

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

ИЗДАНИЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ»

Журнал издается с января 1958 г.

ТОМ 53

МАРТ 2010

№ 3

СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК к 110-летию СПбГУ ИТМО

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| ПРЕДИСЛОВИЕ | 3 |
| Колесников Ю. Л. От ремесленного училища до национального исследовательского университета | 5 |
| Тарлыков В. А., Шехонин А. А. Этапы развития оптического образования в России..... | 11 |
| Аксельрод З. М. Исследование часовых регуляторов без собственного периода колебания | 15 |
| Чуриловский В. Н. О новой стереоскопической марке | 28 |
| Зверев В. А. Большой Телескоп Азимутальный..... | 39 |
| Демин А. В., Денисов А. В., Летуновский А. В. Оптико-цифровые системы и комплексы космического назначения | 51 |
| Бухановский А. В., Васильев В. Н. Современные программные комплексы компьютерного моделирования e-Science | 60 |
| Воробьева Е. А., Гуров И. П., Петерсон М. В. Исследование метода обработки сигналов в системах оптической когерентной томографии с повышенным быстродействием | 65 |
| Арефьева Н. Н., Денисюк И. Ю. Применение наноимпринт-литографии для получения нано- и микроэлементов фотоники..... | 74 |
| Дмитриев П. А., Мусалимов В. М. Кинематические и динамические параметры движения автомобиля | 78 |
| Дульнев Г. Н., Пилипенко Н. В., Ходунков В. П. Теплофизические аспекты процесса псевдооживления в энергетических установках | 83 |
| SUMMARY (перевод Ю. И. Копилевича) | 90 |

SPECIAL ISSUE

110-th ANNIVERSARY OF UNIVERSITY ITMO

CONTENTS

| | |
|---|----|
| INTRODUCTION | 3 |
| Kolesnikov Yu. L. From the Trade School to the National Research University..... | 5 |
| Tarlykov V. A., Shekhonin A.A. Stages of Progress in Optical Education in Russia..... | 11 |
| Axelrod Z. M. Study of Clockwork Regulator without Natural Period of Vibration | 15 |
| Churilovsky V. N. A New Stereoscopic Mark | 28 |
| Zverev V. A. Large Azimuthal Telescope..... | 39 |
| Dyemin A. V., Denisov A. V., Letunovsky A. V. Spaceborne Optical-Digital Systems and Complexes | 51 |
| Boukhanovsky A. V., Vasilev V. N. Modern e-Science Software Packages for Computer Modeling..... | 60 |
| Vorobyeva E. A., Gurov I. P., Peterson M. V. Investigation of a Signal Processing Method for High-Speed Optical Coherent Tomography Systems | 65 |
| Arefeva N. N., Denisyuk I. Yu. Application of Nanoimprint Lithography to Manufacture Nano- and Microelements in Photonics | 74 |
| Dmitriev P. A., Musalimov V. M. Kinematic and Dynamic Parameters of Automobile Movement | 78 |
| Dulnev G. N., Pilipenko N. V., Hodunkov V. P. Thermophysical Aspects of Fluidization in Generating Unit..... | 83 |
| SUMMARY | 90 |

Editor-in-Chief E. B. Yakovlev

ПРЕДИСЛОВИЕ

Специальный выпуск нашего журнала посвящен юбилею СПбГУ ИТМО. В нем значительное внимание уделено истории университета, его научной и образовательной деятельности. В номер также вошли статьи сотрудников СПбГУ ИТМО по основным направлениям современных исследований. Мы сочли возможным поместить в него две статьи ведущих ученых ЛИТМО (З. М. Аксельрода и В. Н. Чуриловского), опубликованные в первом выпуске сборника „Приборостроение“ (1947 г.).

*Главный редактор журнала
„Известия вузов. Приборостроение“,
доктор технических наук, профессор
Е. Б. ЯКОВЛЕВ*

INTRODUCTION

The special issue of the Journal is dedicated to the anniversary of St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics, and Optics. Significant attention is given to history of our University, activities in scientific research and education. The issue includes papers by University employees on main problems of current researches. We have considered it advisable to include also two papers by leading LITMO scientists (Z. M. Axelrod and V. N. Churilovsky); the papers have been published in the first issue of “Priborostroenie” journal (1947).

*Editor-in-Chief of
“Izvestiya vuzov. Priborostroenie” journal
Doctor of Technical Science, Professor
E. B. YAKOVLEV*

К 110-летию СПбГУ ИТМО

ОТ РЕМЕСЛЕННОГО УЧИЛИЩА ДО НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО УНИВЕРСИТЕТА



В 2010 г. исполняется 110 лет со дня основания Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики (с 2009 г. — национальный исследовательский университет) — первого учебного заведения профессиональной подготовки в области точной механики и оптики.

По решению Государственного совета Российской империи от 26 марта 1900 г. было учреждено Механико-оптическое и часовое отделение в Ремесленном училище цесаревича Николая. Инициатором создания системы профессиональной подготовки квалифицированных мастеров по точной механике и оптике в России был потомственный дворянин А. П. Белановский (после создания Отделения он стал руководителем часовой мастерской при училище). Механико-оптическую мастерскую возглавил Н. Б. Завадский. В 1905 г. в училище состоялся первый выпуск специалистов. В мастерских Отделения впервые в России стали изготавливаться оптические приборы высокого качества — объективы и окуляры для зрительных труб и микроскопов, объективы для фотографии, станки для нарезки точных винтов, делительные машины, а также карманные часы.

На Международной выставке новых изобретений, состоявшейся в Санкт-Петербурге в 1909 г., Механико-оптическое и часовое отделение было награждено большой серебряной и большой золотой медалями, а Н. Б. Завадский — большой золотой медалью „За выдающиеся труды по организации преподавания в Механико-оптическом и часовом отделении Ремесленного училища цесаревича Николая“.

Как показывают архивные документы, в 1917—1920 гг. училище подверглось реорганизации, в результате которой был создан техникум повышенного типа с правом выпуска инженеров — Ленинградский техникум точной механики и оптики. В 1925 г. в Техникуме была начата подготовка инженеров-приборостроителей, в 1930 г. техникум был преобразован в Учебный комбинат точной механики и оптики, в который входил *Ленинградский институт точной механики и оптики (ЛИТМО)*. Первым директором Института был К. Ф. Мейер. Первый выпуск специалистов с высшим образованием состоялся уже в 1931 г. В 1933 г. Институт был выделен из комбината в самостоятельное высшее учебное заведение (директор — А. В. Бахшинов).

За годы своей деятельности ЛИТМО развивался как технический вуз с подготовкой инженеров по широкому кругу специальностей в области оптики, точного приборостроения и вычислительной техники. В нем был создан ряд авторитетных научных школ, которые на протяжении десятилетий лидируют в важнейших областях науки и техники. ЛИТМО внес существенный вклад в обороноспособность страны, стал всемирно известным вузом по

подготовке специалистов в области оптики, точного приборостроения и информационных технологий. В 1980 г. Институт за заслуги в подготовке высококвалифицированных кадров для народного хозяйства страны и развитии научных исследований был награжден орденом Трудового Красного Знамени.

В организации и развитии Института активное участие принимали такие выдающиеся ученые, как действительные члены АН СССР С. И. Вавилов, И. В. Гребенщиков, А. Н. Крылов, А. А. Лебедев, В. П. Линник, Д. С. Рождественский, В. И. Смирнов, А. Н. Теренин, академики РАН Ю. Н. Денисюк, Г. Т. Петровский, академики АН БССР М. А. Ельяшевич, Б. И. Степанов, члены-корреспонденты АН СССР В. С. Игнатовский, Д. А. Завалишин, Т. П. Кравец, А. И. Тудоровский, С. Э. Фриш, Я. И. Френкель, члены-корреспонденты РАН А. М. Бонч-Бруевич, Н. И. Комяк, заслуженные деятели науки и техники РСФСР Т. А. Глазенко, С. И. Зилитинкевич, С. А. Изенбек, Г. М. Кондратьев, К. И. Крылов, Б. И. Кудревич, М. Н. Либенсон, С. А. Майоров, М. Ф. Маликов, А. А. Маталин, С. П. Митрофанов, Л. С. Полак, Л. Ф. Порфирьев, В. К. Прокофьев, М. М. Русинов, Ю. А. Сабинин, Н. П. Соболев, С. И. Фрейберг, В. Н. Чуриловский, А. П. Ющенко, заслуженные деятели науки Российской Федерации И. В. Мирошник, Э. Д. Панков, А. В. Сечкарев, профессора З. М. Аксельрод, А. А. Гершун, А. Н. Захарьевский, И. И. Крыжановский, В. С. Меськин, И. М. Нагибина, Г. В. Погарев, Л. П. Рифтин, С. А. Родионов, В. А. Тартаковский, Л. Г. Титов, К. С. Ухов, М. Л. Цуккерман, С. Т. Цуккерман и многие другие.

За годы деятельности Институт подготовил около 50 тысяч специалистов. Среди выпускников вуза — *М. М. Русинов* (выпускник 1931 г., лауреат Ленинской премии, четырежды лауреат Государственной премии СССР, заслуженный деятель науки и техники РСФСР), *П. А. Ефимов* (1935 г., генеральный директор — главный конструктор ОКБ „Электроавтоматика“ в 1963—1982 гг., Герой Социалистического Труда, дважды лауреат Государственной премии СССР, заслуженный машиностроитель Российской Федерации), *С. А. Зверев* (1936 г., с 1963 по 1978 г. — министр оборонной промышленности СССР, Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской премии и Государственной премии СССР), *С. П. Митрофанов* (1939 г., лауреат Ленинской премии, ректор ЛИТМО в 1961—1974 гг., заслуженный деятель науки и техники РСФСР), *М. П. Панфилов* (1947 г., генеральный директор ЛОМО им. В. И. Ленина в 1962—1986 гг., дважды Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской премии и Государственной премии СССР), *Г. Н. Дульнев* (1950 г., ректор ЛИТМО в 1974—1986 гг., заслуженный деятель науки и техники РСФСР), *Ю. Н. Денисюк* (1954 г., академик РАН, лауреат Ленинской премии и Государственной премии СССР, автор метода объемной голографии и принципов динамической голографии), *М. Д. Агеев* (1954 г., академик РАН, директор Института проблем морских технологий Дальневосточного отделения РАН), *А. И. Федотов* (1955 г., основатель и первый президент Санкт-Петербургской инженерной академии, заслуженный деятель науки Российской Федерации, почетный машиностроитель СССР, лауреат Государственной премии СССР), *В. А. Зверев* (1961 г., лауреат Ленинской премии, заслуженный деятель науки Российской Федерации), *Н. А. Агальцова* (1961 г., лауреат Ленинской премии), *Г. И. Новиков* (1962 г., ректор ЛИТМО в 1986—1996 гг.), *Г. Н. Громов* (1963 г., генеральный директор — главный конструктор ВНИИ радиоаппаратуры, Герой Социалистического Труда), *П. П. Парамонов* (1964 г., директор — главный конструктор ОКБ „Электроавтоматика“, заслуженный конструктор Российской Федерации, доктор технических наук), *Т. И. Манина* (1965 г., заслуженный мастер спорта СССР, двукратная олимпийская чемпионка, многократная чемпионка мира, профессор), *А. А. Акаев* (1968 г., первый президент Кыргызстана, с 1987 г. — академик, в 1989—1990 гг. — президент АН Киргизии), *П. П. Матвиенко* (1971 г., зам. директора ВНИИ Трансмаш, заслуженный машиностроитель Российской Федерации), *А. С. Запесоцкий* (1976 г., ректор Санкт-Петербургского гуманитарного университета профсоюзов, заслуженный деятель науки Российской Федерации),

А. М. Аронов (1976 г., председатель совета директоров, генеральный директор ОАО „ЛОМО“, доктор экономических наук) и многие другие высококвалифицированные специалисты, работающие в различных областях науки, техники, образования, производства и бизнеса.

В 1994 г. по итогам Государственной аттестации Институту был присвоен статус технического университета, и он был переименован в *Санкт-Петербургский государственный институт точной механики и оптики (технический университет)*. В 1998, 2003 и 2008 гг. статус университета был подтвержден Государственной аккредитацией вуза. В 2003 г. вуз получил название *„Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики“*.

С 1996 г. ректором Университета является Владимир Николаевич Васильев, заслуженный деятель науки Российской Федерации, вице-президент Российского Союза ректоров, председатель Совета ректоров вузов Санкт-Петербурга, дважды лауреат премии Президента Российской Федерации, дважды лауреат премии Правительства Российской Федерации в области образования, член-корреспондент Российской Академии образования, доктор технических наук, профессор.

В Университете в соответствии с Государственным образовательным стандартом России реализуется многоуровневая система высшего профессионального образования: бакалавр наук — 4 года, дипломированный специалист — 5—5,5 лет, магистр наук — 6 лет обучения. Учебные планы подготовки позволяют студентам в процессе обучения выбирать уровень подготовки. При этом система подготовки в Университете нацелена на то, чтобы выпускники вуза были профессионально востребованы.

Профессиональная подготовка ведется более чем по 97 образовательным программам профессионального образования, из них 44 — в области высшего образования (оптика и оптоэлектроника, информатика и вычислительная техника, компьютерные технологии и телекоммуникационные системы, лазерная техника и биомедицинская оптика, информационные системы в экономике и менеджмент, приборостроение и инженерная и компьютерная графика и др.), 10 — в области среднего образования, 28 — в области послевузовского образования.

На дневном отделении обучаются около 10 тысяч студентов. В Университете работают около 900 высококвалифицированных преподавателей, из них более 650 докторов и кандидатов наук. Среди преподавателей Университета — видные ученые и педагоги, внесшие существенный вклад в его развитие: действительные члены РАН В. Г. Пешехонов и Е. Б. Александров, член-корреспондент РАН М. М. Мирошников, заслуженный деятель науки и техники РСФСР Г. Н. Дульнев, заслуженный деятель науки Российской Федерации, член-корреспондент Российской Академии образования В. Н. Васильев, заслуженные деятели науки Российской Федерации В. П. Вейко, В. А. Зверев, А. А. Мак, И. К. Мешковский, Г. И. Емельянец, В. Т. Прокопенко, заслуженные работники высшей школы Российской Федерации В. А. Валетов, Г. Г. Ишанин, В. С. Кулагин, Г. И. Мельников, Н. А. Ярышев, Е. И. Бутиков, Э. С. Путилин, Т. И. Алиев, В. В. Григорьев, И. А. Лапин, Е. Г. Лебедько, В. И. Подлесных, О. А. Приходько, Б. П. Тимофеев, заслуженный конструктор Российской Федерации П. П. Парамонов, заслуженный метролог Российской Федерации Л. П. Конопелько и другие.

Дневное отделение Университета составляют 10 факультетов: инженерно-физический, информационных технологий и программирования, компьютерных технологий и управления, оптико-информационных систем и технологий, точной механики и технологий, естественно-научный, фотоники и оптоинформатики, гуманитарный, Институт комплексного военного образования и Институт международного бизнеса и права. В состав факультетов входят 62 кафедры (из них 41 — выпускающая). На вечернем факультете ведется подготовка специалистов по программам с различными сроками обучения.

В подготовке будущих специалистов принимают участие ведущие ученые и специалисты базовых кафедр Университета, созданных на известных предприятиях и в организациях, например ВНЦ „ГОИ им. С. И. Вавилова“, ОАО „ЛОМО“, ОАО „Техприбор“, ОКБ „Электроавтоматика им. П. А. Ефимова“, ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, ОАО „НПП Радар ММС“, ОАО „ЦНИИ „Электроприбор“, ОАО „Ленполиграфмаш“, ОАО „НПП Сигнал“.

В составе Института комплексного военного образования действует военная кафедра, на которой студенты могут пройти обучение, получив второе высшее (военное) образование и звание офицера запаса.

Факультет среднего профессионального образования Университета осуществляет подготовку специалистов со средним профессиональным образованием по профилю вуза.

В Университете работают факультет повышения квалификации преподавателей и Академия методов и техники управления (Академия ЛИМТУ), реализующие большое число разнообразных образовательных программ дополнительного профессионального образования. В этой области также активно работают Институт международного бизнеса и права, Центр авторизованного обучения IT-технологиям, кафедра компьютерных образовательных технологий.

В Университете реализуется специальный образовательный проект по отбору и подготовке талантливой молодежи. Более 200 студентов Университета являются дипломантами городских школьных и студенческих олимпиад по математике, физике, информатике, оптотехнике, компьютерной графике, из них более 75 студентов — победители международных и всероссийских олимпиад. За последние несколько лет наши студенты выиграли большинство всероссийских и городских олимпиад по математике, физике, прикладной математике и информатике.

В Университете существует один из лучших в России центров по отбору и подготовке молодых одаренных программистов. Команда Университета стала первым чемпионом России по программированию (1996 г.). Сборная команда Университета является единственным постоянным российским участником финала студенческого командного чемпионата мира по программированию. В 2001, 2003, 2005 и 2007 гг. наша студенческая команда завоевала золотые медали мирового первенства, а в 2004, 2008 и 2009 г. — стала абсолютным чемпионом мира по программированию!

Университет является инициатором и главным разработчиком Федеральной университетской компьютерной сети России RUNNet — крупнейшей академической сети России, позволившей российским вузам получить доступ в мировую глобальную сеть Интернет. На территории Университета расположен Санкт-Петербургский узел сети RUNNet, объединяющей региональные сети и сети крупных научно-образовательных учреждений России. Через университетский узел осуществляется связь сети RUNNet с международными сервис-провайдерами по наземным и спутниковым каналам.

В 2000 г. коллективу авторов во главе с В. Н. Васильевым за разработку научно-организационных основ и создание Федеральной университетской компьютерной сети RUNNet для высших учебных заведений была присуждена премия Правительства Российской Федерации в области образования.

Среди студентов Университета — стипендиаты Президента и Правительства Российской Федерации, стипендиаты Санкт-Петербурга, лауреаты различных премий и грантов.

Основные научные направления Университета: оптические технологии, компьютерные и информационные технологии, системы управления, прецизионная техника и технология, электротехника и электроника, фундаментальные и прикладные исследования в области математики и физики.

Фундаментальные исследования ведутся в следующих областях: квантовая электроника и нелинейная оптика, оптика биотканей, физическая оптика и спектроскопия, лазерные и оп-

тические технологии, энергомониторинг, нецентрированная оптика, компьютерные технологии, управление роботами, теория нелинейных систем, компьютерные сети, суперкомпьютинг. В этих научных областях Университет ведет исследования по крупным Федеральным программам, в том числе аналитической ведомственной целевой программе „Развитие научного потенциала высшей школы (2006—2010)“, Федеральной целевой программе развития образования, Федеральной целевой программе „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009—2013 годы“.

В результате исследований ученые и специалисты Университета создают качественно новые системы приборов, технологии и материалы — лазерные аэрокосмические системы, пикосекундные (фемтосекундные) лазеры, лазерные оптические технологии, композиционные материалы, оптоэлектронные измерительные системы, медицинские лазерные системы, оптические сенсоры для промышленных и экологических применений, корпоративные сети и др.

За выдающийся вклад в развитие физики метаматериалов и разработку устройств передачи и обработки изображений со сверхразрешением в 2009 г. П. А. Белову, ведущему научному сотруднику кафедры фотоники и оптоинформатики, присуждена премия Президента Российской Федерации в области науки и инноваций для молодых ученых. Согласно указу, премия присуждается „за значительный вклад в развитие отечественной науки и в инновационную деятельность в целях стимулирования дальнейших исследований лауреатов указанной премии, создания благоприятных условий для новых научных открытий и инновационных достижений“.

Университет является ведущим университетом России в области информационных и оптических технологий!

В 2007 г. Университет стал победителем инновационных образовательных программ вузов России на 2007—2008 гг. Реализация инновационной образовательной программы позволила выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворить возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологических отраслях экономики.

В 2009 г. Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого были определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория „Национальный исследовательский университет“. По результатам конкурса Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена Программа развития государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования „Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики“ на 2009—2018 гг.

*Проректор СПбГУ ИТМО,
доктор физико-математических наук,
профессор Ю. Л. КОЛЕСНИКОВ*

К 110-летию СПбГУ ИТМО

В. А. ТАРЛЫКОВ, А. А. ШЕХОНИН

ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ОПТИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ В РОССИИ

XXI век часто называют веком оптики и информатики. Понятие „оптика“ в настоящее время приобрело гораздо более широкий смысл, нежели несколько десятилетий назад. Сегодня оно включает в себя как классическую оптику — оплотехнику, визуальные и оптико-электронные приборы широкого назначения, лазерную технику, так и сравнительно новые научно-технические направления — акустооптику, фотонику, оптоинформатику.

Первую в России оптическую мастерскую, где в большом количестве изготавливались зрительные трубы и другие оптические приборы и инструменты, организовал Петр I. Следующий, поистине революционный, шаг в развитии оптики в России был сделан после создания Академии наук.

М. В. Ломоносов построил более десятка принципиально новых оптических приборов. В своей работе „Слово о происхождении света, новую теорию о цветах представляющее в публичном собрании Императорской Академии наук июля 1 дня 1756 года, говоренное М. В. Ломоносовым“ он предложил верную по сути гипотезу о трех основных цветах и их различении [1]. К сожалению, труды Ломоносова не получили должного признания, поддержки и дальнейшего развития.

Зарождение оптической промышленности в России началось в XIX в. путем создания сравнительно небольших мастерских — „Механического заведения Военно-топографического депо Главного штаба“, где изготавливались зрительные трубы, астролябии, буссоли с диоптрами, нивелиры, секстанты, теодолиты, кипрегель-высотомер-дальномер и другие оптико-механические приборы, мастерской Гидрографического управления Морского министерства. А подготовка специалистов по точной механике, часовому делу и оптике была начата в России впервые в 1900 г. на базе учебного заведения, известного сегодня как Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (НИУ ИТМО).

Быстро развивающаяся в начале XX в. промышленность России потребовала создания оптико-механического производства. В 1905 г. на Обуховском заводе в Санкт-Петербурге была открыта оптическая мастерская, а в 1914 г. основано „Российское акционерное общество оптического и механического производства“, которое со временем превратилось в крупнейший завод — Государственный оптико-механический завод (ГОМЗ), а затем в Ленинградское оптико-механическое объединение (ЛОМО).

В Константиновском Межевом институте в 1902 г. впервые в России Н.М. Кисловым был поставлен курс „Теория оптических инструментов“, а его книга „Теория оптических инструментов“ (1915 г.) стала первым отечественным учебником по оптике.

В 1908 г. в России был учрежден Оптико-механический институт для изготовления геодезических инструментов и других оптических приборов. Примерно в это же время А. И. Тудоровский начал читать морским артиллерийским офицерам специальный курс „Теория оптических приборов“ [2].

В 1918 г. декретом Совета народных комиссаров РСФСР от 9 сентября 1918 г. учрежден „Высший институт Фотографии и Фототехники“ (в настоящее время СПбГУКиТ), куда для чтения курса лекций по оптике был приглашен В. С. Игнатовский — профессор, доктор физико-математических наук, выдающийся физик-оптик (основоположник оптической школы Ленинградского института точной механики и оптики). В 1921 г. в Институте создается оптический факультет, в 1939 г. для чтения курса оптики был приглашен проф. Г. Г. Слюсарев и создана кафедра оптоотехники.

15 декабря 1918 г. был основан Государственный оптический институт (ГОИ), сыгравший важную роль в развитии оптоотехники и формировании оптического образования в СССР. В 1922 г. государством были выделены значительные средства для закупки оборудования за рубежом, и ГОИ стал одним из наиболее оснащенных институтов страны. В ГОИ сложился уникальный научный коллектив, успешно совмещавший научную и педагогическую деятельность. Многие из специалистов впоследствии стали известными учеными, академиками, создателями авторитетных научных школ. Достаточно назвать имена академиков И. В. Гребенщикова, А. А. Лебедева, В. П. Линника, И. В. Обреимова, А. Н. Теренина, В. А. Фока, членов-корреспондентов АН СССР Н. Н. Качалова, Т. П. Кравца, Д. Д. Максудова, А. И. Тудоровского, П. П. Феофилова, С. Э. Фриша. С 1932 г. и до своей кончины в 1951 г. в ГОИ работал академик С.И. Вавилов, имя которого носит институт. В 1970—1980 гг. Институт превратился в одно из самых крупных научных учреждений страны и крупнейший научный центр по оптике в мире.

Следствием интенсивного развития отечественной промышленности, в том числе и оптической, на рубеже 1920—1930-х гг. стало появление научно-технического „Оптического журнала“ (до 1992 г. — „Оптико-механическая промышленность“), издающегося с августа 1931 г.

