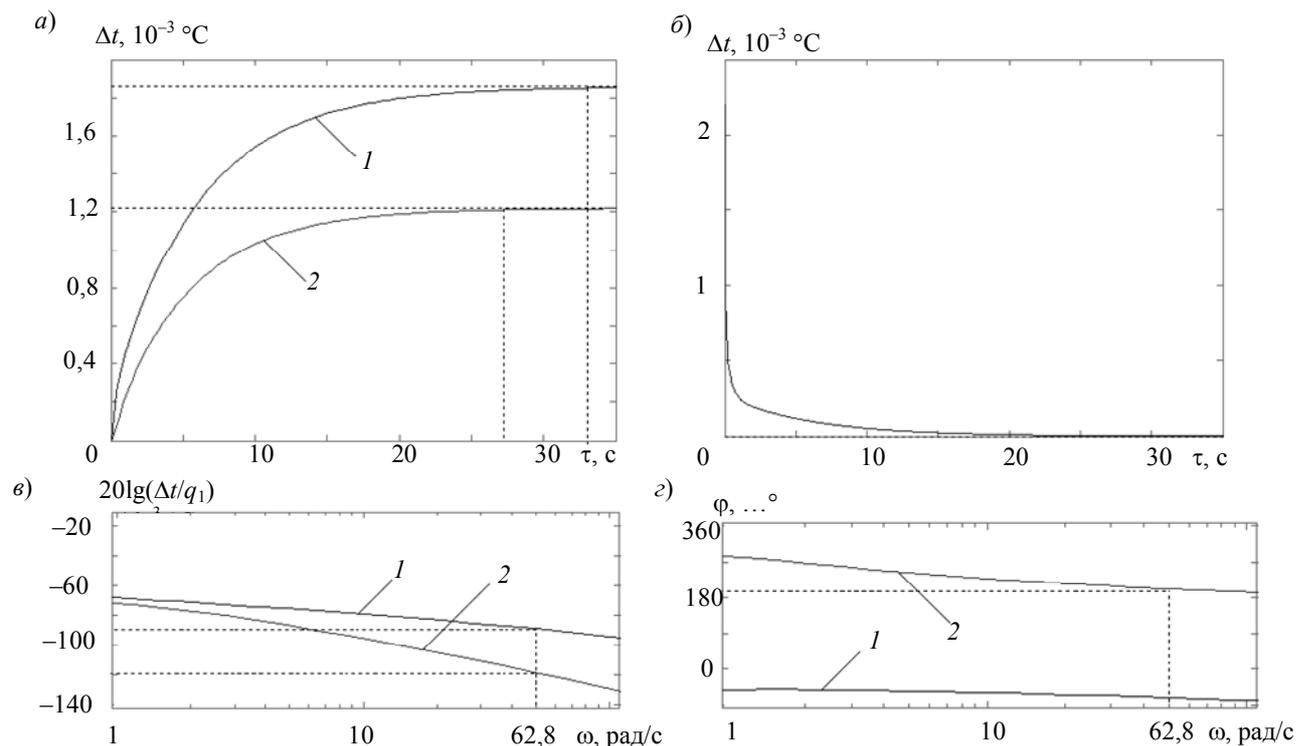


Рис. 2

Анализ рис. 2 позволяет сделать вывод о соответствии динамических характеристик рассматриваемого ВППП техническому заданию. В частности, логарифмическая амплитудно- и фазочастотная характеристики показывают, что в ВППП без защитной пластины при достижении частоты 1 рад/с (0,16 Гц) выходной сигнал сдвигается по фазе относительно входного на 54° . Входной сигнал ослабляется на 75 дБ. В диапазоне от 1 до 10 Гц наблюдается постепенное ослабление сигнала. При частоте 62,8 рад/с (10 Гц) выходной сигнал сдвигается по фазе относительно входного на 70° . Входной сигнал ослабляется на 87 дБ.

Метод априорного оптимального планирования основан на учете зависимости ковариационной матрицы ошибок и совместных доверительных областей (СДО) от всех значимых факторов эксперимента, а именно: вида и параметров теплопереноса в ПТП, количества точек измерения температуры и их местоположения, а также погрешностей измеряемых величин, характеристик входных воздействий, количества участков измерений по времени и количества N измерений на этих участках.

Перечисленные факторы влияют на вид функций чувствительности U_{ijk} i -го элемента к j -му воздействию в k -й момент времени. Для некоторых ПТП функции чувствительности могут быть определены аналитическим путем, а в общем случае — численно на основе математической модели теплопереноса в ВППП [4].

Критерием оптимальности планирования является условие получения оптимальных в смысле минимума среднеквадратичной функции невязки $\Phi(\mathbf{Q})$ оценок идентифицируемых параметров.

$$\Phi(\mathbf{Q}) = \sum_{k=1}^N [\mathbf{Y}_k - \hat{\mathbf{Y}}_k(\mathbf{Q}_k)]^T \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{Y}_k - \hat{\mathbf{Y}}_k(\mathbf{Q})], \quad (8)$$

где \mathbf{Y}_k — вектор измерения температуры ПТП, включающий вектор $\boldsymbol{\varepsilon}_k$ случайных погрешностей измерений; $\hat{\mathbf{Y}}_k(\mathbf{Q}_k)$ — модельные (расчетные) значения вектора измерений; \mathbf{R} —

ковариационная матрица вектора случайных погрешностей ε_k измерений значений температуры; k — дискретное время [4, 5].

В работе рассмотрено влияние всех значимых факторов на погрешность восстановления теплового потока при оптимальном планировании эксперимента. Ниже приведены результаты влияния одного из факторов, а именно полной теплоемкости термометров сопротивления I (рис. 1, б), на точность восстановления потока.

На рис. 3 приведены результаты восстановления теплового потока: эталонный (1) и восстановленный (2) тепловые потоки с заданными (а) и проектируемым (б) чувствительными элементами; в — вид совместных доверительных областей.