В 1930-х гг. в стране организуется массовая подготовка инженеров-оптиков в ведущих вузах страны — Московском высшем техническом училище им. Н. Э. Баумана (МВТУ), Ленинградском институте точной механики и оптики (ЛИТМО), Московском геодезическом институте (МИИГАиК).

Большое значение для развития прикладной оптики в СССР имел выход в свет в 1930—1940 гг. ряда фундаментальных монографий, посвященных методам расчета и проектирования оптических систем различного назначения, а также издание учебных пособий по курсу „Прикладная оптика“, написанных советскими учеными, ставшими основоположниками оптической науки в СССР: Г. Г. Слюсаревым, Д. Д. Максудовым, В. Н. Чуриловским, Д. С. Волосовым, М. М. Русиновым, Б. В. Феофиловым, А. И. Турыгиным и др. Значительным событием явилось издание А.И. Тудоровским двухтомной монографии по теории оптических приборов, ставшей основным руководством для специалистов, занимающихся технической оптикой [2].

Следующий мощный толчок к развитию оптической промышленности и оптического образования относится к периоду второй мировой войны. В это время потребовались не только специалисты по созданию и расчету оптических приборов наблюдения, но и специалисты, способные разрабатывать приборы для анализа физико-химического состава вещества. В целом ряде вузов СССР началась подготовка специалистов по оптике и спектроскопии — ЛИТМО, Саратовском, Казанском, Томском и Ленинградском государственных университетах.

В 1960 гг. после создания лазера, которое коренным образом изменило представления об окружающем мире и способствовало бурному развитию оптических технологий, в ведущих вузах СССР началась подготовка инженеров по лазерной технике.

Учебно-методическое объединение вузов России. В 1960-е гг. ЛИТМО был определен в качестве базового вуза СССР, ответственного за учебно-методическое обеспечение инженерного образования в области оптического приборостроения [3].

Дальнейшее развитие высшего профессионального образования привело к созданию в СССР учебно-методических объединений (УМО) вузов по отдельным направлениям подготовки. В 1987 г. на базе ЛИТМО было создано УМО по образованию в области приборостроения и оптотехники.

Одними из главных целей деятельности УМО вузов России являются сохранение и развитие единого образовательного пространства, совершенствование структуры и содержания, а также повышение качества подготовки специалистов.

На момент создания УМО за ним были закреплены две специальности. Сегодня в состав объединения входит 81 вуз из 53 городов России и вузы из Беларуси (ассоциированные члены), осуществляющие подготовку специалистов оптического и приборостроительного профиля.

Вузы объединения представлены классическими и техническими университетами, академиями и институтами, среди которых такие известные и авторитетные вузы, как МГТУ им. Н. Э. Баумана, МГУГиК, МАИ, МЭИ, СПб ГПУ, СПб ГЭТУ, ТГУ и др. Одиннадцать вузов УМО, в том числе Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики (СПбГУ ИТМО), явились победителями конкурса инновационных вузов (2006—2008 гг.) и реализуют инновационные образовательные программы. В настоящее время семь вузов, входящих в УМО, получили статус „Национального исследовательского университета“. География вузов УМО включает почти все регионы России: Северо-Западный и Центральный, Юг России и Сибирь. Председатель Совета УМО — В. Н. Васильев.

В настоящее время УМО курирует четыре направления подготовки бакалавров и магистров: оптические — оптотехника, лазерная техника и лазерные технологии, фотоника и оптоинформатика, а также направление — приборостроение.

Для взаимодействия вузов и оперативного ознакомления с нормативной информацией Минобрнауки России, учебно-методическими материалами УМО в 1998 г. в СПбГУ ИТМО создан сайт <<http://www.umo.ifmo.ru>>. На сайте размещена необходимая для деятельности вузов информация, включая государственные (федеральные государственные) образовательные стандарты (ГОС и ФГОС) по направлениям и специальностям, закрепленным за УМО, перечень специализаций, примерные учебные планы и программы дисциплин, фонды оценочных средств для итоговой аттестации выпускников вузов, требования к материально-техническому и информационно-методическому обеспечению, требования к составлению заключений УМО, получению грифов УМО и т.п. Наличие сайта УМО позволяет заинтересованным вузам активно участвовать в обсуждении и разработке новых образовательных программ вузов, учебно-методических материалов.

К разработке проектов ФГОС ВПО нового поколения в 2007 г. было привлечено более ста человек (профессора и преподаватели вузов УМО, представители работодателей и бизнеса).

Большое внимание в своей работе УМО уделяет издательской деятельности вузов-участников объединения, осуществляя экспертизу учебно-методических изданий вузов России на предмет присвоения грифа УМО. Проведение экспертизы способствует повышению качества изданий. С 1997 г. УМО присвоило свыше трехсот грифов учебно-методическим изданиям.

Эксперты УМО принимают участие в проведении комплексной оценки деятельности вузов (аккредитации и лицензировании), готовят заключения УМО о готовности вузов к реализации основных образовательных программ.

Значимую роль в жизни УМО играют конференции „Оптика и образование“, проводимые с 2000 г. на базе СПбГУ ИТМО в рамках Международного оптического конгресса „Оптика—XXI век“. Конференции способствуют активному обмену опытом в образовательной деятельности всех участников УМО. Основные вопросы, выносимые на обсуждение: образование в вузах и колледжах, современные технологии обучения, интеграция учебного и науч-

но-исследовательских процессов. Число участников этих конференций непрерывно растет. В работе последней конференции приняло участие более 160 человек из 36 вузов и организаций 16 городов России.

Для информирования членов УМО и взаимного обмена опытом издается учебно-методический сборник, в котором освещаются следующие вопросы: структура и содержание образования, интеграция науки и образования, организация учебного процесса вуза; публикуются нормативные документы и организационно-методические материалы УМО.

Активизации образовательного процесса, повышению качества образования и более тесному сплочению вузов России способствуют проводимые под руководством УМО всероссийские студенческие олимпиады и конкурсы. Всероссийские студенческие олимпиады по оплотехнике и технологии приборостроения проводятся на базе СПбГУ ИТМО, на базе ТГУ проводится олимпиада по специальности „Опτικο-электронные приборы и системы“. В 2009 г. во Всероссийской олимпиаде по оплотехнике приняли участие 53 студента из 14 вузов 10 городов России, Украины и Беларуси.

По направлениям подготовки „Оплотехника“, „Приборостроение“, „Фотоника и оптоинформатика“ в СПбГУ ИТМО ежегодно проводится Всероссийский конкурс выпускных квалификационных работ специалистов, бакалавров и магистров.

Росту престижа специальности и повышению квалификации молодых специалистов способствуют проводимые ежегодно в СПбГУ ИТМО конференции молодых ученых и специалистов, активное участие в которых принимают участники вузов из многих регионов России. В 2009 г. было сделано 640 докладов (из них 30 — школьниками Санкт-Петербурга) представителями 53 городов России и стран ближнего зарубежья (Украина, Беларусь, Казахстан, Молдова, Латвия).

Высшая школа России подвергается той же модернизации и переживает те же трудности, что и образование во многих европейских странах. Развитие наукоемких отраслей промышленности (в том числе оптической), основанных на информационных технологиях и нанотехнологиях требует специалистов нового типа, способных к постоянному самообучению, саморазвитию и активной адаптации к быстро меняющимся условиям профессиональной области деятельности. Происходит интенсивный рост числа специальностей и специализаций, востребованных на рынке труда; стирается грань между классическими академическими и прикладными профессиями; развиваются тенденции к повышению ориентации результатов образования на требования работодателей, прозрачности процедур аттестации и аккредитации в условиях сопоставимости результатов образования.

Переход к компетентностно-ориентированному обучению в рамках ФГОС требует создания соответствующей образовательной среды вуза, включающей новое формулирование целей и результатов обучения, новых технологий обучения, преподавания, оценивания, а также новых способов взаимодействия между преподавателем и студентом и между самими студентами, стимулирующих их личностное развитие. Информационные технологии в значительном объеме „взяли на себя интеллектуальные функции“, коренным образом изменив веками сложившуюся традицию использования инженером утомительного умственного труда по расчету сложных технических устройств и систем. Функционально инженер становится „хозяином“ вычислительной техники, которая в соответствии с его указаниями выполняет необходимые действия. Информационные технологии позволяют полноценно реализовать основные принципы педагогической дидактики — принципы наглядности, сознательности и активности обучающегося, доступности и посильности, индивидуализации и вариативности обучения и др. [4].

С первого года обучения студент должен максимальное количество учебных заданий выполнять самостоятельно в информационно-образовательной среде вуза с использованием компьютеров и современных пакетов прикладных программ. Следует отказаться от традиционных

методик преподавания, например, математических и естественнонаучных дисциплин, ориентированных в основном на аудиторские формы занятий и слабо связанных с формированием необходимых компетенций у выпускника вуза.

Значительное внимание при подготовке специалистов в области техники и технологий (в том числе оптиков) необходимо уделять формированию как системной и инструментальной группам базовых компетенций, так и межличностным компетенциям, существенный недостаток овладения которыми отмечают многие выпускники и работодатели [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. [Электронный ресурс]: <<http://www.vision-express.ru/info/stori>>.
2. Гуриков В. А. История прикладной оптики. М.: Изд-во МИИГАиК, 1984. 111 с.
3. Васильев В. Н., Шехонин А. А. Учебно-методическое объединение по образованию в области приборостроения и оптоэлектронных устройств // Сб. мат. Всеросс. науч.-метод. конф. „Государственно-общественные объединения в системе профессионального образования“. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. С. 156—158.
4. Шадриков В. Д., Шемет И. С. Информационные технологии в образовании: плюсы и минусы // Высшее образование в России. 2009. № 11. С. 61—65.
5. Зиновьева В. С., Вознесенская А. О., Нелепец А. В., Тарлыков В. А., Шехонин А. А. Выявление значимости общих компетенций по результатам анкетирования // Проблемы разработки учебно-методического обеспечения перехода на двухуровневую систему в инженерном образовании. М.: Изд-во МИСиС, 2008. С. 33—43.

К 110-летию СПбГУ ИТМО

З. М. Аксельрод

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСОВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ БЕЗ СОБСТВЕННОГО ПЕРИОДА КОЛЕБАНИЯ

Часовые регуляторы без собственного периода колебания находят применение в механизмах, работающих непродолжительное время, к которым предъявляются невысокие требования в смысле точности.

Достоинство подобных регуляторов состоит в простоте конструкции и способности противостоять сравнительно сильным ударам и толчкам.

На рис. 1 изображен регулятор часового механизма немецкой противотанковой мины. Регулятор (баланс) представляет собой уравновешенный маховичок 1, к которому прикреплен якорь 2 с плоскими палеттами: входной 3 и выходной 4. Ходовое колесо состоит из диска 5 и запрессованных в него штифтов 6.

На рис. 2 изображен баланс с ходом механизма пожарного извещателя. В отличие от предыдущей конструкции входная палетта здесь образована дугой окружности, эксцентрично расположенной по отношению к оси вращения баланса. Подобный ход применяется в фотозатворе типа „Компур“.

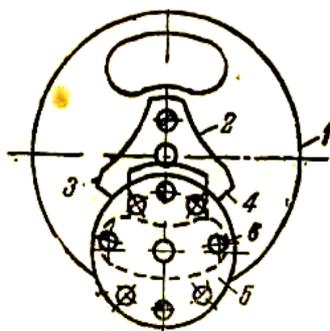


Рис. 1. Регулятор часового механизма немецкой противотанковой мины

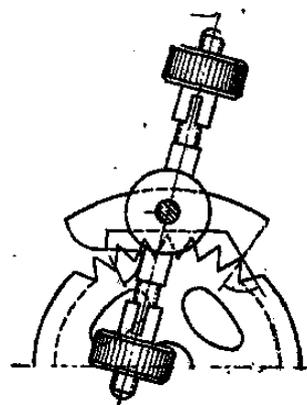


Рис. 2. Регулятор механизма пожарного извещателя

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДА И АМПЛИТУДЫ КОЛЕБАНИЯ РЕГУЛЯТОРА

Для решения поставленной задачи расчленим весь угол поворота баланса при его движении слева направо на три участка (рис. 3, а):

1) угол поворота баланса от крайнего положения до конца импульса (от нуля до Φ_m);

2) угол свободного поворота баланса δ (ходовое колесо проходит угол падения);

3) дополнительный угол Φ_1 .

При движении баланса в обратном направлении мы будем иметь аналогичную картину (рис. 3, б).

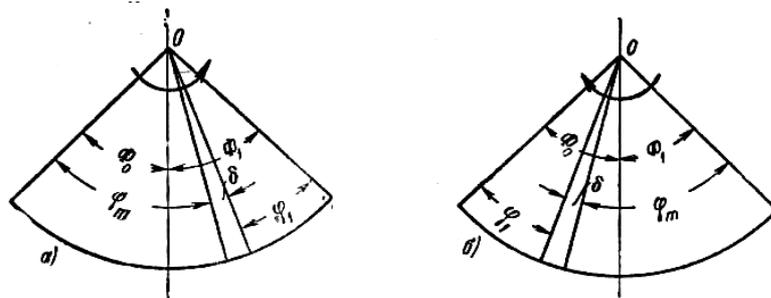


Рис. 3. Углы поворота баланса

1. Определение времени прохождения балансом угла φ_m

На рис. 4 стрелками показано направление движения якоря (баланси) и ходового колеса, а также направление действия сил и моментов.

Введем обозначения: I – момент инерции баланса и связанного с ним якоря; I_x – приведенный момент инерции ходового колеса; M_x – момент на оси ходового колеса; M_T – момент трения в цапфах баланса; f – коэффициент трения; φ – текущий угол поворота баланса; N – нормальная составляющая давления острия зуба колеса на палетту; N_1 – реакция этого давления; α – текущий угол поворота ходового колеса.

На основании рис. 4 уравнения движения баланса и ходового колеса будут следующими:

$$-I\ddot{\varphi} - M_T + Nx - fN\alpha = 0, \quad -I_x\ddot{\alpha} - M_x + N_1x - fN_1v = 0.$$

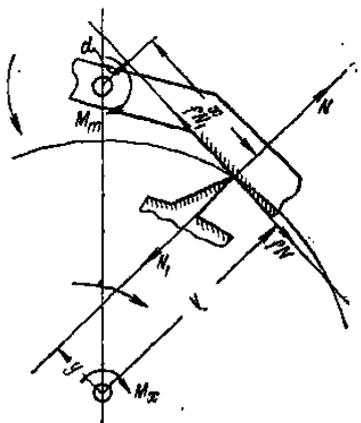


Рис. 4. Схема к расчету времени прохождения балансом угла

Исключив из этих двух уравнений $N = N_1$ и положив

$$f(\varphi) = \frac{x - f\alpha}{x + fv}, \quad (1)$$

получим

$$-I\ddot{\varphi} - f(\alpha) (M_x + I_x\ddot{\alpha}) + M_T = 0.$$

Угол α можно выразить через угол φ , пользуясь уравнением связи $\alpha = F(\varphi)$. В пределах малых углов поворота можно положить

$$\alpha = -i\varphi \text{ и } \ddot{\alpha} = -i\ddot{\varphi} \quad (\alpha < 0 \text{ и } \varphi > 0),$$

поэтому

$$(I + f(\varphi)iI_x)\ddot{\varphi} - f(\varphi)M_x + M_T = 0.$$

В нормальных конструкциях часовых механизмов $I \gg I_x$, а $f(\varphi)i$ обычно меньше единицы. Поэтому без заметной погрешности можно принять:

$$I_1 = I + \bar{f}_{\text{cp}}(\varphi) i I_x, \quad (2)$$

где $\bar{f}_{\text{cp}}(\varphi)$ – среднее значение функции.

Коэффициент I_1 назовем приведенным моментом инерции баланса, следовательно

$$I\ddot{\varphi} - f(\varphi)M_x + M_T = 0.$$

Первый интеграл этого уравнения при начальных условиях $t = 0$, при $\varphi = 0$ и $\dot{\varphi}_0 = 0$ будет:

$$\sqrt{\frac{1}{2} I_1} \frac{d\varphi}{dt} = \sqrt{M_x \int_0^\varphi f(\varphi) d\varphi - M_T \varphi},$$

откуда получаем искомое время t_1 :

$$t_1 = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{I_1}{M_x}} \int_0^{\varphi_m} \frac{d\varphi}{\sqrt{\int_0^\varphi f(\varphi) d\varphi - \frac{M_T}{M_x} \varphi}}. \quad (3)$$

Угловая скорость баланса в конце рассматриваемого участка равна:

$$\dot{\varphi}_1 = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{2} \frac{I_1}{M_x}}} \sqrt{\int_0^\varphi f(\varphi) d\varphi - \frac{M_T}{M_x} \varphi}. \quad (4)$$

2. Определение времени свободного поворота баланса на угол δ

На рис. 5 изображено ходовое колесо в момент падения на входную палетту.

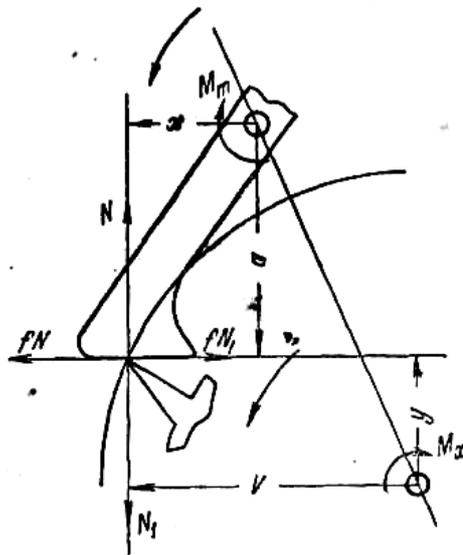


Рис. 5. Схема к расчету времени прохождения балансом угла

Так как угол δ мал, то с большой степенью приближения можно принять, что баланс проходит этот угол с постоянной скоростью $\dot{\varphi}_1$, тем более что уменьшение скорости баланса вызывает только момент трения. Искомое время будет:

$$t_2 = \frac{\delta}{\dot{\varphi}_1}. \quad (5)$$

Пусть α_1 – угол падения ходового колеса при неподвижном балансе (это значение всегда известно), тогда фактический угол падения колеса будет

$$\alpha = \alpha_1 - \gamma.$$

В пределах малых углов можно принять, что $\gamma = I\delta$, где I можно определить из уравнения связи на входной палетке, следовательно:

$$\alpha = \alpha_1 - I\delta.$$

С другой стороны,

$$t_2 = \frac{\alpha}{\dot{\alpha}_1} = \frac{\alpha}{i\dot{\phi}_1} \quad \text{и} \quad \delta = \phi_1 t_2 = \frac{\alpha}{i},$$

где $\dot{\alpha}_1$ – угловая скорость ходового колеса в конце первого участка.

Полученные равенства дают

$$\delta = \frac{\alpha_1}{I + i}. \quad (6)$$

3. Определение времени прохождения балансом дополнительного угла ϕ_1

Ходовое колесо на этом участке (рис. 6) тормозит движение баланса и вместе с тем отходит несколько назад.

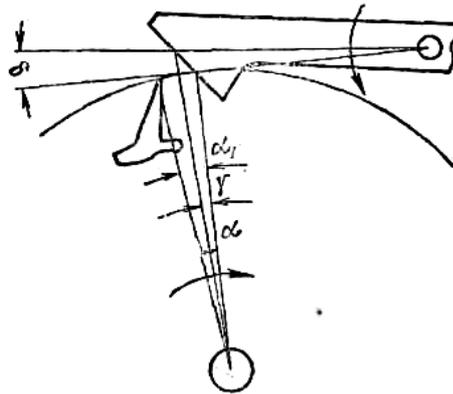


Рис. 6. Схема к расчету времени свободного поворота баланса ϕ_1

Уравнения движения баланса и ходового колеса в этом случае будут

$$-I\ddot{\phi} - M_T - Nx - fN\alpha = 0,$$

$$-I_x\ddot{\alpha} - M_x + N_1x - fN_1v = 0.$$

На основании этих уравнений имеем:

$$-I_2\ddot{\phi} + f_1(\phi)M_x + M_T = 0, \quad (7)$$

где

$$f_1(\phi) = \frac{x + fa}{x - fv}, \quad (8)$$

$$I_2 = I + f_{1cp}(\phi)I_x. \quad (9)$$

В общем случае $I_1 \neq I_2$.

Первый интеграл уравнения (7) при начальных условиях $\phi = 0$ при $\dot{\phi} = \dot{\phi}_1$ равен:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \sqrt{\frac{2M_x I_1}{I_1}} \sqrt{\int_0^{\varphi_m} f(\varphi) d\varphi - \frac{I_1}{I_2} \int_0^{\varphi} f_1(\varphi) d\varphi - \frac{M_T}{M_x} \left(\varphi_m + \frac{I_1}{I_2} \varphi \right)}.$$

Отделив переменные и проинтегрировав в пределах от нуля до φ_1 , получим искомое время прохождения балансом дополнительного угла:

$$t_3 = \sqrt{\frac{I_1}{2M_x}} \int_0^{\varphi_1} \frac{d\varphi}{\sqrt{\int_0^{\varphi_m} f(\varphi) d\varphi - \frac{I_1}{I_2} \int_0^{\varphi} f_1(\varphi) d\varphi - \frac{M_T}{M_x} \left(\varphi_m + \frac{I_1}{I_2} \varphi \right)}}. \quad (10)$$

Сумма правых частей выражений (3), (5) и (10) представляет половину периода колебания баланса при движении его слева направо:

$$\frac{T}{2} = \sqrt{\frac{I_1}{2M_x}} \left[\int_0^{\varphi_m} \frac{d\varphi}{\sqrt{\int_0^{\varphi} f(\varphi) d\varphi - \frac{M_T}{M_x} \varphi}} + \int_0^{\varphi_1} \frac{d\varphi}{\sqrt{\int_0^{\varphi_m} f(\varphi) d\varphi - \frac{I_1}{I_2} \int_0^{\varphi} f_1(\varphi) d\varphi - \frac{M_T}{M_x} \left(\varphi_m + \frac{I_1}{I_2} \varphi \right)}} + \right. \\ \left. + \int_0^{\varphi_m} \frac{d\varphi}{\sqrt{\int_0^{\varphi} f(\varphi) d\varphi - \frac{M_T}{M_x} \varphi}} \right]. \quad (11)$$

Из рис. 3, а видно, что $\varphi_m = \Phi_0 + \frac{\lambda}{2}$ и $\varphi_1 = \Phi_1 - \left(\frac{\lambda}{2} + \delta \right)$.

Другая половина периода колебания, равная продолжительности левого движения баланса, выражается подобной формулой, в которой следует лишь сделать перестановку амплитуд Φ_0 и Φ_1 .

При $\varphi = \varphi_1$ баланс достигает крайнего правого положения, в котором его скорость равна нулю, т.е.

$$M_x \left[\int_0^{\varphi_m} f(\varphi) d\varphi - \frac{I_1}{I_2} \int_0^{\varphi} f_1(\varphi) d\varphi \right] = M_T \left(\varphi_m + \frac{I_1}{I_2} \varphi_1 \right).$$

При $I_1 = I_2$ левая часть этого выражения представляет работу, полученную, а правая часть — работу, затраченную балансом при одном полуколебании, следовательно:

$$M_x = \frac{M_T \left(\varphi_m + \frac{I_1}{I_2} \varphi_1 \right)}{\int_0^{\varphi_m} f(\varphi) d\varphi - \frac{I_1}{I_2} \int_0^{\varphi} f_1(\varphi) d\varphi}.$$

Эта формула выражает зависимость амплитуды колебания баланса от момента на оси ходового колеса.

ПОСТРОЕНИЕ ВОЗВРАТНОГО ХОДА

Прежде всего следует заметить, что в ходе, работающем совместно с балансом без собственного периода колебания, палетты располагаются так, что во время прохождения дополнительного угла возникает момент, направленный против движения баланса, а ходовое колесо отходит назад. Только при этом условии возможно колебательное движение баланса. Подобные хода называются возвратными.

На рис. 7 показано построение возвратного хода. Этот ход характеризуется следующими данными: число зубцов ходового колеса — 25, якорь обхватывает 4,5 шага, угол падения — $1^{\circ}30'$ и угловая ширина палетты — 6° . Угол обхвата $l_{on} = 64^{\circ}48'$ симметрично расположен по отношению к оси ou . Лучи oi и oh , ограничивающие угловую ширину палетты, симметрично расположенную относительно ol , пересекают внешнюю окружность в точках A и B . На выходной палетте соответствующие точки обозначены через F и E . Через эти точки проведены секущие ca и cb , которые пересекаются на оси ou в точке c — центре вращения якоря. Через точки A и B (или F и E) проведены из центра c внешняя и внутренняя палеттные окружности mm и ss . Далее проведены лучи cf и ce под углом 6° (угол импульса) к секущим ca и cb .

Эти лучи пересекают палеттную окружность в точках L и N . Прямые AL и NF представляют проекцию плоскостей импульса на плоскость чертежа; эти плоскости продолжены вверх. Ходовое колесо имеет острые зубцы, снабженные на концах небольшими фасками для увеличения прочности.

Плоская входная палетта имеет следующий недостаток: при перемещении зуба колеса по плоскости, во время прохождения балансом дополнительного угла, возникает сильное трение, вызывающее уменьшение амплитуды колебания и сильный износ зубцов и палетты.

Этот недостаток можно устранить, если вместо плоской входной палетты построить палетту, очерченную по цилиндрической поверхности. На рис. 7 это построение показано пунктирными линиями. Из середины прямой AL восстановлен перпендикуляр, и из центра O_1 на этом перпендикуляре проведена через точки A и L дуга окружности радиуса $r_0 = 0,46r$, где r — радиус внешней палеттной окружности. Эта дуга окружности и представляет проекцию поверхности импульса входной палетты на плоскость рисунка.

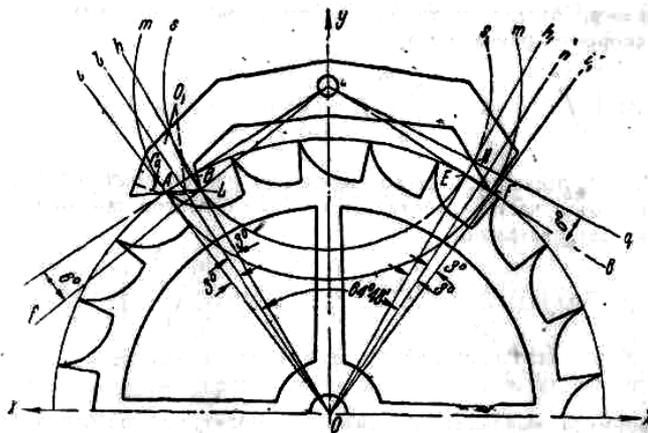


Рис. 7. Построение возвратного хода

Функции $f(\varphi)$ и $f_1(\varphi)$ определяются по формулам (1) и (7), в которые входят переменные коэффициенты, зависящие от угла поворота баланса. Определение значения этих коэффициентов для заданных размеров хода не встречает принципиальных затруднений. Заметим, что $M_x f(\varphi)$ есть момент импульса, поддерживающий колебание баланса, а $M_x f_1(\varphi)$ — момент, направленный против движения баланса.

В табл. 1 приведены значения функций $f(\varphi)$ и $f_1(\varphi)$, вычисленные для пяти равноотстоящих значений φ и коэффициентов трения 0,15 и 0,2. В качестве исходных данных приняты число зубцов ходового колеса $z=25$, угол обхвата $2\alpha_0 = 64^\circ 48'$, угол импульса $\lambda = 6^\circ$ и угловая ширина палетты $\psi = 6^\circ$. Радиус внешней окружности R может иметь произвольную величину, так как он не оказывает влияния на эти функции. Угол поворота колеса — α .

Таблица 1

| $z=25 \lambda=6^\circ 2\alpha_0$ | | | | | | | |
|----------------------------------|----------------|---------|---------------|---------------|----------------|---------|---------------|
| Входная палетта | | | | | | | |
| $0-\varphi_1$ | | | | $0-\varphi_m$ | | | |
| φ | $f_1(\varphi)$ | | α | φ | $f_1(\varphi)$ | | α |
| | $f=0,15$ | $f=0,2$ | | | $f=0,15$ | $f=0,2$ | |
| 0° | 0,9732 | 1,076 | 0° | 0° | 0,3790 | 0,3378 | 0° |
| $1^\circ 30'$ | 0,8781 | 0,9651 | $0^\circ 3'$ | 3° | 0,4554 | 0,4111 | $1^\circ 41'$ |
| $3^\circ 0'$ | 0,8016 | 0,8777 | $2^\circ 1'$ | 6° | 0,5470 | 0,6036 | $3^\circ 41'$ |
| $4^\circ 30'$ | 0,7373 | 0,8054 | $2^\circ 52'$ | 9° | 0,6748 | 0,6129 | $6^\circ 7'$ |
| $6^\circ 0'$ | 0,6814 | 0,7436 | $3^\circ 41'$ | 12° | 0,9237 | 0,8775 | $9^\circ 23'$ |
| Выходная палетта | | | | | | | |
| 0° | 0,9974 | 1,113 | 0° | 0° | 0,3896 | 0,3556 | 0° |
| $1^\circ 30'$ | 0,8888 | 0,9852 | $0^\circ 3'$ | 3° | 0,4592 | 0,4192 | $1^\circ 40'$ |
| $3^\circ 0'$ | 0,8002 | 0,8823 | $2^\circ 0'$ | 6° | 0,5520 | 0,5030 | $3^\circ 40'$ |
| $4^\circ 30'$ | 0,7265 | 0,7976 | $2^\circ 52'$ | 9° | 0,6837 | 0,6207 | $6^\circ 7'$ |
| $6^\circ 0'$ | 0,6642 | 0,7266 | $3^\circ 41'$ | 12° | 0,8911 | 0,8029 | $9^\circ 22'$ |

Графическое представление функции $f(\varphi)$ и $f_1(\varphi)$ мы назовем импульсными кривыми. На рис. 8 построены импульсные кривые для $f = 0,15$.

Из этого рисунка, а также из табл. 1 видно, что функция $f_1(\varphi)$ для обеих палетт практически одинакова; то же можно сказать о функции $f(\varphi)$. Таким образом, предлагаемый нами профиль палетт обеспечивает симметричность колебания баланса относительно линии центров и равенство полупериодов.

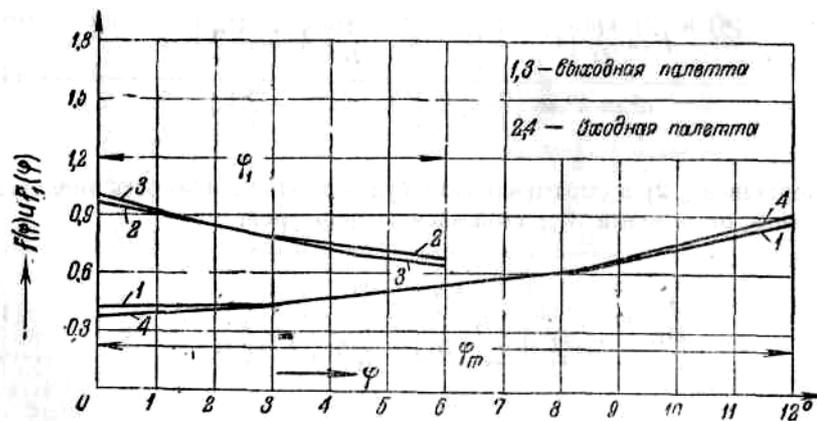


Рис. 8. Импульсные кривые возвратного хода

Следует, кроме того, отметить, что импульсные кривые практически не изменяются при изменении угла обхвата.

ВЫВОД ОСНОВНЫХ РАСЧЕТНЫХ ФОРМУЛ

Из рис. 8 и табл. 1 видно, что импульсные кривые монотонно изменяются с изменением φ и сравнительно мало отличаются от прямых. Следует добавить, что при работе баланса совместно с несвободным ходом небольшое изменение формы импульсной кривой не оказывает влияния на период колебания.

На этом основании произведем спрямление импульсных кривых методом наименьших квадратов и обозначим

$$f_1(\varphi) = A - B\varphi, \quad f(\varphi) = C + D\varphi. \quad (12)$$

Подставив эти значения в выражение (11) и проинтегрировав, мы получим формулу для определения полупериода колебания баланса следующего вида:

$$T = 2\sqrt{\frac{I_1}{M_x}} \left\{ \frac{1}{\sqrt{D}} \operatorname{arccch} \left(\frac{\varphi_m + b}{b} \right) + \sqrt{\frac{I_2}{I_1 B}} \left[\operatorname{arccch} \left(\frac{\varphi_1 + k}{a} \right) + \operatorname{arccch} \frac{k}{a} \right] + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\delta}{\sqrt{\varphi_m \left(\frac{D}{2} \varphi_m + C - \frac{M_T}{M_x} \right)}} \right\}, \quad (13)$$

где

$$\left. \begin{aligned} b &= \frac{1}{D} \left(C - \frac{M_T}{M_x} \right), \quad k = \frac{1}{B} \left(C - \frac{M_T}{M_x} \right), \\ a^2 &= k^2 - \frac{2I_2}{I_1 B} \varphi_m \left(\frac{D}{2} \varphi_m + C - \frac{M_T}{M_x} \right). \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Подставив (12) в выражение (11), получим зависимость амплитуды колебания от момента M_x , выражаемую формулой:

$$\frac{M_T}{M_x} = \frac{\varphi_m + \frac{I_1}{I_2} \varphi_1}{\varphi_m \left(C + \frac{D}{2} \varphi_m \right) - \frac{I_1}{I_2} \varphi_1 \left(A - \frac{B}{2} \varphi_1 \right)}, \quad (15)$$

где

$$\varphi_m = \Phi + \frac{\lambda}{2} \quad \text{и} \quad \varphi_1 = \Phi - \left(\frac{\lambda}{2} + \delta \right).$$

Имея в виду выяснить влияние угла импульса и числа зубцов колеса на период и амплитуду, рассмотрим следующие три хода (табл. 2, здесь α_1 — угол падения).

Таблица 2

| № хода | z | λ, \dots° | α_1 | $2\alpha_0$ |
|--------|-----|------------------------|---------------|----------------|
| 1 | 25 | 6 | $1^\circ 30'$ | $64^\circ 48'$ |
| 2 | 25 | 8 | $1^\circ 30'$ | $64^\circ 48'$ |
| 3 | 30 | 6 | $1^\circ 30'$ | $66^\circ 0'$ |

Для этих ходов найдены импульсные кривые и методом наименьших квадратов вычислены коэффициенты A , B , C и D , приведенные в табл. 3.

Таблица 3

| № хода | $f=0,15$ | | | | $f=0,2$ | | | |
|--------|----------|-------|--------|-------|---------|-------|--------|-------|
| | A | B | C | D | A | B | C | D |
| 1 | 0,9533 | 2,737 | 0,3421 | 2,269 | 1,051 | 3,111 | 0,3144 | 2,030 |
| 2 | 0,7287 | 1,793 | 0,2613 | 1,546 | 0,7979 | 1,963 | 0,2350 | 1,406 |
| 3 | 0,8085 | 2,189 | 0,3205 | 1,696 | 0,8885 | 2,450 | 0,2897 | 1,539 |

Площади, ограниченные прямыми $A - B\varphi$ и $C + D\varphi$ и осями координат, с точностью до четвертого знака совпадают с площадями, ограниченными импульсными кривыми с теми же осями координат. Таким образом, энергия, сообщаемая балансу в результате спрямления импульсных кривых, не изменилась.

В табл. 4 помещены значения приведенных моментов инерции баланса (отношения $\frac{I_1}{I}$ и $\frac{I_2}{I}$) вычисленные по формулам (2) и (9).

Таблица 4

| № хода | $f=0,15$ | | | | | |
|---------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | $\frac{I_1}{I}$ | | | $\frac{I_2}{I}$ | | |
| | $\frac{I_x}{I} = \frac{1}{5}$ | $\frac{I_x}{I} = \frac{1}{10}$ | $\frac{I_x}{I} = \frac{1}{20}$ | $\frac{I_x}{I} = \frac{1}{5}$ | $\frac{I_x}{I} = \frac{1}{10}$ | $\frac{I_x}{I} = \frac{1}{20}$ |
| 1 | 1,093 | 1,046 | 1,023 | 1,100 | 1,050 | 1,025 |
| 2 | 1,056 | 1,028 | 1,014 | 1,058 | 1,029 | 1,014 |
| 3 | 1,064 | 1,032 | 1,016 | 1,075 | 1,037 | 1,019 |
| $f=0,2$ | | | | | | |
| 1 | 1,084 | 1,042 | 1,021 | 1,110 | 1,055 | 1,028 |
| 2 | 1,051 | 1,025 | 1,013 | 1,063 | 1,032 | 1,016 |
| 3 | 1,058 | 1,029 | 1,014 | 1,082 | 1,041 | 1,020 |

С возрастанием отношения $\frac{I_x}{I}$ увеличивается погрешность приведенных моментов I_1 и I_2 при принятых нами значениях $\frac{I_x}{I}$ эта погрешность колеблется от 0,18 до 1,8 %.

За то время, пока ходовое колесо проходит угол падения, баланс совершает свободный поворот на угол δ , определяемый по формулам (5) и (6). В табл. 5 приведены значения этого угла для рассматриваемых ходов.

Таблица 5

| № хода | 1 | 2 | 3 |
|----------|----------|----------|----------|
| δ | 0,013 52 | 0,017 78 | 0,017 21 |

Погрешность найденных значений δ не превышает 0,6 %. Нетрудно показать, что $\frac{\Phi_1 - k}{a} = 1$, а следовательно

$$\operatorname{arcch} \left(\frac{\Phi_1 - k}{a} \right) = 0.$$

Подставив значения Φ_m и Φ_1 в формулы (13) и (15) и обозначив $\frac{M_x}{M_T} = \frac{1}{F(\Phi)}$ и $\frac{\lambda}{2} = \varepsilon$, будем иметь:

$$T = 2 \sqrt{\frac{I_1}{M_x}} \sqrt{F(\Phi)} \left\{ \frac{1}{\sqrt{D}} \operatorname{arcch} \left(\frac{\Phi + \varepsilon + b}{b} \right) + \sqrt{\frac{I_2}{I_1 B}} \operatorname{arcch} \left(\frac{k}{a} \right) + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\delta}{\sqrt{(\Phi + \varepsilon) \left[\frac{D}{2} (\Phi + \varepsilon) + C - F(\Phi) \right]}} \right\}, \quad (16)$$

где

$$b = \frac{1}{D} [C - F(\Phi)]; \quad k = \frac{1}{B} [A + F(\Phi)];$$

$$a = \left\{ k^2 - \frac{2I_2}{BI_1} (\Phi + \varepsilon) \left[\frac{D}{2} (\Phi + \varepsilon) + C - F(\Phi) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

и

$$\frac{M_x}{M_T} = \frac{1}{F(\Phi)} = \frac{\Phi + \varepsilon + \frac{I_1}{I_2} (\Phi - \varepsilon - \delta)}{(\Phi + \varepsilon) \left[C + \frac{D}{2} (\Phi + \varepsilon) \right] - \frac{I_1}{I_2} (\Phi - \varepsilon - \delta) \left[A - \frac{B}{2} (\Phi - \varepsilon - \delta) \right]} \quad (18)$$

На основании последней формулы построены кривые зависимости $\frac{M_x}{M_T}$ от Φ (рис. 9) для трех рассматриваемых нами ходов (табл. 2); эти кривые получены при $\frac{I_x}{I} = \frac{1}{10}$ и $f = 0,2$, причем кривой а соответствует $f = 0,15$.

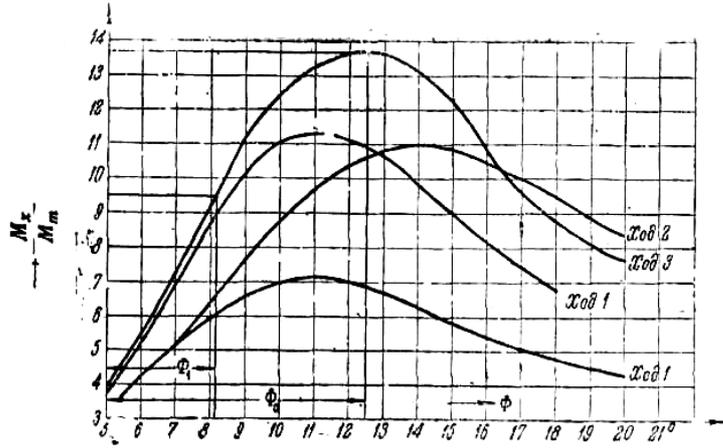


Рис. 9. Кривые зависимости $\frac{M_x}{M_T}$ от Φ

По тем же данным найдены периоды $T_0 = \frac{T}{2\sqrt{I_1 M_T}}$ для ряда значений амплитуд Φ и построены кривые зависимости T_0 от Φ (рис. 10), названные нами характеристиками регулятора. Кривые, изображенные на рис. 11, дают представление о влиянии величины отношения $\frac{I_x}{I}$ на период и амплитуду.

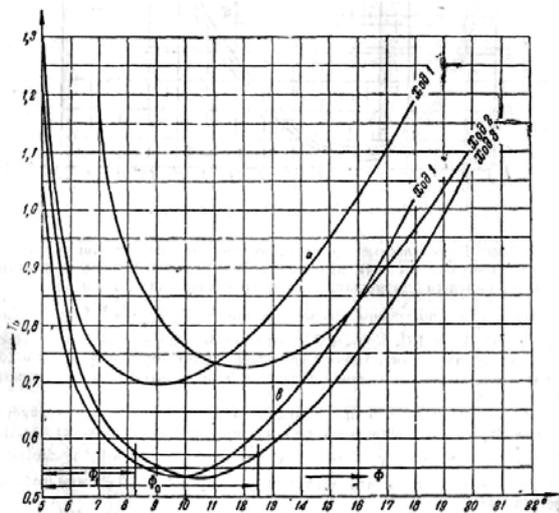


Рис. 10. Характеристики регулятора

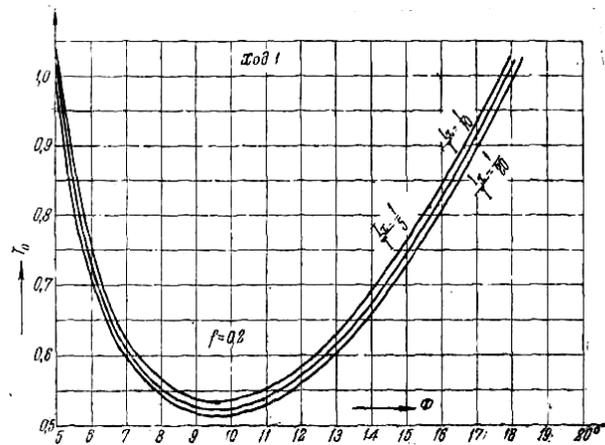


Рис. 11. Характеристики регулятора

В ходе 1 импульсные кривые заменены горизонтальными прямыми (момент импульса = const) при соблюдении условия сохранения работы момента им-

пульса неизменной. Для этого случая найдены соответствующие формулы и построены кривые зависимости T_0 от Φ и $\frac{M_x}{M_T}$ от Φ (рис. 12 и 13, кривые а).

Кривые *b* соответствуют импульсным кривым того же хода, спрямленным обычным способом. Таким образом, рис. 12 и 13 дают представление о влиянии характера импульсных кривых на период и амплитуду.

Из рис. 9 видно, что при возрастании Φ момент на оси ходового колеса M_x увеличивается, достигает максимума, а затем начинает падать. Таким образом, одному и тому же значению M_x (или $\frac{M_x}{M_T}$) соответствуют две амплитуды, что характеризует неустойчивый режим работы регулятора.

Почему такой режим возникает? Из рис. 8 видно, что $f(\varphi)$ увеличивается, а $f_1(\varphi)$ — уменьшается при увеличении φ . Благодаря этому обстоятельству интеграл

$$\int_0^{\varphi_m} f(\varphi) d\varphi \text{ растет с увеличением } \Phi \text{ значительно быстрее интеграла } \int_0^{\varphi_1} f_1(\varphi) d\varphi.$$

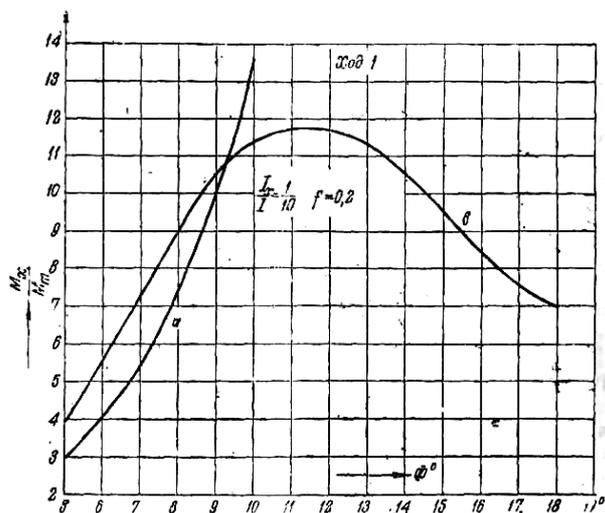


Рис. 12. Кривые зависимости $\frac{M_x}{M_T}$ от Φ

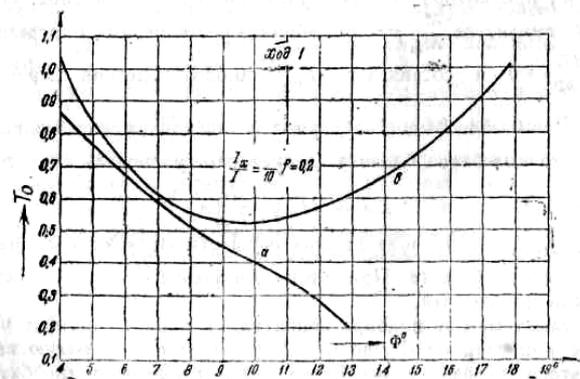


Рис. 13. Характеристики регулятора

Это означает, что с некоторого значения Φ знаменатель выражения (11) начнет быстрее возрастать, чем числитель, что вызывает неустойчивый режим. При постоянных $f(\varphi)$ и $f_1(\varphi)$ неустойчивого режима не получается (рис. 12). Для того чтобы исключить неустойчивый режим, следует пользоваться лишь возрастающей ветвью кривой, для которой $\frac{dM_x}{d\Phi} > 0$. Для этого необходимо установить ограничитель амплитуды. Впрочем, это можно и не делать, так как амплитуда колебания баланса ограничена конструкцией хода и едва ли превышает 12° . При увеличении $\frac{M_x}{M_T}$ (на возрастающей ветви) период колеба-

ния уменьшается ($\frac{dT_0}{d\Phi} < 0$), достигает минимума ($\frac{dT_0}{d\Phi} = 0$), а затем начинает

возрастать $\frac{dT_0}{d\Phi} > 0$. Следует отметить, что при $\frac{dM_x}{d\Phi} = 0$ имеем $\frac{dT_0}{d\Phi} > 0$. При

малых значениях амплитуды $\frac{dT_0}{d\Phi} > 1$, что указывает на сильную неизохронность колебания баланса.

Выясним, при каком диапазоне амплитуды колебания баланса достижима наименьшая ошибка часового механизма. Для этого обратимся к рис. 9 и 10 и рассмотрим кривые хода 3. Наибольшая амплитуда колебания баланса на возрастающей ветви кривой (рис. 9) определяется из условия $\frac{dM_x}{d\Phi} = 0$ и $\frac{dM_x}{d\Phi} = 0$ и

составляет для рассматриваемого случая $\Phi_0 = 12^\circ 30'$ при $\frac{M_x}{M_T} = 13,6$. Находим

на характеристике этого хода (рис. 10) период $T_{10} = 0,575$, соответствующий $\Phi_0 = 12^\circ 30'$, и определяем амплитуду $\Phi_1 = 8^\circ 12'$, при которой баланс будет иметь тот же период. При этой последней амплитуде $\frac{M_x}{M_T} = 9,50$. Минимальный

период определяется из условия $\frac{dT_0}{d\Phi} = 0$ и составляет $T_{0T} = 0,533$. Средний пе-

риод $T_0 = \frac{T_{10} + T_{0T}}{2} = 0,554$. Если T – период в предположении полного изохронизма, то колебания баланса следует отрегулировать так, чтобы

$$T = 2T_0 \sqrt{\frac{I_1}{M_T}},$$

причем регулировка периода должна осуществляться за счет изменения момента инерции баланса. При этом отношение $\frac{I_1}{I_2}$ будет оставаться практически постоянным.