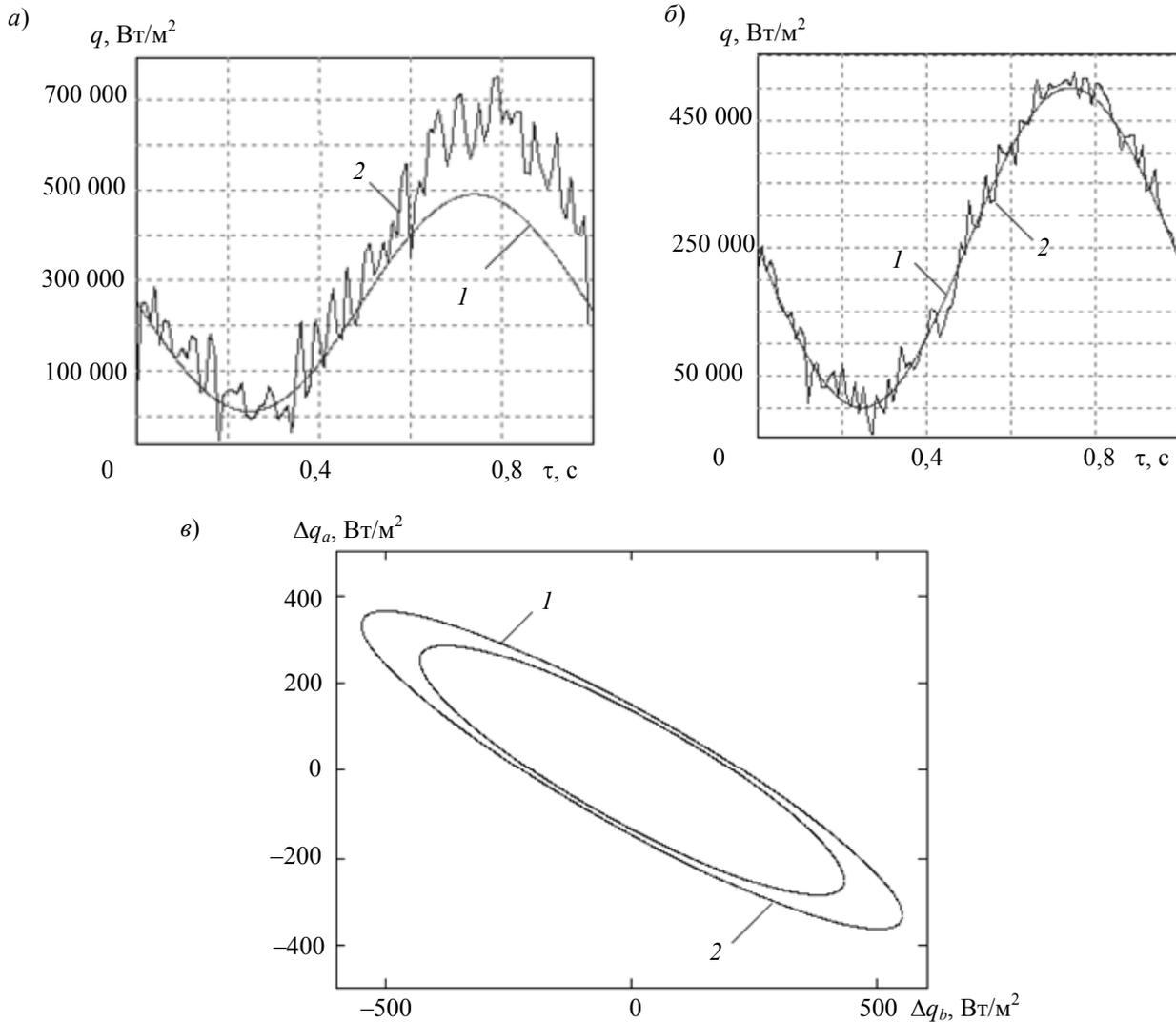


Рис. 3

Как видно из рис. 3, погрешность восстановления потока при уменьшении теплоемкости термометров сопротивления в три раза существенно уменьшается.

Заключение. Рассмотрена конструкция сенсоров для измерения нестационарных тепловых потоков с характеристиками, предусмотренными техническим заданием; созданы математические модели процессов теплопереноса и измерений; определены динамические характеристики и передаточные функции сенсоров; проведено имитационное моделирование при различных законах воздействия на сенсоры; оценена погрешность восстановления теплового потока, показаны способы оптимального планирования эксперимента при идентификации процессов теплообмена.

Работа выполнена в рамках госконтракта № 02.740.11.0169 от 25.06.09.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алифанов О. М. и др. Основы идентификации и проектирования тепловых процессов и систем: Учеб. пособие. М.: Логос, 2001. 400 с.
2. Артюхин Е. А. Оптимальное планирование эксперимента при идентификации процессов теплообмена // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1987. № 7/2. С. 28—32.
3. Пилипенко Н. В., Кириллов К. В. Определение нестационарных условий теплообмена в энергетических установках // Приборы. 2008. № 9. С. 21—25.
4. Пилипенко Н. В. Методические погрешности определения нестационарных условий теплообмена при параметрической идентификации // Измерительная техника. 2007. № 8. С. 54—59.
5. Pilipenko N. Parametrical identification of differential-difference heat transfer models in non-stationary thermal measurements // Heat Transfer Research. 2008. Vol. 39, N 4. P. 311—315.

Сведения об авторах

- Николай Васильевич Пилипенко** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга; E-mail: pilipenko38@mail.ru
- Ярослав Валерьевич Казарцев** — ФГУП „ВНИИМ им. Д. И. Менделеева“, лаборатория калориметрии и высокочистых органических веществ метрологического назначения, Санкт-Петербург; младший научный сотрудник; E-mail: kazartsev@hotmail.com

Рекомендована кафедрой
компьютерной теплофизики
и энергофизического мониторинга

Поступила в редакцию
18.05.10 г.

УДК 535.31;53.072;62.51

А. В. Демин, А. В. Сорокин, Д. М. Гордеев, М. А. Белянский, А. С. Птицына,
А. Г. Шалковский, А. Б. Чуриков, А. С. Смолин

АВИАЦИОННЫЙ ТЕПЛОПЕЛЕНГАТОР

Приведены результаты работ по созданию авиационного тепlopеленгатора для обнаружения и пеленгации высокоскоростных летательных аппаратов.

Ключевые слова: тепlopеленгатор, летательный аппарат, помехи, инфракрасный диапазон излучения, фотоприемное устройство, объектив.

Тепlopеленгаторы относятся к классу пассивных оптико-электронных систем, позволяющих в инфракрасном диапазоне спектра излучения решать задачи обнаружения, идентификации и пеленгации путем выявления искомого объекта на фоне помех на основе выбранной совокупности критериев.

Одной из основных характеристик тепlopеленгаторов (ТП) является дальность, на которой объект с требуемой вероятностью и достоверностью может быть обнаружен, определяемая параметрами приемника излучения и объектива, а также конструкцией тепlopеленгатора в целом.