При таком методе подбора амплитуды и периода ошибка часов из диапазона амплитуд от Φ_0 до Φ_1 будет иметь весьма малую величину. Внутри этого диапазона мы будем иметь мгновенную ошибку часов вследствие непрерывного изменения периода. Но эта ошибка, характеризуемая $\frac{dT_0}{d\Phi}$, будет значительно меньше, чем на других участках кривой.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Предлагаемая нами форма палетт хода имеет следующие достоинства:
 - а) обеспечивает симметричность колебания баланса относительно линии центров, что при прочих равных условиях позволяет получить большую амплитуду;
 - б) делает практически независимой импульсную кривую от угла обхвата, что позволяет удобно располагать ось вращения якоря;
 - в) снижает потери на трение;
 - г) дает дугообразную характеристику регулятора, что при определенных условиях значительно повышает точность работы часов. Если, например, форма палетт такова, что момент импульса постоянен, а $f(\varphi)$ и $f_1(\varphi)$ представляют горизонтальные прямые, то момент на оси ходового колеса будет сильно возрастать с амплитудой (рис. 12, кривая а), что указывает на большое трение. При этом характеристика регулятора представляет собой быстро падающую кривую (рис. 13, кривая а), дающую сильную неизохронность.
2. Режим работы баланса является неустойчивым, поэтому следует применять лишь возрастающую ветвь кривой зависимости $\frac{M_x}{M_T}$ от Φ (рис. 9).

3. Часы будут давать минимальную ошибку (ход), если разность начальной и конечной амплитуд $\Delta\Phi = \Phi_0 - \Phi_1$ будет симметрично расположена относительно той точки характеристики, в которой $\frac{dT_0}{d\Phi} = 0$.

4. Из сравнения кривых *a* и *b* рис. 10 явствует, что увеличение трения зуба о палетту не снижает точности работы регулятора. Увеличение трения вызывает лишь быстрый износ трущихся частей и требует более мощного двигателя.

5. Изменение величины отношения $\frac{I_x}{I}$ и приведенного момента инерции баланса в определенных границах не оказывает сколько-нибудь существенного влияния на характеристику и кривую зависимости $\frac{M_x}{M_T}$ от Φ (рис. 11). Это обосновывает сделанное нами допущение [формулы (2) и (8)].

6. При изменении угла импульса и числа зубцов ходового колеса период колебания и $\frac{M_x}{M_T}$ претерпевают некоторое изменение. Однако это не оказывает влияния на точность работы регулятора (рис. 9 и 10).

Полученные нами формулы (16) и (18) позволяют определить период T , момент M_x и мощность двигателя для любой амплитуды. Эти параметры зависят от момента трения в цапфах баланса M_T , который меняется при изменении положения часов (оси баланса).

Перепечатано из сборника „Приборостроение“ (1947. С. 22—37).

К 110-летию СПбГУ ИТМО

В. Н. Чуриловский

О НОВОЙ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОЙ МАРКЕ

1. ПРИНЦИП ДВОЙНОЙ МАРКИ

1. Зона неуверенности

Рассмотрим сначала действие обычной стереоскопической марки. На рис. 1 схематически представлено пространство изображений после окуляров какого угодно стереоскопического измерительного прибора.

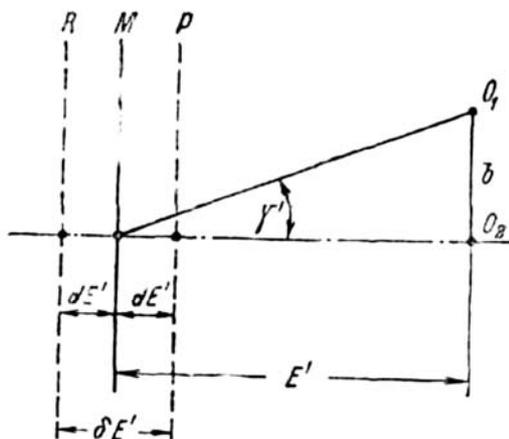


Рис. 1. Пространство изображений

В этом пространстве располагается стереоскопическая модель рассматриваемого через прибор предмета; эта модель рассматривается непосредственно глазами наблюдателя. Пусть центры зрачков его глаз помещаются в точках O_1 и O_2 , тогда отрезок $b = O_1O_2$ представляет собой глазную базу наблюдателя. Пусть в плоскости M расположено стереоскопическое изображение измерительной марки прибора; плоскость M удалена от глазной базы b на расстояние E' . Параллактический угол марки γ' , ввиду его малости, определяется формулой

$$\gamma' = \frac{b}{E'}. \quad (1)$$

Продифференцировав (1), получим

$$dE' = \frac{d\gamma' E'^2}{b}. \quad (2)$$

Здесь $d\gamma'$ — предельный угол стереоскопической разрешающей способности наблюдателя; dE' — погрешность измерений, отнесенная в пространство изображений.

Представим себе теперь две плоскости P и R , параллельные плоскости M и расположенные на расстоянии dE' по обе стороны от нее. Если какая-либо точка изображения рассматриваемого пространственного предмета удалена от плоскости M на расстояние, меньшее dE' , то наблюдатель не сможет обнаружить несовпадение этой точки с плоскостью M . Наблюдатель будет способен

констатировать несовпадение точки изображения с плоскостью M только в том случае, если эта точка удалена от плоскости M на расстояние, превышающее dE' , иными словами – если точка изображения лежит вне зоны пространства, заключенной между плоскостями P и R .

Выполняя совмещение некоторой точки изображения с плоскостью M , наблюдатель не может таким образом уверенно достичь строгого совпадения их; он может констатировать лишь тот факт, что точка изображения находится внутри указанной зоны. Поэтому мы можем назвать зону, заключенную между плоскостями P и R , „зоной неуверенности“ измерения стереоскопическим прибором. Из чертежа вытекает, что ширина $\delta E'$ этой зоны определяется выражением

$$\delta E' = 2dE' . \quad (3)$$

Из (2) видно, что зона неуверенности связана с углом $d\gamma'$. Если поэтому мы сможем каким-либо способом уменьшить зону неуверенности, то тем самым мы достигнем и соответственного уменьшения угла $d\gamma'$.

2. Уменьшение зоны неуверенности при помощи двойной марки

Предлагаемое нами устройство стереоскопической измерительной марки имеет целью сокращение зоны неуверенности. Для этого марка делается состоящей из двух частей, вследствие чего мы и называем ее двойной. Стереоскопическая пара марок, помещаемая в приборе, должна быть рассчитана таким образом, чтобы наблюдателю, смотрящему через окуляр прибора, обе части марки казались лежащими в двух различных плоскостях M_1 , и M_2 , как это показано на рис. 2.

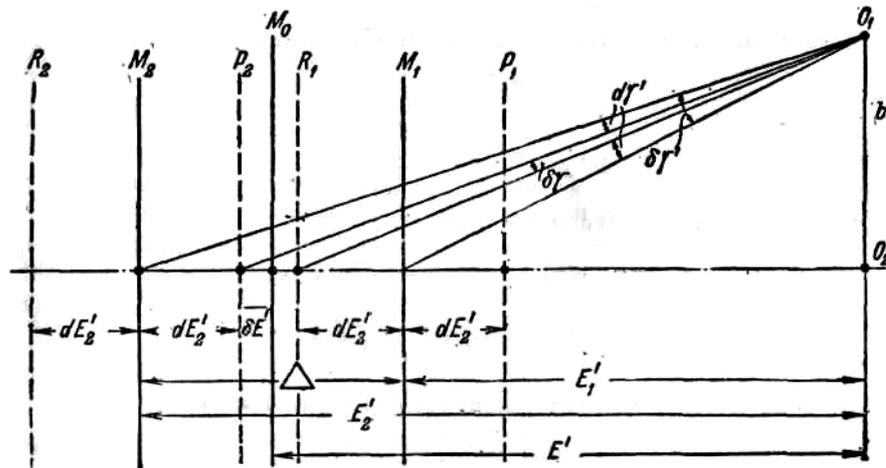


Рис. 2. Уменьшение зоны неуверенности

Пусть Δ – расстояние между плоскостями M_1 и M_2 . Наметим на чертеже положение плоскости M_0 , равноудаленной от обеих плоскостей M_1 и M_2 . Обозначим через E' удаление плоскости M_0 от глазной базы b наблюдателя. Согласно (2), получим для этой плоскости теоретическую погрешность измерения dE'

$$dE' = \frac{d\gamma' E'^2}{b} . \quad (4)$$

Каждая из двух частей M_1 и M_2 нашей двойной марки будет иметь теперь свою зону неуверенности; эти зоны ограничиваются: для марки M_1 – плоскостями P_1 и R_1 , а для марки M_2 – плоскостями P_2 и R_2 .

Ширина каждой из этих зон определяется удвоением теоретических погрешностей dE'_1 и dE'_2 марок M_1 и M_2 ; эти погрешности находятся по формулам

$$\left. \begin{aligned} dE'_1 &= \frac{d\gamma' E_1'^2}{b}, \\ dE'_2 &= \frac{d\gamma' E_2'^2}{b}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Здесь E'_1 и E'_2 – удаление плоскостей M_1 и M_2 от главной базы b . Из чертежа следует

$$\left. \begin{aligned} E'_1 &= E' - \frac{1}{2} \Delta, \\ E'_2 &= E' + \frac{1}{2} \Delta. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Вследствие (6) получим из (5), учитывая малость значения Δ :

$$\left. \begin{aligned} dE'_1 &= \frac{d\gamma' E'^2}{b} \left(1 - \frac{\Delta}{E'}\right), \\ dE'_2 &= \frac{d\gamma' E'^2}{b} \left(1 + \frac{\Delta}{E'}\right). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Но ввиду (4) мы найдем из (7):

$$\left. \begin{aligned} dE'_1 &= dE' \left(1 - \frac{\Delta}{E'}\right), \\ E'_2 &= E' \left(1 + \frac{\Delta}{E'}\right). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Поэтому для суммы этих величин мы получим выражение:

$$dE'_1 + dE'_2 = 2dE'. \quad (9)$$

Представим себе теперь, что некоторая точка изображения рассматриваемого предмета находится между плоскостями R_1 и P_1 , т.е. внутри первой зоны неуверенности. В таком случае наблюдатель не будет в состоянии „отделить“ эту точку от плоскости M_1 ; однако он совершенно уверенно обнаружит несовпадение данной точки с плоскостью M_2 второй половины нашей марки. Вращая дальномерный валик или измерительный маховичок прибора, наблюдатель заставит перемещаться точку изображения относительно плоскостей M_1 и M_2 (или, наоборот, плоскости M_1 и M_2 относительно точки изображения) до тех пор, пока эта точка не окажется между плоскостями R_1 и P_2 . Теперь наблюдатель сможет отчетливо обнаружить, что точка находится между плоскостями M_1 и M_2 . Но если точка изображения окажется переместившейся еще дальше, она попадет во вторую зону неуверенности между плоскостями P_2 и R_2 ; тогда наблюдатель не сможет „отделить“ эту точку от плоскости M_2 второй части нашей марки. При этом, однако, он отчетливо обнаружит несовпадение данной точки с плоскостью M_1 и сможет, действуя снова дальномерным валиком или маховичком прибора, перевести точку изображения в пространство, заключенное между плоскостями R_1 и P_2 .

Из приведенного здесь рассуждения вытекает, что при наличии двойной марки наблюдатель всегда имеет полную возможность „загнать“ взятую им точку изображения в промежуток между плоскостями R_1 и P_2 . Для этого он должен, пользуясь артиллерийским термином, взять эту точку „в вилку“ или, иначе говоря, – добиться отчетливого ощущения, что данная точка лежит между плоскостями P_2 и R_1 не совпадая ни с одной из них. Таким образом, мы убеждаемся, что промежуток между плоскостями P_2 и R_1 играет в случае двойной марки роль зоны неуверенности; внутри этой зоны наблюдатель уже не может „уточнить“ положение данной точки изображения.

Обозначим ширину нашей новой зоны неуверенности, т.е. расстояние между плоскостями R_1 и P_2 через $\overline{\delta E'}$. Из рис. 2 мы тогда легко находим:

$$\overline{\delta E'} = \Delta - dE'_1 - dE'_2. \quad (10)$$

Отсюда получим вследствие (9):

$$\overline{\delta E'} = \Delta - 2dE'. \quad (11)$$

Но (см. формулу (3)) ширина зоны неуверенности в два раза превосходит соответствующую ей погрешность измерения; обозначив последнюю при наличии двойной марки через \overline{dE} , найдем, применив (11):

$$\overline{dE} = \frac{1}{2} \overline{\delta E'} = \frac{1}{2\Delta} - dE'. \quad (12)$$

Далее, используя (2), мы можем написать

$$\overline{dE} = \frac{\overline{d\gamma E'^2}}{b}, \quad (13)$$

где $\overline{d\gamma}$ – новое значение предельного угла стереоскопического зрения, получаемое при применении предлагаемой нами двойной марки. Наконец, введя угловую параллактическую разность $\delta\gamma'$, соответствующую расстоянию Δ между обеими плоскостями M_1 и M_2 двойной марки, мы можем написать, пренебрегая членами высших порядков:

$$\Delta = \frac{\delta\gamma' E'^2}{b}. \quad (14)$$

Вследствие (2), (13) и (14) мы получим теперь из (12):

$$\overline{d\gamma} = \frac{1}{2} \delta\gamma' - d\gamma'. \quad (15)$$

Из формулы (11) развитой здесь весьма простой теории двойной стереоскопической марки следует, что мы имеем возможность полностью исключить зону неуверенности $\overline{\delta E}$, сделав ее равной нулю; для этого достаточно определить расстояние Δ между плоскостями M_1 и M_2 из выражения

$$\Delta = 2dE'. \quad (16)$$

Вследствие (9) и (16) мы находим из чертежа, что в этом случае плоскости R_1 и P_2 совпадают. Поэтому момент установки точки изображения „в вилку“ между обеими частями становится теперь совершенно определенным: установка эта может возникнуть лишь в том случае, если точка изображения строго лежит на совпадающих между собой плоскостях R_1 и P_2 . Стоит данной точке сколько-нибудь сдвинуться в ту или иную сторону, как впечатление „вилки“ должно сразу же нарушиться, так как одно из двух расстояний от этой точки до плоскостей M_1 и M_2 делается меньше теоретической погрешности измерений dE' , а второе расстояние станет больше dE' .

При соблюдении условия (16) следует из (12), что теоретическая погрешность измерений \overline{dE} обращается в нуль; при этом вследствие (13) обращается в нуль и угловая погрешность $\overline{\delta\gamma}$. Из (15) тогда находим

$$\delta\gamma' = 2d\gamma', \quad (17)$$

значит, угловая параллактическая разность между обеими частями двойной марки должна быть равна удвоенному предельному углу стереоскопического зрения наблюдателя.

Не следует понимать изложенное здесь таким образом, что при соблюдении условий (16) или (17) прибор будет действовать с абсолютной точностью.

И при отсутствии погрешности \overline{dE} имеется всегда достаточно причин, кроющихся в самом приборе, в условиях наблюдения и в физиологических особенностях человеческого органа зрения, которые ограничат практически точность прибора.

К этому нужно прибавить еще следующее соображение. Если вследствие каких-либо из указанных выше причин погрешность измерения прибора не может быть сделана меньше некоторой величины dE'_m , а угловая погрешность — меньше $\delta\gamma'_m$, то нет практической надобности стремиться к тому, чтобы \overline{dE} и $\overline{d\gamma}$ были равны нулю. Дело в том, что соблюдение условия (16) или (17), несомненно, вызовет некоторое затруднение наводки, требуя от наблюдателя крайнего напряжения его способности стереоскопического восприятия. Поэтому практически будет более целесообразно, задавшись установленным опытным путем значением $\delta\gamma'_m$ принять $\overline{d\gamma} = d$.

Из (15) тогда найдем

$$\delta\gamma' = 2 (d\gamma' + d\gamma'_m). \quad (18)$$

Так, например, полагая $d\gamma' = 10''$ и $d\gamma'_m = 2,5''$, мы получим $\delta\gamma' = 25''$, в то время как из (17) мы получили бы $\delta\gamma' = 20''$. Аналогично этому, полагая $\overline{dE} = dE'_m$, мы получим из (12):

$$\Delta = 2 (dE' + dE'_m). \quad (19)$$

Выражение (19) заменяет теперь условие (16).

Таким образом мы установили, что введение двойной марки теоретически может полностью устранить зону неуверенности и теоретическую погрешность измерения прибора. Основываясь на некоторых экспериментальных данных, указанных в литературе, а также на собственных предварительных опытах, мы полагаем, что угловую погрешность $\overline{d\gamma}$ можно будет нашим методом довести до $2,5-3''$ в тех случаях, когда точность измерения не ограничивается ни условиями наблюдений, ни технологическими дефектами изготовления прибора, а лишь несовершенством глаза наблюдателя.

3. Исключение фактора памяти

Помимо исключения зоны неуверенности предлагаемая нами двойная марка обладает еще одним любопытным и ценным свойством, к установлению которого мы теперь и переходим.

Чтобы иметь перед глазами конкретный пример, представим себе манипуляции, выполняемые дальномерщиком при совмещении обычной стереоскопической марки с целью. Пусть дальномерщик вращением дальномерного валика добился грубой предварительной установки. Внимательно приглядевшись к марке и цели, дальномерщик дальше находит, что совмещение цели с маркой еще не достигнуто; тогда он поворачивает немного дальномерный валик, стремясь улучшить совмещение цели с маркой. После поворота валика дальномерщик снова приглядывается к получившемуся теперь новому взаимному расположению цели и марки. Стало ли это новое расположение цели и марки более близким к совмещению, чем расположение, наблюдавшееся до поворота валика, и если стало, то насколько улучшилась картина совмещения? Чтобы ответить на эти вопросы, дальномерщик должен вызвать в своей памяти картину, наблюдавшуюся им до поворота валика, и сравнить ее с полученной после поворота. Повторив несколько раз этот процесс сравнения двух взаимных расположений марки и цели, дальномерщик постепенно улучшает их совмещение и добивается, наконец, такого их взаимного расположения, при котором их несовпадение уже не поддается обнаружению, иными словами, когда цель находится внутри зоны неуверенности.

Из данного здесь описания манипуляций, выполняемых дальномерщиком, становится понятной важная роль фактора памяти в работе дальномерщика. Ведь ему постоянно приходится сравнивать в уме две картины, из которых

одна находится перед его глазами, а вторую он должен вызвать в своей памяти. Наблюдая за работой опытного дальномерщика, можно заметить, что он иногда довольно быстро вращает дальномерный валик несколько раз вперед и назад; такой прием должен, очевидно, помочь памяти дальномерщика лучше удерживать обе сравниваемые картины.

Необходимость привлечения памяти при работе со стереоскопическими измерительными приборами является неблагоприятным обстоятельством, снижающим скорость работы и, несомненно, уменьшающим достигаемую при измерениях практическую точность, которая, как известно, всегда несколько отстает от теоретической. Новая двойная измерительная марка отличается тем свойством, что она избавляет стереоскописта от необходимости прибегать во время измерительных манипуляций к помощи памяти.

В самом деле, выполняя установку точки предмета „в вилку“ между обеими частями двойной марки, стереоскопист (или дальномерщик) должен сравнивать мысленно два расстояния: от предмета до первой части марки и от предмета до второй части марки. Оба эти расстояния одновременно находятся перед его глазами, а потому сравнение их не требует вмешательства памяти. Фактор памяти, следовательно, исключается совершенно при применении новой стереоскопической марки; вместе с ним устраняются и вызываемые им недостатки в работе. Поэтому двойная марка должна повысить уверенность и быстроту совмещения, устранить грубые ошибки измерения, встречающиеся иногда вследствие утомления и недостаточной внимательности стереоскописта; все это должно содействовать снижению практической погрешности измерений.

Мы видим, таким образом, что применение стереоскопической марки, во-первых, путем устранения или уменьшения зоны неуверенности уменьшает теоретическую погрешность измерений; во-вторых, исключая фактор памяти в работе стереоскописта, уменьшает практическую погрешность измерений и увеличивает надежность и быстроту измерения.

Следует отметить, что указанные преимущества достигаются при введении предлагаемой нами марки без всяких конструктивных измерений стереоскопического прибора.

На рис. 3 представлен вид двойной марки в поле зрения дальномера. Марка состоит из двух треугольников M_1 и M_2 . При правильной установке дальномера треугольник M_1 представляется более близким к наблюдателю, а треугольник M_2 — более далеким, чем цель T (башня).

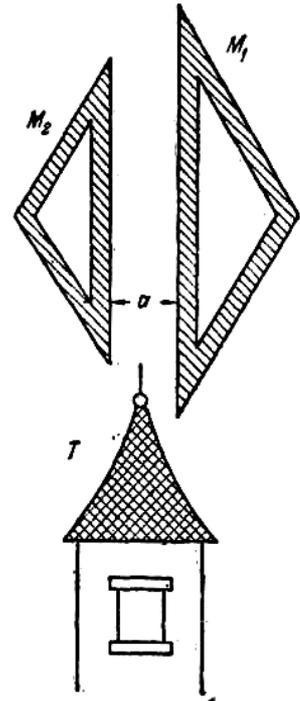


Рис. 3. Вид двойной марки в поле зрения дальномера

II. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

1. Постановка и результаты предварительных опытов

Изложенные выше теоретические соображения в пользу двойной стереоскопической измерительной марки в полной мере подтверждаются поставленными нами весьма простыми предварительными опытами, выполненными при помощи установки, показанной в трех проекциях на рис. 4.

На рис. 4, а установка показана в плане, на рис. 4, б дан ее боковой вид, на рис. 4, в представлен вид установки со стороны наблюдателя. Установка состоит из массивной станины 1 с направляющей прорезью 2, по которой скользит каретка 3. Длина станины около 500 мм. У переднего конца станины 1 закреплен вертикальный щит 4 с вырезом, скрывающий от наблюдателя механизм установки; у заднего конца станины укреплен второй щит 5, окрашенный в белый цвет и служащий фоном при наблюдениях. На каретке 3 закреплена в вертикальном положении спица 6; кроме того, по бокам прорези 2

и в станине 1 закреплены еще две такие же спицы — 7 и 8. Спицу 8 можно в некоторых пределах перемещать вдоль станины 1, так что продольное расстояние Δ между задней спицей 7 и передней 8 можно устанавливать по усмотрению лица, руководящего опытом.

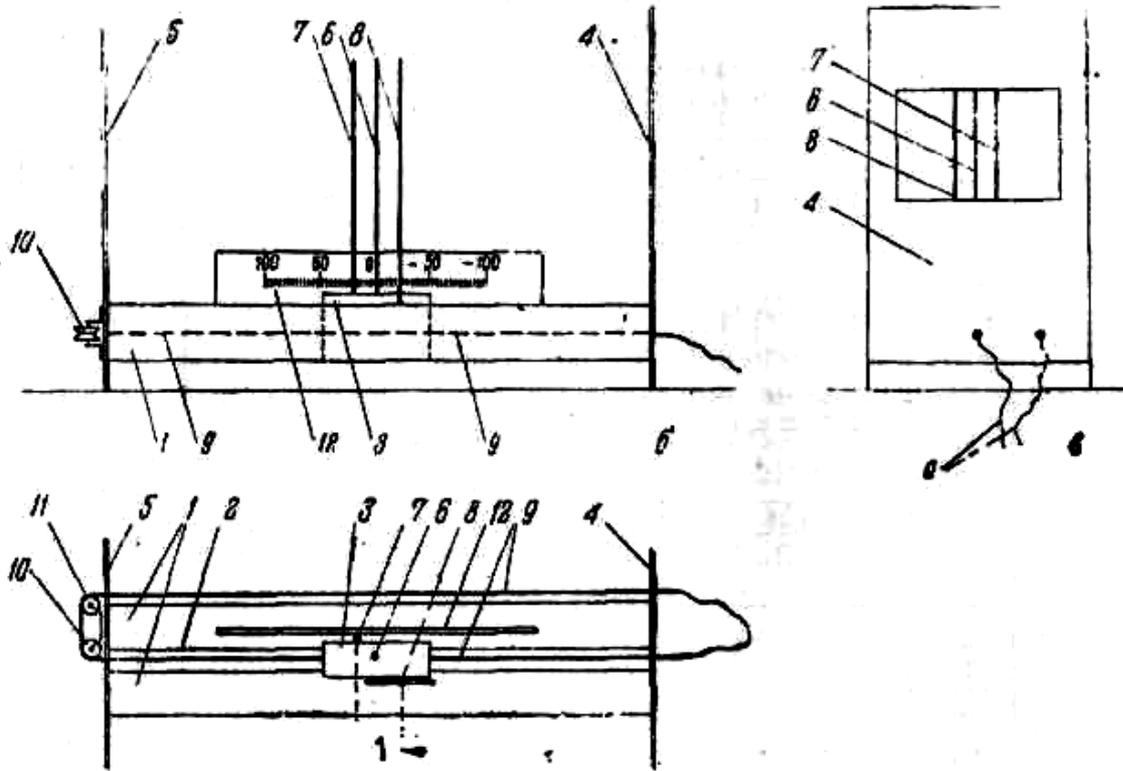


Рис. 4. Двойная стереоскопическая измерительная марка

Наблюдатель, помещающийся на расстоянии 5,06 м от прибора, видит все три спицы одновременно через отверстие в щите 4; при помощи шнура 9 соответствующей длины, перекинутого через блоки 10 и 11 и концами прикрепленного к каретке 3, наблюдатель может перемещать эту каретку вдоль станины, а вместе с кареткой — и спицу 6. Задача наблюдателя заключается в том, чтобы, пользуясь своей способностью пространственного восприятия трех спиц, установить спицу 6 по дальности посередине между спицами 7 и 8. Последние играют, таким образом, роль двойной марки, а спица 6 — роль предмета или цели.

Руководитель опыта помещается сбоку от установки. По шкале 12 он может отсчитывать положение подвижной спицы 6. Нуль шкалы 12 устанавливается посередине отрезка Δ ; таким образом, по шкале 12 против спицы 6 отсчитывается непосредственно погрешность совмещения 8. При этом, если спица 6 отошла от нуля в сторону щита 5, погрешность 3 считается положительной, в противном случае — отрицательной.

Параллельно с опытами, демонстрирующими действие двойной марки, для сравнения мы проводили опыты с обычной ординарной маркой. Для этого спица 8 была удалена из установки, а нуль шкалы 12 поставлен против спицы 7. При этом наблюдатель должен „совместить“ подвижную спицу 6 с неподвижной 7, т.е. добиться такого их расположения, чтобы они казались ему равно удаленными.

Теоретическая погрешность совмещения dE может быть вычислена по формуле, аналогичной соотношению (2):

$$dE = \frac{d\gamma'E^2}{b}. \quad (20)$$

Принимая здесь $d\gamma' = 10''$, $E = 5,06$ м, $b = 64$ мм, мы находим: $dE = 20$ мм. Учитывая благоприятные условия наблюдения, мы должны ожидать, что в нашей установке при ординарной марке такого же порядка должна быть и практическая погрешность.

В табл. 1 дана сводка результатов выполненных нами предварительных опытов. Опыты производились с шестью наблюдателями, обладающими зрением, близким к эметропическому, и обозначенными в таблице буквами А, В, С, D, E, А'. Из них первые пять наблюдателей никогда не работали на стереоскопических приборах и не проходили никакой предварительной тренировки. Наблюдатель А' – то же лицо, что и А, но после выполнения небольшой предварительной тренировки на этой же установке.

Таблица 1

| № наблюдения | МАРКА | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|-------------|------|-------|------|------|------|--------|-------------|------|------|------|------|------|-------|
| | Ординарная | | | | | | | Двойная | | | | | | |
| | Наблюдатель | | | | | | Итого | Наблюдатель | | | | | | Итого |
| | А | В | С | D | E | А' | | А | В | С | D | E | А' | |
| 1 | +8 | +15 | -12 | -13 | +13 | +16 | - | -2 | +4 | -7 | -6 | +2 | -2 | - |
| 2 | -13 | -8 | -20 | -21 | -3 | 0 | - | -2 | +7 | +1 | +7 | -5 | +3 | - |
| 3 | -19 | -17 | +12 | +7 | -16 | +16 | - | +3 | -1 | +11 | 0 | 0 | -2 | - |
| 4 | +9 | -15 | -41 | +8 | 0 | +6 | - | -6 | +2 | 0 | +3 | 0 | +1 | - |
| 5 | -16 | -12 | -11 | -16 | -18 | +1 | - | -7 | -3 | -4 | -4 | +4 | +1 | - |
| 6 | +7 | -18 | +10 | +20 | +8 | -7 | - | +4 | -7 | -3 | +5 | -3 | 0 | - |
| 7 | -18 | +13 | -32 | +13 | +19 | -5 | - | -3 | +3 | +5 | 0 | -1 | 0 | - |
| 8 | -15 | 0 | -8 | +4 | -9 | +8 | - | 0 | -2 | -2 | -2 | +3 | -2 | - |
| 9 | +17 | -15 | +3 | +18 | +22 | -6 | - | +3 | +5 | -5 | -7 | +8 | -6 | - |
| 10 | -12 | +6 | -22 | +22 | +17 | +12 | - | +5 | -4 | +3 | -2 | -2 | +3 | - |
| δ_a | -5,2 | -2,7 | -12,1 | +4,2 | +3,3 | +4,1 | -1,4 | -0,5 | +0,5 | -0,1 | -0,6 | +0,5 | -0,4 | -0,10 |
| $\Sigma\delta^2$ | 1962 | 1701 | 4171 | 2372 | 1817 | 867 | 12 890 | 161 | 182 | 261 | 192 | 132 | 68 | 996 |
| δ_k | 14,0 | 13,0 | 20,4 | 15,4 | 13,5 | 9,3 | 14,67 | 4,0 | 4,3 | 5,1 | 4,4 | 3,6 | 2,6 | 4,07 |
| r | 9,5 | 8,8 | 13,7 | 10,4 | 9,1 | 6,3 | 9,89 | 2,7 | 2,9 | 3,4 | 3,0 | 2,4 | 1,8 | 2,74 |
| $d\gamma_r$ | 4,7" | 4,4" | 6,9" | 5,2" | 4,5" | 3,2" | 4,95" | 1,4" | 1,5" | 1,7" | 1,5" | 1,2" | 0,9" | 1,37" |
| η | 3,5 | 3,0 | 4,0 | 3,5 | 3,7 | 3,6 | 3,61 | - | - | - | - | - | - | - |

Каждый наблюдатель выполнил две серии наблюдений, по десяти в каждой серии. Первая серия выполнялась с ординарной маркой, вторая – с двойной маркой, причем расстояние Δ было взято равным 40 мм, что соответствует удвоенной теоретической ошибке dE .

В верхней половине табл. 1 приведены погрешности δ в миллиметрах, полученные при каждом наблюдении. В нижней половине таблицы выведены средние величины по каждой серии наблюдений; кроме того, в графах с обозначением „итого" приводятся средние результаты по всем шести наблюдателям, отдельно для ординарной марки и для двойной. В первой строке нижней половины таблицы приводится средняя арифметическая δ_a из десяти наблюдений

данной серии: $\delta_a = \frac{1}{m} \sum \delta_1$, где m – число наблюдений.

В следующей строке приводится сумма квадратов погрешностей $\sum \delta^2$. В третьей строке мы даем среднюю квадратическую погрешность $\delta_k = \sqrt{\frac{1}{m} \sum \delta^2}$.

В четвертой строке нижней половины таблицы приводится вероятная ошибка $r = 0,674\delta_k$. Все эти величины даны в миллиметрах. В пятой строке даны выражения $d\gamma_r$ вероятной ошибки r в секундах параллактического угла $d\gamma'$. Для нахождения $d\gamma_r$ имеем, применив (20):

$$d\gamma_r = \frac{br}{E^2}; \quad (21)$$

отсюда при $b = 64$ мм и $E = 5,06$ м имеем для $d\gamma_r$ (в секундах): $d\gamma_r = 0,5r$.

Наконец, в последней строке выведены отношения η вероятных ошибок при ординарной и при двойной марке для каждого из шести наблюдателей и среднее по всем наблюдателям.

Результаты опытов, приведенные в табл. 1, убедительно свидетельствуют об эффективности применения двойной марки. Как видно из последней строки таблицы, двойная марка увеличивает точность в среднем в 3,6 раза. Вероятная погрешность r при ординарной марке составляет $5''$; для тренированного наблюдателя она падает даже до $3,2''$. При двойной марке вероятная ошибка r составляет в среднем $1,37''$, а для тренированного наблюдателя – всего лишь $0,9''$. Любопытно сравнить с этим встречающееся в литературе (Проф. С. В. Кравков. Глаз и его работа) указание, что, по данным американских исследователей, наивысшая точность стереоскопического зрения, получающаяся при благоприятных условиях, выражается углом $d\gamma$ в $2,5-3''$.

Сравнив результаты в графах А и А', мы видим, что тренировка наблюдателя не только не снижает эффективность двойной марки, но даже несколько способствует ее повышению. Интересно также отметить результаты, полученные с наблюдателем С, обладающим, по сравнению с другими нашими наблюдателями, пониженной способностью пространственного восприятия.

Для этого наблюдателя применение двойной марки оказалось особенно эффективным. Видно, что предлагаемая двойная марка обладает ценным свойством: она уменьшает влияние дефектов пространственного зрения наблюдателя.

Мы выполнили еще ряд опытов с целью выяснения наиболее благоприятного расстояния Δ между обеими половинами двойной марки. Для этого мы провели пять серий наблюдений с тренированным наблюдателем, меняя от серии к серии расстояние Δ через 5 мм в пределах от 30 до 50 мм. Результаты этих наблюдений приведены в табл. 2. Полученная таким образом зависимость угловой вероятной погрешности $d\gamma_r$ от расстояния Δ показана графически на рис. 5. На этом графике обозначены точки, полученные опытным путем, согласно табл. 2.

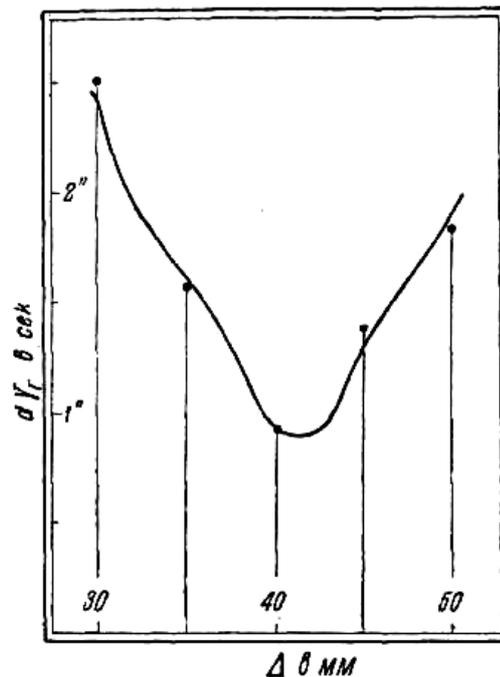


Рис. 5. Зависимость угловой вероятной погрешности

Таблица 2

| № наблюдения | Δ , мм | | | | |
|-------------------|---------------|-------|-------|-------|-------|
| | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
| 1 | -4 | +5 | +2 | -2 | -5 |
| 2 | +13 | +6 | 0 | +3 | -3 |
| 3 | -5 | -2 | -3 | 0 | +10 |
| 4 | +15 | -5 | 0 | +2 | -7 |
| 5 | +1 | -7 | -5 | -3 | +3 |
| 6 | -3 | +6 | 0 | +5 | -10 |
| 7 | +2 | -6 | +1 | -4 | -8 |
| 8 | -10 | 0 | +1 | -6 | -5 |
| 9 | 0 | +2 | -3 | +3 | +2 |
| 10 | +2 | -2 | +5 | +1 | +4 |
| δ_a | +1,1 | -0,3 | -0,2 | -0,6 | -1,9 |
| $\Sigma \delta^2$ | 553 | 219 | 74 | 168 | 299 |
| δ_k | 7,44 | 468 | 2,72 | 4,10 | 5,46 |
| r | 5,01 | 3,15 | 1,83 | 2,76 | 3,68 |
| $d\gamma_r$ | 2,51" | 1,58" | 0,92" | 1,38" | 1,84" |

Приведенная на рис. 5 кривая построена при соблюдении двух условий: во-первых, она имеет вертикальную ось симметрии и, во-вторых, при плавном контуре наилучшим образом примыкает к точкам, полученным в результате опытов.

Мы видим, что кривая имеет отчетливо выраженный минимум. Расстояние Δ , при котором достигается минимальная погрешность, немного превосходит значение удвоенной теоретической погрешности $dE = 20$ мм. Этот результат хорошо согласуется с нашими теоретическими соображениями, изложенными в настоящем исследовании.

Выполненные нами предварительные исследования с большой убедительностью свидетельствуют в пользу предлагаемой двойной марки, позволяющей повысить точность прибора в 3,5–4 раза; результаты опытов вполне подтверждают наши теоретические положения.

2. Технологические проблемы введения двойной марки

Существенное повышение точности измерения стереоскопическим методом путем применения двойной марки обосновано нами теоретически и подтверждено предварительными опытами. Но нужно иметь в виду, что при практическом введении новой марки встретятся еще некоторые технологические трудности.

Основное затруднение при осуществлении двойной марки вытекает из малости линейного параллакса dp этой марки. Практический расчет дает для dp значение порядка 2,5 мкм при угловой параллактической разности $\delta\gamma' = 25''$. Правда, нужно здесь заметить, что мы можем ожидать, что практические опыты покажут целесообразность некоторого увеличения $\delta\gamma'$, а следовательно, и dp .

Дело в том, что в наших предварительных опытах при ординарной марке вероятная угловая погрешность $d\gamma_r$ оказалась в два раза меньше теоретической ошибки $\delta\gamma' = 10''$. В реальных условиях применения стереоскопических приборов, в особенности дальномеров, следует ожидать увеличения вероятной угловой погрешности вследствие ухудшенных условий наблюдения; в связи с этим можно полагать, что и оптимальное расстояние Δ несколько возрастет, а с ним увеличатся соответственно и интересующие нас величины $d\gamma_r$ и dp .

Предоставляя уточнение этого вопроса будущим экспериментальным исследованиям, мы все же должны констатировать малость линейного параллакса dp . Выясним еще вопрос, с какой точностью должен быть выдержан параллакс dp . Рассмотрев кривую на рис. 5, можно убедиться, что во избежание резкого повышения вероятной ошибки $d\gamma_r$, отрезок Δ не должен отступать от его оптимального значения более чем на ± 5 мм; при этом $d\gamma_r$ еще не будет превосходить 1,5". Но допуску на Δ в 5 мм соответствует допуск на $d\gamma_r$ в 2,5".

Отсюда находим и интересующий нас допуск на линейный параллакс Δp ; этот допуск составляет 0,25 мкм.

Изготовление стереоскопической пары марок с указанной точностью представляет собой довольно сложную задачу. Применяя для этого фотографический метод, мы должны изготовить исходный чертеж марок в очень крупном масштабе, для того чтобы обеспечить требуемую точность; обычно применяемый масштаб 100:1 здесь недостаточен. Используя при черчении точную масштабную линейку с делениями 0,2 мм и лупу, можно гарантировать погрешность черчения в 0,1 мм. Поэтому для достижения допуска на Δp в 0,25 мкм необходим масштаб чертежа не меньше 400:1.

Кроме того, и к точной фотокамере, применяемой при фотографировании чертежа марки, предъявляются здесь повышенные требования. Наводка на резкость и измерение величины изображения должны производиться при помощи микроскопа с окулярным микрометром. Если при этом микрометр дает погрешность в 0,01 мм, а объектив микроскопа имеет 10-кратное собственное увеличение, то погрешность измерения будет равна 1 мкм. Такую точность можно признать приемлемой, так как при установке камеры можно производить проверку масштаба, измеряя один из самых больших размеров марки.

Понятно, что от фотохимического процесса фиксации полученного изображения марки будет в значительной мере зависеть точность ее изготовления. Требование, предъявляемое здесь к мелкозернистости фотографической эмульсии, подходит к пределу технических возможностей.

Введение двойной марки, что в 3,5–4 раза увеличивает точность прибора, вызывает также повышенные требования к технологическому процессу изготовления и юстировки прибора. Это замечание имеет особенно важное значение для дальномеров. В последних повышение точности изготовления и юстировки может оказаться сопряженным с очень серьезными трудностями, а во многих случаях — и совсем невыполнимым. Понятно, что в этих случаях применение двойной марки будет малоэффективным. Однако и здесь введение новой марки, несомненно, явится мощным стимулом к преодолению всех технических трудностей, так как достигаемое при помощи нашей марки повышение точности является для дальномеров действительно необходимым, если учесть непрерывный и быстрый рост дальнобойности и кучности стрельбы современных огневых средств.

Перепечатано из сборника „Приборостроение“ (1947. С. 8—21).

В. А. ЗВЕРЕВ

БОЛЬШОЙ ТЕЛЕСКОП АЗИМУТАЛЬНЫЙ

Представлена история создания Большого Телескопа Азимутального. Описаны основные особенности его конструкции.

Ключевые слова: телескоп, альт-азимутальная монтировка, оптическая схема, звездный спектрограф.

25 марта 1960 г. Совет Министров СССР принял постановление о разработке телескопа-рефлектора с главным зеркалом диаметром 6 метров (головное предприятие-разработчик — ЛОМО, главный конструктор — Б. К. Иоаннисиани). В ноябре 1960 г. на заседании Астросовета АН СССР и Межведомственного Совета по БТА (Большой Телескоп Азимутальный) утвержден аванпроект шестиметрового телескопа на альт-азимутальной монтировке [1—25].

Типичная для телескопов структурная схема приведена на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема телескопа

Оптическая схема телескопа. При построении оптической системы телескопов широко применяется двухзеркальная схема Кассегрена и ее модификации, представленные на рис. 2.

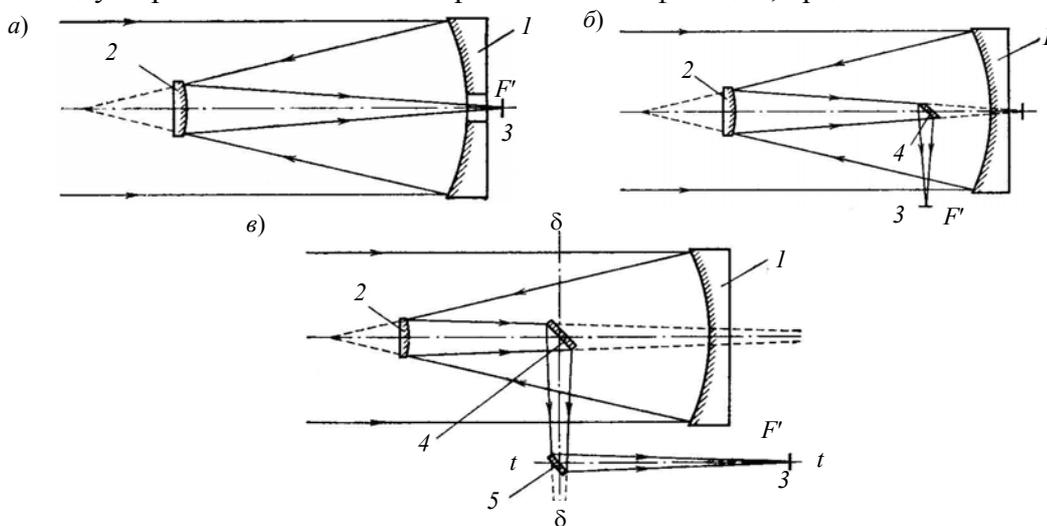


Рис. 2. Варианты схем применяемых двухзеркальных оптических систем при построении телескопов: а) схема Кассегрена; б) схема Несмита; в) схема кудэ (фр. *coude* — ломаный, коленчатый)

На рис. 2: 1 — главное зеркало, 2 — вторичное зеркало, 3 — фокальная плоскость и светоприемник, 4 и 5 — плоские диагональные зеркала, $\delta\delta$ — ось склонений, tt — полярная ось телескопа.

Принципиальная схема оптики шестиметрового БТА представлена на рис. 3.

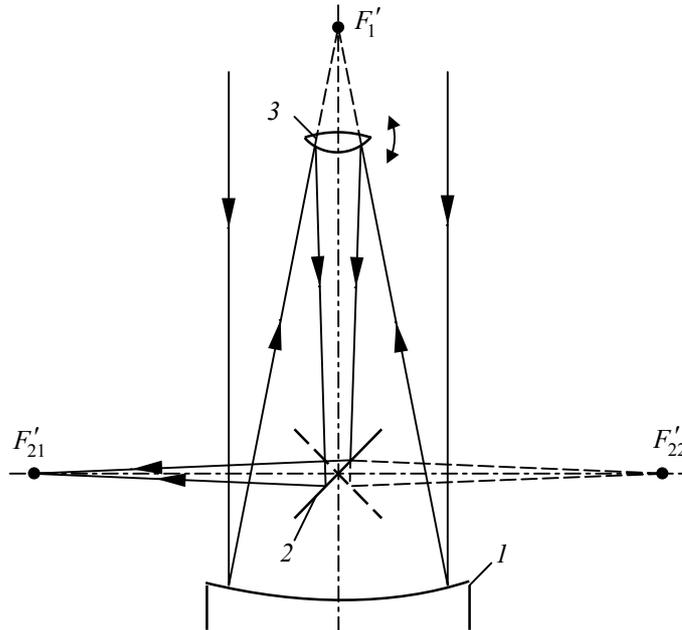


Рис. 3. Принципиальная схема оптики БТА:

1 — главное зеркало; 2 — плоское зеркало (переключается в два положения);
3 — гиперболическое зеркало (выключается при работе в первичном фокусе)

Основная деталь оптической системы телескопа — главное зеркало, его параметры следующие:

| | |
|---|---------|
| световой диаметр, мм | 6 000 |
| наружный диаметр, мм | 6 050 |
| толщина зеркала по оси | 655 |
| масса зеркала (вычисленная по фактическим размерам), кг | 41 700. |

Отражающая поверхность главного зеркала имеет форму параболоида вращения.

На рис. 4 представлены основные оптические системы, используемые при работе телескопа.

1. Система первичного фокуса.

Этой системе свойственны наименьшие потери света. Полезное рабочее поле $2w \leq 2'$.

2. Система первичного фокуса с корректором полевых аберраций.

Полезное рабочее поле $2w \approx 10'$. Конструктивно корректор состоит из двухлинзового компенсатора аберраций и линзы Смита. Двухлинзовый компенсатор диаметром ≈ 700 мм установлен на расстоянии 0,1 фокусного расстояния параболоида от плоскости изображения. Все линзы изготовлены из оптического стекла марки К8.

3. Система вторичного (неподвижного) фокуса.

Система обслуживает спектральную и другую аппаратуру, установленную на балконах телескопа. Переход от системы первичного фокуса к системе вторичного осуществляется введением выпуклого зеркала 4 (см. рис. 4), отражающая поверхность которого имеет форму гиперболоида вращения.

4. Система вторичного (неподвижного) фокуса с линзовой системой, уменьшающей фокусное расстояние.

5. Система вторичного (неподвижного) фокуса с линзовой системой, увеличивающей фокусное расстояние.

6. Оптическая система вторичного фокуса для работы с интерференционно-поляризационным фильтром (ИПФ).

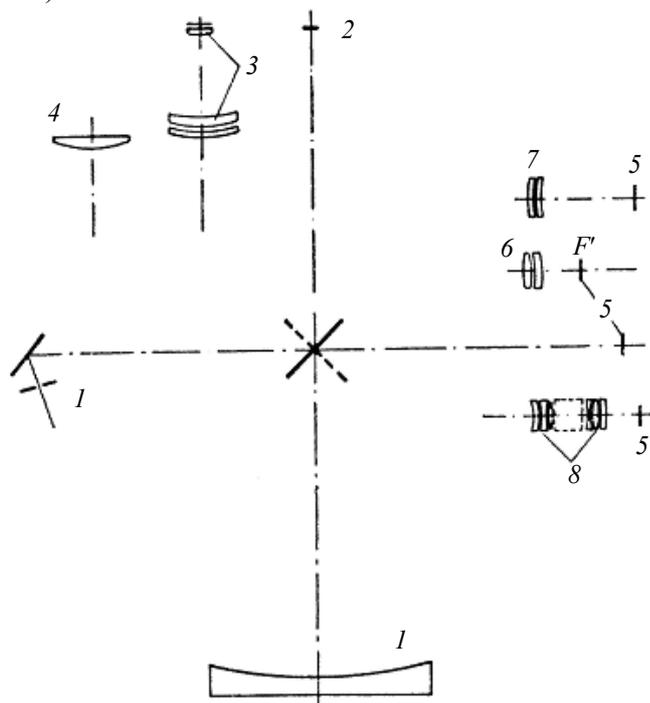


Рис. 4. Оптическая схема БТА:

- 1 — главное зеркало, 2 — фокус главного зеркала,
- 3 — двухлинзовый корректор aberrаций в системе первичного фокуса,
- 4 — вторичное гиперболическое зеркало системы вторичного фокуса,
- 5 — фокальные плоскости систем вторичного фокуса,
- 6 — линзовая укорачивающая система, 7 — линзовая удлиняющая система,
- 8 — оптическая система с интерференционно-поляризационными фильтрами

На балконе телескопа устанавливается оптическая система с ИПФ. Эта система рассчитана для работы с излучением в спектральном диапазоне $\lambda = 0,3—0,66$ мкм. Оптическая система вторичного фокуса в сочетании с частью системы, питающей ИПФ, образует телескопическую систему, формирующую изображение с угловым увеличением, равным 120^{\times} .