В настоящей работе приведены результаты разработки авиационного тепlopеленгатора для обнаружения высокоскоростного летательного аппарата на фоне помех. В процессе полета высокоскоростного летательного аппарата (ЛА) вследствие торможения воздушного потока в пограничном слое и в ударных волнах происходят сложные нестационарные процессы теплообмена с изменением свойств воздуха (диссоциация, ионизация, рекомбинация),

что создает определенные трудности при идентификации ЛА, размеры которого малы по сравнению с окружающим его пространством, являющимся помехой.

Из экспериментальных исследований [1—16] известно, что интегральная сила излучения факелов ЛА для высоты 5—30 км в спектральном диапазоне 3—5 мкм составляет порядка $(1,3—9,5) \cdot 10^4$ Вт/ср. Тем не менее время излучения факела двигателя ЛА меньше чем время его полета, поэтому основным источником теплового излучения для ТП является корпус ЛА.

В соответствии с уравнением термодинамического состояния системы, представленного в цилиндрических координатах, может быть рассчитана температура различных участков ЛА путем интегрирования этого уравнения по времени и поверхности [17]:

$$\left. \begin{aligned} \rho(R, Z) C_p(R, Z, T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left[R \xi_{RR}(R, Z, T) \frac{\partial T}{\partial R} \right] + \frac{\partial}{\partial Z} \left[\xi_{ZZ}(R, Z, T) \frac{\partial T}{\partial Z} \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial Z} \left[\xi_{RZ}(R, Z, T) \frac{\partial T}{\partial R} \right] + \frac{\partial}{\partial R} \left[R \xi_{RZ}(R, Z, T) \frac{\partial T}{\partial Z} \right], \\ T' \approx T_a \left(1 + r \frac{(\gamma - 1)}{2} M^2 \right), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где R, Z — цилиндрические координаты поверхности ЛА; ρ — удельная плотность материала ЛА с координатами R, Z ; C_p — удельная теплоемкость материала ЛА с координатами R, Z при температуре T ; $\xi_{RR}, \xi_{RZ}, \xi_{ZR}$ и ξ_{ZZ} — компоненты тензора теплопроводности ЛА с координатами R, Z при температуре T ; t — текущее время; T' — оценка температуры поверхности ЛА; T_a — температура атмосферы; γ — отношение теплоемкости атмосферы при постоянном давлении к ее теплоемкости при постоянном объеме ($\gamma \approx 1,4$); r — коэффициент восстановления температурного баланса, для головной части ЛА $\approx 0,5—0,9$; M — число Маха.

Величина потока излучения от ЛА на приемник излучения ОЭС_{ТП} определяется следующим соотношением [14, 16]:

$$F_{об} = \frac{\tau_{об} S_{об} \varepsilon}{\pi} \frac{S \cos \alpha \cos \varphi}{L^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r(\lambda) P_\lambda \tau_a d\lambda, \quad (2)$$

где $S_{об}$ — площадь входного зрачка объектива ТП; L — расстояние между ТП и ЛА; φ — угол между направлением на ЛА и оптической осью ТП (угол рассогласования); $\tau_{об}$ — коэффициент пропускания объектива ТП; P_λ — спектральная чувствительность приемника излучения с фильтром; τ_a — коэффициент пропускания атмосферы.

Расчеты показывают, что с расстояния 50 км ожидаемый поток от ЛА в спектральном интервале 3—5 мкм составляет порядка $5,5 \cdot 10^{-10}$ Вт/пиксел, а с расстояния в 200 км — $3,5 \cdot 10^{-11}$ Вт/пиксел, в то время как чувствительность современных приемников составляет порядка $3 \cdot 10^{-13}$ Вт/пиксел (MARS MW K508 фирмы “SOFRADIR”), что свидетельствует о возможности создания тепlopеленгаторов дальнего действия.

На рис. 1 приведена укрупненная схема авиационного ТП без вторичных источников питания, пунктир обозначает наличие электроинформационных связей, а сплошные стрелки — наличие механических связей. Ниже приведены основные параметры ТП.

Фокусное расстояние, мм	115
Относительное отверстие	1:2
Угловое поле зрения, ...°	8,5

Рабочий спектральный интервал, мкм 3—5
 Фотоприемное устройство MARS MW K508 ФИРМА “SOFRADIR”
 Чувствительность, Вт/пиксел $\sim 3 \times 10^{-13}$
 Число пикселей матрицы 320×256
 Размер пикселя, мкм 33
 Время накопления сигнала, мс 6,1