Выходные параметры основных оптических систем, используемых при работе телескопа, приведены в таблице.

Оптические системы, используемые в БТА

| Наименование системы | Фокусное расстояние, f , мм | Относительное отверстие | Поле | | Масштаб изображения, мм/угл.с. |
|----------------------|-------------------------------|-------------------------|--------------------|----------------------|--------------------------------|
| | | | угловое, 2ω | линейное, $2l'$, мм | |
| 1 | 24 000 | 1 : 4 | $2'$ | 14 | 0,116 |
| 2 | 24 680 | 1 : 4,11 | $9'45''$ | 70 | 0,120 |
| 3 | 97 700 | 1 : 14,62 | $3'55''$ | 100 | 0,425 |
| 4 | 184 400 | 1 : 30,74 | $1'52''$ | 100 | 0,894 |
| 5 | 349 400 | 1 : 58,2 | $1'$ | 101,6 | 1,694 |
| 6 | 188 400 | 1 : 31,4 | — | | 0,919 |

Конструкция БТА. Телескоп состоит из двух основных механических узлов: монтировки и трубы. Монтировка, в свою очередь, состоит из опорно-поворотной части и стоек с подшипниками горизонтальной оси. Впервые примененные для двух осей специальные гидростатические подшипники, а также уникальные (диаметром 5,6 м) высокоточные червячные пары обеспечивают перемещение подвижной части телескопа массой 650 тонн с точностью до десятых долей угловой секунды.

Монтировкой называется основание с системой осей, несущих трубу телескопа; различные типы монтировок представлены на рис. 5.

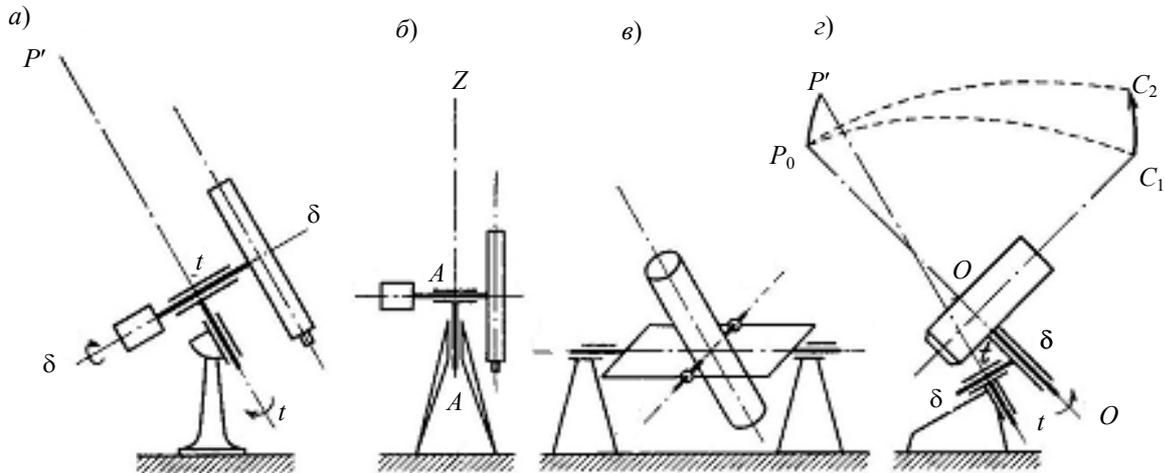


Рис. 5. Основные принципиальные типы монтировок:

а) экваториальная немецкого типа (P — видимый полюс мира); б) альт-азимутальная (Z — зенит);
в) горизонтальная (альт-альт); г) трехосная (P_0 — полюс орбиты искусственного спутника Земли,

C_1C_2 — его видимая траектория, OO — орбитальная ось)

Конструктивно монтировки делятся на два основных типа — симметричные и несимметричные.

На рис. 6 приведена схема несимметричной монтировки кудэ разработанного Б. К. Иоаннисиани рефлектора РМ-700.

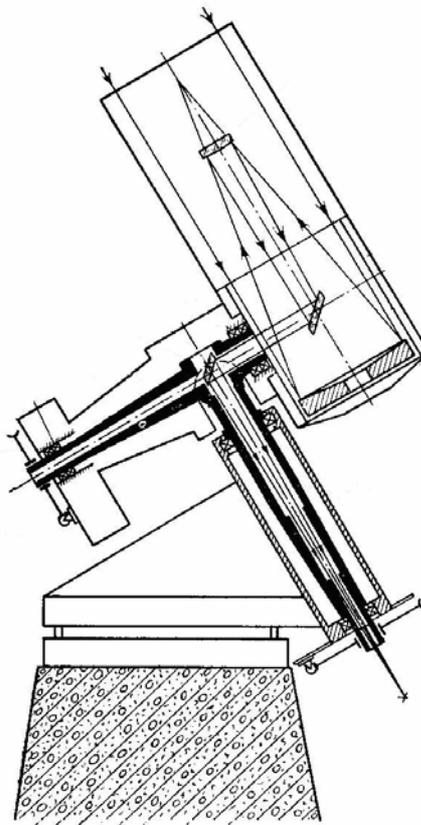


Рис. 6. Схема монтировки Б. К. Иоаннисиани, примененной в рефлекторе РМ-700 с фокусом кудэ

На рис. 7 представлена конструкция БТА.

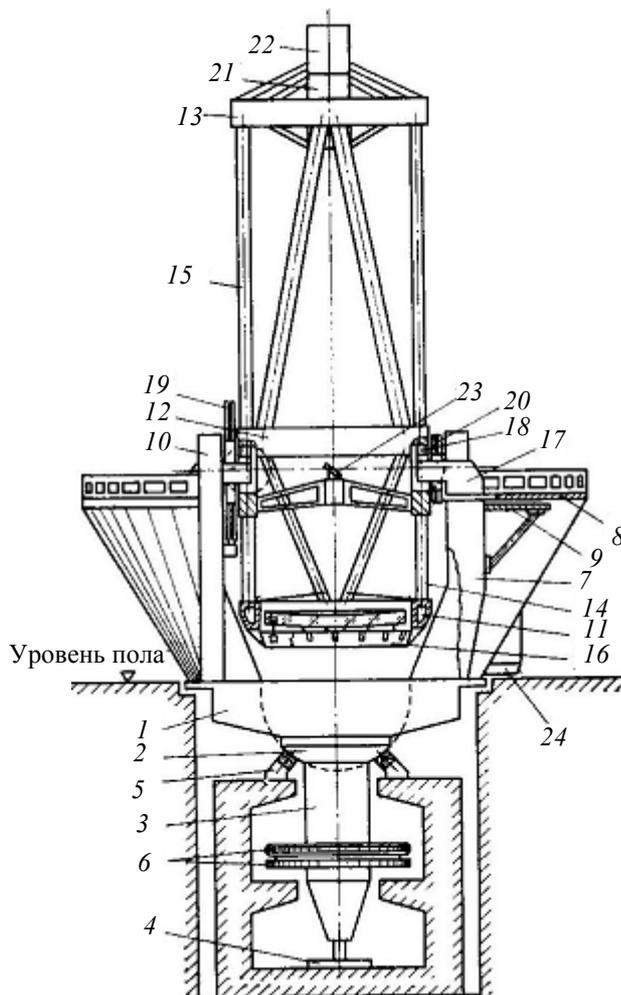


Рис. 7. Схема конструкции шестиметрового телескопа БТА на альт-азимутальной монтировке:

- 1 — платформа, 2 — сферическое кольцо, 3 — ось, 4 — радиальный подшипник,
- 5 — опора жидкостного трения, 6 — блок колес, 7 — стойка, 8 — рабочие балконы,
- 9 — кронштейн балкона, 10 — лифт, 11 — нижнее кольцо, 12 — „средник“,
- 13 — верхнее кольцо, 14 — нижняя штанга, 15 — верхняя штанга,
- 16 — оправа главного зеркала с разгрузочным устройством, 17 — консольные балки,
- 18 — гидростатические подушки, 19 — червячная шестерня, 20 — кабельный барабан,
- 21 — стакан первичного фокуса, 22 — кабина наблюдателя,
- 23 — зеркало неподвижного фокуса, 24 — основной звездный спектрограф

Платформа телескопа 1 (горизонтальный вращающийся круг диаметром 12 м) образует центральную часть пола купольного этажа башни. Сферическое кольцо 2 — верхний радиально-упорный самоустанавливающийся подшипник, представляющий собой стальную отливку диаметром 4600 мм со сферической поверхностью радиусом 3300 мм. Вертикальная полая ось 3 — ось длиной 9 м с нижним радиальным подшипниковым узлом 4, определяющим и фиксирующим положение оси в пространстве; погрешность положения вертикальной оси при нагрузке 600 т и при повороте ее на 360° не превышает 2". Подшипниковые узлы главных осей телескопа должны обеспечивать возможность легкого и плавного вращения его подвижных частей, масса которых часто достигает сотен тонн, с малой скоростью — от 0,2 до 0,000 01 об/мин, и точностью до долей секунды дуги. Опыт зарубежного и отечественного астроприборостроения показал, что лучше всего этим требованиям соответствуют гидростатические подшипники, имеющие весьма малый, порядка 10^{-5} — 10^{-6} , коэффициент трения. В телескопе БТА из шести опор 5 гидростатических подшипников три, определяющие

положение вертикальной оси — жесткие и три, разгружающие жесткие опоры — упругие. Жесткие опоры (рис. 8) расположены по окружности через 120° , упругие — между ними.

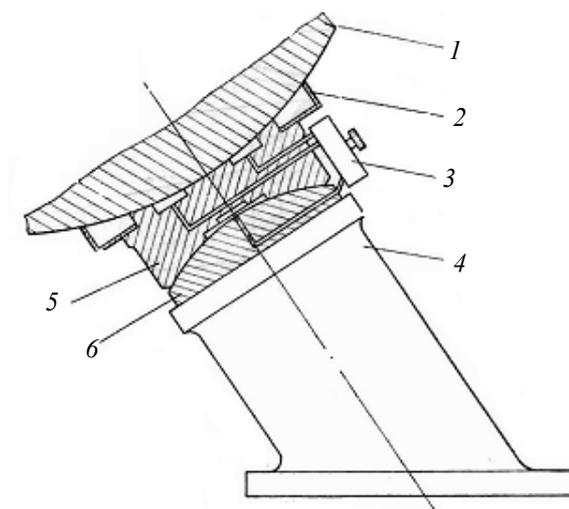


Рис. 8. Жесткая опора БТА:

- 1 — опорное сферическое кольцо, 2 — поддон,
3 — распределительная коробка, 4 — основание,
5 — подушка, 6 — неподвижный вкладыш

Подушка представляет собой квадратную стальную плиту размером 750×750 мм. Для возможности самоустановки соприкасающиеся поверхности неподвижного вкладыша и подушки изготовлены по сфере радиусом 600 мм. Устройство упругой опоры подобно устройству жесткой за исключением основания, которое выполнено в виде рычажно-пружинной подвески.

Гидростатические подшипники горизонтальной оси (по одному на каждой стороне оси) воспринимают массу трубы 240 тонн.

Опыт эксплуатации показал, что гидростатические подшипники БТА безотказны в работе и обеспечивают малый, порядка $(1-5) \cdot 10^{-6}$, коэффициент трения при любой предусмотренной рабочей скорости перемещения и существующих сезонных колебаниях температуры (в зависимости от времени года — от $+15$ до -10 °С).

Между верхним и нижним подшипниками на вертикальной оси установлен блок колес 6 привода вращения. Блок состоит из прецизионного червячного и цилиндрического косозубого колес, которые жестко связаны с осью. Червячное колесо предназначено для точного слежения телескопа за объектом, а цилиндрическое — для наведения на объект. Таким образом, без обычно применяемых переключающих устройств разделяются ветви слежения и наведения, а высокоточная червячная пара надежно предохраняется от перегрузок, возникающих при быстром вращении телескопа в режиме наведения.

На платформе опорно-поворотной части установлены две идентичные стойки 7 восьмиметровой высоты, несущие на верхних частях элементы горизонтальной оси телескопа. К одной из стоек с внешней стороны крепятся узлы основного звездного спектрографа. На верхних плоскостях стоек установлены (раздельно) рабочие балконы 8 для работы операторов и жесткие несущие кронштейны 9 для установки наблюдательных приборов. На одном из балконов стационарно установлена головная часть основного звездного спектрографа, а на другом предусмотрена возможность установки трех спектральных приборов: планетного и эшелюного спектрографов и спектрометра с интерферометром Фабри—Перо. Опорный узел универсален и предусматривает также возможность установки впоследствии любого нового спектрального прибора или какого-либо другого светоприемника.

В трубе БТА использована стержневая конструкция каркаса, выполненная по схеме равных прогибов, обеспечивающей высокую стабильность центрировки деталей оптической системы телескопа при относительно малой жесткости его несущих элементов. Конструкция каркаса включает нижнее кольцо 11, „средник“ 12, верхнее кольцо 13, нижние 14 и верхние 15 соединительные трубчатые штанги (стержни). Кроме того, в трубе телескопа различают следующие основные части: оправу главного зеркала с механизмами разгрузки 16, стакан первичного фокуса 21 с кабиной наблюдателя 22, плоское диагональное зеркало системы вторичного фокуса 23.

Штанги — это бесшовные трубы диаметром 420 мм, механически обработанные снаружи и внутри; длина нижних штанг равна 6750 мм при толщине стенок 15 мм, верхних — 13 500 мм при толщине стенок 26 мм. Внутри верхних штанг перемещаются балансирующие грузы.

К внешнему торцу нижнего кольца крепится оправа 16 главного зеркала с разгрузочным устройством. Во внутренних полостях кольца расположены редукторы крышек, закрывающих главное зеркало.

Внутри верхнего кольца расположены редукторы перемещения грузов, автоматически балансирующие трубу, и устройства для вентиляции кабины наблюдателя.

„Средник“ состоит из четырех (двух боковых и двух поперечных) плит. На внутренних концах консольных балок 17 на поперечине установлены попарно под углом 60° гидростатические подушки (опоры) 18 горизонтальной оси, аналогичные подушкам (опорам) вертикальной оси, по которым скользят сферические поверхности отверстий „средника“.

Стакан первичного фокуса 21 состоит из неподвижного внешнего цилиндра диаметром 1800 мм и подвижного внутреннего цилиндра, перемещающегося вдоль своей оси. Внешний цилиндр с помощью четырех растяжек подвешен к верхнему кольцу трубы. Внутри подвижного цилиндра на откидывающихся кронштейнах установлены зеркало диаметром 760 мм с отражающей поверхностью в форме гиперболоида вращения оптической системы неподвижного фокуса и компоненты корректора аберраций системы первичного фокуса. Попеременный ввод их в рабочее положение осуществляется дистанционно с центрального пульта управления.

На верхнем фланце подвижного цилиндра установлен поворотный стол, который может вращаться для компенсации параллактического угла. Скорость перемещения подвижного цилиндра для фокусировки изображения равна 0,1—0,5 мм/с.

Внутри кабины наблюдателя 22 (диаметр 1800, высота — 2260 мм) установлен пульт управления телескопом.

Внутри „средника“ на растяжках установлено диагональное плоское зеркало 23 системы вторичного (неподвижного) фокуса. Зеркало можно поворачивать на угол 180° вокруг оси, совпадающей с оптической осью трубы. Таким образом, пучок световых лучей может быть направлен сквозь отверстия в боковых плитах „средника“ и в консольных балках гидростатических опор оси Z на любой из двух рабочих балконов системы неподвижного фокуса.

Система управления БТА. Система управления должна обеспечивать наведение телескопа на объект наблюдения, ведение телескопа (слежение) за объектом наблюдения, коррекцию положения телескопа и ряд других операций, необходимых для функционирования такого сложного прибора, каким является оптический телескоп. Для управления альт-азимутальным телескопом необходимо обеспечивать неравномерное знакопеременное движение по двум координатам с ошибкой, не превышающей 0,1—0,2", а также компенсировать вращение изображения в фокальных плоскостях оптических систем телескопа. Таким образом, управление оптическим телескопом на альт-азимутальной монтировке фактически ведется по трем координатам: азимуту (A), зенитному расстоянию (Z) и параллактическому углу (P). Проблема управления телескопом была решена с помощью специально разработанной и

изготовленной электронно-цифровой управляющей машины системы фототелевизионного поиска и гидирования, а также системы компенсации вращения образованного изображения. Для контроля углового положения осей телескопа был изготовлен высокоточный преобразователь „угол—код“.

Скорость наведения по азимуту не выше 45, а по зенитному расстоянию — до 30 градусов в минуту, ускорения по обеим осям — до 0,1 угл. град·с². Однако этих мер не достаточно для исключения возможности возникновения аварийных режимов, особенно по зенитному расстоянию. Скорость в любой точке траектории движения трубы автоматически поддерживается на таком уровне, чтобы свободный выбег при аварийном отключении питания обеспечивал остановку в зоне $Z=0—90^\circ$.

Контроль движения дублирован и осуществляется как цифровой управляющей машиной, так и аналоговыми средствами.

Спектральная аппаратура БТА. Для астрофизических исследований с помощью телескопа БТА предусмотрен большой комплекс спектральной аппаратуры. Конструкция трубы телескопа и его монтаж позволили разместить светоприемную аппаратуру как в кабине наблюдателя (в первичном фокусе), так и на рабочих балконах вторичного фокуса (системы неподвижного фокуса).

Для работы в системе главного (первичного) фокуса предусмотрен светосильный спектрограф СП-160, предназначенный для изучения спектров звезд и туманностей. Оптическая схема прибора приведена на рис. 9.

На входной щели 1, расположенной в фокальной плоскости главного зеркала БТА, формируется изображение исследуемой звезды или иного астрономического объекта, поиск которого, наведение на него телескопа и последующее гидирование осуществляется с помощью визуального гида 2. Изображение объекта удерживается на щели качанием плоскопараллельной пластинки 3. Плоское зеркало 4 направляет световой пучок лучей на коллиматор 5 — внеосевой отражающий параболоид ($f = 400$ мм, $D : f = 1 : 4$). Диспергирующими элементами служат сменные плоские дифракционные решетки 6 (600, 300 и 200 штр/мм) размером 150×140 мм, работающие в первом порядке. Объектив 7 на фотокатоде ЭОП 8 фокусирует спектр, который контактным способом фотографируется с экрана ЭОП на пленку. Разрешающая способность изображения, образованного объективами, равна 200 лин/мм в центре поля и 50—70 лин/мм на его краях. Сменные светофильтры 9 служат для устранения налагающихся порядков дифракционных спектров. Расширение спектра осуществляется качанием кварцевой плоскопараллельной пластинки 10. Семь сменных щелей шириной от 0 до 1 мм расположены на поворотном диске. Положение щели контролируется по лимбу 11, который позволяет при помощи установочного микроскопа 12 осуществлять позиционную установку входной щели. Перед щелью помещены две раздвижные призмы, направляющие в прибор свет от спектральной лампы. Щель

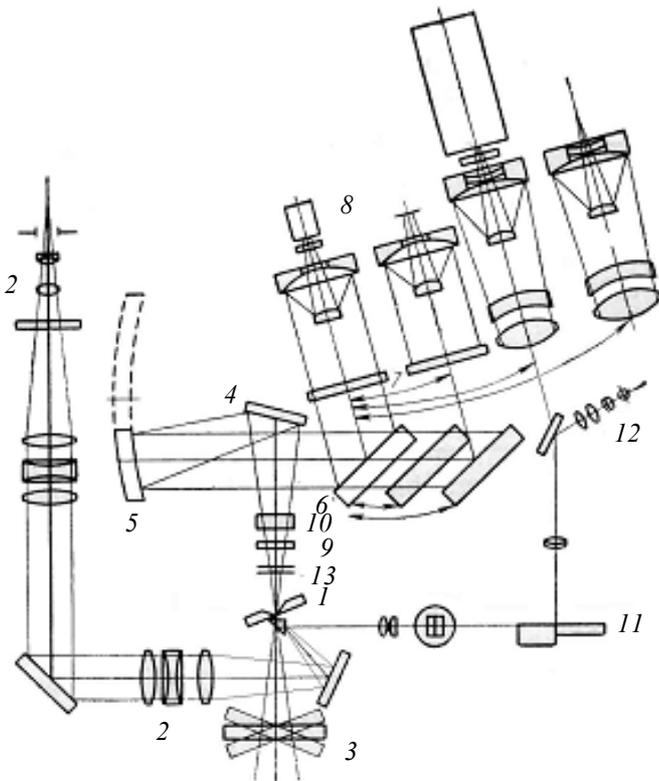


Рис. 9. Оптическая схема спектрографа СП-160

Щель

может перекрываться затвором 13 с пульта управления. Для термостатирования весь спектрограф изолирован слоем пенопласта.

Для термостатирования весь спектрограф изолирован слоем пенопласта.

Для работы в системе неподвижного фокуса ($f' = 186\ 000$ мм, $D : f' = 1 : 31$) предусмотрены следующие приборы:

- основной звездный спектрограф ОСЗП;
- эшелельный спектрограф СП-161;
- планетный спектрограф СП-124 ($f' = 400$ мм, $D : f' = 1 : 4$);
- спектрометр с интерферометром Фабри—Перо.

Благодаря применению азимутальной монтировки свет выводится диагональным зеркалом, установленным на оси вращения трубы телескопа, на специальные балконы стоек, вращающихся вместе с телескопом в горизонтальной плоскости. Основной звездный спектрограф (рис. 10) предназначен для спектрального анализа слабых небесных объектов в диапазоне длин волн 0,3—1,1 мкм.

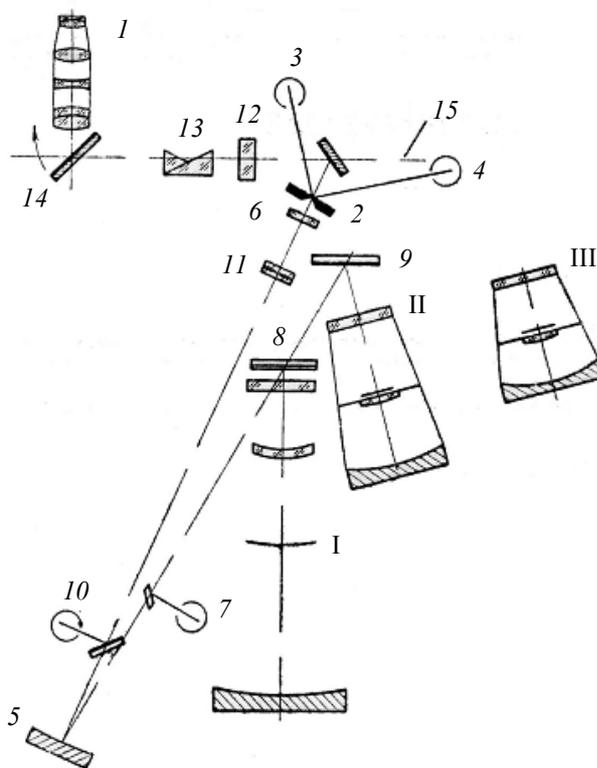


Рис. 10. Оптическая схема основного звездного спектрографа:

- 1 — поисковая система вторичного фокуса,
- 2 — щель, 3 — система фотоэлектрического и визуального гидирования,
- 4 — система спектра сравнения, 5 — коллиматор, 6 — цилиндрическая линза,
- 7 — система спектра калибровки, 8 — узел скрещенной дисперсии,
- 9 — дифракционная решетка камер III и II,
- 10 — фотоэкспонетр, 11 — пластина расширения спектра,
- 12 — пластина гида, 13 — призма Аббе, 14 — откидное зеркало,
- 15 — горизонтальная ось телескопа

Три сменные камеры I—III обеспечивают получение спектрограмм с обратной линейной дисперсией от 0,13 до 5,6 нм/мм.

В предщелевой части расположена поисковая визуальная система с откидным зеркалом 14, обеспечивающая наблюдение в неподвижном фокусе телескопа (поле 3'). Удержание изображения в центре щели осуществляется качанием плоскопараллельной пластинки гида 12. Фокальный узел оснащен рядом сменных нейтральных и цветных светофильтров. Сменные

ступенчатые ослабители позволяют впечатывать девять ступеней непрерывного спектра калибровки в кадр камеры.

Главное зеркало БТА. Функциональные возможности любого телескопа принципиально определяются диаметром главного зеркала. Помимо очевидных проблем, связанных с созданием крупной заготовки зеркала, приданием рабочей поверхности зеркала требуемой формы при допустимом отклонении ее от номинальной (при предельно возможной точности обработки), основная конструкторская проблема заключалась в обеспечении высокой стабильности формы отражающей поверхности зеркала как в процессе ее обработки, так и в весьма сложных условиях эксплуатации зеркала в обсерватории. Известны два основных источника деформации зеркала: деформации вследствие температурных градиентов в материале, возникающих под влиянием изменения температуры окружающей среды, и деформации от собственного веса зеркала. Зеркало БТА представляет собой равнотолщинный мениск диаметром 6050 и толщиной 650 мм. Для определения количества и местоположения опор при заданных параметрах зеркала допустимые деформации отражающей поверхности зеркала от собственной массы определялись исходя из условия Рэлея, требовалась точность отражающей поверхности зеркала до $1/8\lambda$. Было решено, что деформация поверхности зеркала в результате разгрузки не должна превышать 0,035 мкм.

Было рассчитано, что зеркало телескопа БТА достаточно разгрузить в 60 точках как в торцевом, так и в радиальном направлениях. При этом амплитуда упругих деформаций в пределах рабочей зоны зеркала не превышает 0,0096 мкм, что в 3,6 раза меньше принятого допуска.

Разгрузка зеркала построена на принципе уравнивания масс с помощью неравноплечих рычагов. Каждый механизм содержит торцевую и радиальную системы разгрузки.

В торцевом направлении зеркало разгружается 57 механизмами разгрузки и опирается на три фиксирующие опоры. В радиальном направлении зеркало разгружается 60 рычагами радиальной разгрузки и фиксируется центрирующим стаканом. Расчет показал, что деформация отражающей поверхности главного зеркала из-за потерь вследствие трения будет не более 0,045 мкм.

При выборе материала зеркала для уменьшения влияния перепадов температуры предпочтение при любой конструкции зеркала (сплошной, ребристой) должно быть отдано материалу с наименьшим коэффициентом линейного расширения (например, плавленому кварцу, ситаллу). В результате проведенных исследований специалистами Лыткаринского завода оптического стекла и ГОИ им. С.И. Вавилова был разработан новый сорт стекла — стекло 316 (с коэффициентом линейного расширения $\alpha=3\cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), аналогичное стеклу ЛК5, но имеющее некоторые технологические преимущества. Из этого стекла 20 ноября 1964 г. была отлита заготовка главного зеркала телескопа. Процесс заполнения формы стеклом длился чуть больше шести часов. Форма с отлитой заготовкой охлаждалась на воздухе в цехе под обогреваемой крышкой в течение четырех часов до температуры 1000—1050 °С, после чего была установлена в специальную печь для отжига.

Заготовка главного зеркала БТА отжигалась в течение двух лет и шести дней.

Для получения заготовки зеркала заданной геометрической формы был спроектирован и изготовлен комплект алмазного инструмента, при этом было использовано свыше 12 тысяч каратов натурального алмаза в виде порошка. При обработке заготовки наиболее сложными и трудоемкими операциями были получение сфер фрезерованием, разметка 66 глухих отверстий для размещения механизмов разгрузки зеркала, а также их обработка.

Окончательная шлифовка и полировка главного зеркала БТА проводились бригадой высококвалифицированных оптиков ЛОМО в специальном термостатированном корпусе на уникальном шлифовальном станке. Заготовка была установлена в технологическую оправу с сильфонной разгрузкой. В мае 1969 г. отполированная поверхность зеркала была такова, что

контроль ее формы при горизонтальном направлении оси зеркала, подвешенного на ленте, был уже недопустим из-за возникновения деформаций поверхности. Поэтому последующая обработка поверхности зеркала была продолжена в штатной оправе при штатной системе разгрузки. Это позволило обрабатывать и контролировать поверхность зеркала, не снимая его со станка. В апреле 1970 г. поверхность зеркала была отшлифована и начата ее полировка, в июне 1974 г. изготовленное зеркало было готово для проведения аттестации.

Параллельно с решением проблем обработки поверхности проводилась большая научно-исследовательская работа по созданию методов и средств контроля формы поверхности этого уникального зеркала. Был использован комплекс методов, взаимно дополняющих друг друга, позволивших получить объективную количественную информацию о поверхности главного зеркала БТА. Для проведения технологических и аттестационных контрольных испытаний были разработаны и изготовлены высокоточные контрольные приборы.

Впервые было разработано программное обеспечение, позволяющее получить топографическую карту отклонений отражающей поверхности зеркала от номинальной формы по результатам гартмановского или интерференционного контроля. Впервые была решена задача машинного расчета режимов обработки оптических поверхностей несферической формы по результатам численных значений измеренных отклонений формы поверхности от номинальной, т.е. по данным топографической карты.

Модифицированные методы и средства цехового контроля формы поверхности успешно применялись для решения тех же задач в обсерватории.

30 декабря 1975 г. министром оборонной промышленности С. А. Зверевым и Президентом АН СССР академиком А. П. Александровым утвержден акт Государственной межведомственной комиссии по приемке комплекса большого азимутального телескопа БТА в совместную эксплуатацию АН СССР и министерством.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агурок И. П., Зверев В. А., Родионов С. А., Сокольский М. Н., Усоскин В. В. Оптимальная компенсация погрешностей изготовления астрономических зеркал юстировкой телескопа // ОМП. 1980. № 7. С. 17—20.
2. Амур Г. И., Зверев В. А. Изготовление главного зеркала азимутального телескопа БТА // Изготовление асферической оптики. М.: Машиностроение, 1978. С. 170—190.
3. Бородуля Л. П., Бобашов В. В. Расчет основных систем БТА // ОМП. 1977. № 8. С. 3 — 5.
4. Бужинский И. М., Дмитриева З. П., Арефьева К. И. Контроль заготовки главного зеркала БТА // ОМП. 1978. № 5. С. 37—41.
5. Васильев А. С., Евзеров А. М., Лобачев М. В., Пейсахсон И. В. Основной звездный спектрограф БТА // ОМП. 1977. № 2. С. 31—34.
6. Доладугина В. С. Качество заготовки для главного зеркала БТА // ОМП. 1978. № 3. С. 36—38.
7. Зайцев А. А., Клопский А. П., Ковалев В. А. Гидростатические подшипники большого азимутального телескопа // ОМП. 1979. № 2. С. 47—50.
8. Зандин Н. Г., Колесников А. Е., Пейсахсон И. В., Лобачев М. В. Светосильный спектрограф с ЭОП для главного фокуса БТА // ОМП. 1977. № 2. С. 34—37.
9. Зверев В. А., Родионов С. А., Сокольский М. Н. Об оценке влияния местных деформаций волнового фронта на качество оптического изображения // Опт. и спектр. 1974. Т. 36, вып. 4. С. 792—797.
10. Зверев В. А., Кирилловский В. К., Сокольский М. Н. Исследование качества изображения оптических систем методом изофотометрической фоторегистрации // ОМП. 1976. № 8. С. 14—17.
11. Зверев В. А., Родионов С. А., Сокольский М. Н., Ланно Л. М. Исследование связи распределения энергии в пятне рассеяния с величиной и формой отступления поверхности зеркала от идеальной // ОМП. 1976. № 11. С. 5—8.

12. Зверев В. А., Родионов С. А., Сокольский М. Н., Усоскин В. В. Математические основы гартмановского теста главного зеркала БТА // ОМП. 1977. № 2. С. 18—22.
13. Зверев В. А., Родионов С. А., Сокольский М. Н., Усоскин В. В. Технический контроль главного зеркала БТА методом Гартмана // ОМП. 1977. № 3. С. 3—5.
14. Зверев В. А., Родионов С. А., Сокольский М. Н., Усоскин В. В. Исследование главного зеркала БТА в обсерватории // ОМП. 1977. № 4. С. 3—5.
15. Зверев В. А., Болдырев Н. И., Сокольский М. Н. Фотоэлектрический фотометр для измерения концентрации энергии в пятне рассеяния // ОМП. 1977. № 5. С. 27—29.
16. Зверев В. А., Агурок И. П., Родионов С. А., Сокольский М. Н. Автоматизация обработки интерферограмм при контроле оптических систем // ОМП. 1978. № 9. С. 7—10.
17. Зверев В. А., Родионов С. А., Сокольский М. Н., Усоскин В. В. Применение диафрагмы Гартмана в сходящемся пучке лучей при исследовании телескопов в обсерватории // ОМП. 1980. № 2. С. 48—49.
18. Иоаннисиани Б. К. Разработка телескопа с зеркалом диаметром 6 метров // ОМП. 1970. № 4. С. 37—48.
19. Коровяковский Ю. П., Шабанов М. Ф. Предварительные результаты определения проникающей силы БТА // ОМП. 1978. № 5. С. 21—23.
20. Маларев В. А. Поисково-гидирующая система большого азимутального телескопа // ОМП. 1977. № 7. С. 32—36.
21. Неплохов Е. М. Автоматизированная система управления комплексом большого азимутального телескопа // ОМП. 1977. № 8. С. 41—49.
22. Павлов В. Н. Система разгрузки главного зеркала большого азимутального телескопа // ОМП. 1979. № 2. С. 44—46.
23. Самофал Н. С. Аналитическое исследование и разработка методики расчета системы оптимальной разгрузки главных зеркал телескопов // ОМП. 1966. № 6. С. 1—8.
24. Самофал Н. С. Оптимальная разгрузка главных зеркал телескопов с отверстием в центре // ОМП. 1966. № 12. С. 23—29.
25. Создание большого азимутального телескопа БТА / Под ред. д.т.н., проф. В. Ю. Торочкова. М.: ЦНИИ информации, 1976. С. 83.

Сведения об авторе

Виктор Алексеевич Зверев

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики

Рекомендована кафедрой
прикладной и компьютерной оптики

Поступила в редакцию
25.12.09 г.

К 110-летию СПбГУ ИТМО

УДК 528.8 (15)

А. В. Демин, А. В. Денисов, А. В. Летуновский

ОПТИКО-ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

На основе данных из общедоступных источников рассматривается тенденция развития основных направлений оптико-цифровых систем и комплексов дистанционного зондирования Земли из космоса.

Ключевые слова: оптико-цифровые системы и комплексы космического назначения, дистанционное зондирование Земли, астрометрия, линейное разрешение на местности, космический аппарат.

Повышение эффективности управления научно-техническими и технологическими процессами, связанными с разнообразными направлениями исследований в интересах народного хозяйства и обороноспособности страны, а также изучения ближнего и дальнего космоса, требует использования дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и возможностей такого направления исследований, как астрометрия. Определим основные направления разработок для решения практических задач, стоящих перед оптико-цифровыми системами и комплексами (ОЦСиК), устанавливаемыми на борт космического аппарата массой 100—2000 кг [1—23].

Дистанционное зондирование Земли:

- линейное разрешение на местности не хуже 0,5 м для панхроматического канала и менее 3 м — для мультиспектрального;
- полоса захвата порядка 20 км;
- отношение сигнал/шум не хуже 150;
- функция передачи модуляции на зачетной частоте не хуже 0,2.

Астрометрия:

- создание высокоточного (погрешность — не хуже $25 \cdot 10^{-6}$ секунд дуги) каталога положений (точность положений и собственных движений — не хуже $1 \cdot 10^{-3}$ секунды дуги; точность определения параллакса — порядка $4 \cdot 10^{-5}$ секунд дуги для звезд, величина которых составляет 16 m; точность фотометрии — 0,01—0,10 м для длины волны 0,2—10 мкм, число спектральных полос 10—16) и собственных движений небесных объектов — до 18 m;
- создание каталога спектральных энергетических распределений ($R \sim 1/2000$) звезд до 12 m (выборочно — до 16—18 m) и лучевых скоростей всех звезд до 18—19 m в 4—6 независимых интервалах спектра.

Рассмотрим первое из указанных направлений. Использование дистанционного зондирования Земли в оптическом диапазоне длин волн позволяет получать информацию как о географических и геофизических ее параметрах, так и о техногенных процессах, происходящих на поверхности Земли, что повышает ценность этой информации. ДЗЗ в зависимости от задач, для решения которых оно предназначено, осуществляется методами маршрутной,

объектовой, стереоскопической, статической, динамической, топографической и спектрометрической съемки. ДЗЗ в оптическом диапазоне осуществляется с помощью ОЦСиК, устанавливаемых на борт космических аппаратов (КА). Развитие космических ОЦСиК идет по пути создания пакета схемотехнических решений и информационных технологий, позволяющих разрабатывать и создавать комплексы с уникальным сочетанием информационных, энергетических, точностных и массогабаритных параметров.

В соответствии с концепцией построения нового поколения комплексов космического базирования различного назначения предполагается создание ОЦСиК, обеспечивающих:

— мониторинг поверхности Земли с высоким пространственным и энергетическим разрешением;

— получение информации для описания поверхности Земли и ее топографии с высокой точностью;

— решение задач астрометрии с высокой точностью;

— проведение астрофизических исследований (включая спектрометрию) с высокой точностью и достоверностью.

Также для дальнейших исследований необходимы:

— учет возможных направлений совершенствования информационных технологий в наземном сегменте с целью увеличения его производительности для удовлетворения запросов потребителей;

— совершенствование технологии и методологии космических исследований с целью повышения надежности и достоверности обнаружения самых различных подвижных и неподвижных объектов на сложном фоне.

Новые конструкторско-технологические решения для создания перспективных ОЦСиК должны быть основаны на следующих направлениях:

— разработка высокоапертурных оптических систем с возможностью изменения конфигурации в зависимости от требуемого пространственного и энергетического разрешения;

— создание мультимодульных оптических систем с активным управлением формой волнового фронта;

— уменьшение массогабаритных характеристик за счет применения новых конструктивных материалов, технологий производства, радиоэлектронных элементов и фотоприемных устройств.

Бурное развитие ОЦСиК для ДЗЗ космического базирования в конце XX в. привело к тому, что появились системы с линейным разрешением на поверхности (проекция пиксела на поверхность Земли) порядка 1—2 м при диаметре входного зрачка объектива порядка 0,35—0,7 мм и массе КА 250—1000 кг. К такому классу систем можно отнести: IKONOS-2 (США, 1999 г.); QuickBird-2 (США, 2001 г.); OrbView-3 (США, 2002 г.); Spot-5 (Франция, 2002 г.); Eros-A (Израиль, 2000 г.); Cartosat-1 (Индия, 2005 г.); Kopsat-1 (Корея, 1999 г.); Formosat-RocSat-2 (Тайвань, 2004 г.).

Дальнейшее развитие рынка коммерческой видовой продукции, связанное с возникновением спроса на высококачественную информацию субметрового разрешения, которая необходима для разработки высокоточных детальных карт и цифровых моделей рельефа Земли, обеспечило толчок развитию технических средств. К концу первого десятилетия XXI в. появились предложения от американских компаний-операторов Digital Globe и Geo Eye вывести на орбиту порядка 700 км аппарат двойного назначения GeoEye-1 (2008 г.) и WorldView-II (2009 г.) [20].

На этих КА устанавливается ОЦСиК с линейным разрешением на местности (ЛРМ) порядка 0,5 м, видеоинформацию от которого предполагается использовать как для выполнения коммерческих заказов, так и в интересах видовой космической разведки. При определенных условиях эти КА могут обеспечивать получение видеоинформации с ЛРМ до 0,25 м и с высо-

кой оперативностью передавать ее потребителю. Однако законодательство США накладывает ограничения на поставку видовых материалов для заказчиков за пределами США — информация должна поставляться с разрешением до 0,5 м и с задержкой по времени не менее чем на 24 часа. Эти обстоятельства создают дополнительный стимул для развития подобных космических ОЦСиК для ДЗЗ в других странах, в том числе и в России.

В указанных выше суперспутниках США реализована одна из основных тенденций мирового развития КА ДЗЗ — создание тяжелых КА (массой более 2000 кг), на которых размещаются крупногабаритные приборы с диаметром входного зрачка порядка 1,0—1,5 м и многоэлементные мелкоструктурные фотоприемные матрицы (ФПЗС) с размером пиксела порядка 6—8 мкм, что позволяет достичь сверхвысокого разрешения.

Суперспутники GeoEye-1 и WorldView-II обеспечивают просмотр подстилающей поверхности Земли с проекцией пиксела в панхроматическом канале 0,41 и 0,46 м соответственно, первый в полосе захвата 15,2 км, а второй — 16,4 м, с высоты орбиты 684 и 770 км соответственно. При этом масса первого КА составляет 1955, второго — 2800 кг, диаметр входного зрачка телескопа — 1,1 м для обоих КА, эффективная длина строки многоэлементного приемника — порядка 36 000 пикселей. Наблюдение производится одновременно в панхроматическом (ПХ) и мультиспектральном (МС) спектральных диапазонах. Число спектральных диапазонов МС канала в первом КА — 4, а во втором — 8.

Как показывает анализ развития КА ДЗЗ, для того чтобы в дальнейшем перейти к многократному расширению возможностей применения видовой продукции, необходимо совершенствовать суперспутники двойного назначения субметрового разрешения, повышая информативность видеоматериалов, точность координатной привязки, увеличивая производительность съемки и оперативность доставки видеоматериалов потребителю.

В таблице приведены данные по ОЦСиК, функционирующих в настоящее время на космических орбитах (здесь D — диаметр входного зрачка, F — фокусное расстояние, α — угол поля зрения).

КА для ДЗЗ состоит из двух частей: ОЦСиК и многофункционального контейнерного блока, обеспечивающего обработку и передачу данных, тепловой контроль, выработку и распределение энергии космическим аппаратом.

На рис. 1 представлена орбитальная конфигурация КА серии Pleiadas [19], а на рис. 2 приведено схемно-конструктивное решение ОЦСиК для КА серии Pleiadas (объектив расположен в корпусе из углепластика), которое является фактически обобщенным для всех КА, решающих задачу ДЗЗ.

Основными компонентами ОЦСиК являются объектив и система приема и преобразования информации (СПИИ), в состав которой входят ФПЗС с электронными компонентами и блок преобразования и сжатия информации. В КА серии Pleiadas для сжатия информации применяется вейвлет-алгоритм, который позволяет для видеоинформации порядка 4 Гбит/с реализовать семикратную компрессию вместо стандартной четырехкратной. Звездный датчик и волоконно-оптический гироскоп обеспечивают совместно с двигательной установкой КА требуемое положение ОЦСиК на орбите по отношению к поверхности Земли.

ФПЗС позволяет формировать информацию о поверхности Земли в панхроматическом режиме съемки 0,4—0,9 мкм и в мультиспектральном. Мультиспектральные (или спектрональные) изображения представляются в виде сигналов отдельных спектральных каналов, которые в дальнейшем могут использоваться для получения изображений. В натуральных или искусственных цветах поочередный синтез отдельных сигналов позволяет решать разнообразные тематические задачи, а также помогает при дешифрировании малоконтрастных изображений.

| Система | Страна | Масса КА, кг | Масса ОЦСиК, кг | Высота орбиты, км | Оптическая система | Параметры | | | Спектральный диапазон, мкм | Угловой размер пиксела, мкрад | Полоса захвата, км | Проекция пиксела на Землю, м |
|--------------------------|---------|--------------|-----------------|-------------------|----------------------|-----------|----------|-----------------------|---|-------------------------------|--------------------|------------------------------|
| | | | | | | D, м | F, м | α, \dots° | | | | |
| KH-12 (2000 г.) | США | 12000 | 2800 | 350—550 | Ричи—Кретьена | 2,3 | 40 | 0,6 | 0,5—0,8 | 0,3 | 4 | 0,144 |
| | | | | | | 0,7 | 10 | 1 | | | | |
| IKONOS-2 (1999 г.) | США | 700 | 170 | 683 | Корш | 0,3 | 3,5 8 | 1,5 1,6 | 0,45—0,9 0,45—0,52 0,52—0,6 0,63—0,69 0,76—0,9 | 0,3 | 4 | 0,144 |
| | | | | | | | | | | | | |
| EROS-AI (2000) | Израиль | 250 | 70 | 480 | Ричи—Кретьена | 0,16 | 1,082 | 4 | 0,45—0,52 0,63—0,69 0,76—0,9 | 1,36 | 22 | 0,8 3,2 |
| | | | | | | | | | | | | |
| QUICK-BIRD (2001 г.) | США | 980 | 300 | 450 | Зеркальная внеосевая | 0,16 | 1,082 | 4 | 0,49—0,69 0,43—0,47 0,61—0,68 0,68—0,89 1,58—1,75 | 4,6 | 20 | 0,7 2,8 |
| | | | | | | | | | | | | |
| SPOT-5 (2002 г.) | Франция | 3000 | 955,5 | 822 | Схема Шмидта | 0,16 | 1,082 | 4 | 0,49—0,69 0,43—0,47 0,61—0,68 0,68—0,89 1,58—1,75 | 4,6 | 20 | 0,7 2,8 |
| | | | | | | | | | | | | |
| Pleiadas (2007 г.) | Франция | 980 | 300 | 695 | Корш | 0,65 | 12,9 | 4 | 0,49—0,69 0,43—0,47 0,61—0,68 0,68—0,89 | 1 4 | 20 | 0,7 2,8 |
| | | | | | | | | | | | | |
| WorldView 2 (2009 г.) | США | 2800 | <1000 | 759—776 | Трехзеркальная | 1,1 | 13,3 | 1,28 | 0,4—0,8 0,45—0,51 0,51—0,58 0,63—0,69 0,77—0,895 | 0,6 | 16,4 | 0,46 1,85 |
| | | | | | | | | | | | | |



Рис. 1

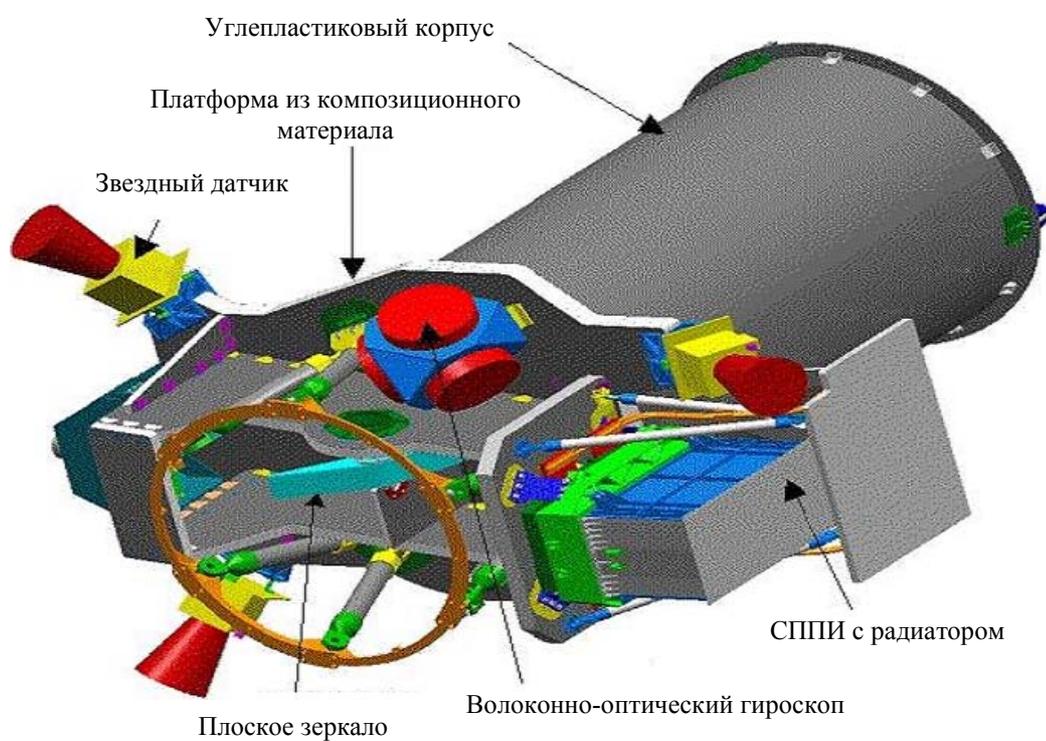


Рис. 2

Емкость запоминающего устройства ОЦСиК достигает 600 Гб и выше; расчетная скорость передачи данных — порядка 600 Мбит/с. Максимальная скорость ввода видеоданных в запоминающее устройство — 1,5 Гбит/с.