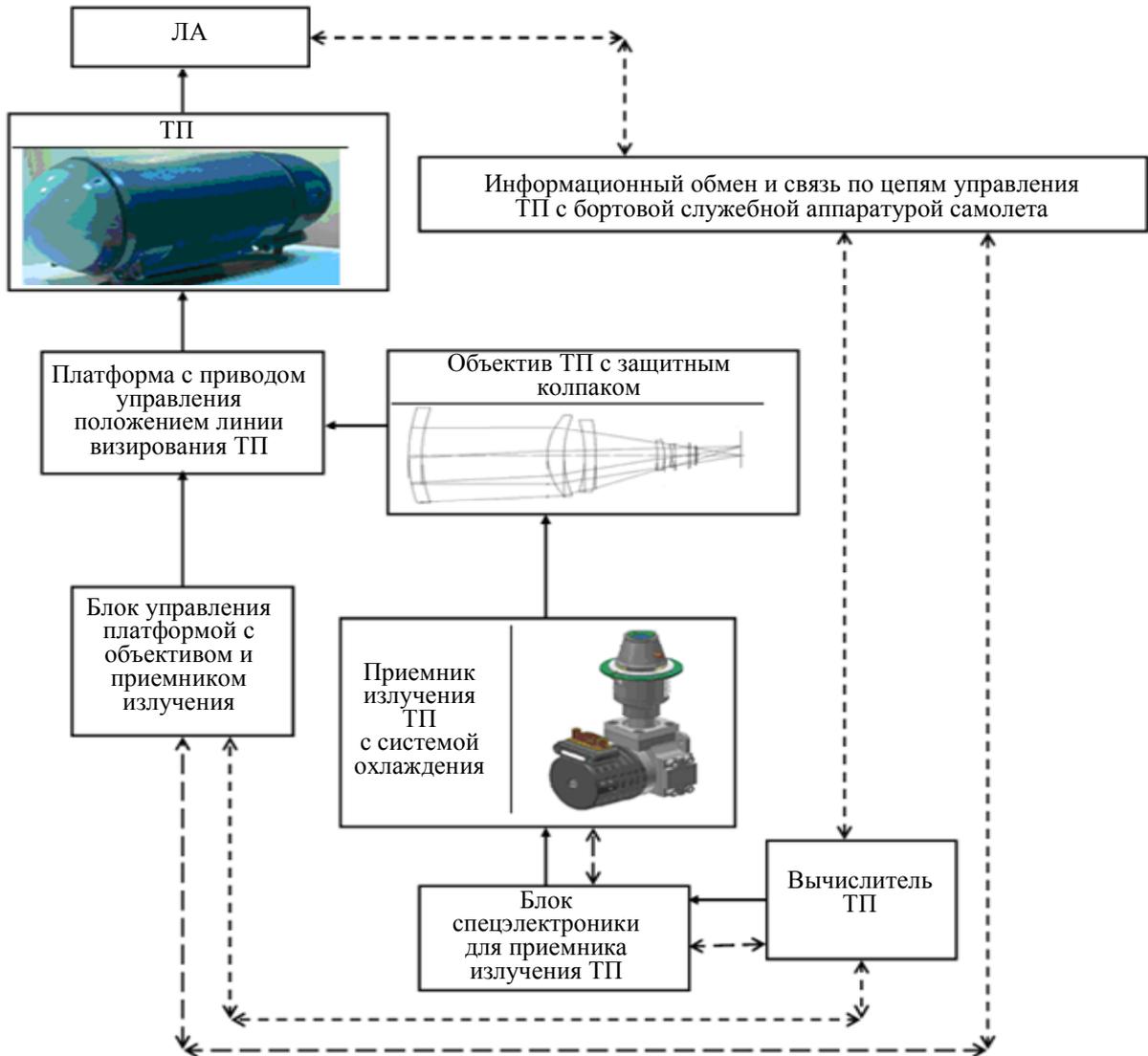


Рис. 1

Были проведены лабораторные стендовые исследования ТП. На рис. 2 приведена схема стенда, а в таблице приведены итоговые результаты лабораторных исследований.

Угловой размер, ...'	Имитируемые параметры ЛА		Мощность ФПУ (расчет), Вт/пиксел	Результат регистрации сигнала ЛА
	Линейный размер диафрагмы, мм	Оценка мощности излучения*, Вт		
10	0,006	$6 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-13}$	2 из 11
15	0,009	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-12}$	7 из 11
20	0,01	$2 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-12}$	11 из 11
40	0,02	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-11}$	11 из 11
80	0,04	$4 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-11}$	11 из 11

* С точностью порядка не более 20 % в диапазоне 3—5 мкм на выходе имитатора.

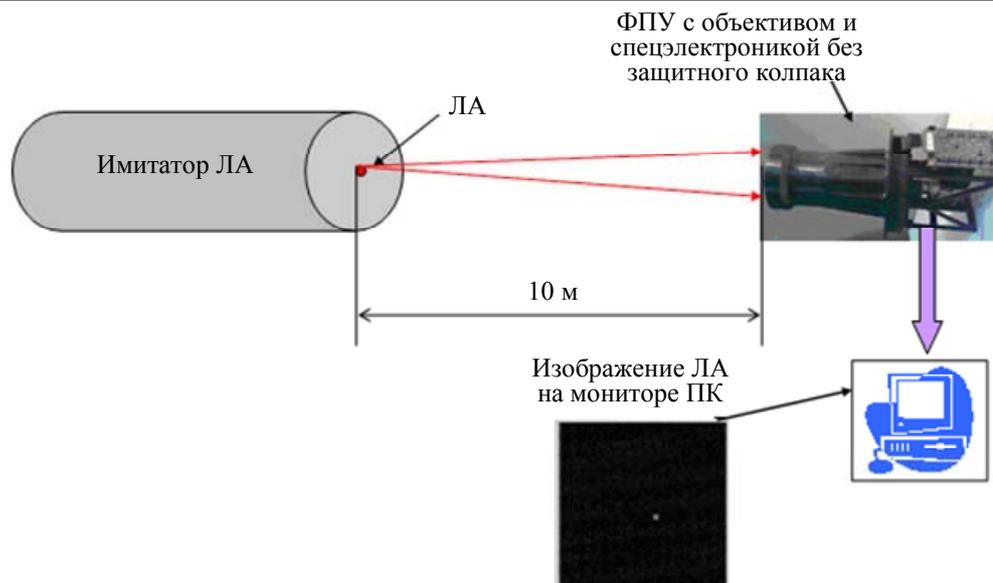


Рис. 2

Был разработан макет ТП; исследования показали возможность создания реальных образов авиационного тепlopеленгатора, способных фиксировать мощность излучения порядка 10^{-12} Вт/пиксел, что соответствует современным требованиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиационные характеристики атмосферы и земной поверхности / Под ред. К. Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 564 с.
2. Das S. R., Sastri V. D. Spectral distribution and color of tropical day light // JOSA. 1965. Vol. 55, N 3. P. 319—322.
3. Кушпиль В. И. Яркость дневного безоблачного неба (экспериментальные данные). Л.: ОНТИ ГОИ, 1971. 164 с.
4. Coulson K. L., Dave J. V., Sekera Z. Tables related to radiation emerging from a planetary atmosphere with Rayleigh scattering. Berkley—Los-Angeles: Univ. California Press, 1960. P. 348—359.
5. Глушко В. Н., Иванов А. И., Лившиц Г. Ш. Рассеяние инфракрасного излучения в безоблачной атмосфере. Алма-Ата: Наука, 1974.
6. Кузнецик О. П. Энергетическая яркость неба в „окнах“ прозрачности атмосферы в области 1,8—5,2 мкм // Рассеяние света в земной атмосфере. Алма-Ата: Наука, 1974.
7. Кузнецик О. П., Афанасьев Г. К., Долинин В. В. Пространственные частоты лучистости ясного неба в области 4,5—5,2 мкм // ДАН БССР. 1973. Т. 17, № 6.
8. Палдма В. К., Тумановская Р. Г. Некоторые статистические характеристики суммарной радиации в облачных условиях // Изв. АН СССР ФАиО. 1971. Т. 7, № 9.
9. Алленов М. И., Шуба Ю. А. Исследование структуры излучения облаков в диапазоне 8—13 мкм с помощью быстродействующего радиометра-пирометра // Изв. АН СССР. ФАиО. 1971. Т. 7, № 9.
10. Кузнецик О. П., Афанасьев Г. К. Автокорреляционные функции и энергетические спектры небосвода в области 1,8—5,2 мкм // Рассеяние света в земной атмосфере. Алма-Ата: Наука, 1972.
11. Linke F., Moller F. Die dunkeln Strahlungsstrome in der Atmosphäre und die Strahlungsbilanz // Handbuch der Geophys. 1943. Bd 8, life 3.
12. Кондратьев К. Я. Лучистый теплообмен в атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1956. 420 с.
13. Основы теплопередачи в авиационной и ракетной технике / Под ред. В. К. Кошкина. М., 1975. 623 с.
14. Ллойд Дж. Системы тепловидения / Пер. с англ.; под ред. А. И. Горячева. М.: Мир, 1978. 416 с.
15. Хадсон Р. Инфракрасные системы / Пер. с англ.; под ред. Н. В. Васильченко. М.: Мир, 1972. 534 с.

16. Лазарев Л. П. Оптико-электронные приборы наведения летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1984. 480 с.
17. Труды ЦАГИ. Аэродинамическое нагревание при сверхзвуковых скоростях полета. ОНТИ. 1975—2000. 136 с.

Сведения об авторах

- Анатолий Валентинович Демин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра информатики и прикладной математики; E-mail: dav_60@mail.ru
- Александр Васильевич Сорокин** — „НТЦ «РОКАД»“, Санкт-Петербург; ведущий инженер; E-mail: alex.corokins@mail.ru
- Дмитрий Михайлович Гордеев** — канд. техн. наук; ООО „АвтоВизус“, Санкт-Петербург; генеральный директор; E-mail: gordeev@autovisus.ru
- Максим Анатольевич Белянский** — ОАО „НТЦ Завод Ленинец“, Санкт-Петербург; начальник конструкторского бюро; E-mail: belyansky@onegroup.ru
- Анастасия Сергеевна Птицына** — студентка; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: Anastasia_88.88@mail.ru
- Алексей Геннадьевич Шалковский** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики; проректор по работе с ВПК
- Алексей Борисович Чуриков** — ОАО „НТЦ Завод Ленинец“, Санкт-Петербург; заместитель технического директора; E-mail: churikov@onegroup.ru
- Александр Сергеевич Смолин** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-цифровых систем и комплексов; E-mail: as_smolin@mail.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-цифровых систем и комплексов

Поступила в редакцию
08.12.10 г.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 681.3.069, 681.324

А. А. БЕЗГОДОВ, А. В. БУХАНОВСКИЙ

ВИРТУАЛЬНЫЙ ПОЛИГОН ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ НА НЕРЕГУЛЯРНОМ ВОЛНЕНИИ

Рассматриваются особенности применения технологий виртуальной реальности для компьютерного моделирования и интерпретации результатов расчетов экстремальной динамики морских объектов на нерегулярном волнении.

Ключевые слова: морской объект, аварийная ситуация, виртуальная реальность, рендеринг, стереоизображение.

Для изучения поведения сложных технических систем в экстремальных ситуациях в настоящее время активно используются технологии научной визуализации и виртуальной реальности (VR), позволяющие создавать проблемно-ориентированные *виртуальные полигоны* для поддержки принятия решений в различных областях науки и промышленности [1]. При проектировании судов и объектов океанотехники они могут применяться для анализа развития аварийных ситуаций в экстремальных условиях эксплуатации.

Ретроспективный анализ кораблекрушений позволяет выделить условия, способствующие возникновению аварийных ситуаций. При движении судна лагом к волне можно выделить воздействие на судно ветрового шквала в условиях сильной качки, потерю остойчивости по причине затопления палубного колодца, а также ударное воздействие гребня разрушающейся волны. На попутном волнении начинают играть роль другие критические факторы, например, захват судна волной (бродинг). Неоднозначность условий, приводящих к возникновению аварийных ситуаций, затрудняет нахождение оптимальных проектных характеристик судна формальными методами и приводит к необходимости использования технологий виртуального моделирования [2].

Для исследования экстремальной динамики судов и объектов океанотехники разработан виртуальный полигон на основе системы VR СПбГУ ИТМО. Система имеет недеполярирующий стереоэкран обратной проекции размером 3,35×2,0 м, изображение на котором формируется посредством шести HDTV DLP-проекторов Rohar Projectiondesign. Интерактивное взаимодействие с наблюдателем в системе VR обеспечивается с помощью манипулятора производства 3dConnexion серии Space Pilot с шестью степенями свободы. Создание и подготовка стереоизображения выполняются на рабочей станции HP Z800 с видеокартой nVidia Quadro FX 5800 посредством интерактивного приложения моделирования динамики судна с шестью степенями свободы под воздействием нерегулярного волнения и ветра. Приложение использует прямой метод интегрирования уравнений движения, основанный на непосредственном вычислении главных сил и моментов по мгновенной погруженной поверхности корпуса, определяемой волновым профилем в каждый момент времени.

Для моделирования нерегулярного волнения по частотно-направленному спектру использована линейная модель в форме спектрального разложения, которая позволяет получить возвышение взволнованной поверхности на произвольной пространственной сетке в заданный момент времени. Для создания эффекта „погружения“ в системе ВР поле волнения отображается в виде визуально бесконечной водной поверхности, простирающейся от точки наблюдения до горизонта. Рендеринг этой поверхности выполняется на основе технологии неравномерных сеток, привязанных к камере [3]. Дополнительно при закрашивании водной поверхности учитывается частичное отражение Френеля (только небо), частичное преломление с затуханием по глубине, а также эффект, связанный с корректным отображением раздела сред. Эффекты пенообразования учитываются путем закрашивания областей поверхности по критерию предельного возвышения или предельной крутизны склона.

Технологически синтез стереоизображения выполняется с использованием расширения `GL_EXT_quad_buffer`, что позволяет выбирать правый или левый буфер экрана с целью создания раздельного изображения для восприятия левым и правым глазом наблюдателя. Разработанные технология и виртуальный полигон на ее основе обеспечивают вполне реалистичное воспроизведение динамики морских объектов в системе ВР СПбГУ ИТМО, включая эффект „морской болезни“ при определенных режимах качки.

На рисунке приведен пример визуализации динамической сцены в виртуальном полигоне.



Работа выполнена при поддержке проектов ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2007–2013 гг. Разработанная система применяется в рамках проектов по реализации постановлений № 218 и 220 Правительства РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Simulation Based Engineering Science. Revolutionizing Engineering Science through Simulation // Report of the National Science Foundation. Blue Ribbon Panel on Simulation-Based Engineering Science. May, 2006 [Electronic resource]: <<http://www.docstoc.com/docs/6820220/Revolutionizing-Engineering-Science-through-Simulation>>.
2. Бухановский А. В., Иванов С. В., Нечаев Ю. И. Виртуальное моделирование динамики судна на морском волнении в интеллектуальных тренажерах // Искусственный интеллект. 2004. Вып. 3. С. 350—359.
3. Mittring M. Finding Next Gen – CryEngine 2 // Advanced Real-Time Rendering in 3D Graphics and Games Course // ACM SIGGRAPH – 2007 [Electronic resource]: <<http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1281671>>.

- Алексей Алексеевич Безгодов* — **Сведения об авторах**
— НИИ Научно-технических компьютерных технологий Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, кафедра информационных систем; младший научный сотрудник; E-mail: demiurghg@gmail.com
- Александр Валерьевич Бухановский* — д-р техн. наук, профессор; НИИ Научно-технических компьютерных технологий Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики; директор; E-mail: avb_mail@mail.ru

Рекомендована кафедрой
информационных систем

Поступила в редакцию
08.02.11 г.

УДК 535:621.373.826

Е. Г. ЛЕБЕДЬКО, М. Г. СЕРИКОВА

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕРВАЛОВ МЕЖДУ ВЫБРОСАМИ СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА И ВОЗМОЖНОСТЬ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ БЛИЖНЕЙ ОПТИЧЕСКОЙ ЛОКАЦИИ С ШУМОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ

На основании результатов исследования распределений длительности интервалов между выбросами случайного процесса рассмотрена возможность построения системы ближней оптической локации с шумовой синхронизацией излучения от приемного устройства.

Ключевые слова: выбросы случайных процессов, распределение интервалов между выбросами, ближняя оптическая локация, шумовая синхронизация.

В системах ближней лазерной локации время запаздывания сигнала сопоставимо с его длительностью. Естественно, что в этом случае возникает возможность использовать в качестве сигнала временной интервал между двумя шумовыми выбросами, что позволило бы уменьшить уровень срабатывания решающего устройства [1—3].

В работе проведен анализ распределений плотности вероятности длительности интервалов между выбросами широкополосного нормального случайного процесса при различных передаточных функциях приемно-усилительного тракта и двухуровневом ограничении. Установлено, что с уменьшением ширины спектра сигнала, а также при увеличении диапазона ограничения длительность интервалов увеличивается, а пик распределения смещается в область низкой вероятности.

Полученные результаты возможно использовать в системах ближней локации, запуск лазерного излучателя в которых осуществляется на спаде шумового выброса на выходе приемно-усилительного тракта, а прием отраженного сигнала осуществляется на интервале между выбросами случайного процесса. Такой подход позволяет существенно снизить уровень срабатывания решающего устройства и уменьшить энергетические затраты. Однако анализ распределения интервалов между выбросами показывает, что требования к частоте посылок излучения и вероятности ложной тревоги находятся в противоречии. Однако эти противоречия могут быть разрешены использованием системы, в которой запуск импульса излучения осуществляется при пересечении спада шумового выброса более низкого уровня, а принятие решения о наличии сигнала — более высокого уровня.

Работа осуществлялась в рамках федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихонов В. И. Распределение выбросов нормальных флуктуаций по длительности // Радиотехника и электроника. 1956. № 1.
2. Лебедько Е. Г., Аверьянов Г. А., Егоров А. С., Романов А. М., Хайтун Ф. И. Определение дифференциальных законов распределения интервалов между выбросами случайного процесса // Приборы и техника эксперимента. 1971. № 6.
3. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь, 1989.

Сведения об авторах

- Евгений Георгиевич Лебедько** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: eleb@gambler.ru
- Мария Геннадьевна Серикова** — студентка; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: serikovamg@gmail.com

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию
28.10.10 г.

SUMMARY

P. 5—10.

QUANTITATIVE ESTIMATES IN NATURAL LANGUAGE MODELING

The problem of natural language processing is considered as applied to underspecified object modeling. The approach offered in the paper addresses the problem of quantitative estimates of linguistic units' collocation.

Keywords: computer linguistics, natural language processing, linguistic units' collocation, computer modeling of linguistic units.

Data on author

Irina E. Voronina — Cand. Techn. Sci.; Voronezh State University, Department of Software & Information System Administering; E-mail: irina.voronina@gmail.com

P. 11—18.

ALGORITHMS OF INSTRUMENT-MAKING PRODUCTS DESIGN AUTOMATION

Algorithms of products design automation are considered. The algorithm in question are intended for electronic products structure development and editing, and technical documentation loading.

Keywords: automated design, electronic structure of product, technical document, PDM-system.

Data on authors

Yuriy A. Gatchin — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer System Design; E-mail: gatchin@mail.ifmo.ru

Julia V. Donetskaya — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer System Design; Assistant Lecturer; E-mail: donetskaya_julia@mail.ru

Irina B. Komarova — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer System Design; E-mail: birdkolibri@mail.ru

P. 19—23.

MATHEMATICAL PRINCIPLES OF DIGITAL HALFTONING

The problem of replacement of continuously varying light flow reflected from absorbing filter on a substrate by two-level signal is considered. The problem is reduced to pulse-width modulation of two-dimensional signal. Various methods of signal conversion to binary raster data are analyzed.

Keywords: digital image processing, halftoning, transformation of spectra.

Data on authors

Valentin N. Drozdov — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Technology and Design, Department of Automated Printery Equipment; Head of Department; E-mail: vndrozdov@uprint.spb.ru

Elena A. Shefer — St. Petersburg State University of Technology and Design, Department of Automated Printery Equipment; Engineer; E-mail: sh68@hotmail.ru

P. 24—28.

HIGH-PERFORMANCE HIGH-CAPACITY ARBITER OF DEMAND PROCESSING

A method is proposed for parallel-conveyor processing of high-capacity demands. Technical implementation of the arbiter is described.

Keywords: arbiter, conveyor, parallel computing.

Data on authors

- Eugeny A. Titenko* — Cand. Techn. Sci.; Kursk State Technical University, Department of Computer Software; E-mail: bossjohn@mail.ru
- Eugeny A. Semenikhin* — Post-Graduate Student; Kursk State Technical University, Department of Computer Software; E-mail: bossjohn@mail.ru

P. 29—34.

DEVELOPMENT OF GENERAL MODEL OF ELECTRONIC ARCHIVE OF ENGINEERING DOCUMENTS WITH THE USE OF IDEF METHODS

The problem of modeling of digital archive of engineering documents is considered. Peculiarities of CAD documents processing are demonstrated. A functional model of digital archive of engineering documents is described.

Keywords: digital archive, IDEF, functional model.

Data on authors

- Alexey A. Malinin* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer System Design; E-mail: a.malinin@gmail.com
- Natalia Yu. Ivanova* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer System Design; Associate Professor; E-mail: ivnatur@gmail.com

P. 35—39.

ESTIMATE OF TYPE RECOGNITION ACCURACY OF AUTOMATED PROCESSING OF AERIAL PHOTOGRAPHS

Comparison of algorithms for Euclidian and Makhalanobis spacing calculation is performed. The results are applied to the problem of accuracy of aerial photographs decoding for estimation of agricultural area conditions.

Keywords: aerial photograph, agricultural area, digital classification, decoding, image analysis, automation.

Data on author

- Igor V. Manylov* — St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Micro- and Nanotechnology in Aerospace Instrumentation; E-mail: igorman1@yandex.ru

P. 40—48.**COURSE EVALUATION IN INTEGRATED NAVIGATION SYSTEM ON THE BASE OF MICROMECHANICAL SENSORS**

The problem of object orientation parameters determination with the use of integrated system of orientation and navigation (ISON) is considered. In the case under analysis, integrated data from inertial measurement module (IMM) and receiving equipment of satellite navigation system are used, and the ISON is started in the moving object, so the problem is reduced to initial alignment and calibration of IMM. Results of navigation tests carried out with an IMM prototype on the base of micro-mechanical sensors by Concern CSRI Electropribor are presented.

Keywords: micromechanical inertial sensors, integrated system of orientation and navigation, satellite navigation system.

Data on authors

- Gennady I. Emelyantsev** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Navigation Information Technology; E-mail: Emel@mail.ifmo.ru
- Boris A. Blazhnov** — Cand. Techn. Sci.; JSC “Concern CSRI Electropribor”, St. Petersburg; Senior Scientist; E-mail: office@eprib.ru
- Alexey V. Lochekhin** — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Navigation Information Technology; E-mail: alex@infom.su
- Alexey P. Stepanov** — JSC “Concern CSRI Electropribor”, St. Petersburg; First Rank Engineer; E-mail: office@eprib.ru

P. 49—56.**METHOD OF CONSTRUCTION OF ADAPTIVE AUTOMATIC CONTROL LOGIC-DYNAMIC SYSTEM WITH SELECTOR**

The problem of control over multidimensional object with sole operating action and channel selector is considered. Application of adaptation algorithms is shown to provide an effective mean for construction of corresponding logic-dynamic system. Questions of the control system synthesis are analyzed. Results of modeling are presented.

Keywords: multidimensional object under control, selector of channels, automated control system, logic-dynamic system, adaptation.

Data on authors

- Valery I. Petunin** — Cand. Techn. Sci.; Ufa State Aviation Technical University, Department of Aviation Instruments Engineering; E-mail: petunin_vi@mail.ru
- Arkady I. Frid** — Dr. Techn. Sci., Professor; Ufa State Aviation Technical University, Department of Computer Technique and Information Security; E-mail: arkfrid@mail.ru

P. 51—65.

OPTIMAL CONTROL OVER LOAD MOVEMENT WITH BRIDGE CRANE

The problem of control over load movement by overhead-type crane with the use of various optimization methods is considered. Convergence of iteration procedure of corresponding boundary value problem solution is analyzed. Theoretical conclusions are illustrated with results of digital simulations.

Keywords: overhead type crane, extremum principal, predictive model.

Data on author

- Sergey A. Kabanov* — Dr. Techn. Sci., Professor; Baltic State Technical University “VOENMEH”, Department of Information Processing and Control, St. Petersburg; E-mail: kaba-sa@mail.ru
- Eugeny N. Nikulin* — Dr. Techn. Sci., Professor; Baltic State Technical University “VOENMEH”, Department of Information Processing and Control, St. Petersburg; E-mail: enikulin@onixmail.ru
- Boris E. Yakushev* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Department of Theoretical Mechanics; E-mail: yakushev.spb@mail.ru
- Daria B. Yakusheva* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University, Department of Information Systems; E-mail: dariayakusheva@gmail.com

P. 66—71.

SPEED CONTROL SYSTEM OF TWO-MASS MECHANISM USING COORDINATES OBSERVER

Three-circuit speed subsystem of follow-up motor of telescope guidance system with two-mass executive axle and additional second mass observed velocity feedback is considered. A vector-matrix mathematical model of the subsystem is proposed and used for analysis of observer errors effect on static and dynamic system characteristics.

Keywords: follow-up motor, executive axle, two-mass mechanism, speed subsystem, coordinates observer, mathematical model.

Data on authors

- Artur A. Abdullin* — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Electrical Engineering and Precision Electro-Mechanical Systems; E-mail: artur.abdullin@gmail.com
- Valery A. Tolmachev* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Electrical Engineering and Precision Electro-Mechanical Systems; E-mail: tolmachev@ets.ifmo.ru

P. 72—75.

PROCESS SPEED MEASUREMENT IN DETONATION TUBES USING IONIZATION DETECTORS

Controlled detonation makes it possible to create new jet propulsion systems and power plants. A test model is developed to study processes running in detonation tube. Ionization detectors are used as sensors in combination with an efficient system for measurement and record of obtained results.

Keywords: ionization detector, detonation, measurement, conductivity, shock wave, formalizing amplifier.

Data on authors

- Pavel A. Galaydin* — Dr. Techn. Sci., Professor; Baltic State Technical University “VOENMEH”, Department of Electrical Engineering, St. Petersburg; E-mail: pag-N7@yandex.ru
- Yusif N. Mustafaev* — Baltic State Technical University “VOENMEH”, Department of Electrical Engineering, St. Petersburg; Associate Professor; E-mail: mustafaev@ss.ru
- Anton I. Musteykis* — Post-Graduate Student; Baltic State Technical University “VOENMEH”, Department of Electrical Engineering, St. Petersburg; E-mail: a.musteykis@gmail.com

P. 76—81.**ERROR ANALYSIS OF AUTOCOLLIMATOR CONTROL SYSTEM WITH ACTIVE COMPENSATION**

A method is proposed to extend autocollimator measurements range by means of active compensation for reference object turning angle. The effect of automated control system on measurement accuracy is analyzed. Application of galvanometer drive in control system is shown to be effective for dynamic errors reduction and measurement time diminishing.

Keywords: autocollimator, vignetting error, automated control system, dynamic error.

Data on authors

- Andrey E. Gorodetskiy** — Dr. Techn. Sci., Professor; Institute of Problems of Mechanical Engineering RAS, Laboratory of Methods and Systems of Automation, St. Petersburg;
E-mail: g27764@yandex.ru
- Maxim S. Doroshenko** — Institute of Problems of Mechanical Engineering RAS, Laboratory of Methods and Systems of Automation, St. Petersburg; Junior Scientist;
E-mail: m.s.doroshenko@gmail.com
- Irina L. Tarasova** — Cand. Techn. Sci., Institute of Problems of Mechanical Engineering RAS, Laboratory of Methods and Systems of Automation, St. Petersburg; Senior Scientist;
E-mail: g17265@yandex.ru
- Igor A. Konyakhin** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optic-Electronic Devices and Systems;
E-mail: igor@grv.ifmo.ru

P. 81—87.**LABORATORY SPECTROPHOTOMETER FOR ULTRAVIOLET SPECTRAL REGION**

Design peculiarities, technical features, and basic performance characteristics of laboratory spectrophotometer for measuring UV spectral transmission of various objects are considered. Results of device testing with solid state optical materials, aqueous solutions of phenols and oil products are presented. Perspectives of the spectrophotometer employment in control over chemical technological processes (e.g., bleaching in pulp industry) are also discussed.

Keywords: ultraviolet spectroscopy, optical materials, photometry of phenols and oil products, optics of cellulose, Kubelka—Munk theory.

Data on authors

- Nikolay P. Belov** — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Solid State Optoelectronics; Senior Scientist
- Olga S. Gaydukova** — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Solid State Optoelectronics
- Igor A. Panov** — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Solid State Optoelectronics
- Alexander Yu. Patyaev** — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Solid State Optoelectronics
- Yury Yu. Smirnov** — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Solid State Optoelectronics;
E-mail: yuri.smirnov@bk.ru
- Alexandra S. Sherstobitova** — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Solid State Optoelectronics;
E-mail: ashev87@mail.ru
- Andrey D. Yaskov** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Solid State Optoelectronics

P. 88—93.

OPTIMAL DESIGN OF EXPERIMENT ON HEAT EXCHANGE PROCESSES IDENTIFICATION IN HEAT FLOW SENSORS

A method of experimental design for heat exchange processes identification in heat flow sensors is proposed. The method is based on solution to inverse problem of thermal conductivity. The method provides a mean for development of sensors for unsteady heat flow measurement in accordance with technical requirements.

Keywords: heat flux, heat flow sensors, optimal planning, identification of thermal processes.

Data on authors

- Nikolay V. Pilipenko* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Thermal Physics and Energy-Physical Monitoring; E-mail: pilipenko38@mail.ru
- Yaroslav V. Kazartsev* — All-Russia D. I. Mendeleyev Scientific and Research Institute for Metrology, Laboratory of Combustion Calorimetry and High-purity Organic Substances for Metrological Purposes, St. Petersburg; Junior Scientist; E-mail: kazartsev@hotmail.com

P. 93—97.

AIRBORNE HEAT DIRECTION FINDER

A new airborne thermal direction finder is developed. The instrument is designed for detection and direction-finding of high-speed aircrafts.

Keywords: heat direction finder, aircraft, noise, infrared radiation, photo-detector, lens.

Data on authors

- Anatoly V. Demin* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Informatics and Applied Mathematics; E-mail: dav_60@mail.ru
- Alexander V. Sorokin* — “STC «ROKAD»”, St. Petersburg; Leading Engineer; E-mail: alex.corokins@mail.ru
- Dmitry M. Gordeev* — Cand. Techn. Sci.; AutoVisus Ltd., St. Peterburg; General Director; E-mail: gordeev@autovisus.ru
- Maxim A. Belyansky* — JSC “STC Zavod Leninet’s”, St. Petersburg; Head of Design Department; E-mail: belyansky@onegroup.ru
- Anastasia S. Ptitsyna* — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Instruments Computerization and Design; E-mail: Anastasia_88.88@mail.ru
- Alexey G. Shalkovskiy* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Pro-rector
- Alexey B. Churikov* — JSC “STC Zavod Leninet’s”, St. Petersburg; Deputy Technical Director; E-mail: churikov@onegroup.ru
- Alexander S. Smolin* — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: as_smolin@mail.ru

P. 98—100.**VIRTUAL PROVING GROUND FOR STUDYING OF EXTREME DYNAMICS OF MARINE OBJECTS AT IRREGULAR SEA WAVES**

Peculiarities of virtual reality technologies application to computer simulation of extreme dynamics of marine vehicles at irregular sea waves are considered. Problem of interpretation of results of extreme dynamic calculation is also discussed.

Keywords: marine vehicle, emergency conditions, virtual reality, rendering, stereo image.

Data on authors

- Alexey A. Bezgodov* — Research Institute of Science Intensive Computer Technologies, St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Information Systems; Junior Scientist; E-mail: demiurghg@gmail.com
- Alexander V. Boukhanovsky* — Dr. Techn. Sci., Professor; Research Institute of Science Intensive Computer Technologies, St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Director; E-mail: avb_mail@mail.ru

P. 100—101.**PROBABILITY DISTRIBUTION OF LEVEL-CROSSING INTERVALS FOR GAUSSIAN RANDOM PROCESS AND POSSIBLE CONSTRUCTION OF NEAR-FIELD LASER LOCATION SYSTEM WITH NOISE SYNCHRONIZATION**

A possible schematic of optical near-field location system with noise synchronization is proposed on the base of investigation into the probability distribution of level-crossing intervals of normal random process.

Keywords: outlying values of random process, probability distribution of level-crossing time-intervals of Gaussian random signals, optical near-field location, noise synchronization.

Data on authors

- Eugeny G. Lebedko* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: eleb@rambler.ru
- Maria G. Serikova* — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: serikovamg@gmail.com