Высокое качество изображения в ОЦСиК является обязательным требованием. Поэтому модуляционная передаточная функция панхроматического канала должна быть не хуже 0,1 на рабочей пространственной частоте, а отношение сигнал/шум при номинальной энергетической яркости Земли должно быть порядка 100. Точность определения местоположения на изображении без использования наземных данных должна достигать 20 м, а при использовании опорных знаков на Земле, отстоящих друг от друга примерно на 80 км — 0,5 м.

На следующем этапе данные кодируются по схеме решетчатого кода в модуляторах типа 8-PSK, которые имеют собственные твердотельные усилители мощности. Затем данные сжимаются и передаются на Землю с помощью антенны X-диапазона. Она установлена на двухосном универсальном карданном подвесе, что гарантирует передачу данных во время движения. В период регистрации изображения этот механизм не используется, чтобы минимизировать динамические искажения. Специальная наводящая антенна ориентирует передающую антенну при движении спутника так, чтобы наземная принимающая станция всегда оставалась в зоне ее действия. Таким образом, передача данных из космоса происходит в условиях полной видимости наземной принимающей станции.

Основные оптические схемы, применяемые в космических ОЦСиК, приведены на рис. 3—6 (рис. 3 — схема Ричи—Кретьена с корректором полевых aberrаций, рис. 4 — зеркальная оптическая система — схема Корша, рис. 5 — оптическая схема с двухзеркальным корректором полевых aberrаций — четырехзеркальная схема, рис. 6 — трехзеркальная внеосевая схема — трехзеркальный триплет Кука).

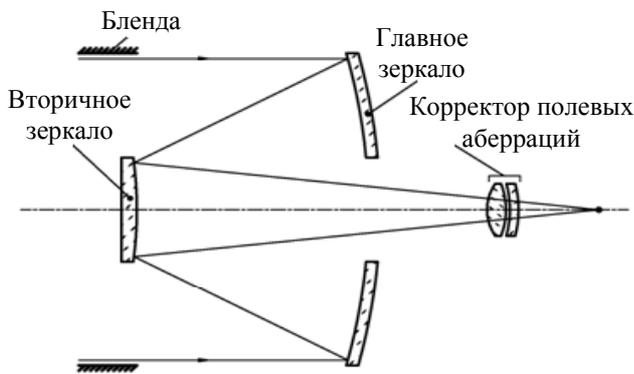


Рис. 3

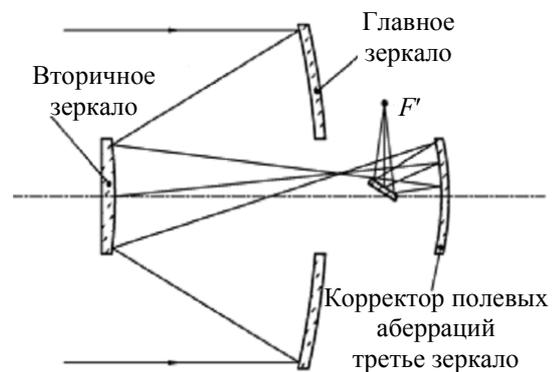


Рис. 4

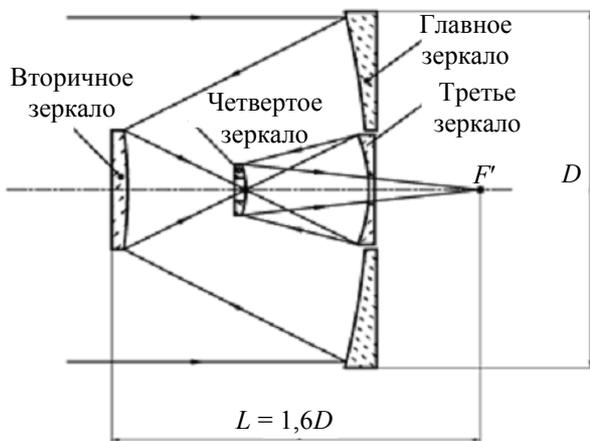


Рис. 5

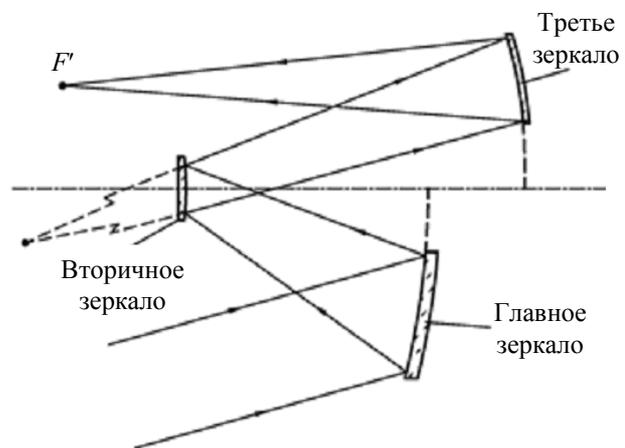


Рис. 6

Основной задачей астрометрических исследований помимо создания каталога положений и собственных движений небесных объектов на микросекундном уровне точности являются:

- определение кратности звезд;
- определение орбитальных движений в двойных и кратных системах;
- поиск невидимых спутников у звезд;
- исследование динамики и кинематики звездных скоплений;
- расчет тригонометрических параллаксов (для нахождения расстояний до звезд);
- уточнение шкалы межзвездных расстояний;
- исследование воздействия нестационарного гравитационного поля галактики на координатно-временные измерения;
- уточнение размеров и возраста Вселенной.

Эти задачи решаются, например, с помощью оптического звездного интерферометра, размещаемого на искусственном спутнике.

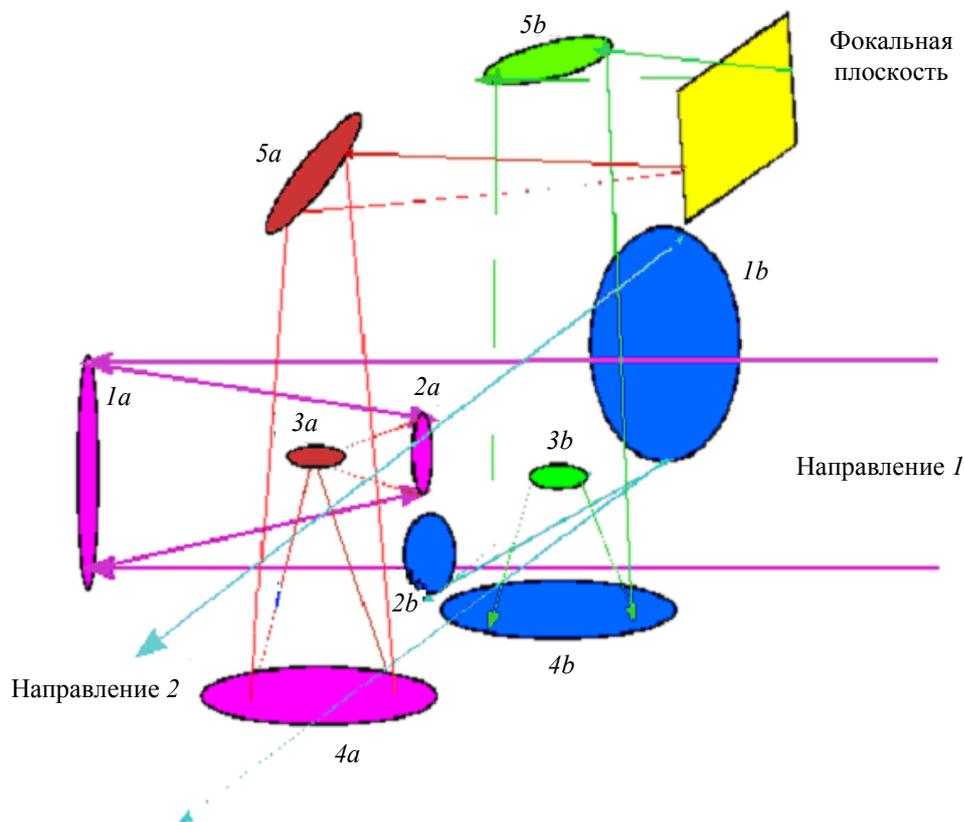


Рис. 7

На рис. 7 приведена оптическая схема звездного интерферометра (выполненного в рамках проекта Gaia), обеспечивающая положение в фокальной плоскости двух оптических излучений, проходящих в направлениях 1 и 2, каждое через свою оптическую систему, состоящую из зеркал 1а, 2а, 3а, 4а, 5а и 1б, 2б, 3б, 4б, 5б соответственно. В фокальной плоскости формируется интерференционная картина взаимодействия двух оптических излучений. Этот звездный интерферометр имеет следующие параметры и характеристики [21]:

- диаметр главных зеркал телескопов интерферометра — 1—1,5 м;
- фокусное расстояние объектива телескопа — порядка 30—45 м;
- поле зрения телескопа 1—1,5°;
- габариты ФПЗС — 0,5×0,5 м;

— применяемый в интерферометре ФПЗС с обратной засветкой содержит 40×40 мозаику матриц 1000×1000 пикселей каждая. Размер пикселя матриц 12 мкм, что соответствует угловому разрешению телескопа $0,08''$;

— фиксируемый угловой размер звезды $0,3—0,4''$ на длине волны 800 нм;

— случайная ошибка измерения положения звезды 14-й звездной величины на одной матрице ПЗС с угловым размером $0,003''$.

Таким образом, анализ состояния и тенденций развития двух основных направлений ОЦСиК позволяет сделать следующие выводы.

1. Современное состояние зарубежных систем ДЗЗ и перспективы их развития свидетельствуют о том, что в соответствии с большим кругом целевых задач, решаемых в интересах народного хозяйства и обороны, имеется широкая номенклатура космических аппаратов для ДЗЗ и астрометрии. Например, по предельному разрешению на местности, обеспечиваемому в ПХ-диапазоне, можно выделить четыре основных направления развития ОЦСиК для ДЗЗ: системы сверхвысокого разрешения — $0,2—0,5$; высокого — $0,5—1,0$; среднего $2—3$; малого — $10—20$ м.

2. С целью повышения информационных, энергетических, точностных и массогабаритных параметров ОЦСиК для космической съемки и астрометрии следует решить следующие основные задачи научно-технического и технологического характера:

— создание космических телескопов с апертурой главного зеркала $1—1,5$ м и выше. В частности, одним из путей создания высокоапертурных телескопов с диаметром главного зеркала порядка 2,5 м является отработка технологии изготовления и контроля составных зеркал на орбите, что позволяет существенно сократить вес телескопа [3, 10];

— разработка технологии композиционных материалов для космических систем;

— разработка приводов нового поколения, в частности пьезопроводов;

— создание крупноформатных ФПЗС с размером пикселя до $6—9$ мкм, работающих в режимах временной задержки и накопления и временной задержки и интегрирования;

— создание цифровых быстродействующих микросхем для обработки информации на борту КА (сжатие, кодирование);

— создание запоминающих устройств большой емкости (до 10^{13} бит);

— создание космической радиолинии со скоростью передачи информации от 700 Мбит/с и выше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адров В. Н., Карионов Ю. И., Титаров П. С., Чекурин А. Д. Критерии выбора данных ДЗЗ для топографического картографирования. М., 2004.
2. Белецкий В. С. Очерки о движении космических тел. М.: Наука, 1977.
3. Васильев В. Н., Демин А. В., Гоголев Ю. А., Олейников Л. Ш. Оптико-электронные комплексы космического базирования // Тр. третьей воен.-науч. конф. космических войск. СПб, 2007. С. 127—133.
4. Васильев В. Н., Демин А. В., Гоголев Ю. А., Никифоров В. О. Оптико-электронные комплексы космического базирования — перспективы развития // Тез. докл. междунар. науч.-технич. конф. „Особенности развития космической отрасли России и перспективы ее дальнейшей интеграции в систему международных экономических связей“. СПб, 2007. С. 163—165.
5. Гарбук С. В., Гершензон В. Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. М.: А и Б, 1997.
6. Гречищев А. В., Лихачев Ю. А. Космические системы дистанционного зондирования Земли // Ежегодный обзор. Вып. 4. М.: ГИС-Ассоциация, 1999. С. 83—92.
7. Данилов В. А., Демин А. В., Никифоров В. О., Савицкий А. М., Сокольский М. Н. Многоспектральные оптико-электронные системы для микроспутников // Мат. науч.-технич. конф. „Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли“. М.: МНТОРЭС им. А. С. Попова, 2008. С. 34—38.

8. Данилов В. А., Демин А. В., Никифоров В. О., Савицкий А. М., Сокольский М. Н. Оптико-электронные комплексы для МКА // Там же. С. 65—68.
9. Демин А. В., Канаев И. И., Серегин А. Г., Смирнов А. П. Сопряжение звездного интерферометра Физо с обзорным изображающим телескопом // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49, № 1. С. 48—52.
10. Демин А. В., Умбиталиев А. А., Цыцулин А. К. Перспективы развития космических систем наблюдения с адаптивной оптикой // Тез. докл. междунар. науч.-технич. конф. „Особенности развития космической отрасли России и перспективы ее дальнейшей интеграции в систему международных экономических связей“. СПб, 2007. С. 166—169.
11. Демин А. В., Горбунов Г. Г., Никифоров В. О., Савицкий А. М., Скворцов Ю. С., Сокольский М. Н. Гиперспектральная аппаратура для дистанционного зондирования Земли // Оптич. журн. 2009. Т. 76, № 10. С. 75—82.
12. Изображения Земли из космоса: примеры применения. М.: СКАНЭКС, 2005.
13. Кучейко А. А. Новый спутник сверхдетального наблюдения // Новости космонавтики. 2009. Т. 19, № 12. С. 323.
14. Кучейко А. А. Космическое зондирование Земли: итоги 2008 // R&D. CNews. 2009.
15. Конечны Г. Тенденции цифрового картографирования. Ганновер, Германия, 2007.
16. Титаров П. С. Практические аспекты фотограмметрической обработки сканерных космических снимков высокого разрешения // Информационный бюллетень ГИС-Ассоциации. 2004. № 3—4.
17. Чернявский Г. М. Космические средства при мониторинге Земли // Земля и Вселенная. 2004. № 5. С. 3—12.
18. Черток Б. Е. Космонавтика сегодня и завтра // Военно-промышленное обозрение. Арсенал. 2009. № 3.
19. Европейская система дистанционного зондирования высокого разрешения „Плеяды“, 2006 [Электронный ресурс]: <<http://www.sovzond.ru/dzz/publications/541/3037.html>>.
20. Снимки GeoEye-1, 2009 [Электронный ресурс]: <<http://www.racurs.ru/page=456>>.
21. Проект Gaia, 2009 [Электронный ресурс]: <http://www.safran.ru/article.php?id_article=621>.
22. Тр. III воен.-науч. конф. космических войск / Под ред. В. Е. Прохорович. СПб, 2007.
23. Fender J. Future Trends in Large Space Optics // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4013. P. 682—686.

Сведения об авторах

- Анатолий Владимирович 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
- Андрей Васильевич Денисов** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра информатики и прикладной математики; E-mail: www.denisoff@mail.ru
- Александр Васильевич Летуновский** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра информатики и прикладной математики

Рекомендована кафедрой
информатики и прикладной
математики

Поступила в редакцию
25.12.09 г.

А. В. БУХАНОВСКИЙ, В. Н. ВАСИЛЬЕВ

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ E-SCIENCE

Рассматриваются основные особенности современных программных комплексов компьютерного моделирования в рамках парадигмы e-Science — их архитектура, специфика развертывания на вычислительных платформах, характеристики информационного обеспечения, внедрения и поддержки жизненного цикла.

Ключевые слова: проблемно-ориентированные оболочки, сервисы, суперкомпьютерные технологии, интеллектуальные технологии, виртуальное сообщество.

Введение. Современный этап эволюции представлений о программных комплексах компьютерного моделирования и обработки результатов научных экспериментов тесно связан с продвижением парадигмы „электронной науки“ — e-Science [1]. Понятие e-Science ассоциируется с проведением разнородными группами специалистов совместных научных исследований, требующих консолидации вычислительных и программных ресурсов для решения сложных междисциплинарных задач на основе технологий распределенных вычислений и систем. Устоявшийся облик инструментария компьютерного моделирования, ориентированного на персональные компьютеры и вычислительные кластеры монопольного применения, в настоящее время претерпевает существенные изменения, связанные, в первую очередь, с глобализацией сферы его применения, ограниченной, пожалуй, лишь охватом сети Интернет. Это касается особенностей архитектуры программных комплексов, специфики их развертывания на вычислительных платформах, характеристик информационного обеспечения, поддержки жизненного цикла и продвижения на рынке. Данные вопросы рассматриваются ниже.

От интегрированных комплексов — к проблемно-ориентированным средам. Традиционное представление о предметно-ориентированном комплексе компьютерного моделирования предполагает наличие в его составе как минимум трех функциональных составляющих: препроцессора данных, „решателя“ (solver) и постпроцессора данных (часто совмещенного с системой визуализации). Численная реализация заложенных в „решателе“ моделей возможна одним или несколькими методами, выбор которых предопределен разработчиком и тем самым навязан пользователю; способы подготовки данных и обработки результатов расчетов ориентированы на особенности „решателя“.

Альтернативой такому подходу является концепция проблемно-ориентированных сред (Problem Solving Environment, PSE) [2]. Она подразумевает организацию модульной архитектуры программного комплекса, в которой различные предметно-ориентированные модули (аналоги традиционных „решателей“) функционируют в рамках управляющей среды. Задачей среды является обеспечение единого интерфейса взаимодействия модулей, централизованный контроль их исполнения на вычислительных ресурсах, а также управление потоками данных (включая внешние средства их обработки). По сравнению с традиционными ком-

плексами это обеспечивает существенную гибкость, что позволяет пользователю с помощью средств компьютерного моделирования самостоятельно строить и выполнять различные сценарии исходя из собственных представлений о логике организации исследований.

От компонентов — к сервисам. Описание архитектуры проблемно-ориентированной среды требует определения способа интеграции ее модулей, что тесно связано с общемировой тенденцией снижения сложности процессов разработки, тестирования и поддержки программных продуктов на фоне увеличения общей сложности решаемых задач. В частности, это привело к переходу от структурного, объектно-ориентированного и компонентно-ориентированного подходов в инженерии программного обеспечения к специфическим концепциям, таким как CCA (Common Component Architecture), AOA (Aspect Oriented Architecture) и (наиболее общая) — SOA (Service Oriented Architecture). Эти концепции ориентированы на достижение высокого уровня функциональной изоляции компонентов программного комплекса, что позволяет интерпретировать отдельные программные модули в рамках PSE как сервисы (SaaS, Software as a Service) [3].

Сервисы в общем случае могут быть разработаны различными группами авторов, реализованы с использованием разных технологий программирования и функционировать, в общем случае, на различных вычислительных системах. Как следствие, такой подход существенно упрощает внедрение в PSE ранее разработанного инструментария компьютерного моделирования на основе морально устаревших информационных технологий. Объединяя отдельные сервисы в вычислительную цепочку (или более сложный поток заданий), пользователь может строить различные композитные приложения для решения сложных междисциплинарных задач, не сосредоточиваясь на низкоуровневой реализации отдельных модулей.

От суперкомпьютеров — к распределенным вычислительным комплексам. Моделирование сложных явлений и систем в настоящее время тесно связано с использованием суперкомпьютерных технологий. Несмотря на появление относительно недорогих кластерных архитектур и стандартизацию соответствующих интерфейсов параллельного программирования для них, на практике они доступны далеко не каждому пользователю. Развитие концепции Грид первого поколения лишь отчасти способствовало улучшению ситуации [4]. Это связано с тем, что Грид первого поколения ориентирован, в первую очередь, на обеспечение пользовательским приложениям доступа к распределенным вычислительным ресурсам. Вопросы подготовки и настройки программного обеспечения для исполнения в Грид остаются за пользователем; при этом эффективная работа параллельной программы при запуске на целевой системе в Грид также не гарантируется. Кардинальное решение данной проблемы стало возможным лишь с появлением концепции Грид второго поколения. Грид второго поколения ориентирован на консолидацию не столько распределенных вычислительных ресурсов, сколько сервисов — прикладных программ, установленных на вычислительных системах в рамках распределенной среды и поддерживающих единый интерфейс взаимодействия [5]. В силу того что пользователь получает удаленный доступ к сервису как к программно-аппаратному решению, не возникает проблем совместимости внутренних интерфейсов и эффективности параллельного исполнения.

От формальных инструкций — к интеллектуальному взаимодействию сервисов. Интерпретация прикладной программы как сервиса подразумевает описание формальных правил ее использования (например, форматы входных и выходных данных) и знаний, касающихся логики ее применения, исходя из специфики предметной области [6]. К таким знаниям, например, относятся правила, регламентирующие область применения, используемые методы, а также методические (не программные) ограничения.

Необходимость использования технологий, основанных на знаниях, связана с тем, что разработчик сервиса, предоставляемого в распределенной среде, является, по сути, экспертом в вопросах его практического использования. Как следствие, совокупность сервисов и

ассоциированных с ними априорных знаний предметной области, объединенных в рамках PSE, образует распределенную базу знаний. Используя базу знаний (например, заданную в форме продукции), пользователь может получить рекомендации по выбору конкретного сервиса для решения поставленной задачи. При этом акценты интеллектуальной поддержки могут быть смещены как в сторону поиска подходящих сервисов в открытых распределенных системах [7], так и оптимальной настройки сервиса для решения конкретной прикладной задачи [8]. Возможность использования интеллектуальных технологий взаимодействия сервисов является принципиальным преимуществом e-Science, в частности, в силу существенных различий в интерпретации одних и тех же подходов, методов и моделей в рамках различных научных школ.

От профилей приложений — к параметрическим моделям параллельной производительности. Для эффективного использования вычислительных сервисов требуются знания об их параллельной производительности на заданной вычислительной платформе применительно к характеристикам решаемой задачи. Традиционно такие знания основываются на результатах определения профилей вычислительного сервиса, представленных в табличной форме или в виде некоторой аппроксимации. Этот подход правомерен для обоснования качества распараллеливания, однако не является достаточным для отчуждения знаний о производительности, в силу того что в процессе эксплуатации пользовательские задачи могут не соответствовать условиям, в рамках которых строился профиль. Поэтому для представления знаний необходимо использовать параметрические модели параллельной производительности.

Параметрическая модель связывает характеристику производительности (время выполнения, параллельное ускорение, эффективность, реактивность) с характеристиками задачи и параметрами вычислительной системы (количеством и производительностью процессоров и пропускной способностью коммуникационной сети). Несмотря на формальный способ записи параметрическая модель может интерпретироваться как представление экспертного знания, поскольку она представляется непосредственно экспертом — разработчиком сервиса. При этом структура модели отражает компетенции разработчика в области параллельных вычислений и может варьироваться в широких пределах — от модификаций закона Амдала до специфических конструкций, учитывающих стохастические эффекты исполнения программы [9]. При создании композитного приложения из нескольких сервисов его параллельная архитектура может формироваться динамически таким образом, чтобы минимизировать время исполнения на основе знаний о параллельной производительности каждого из сервисов [10].

От „коробочного“ программного обеспечения — к ASP-приложениям. Характерной особенностью традиционных программных комплексов компьютерного моделирования являются высокие трудозатраты на их установку и настройку. Это связано с тем, что большинство отчуждаемых программных решений такого рода сформировались на основе исследовательского инструментария с невысокими эргономическими характеристиками. Проблема полностью устраняется, когда пользователь ориентируется на распределенные композитные приложения, создаваемые на основе отдельных предметно-ориентированных сервисов, которые устанавливаются непосредственно самими разработчиками на выделенных целевых системах и могут даже не существовать в форме „коробочных“ решений. Для распространения таких приложений эффективно использовать бизнес-модель ASP (Application Service Provider), в рамках которой провайдер через Интернет предоставляет пользователю в аренду приложение, функционирующее на его технологической площадке. При этом в качестве таких приложений могут рассматриваться как отдельные сервисы, так и объединяющая их проблемно-ориентированная оболочка в целом.

Использование модели ASP изменяет требования и к самим вычислительным сервисам. Так, для многих задач использование суперкомпьютерных систем традиционной архитектуры далеко не всегда является оправданным в силу весьма низкой параллельной эффективности. Если пренебречь переносимостью программы (тем самым принципиально отказываясь от

традиционного „коробочного“ способа ее распространения), в ряде случаев можно эффективно реализовать ее сервисную версию для исполнения на вычислительных системах реконфигурируемой архитектуры (FPGA) [11]. Стоимость разработки в данном случае будет выше в несколько раз, но этот недостаток окупается за счет последующего владения комплексом в целом.

От сайтов информационной поддержки — к профессиональным виртуальным сообществам в сети Интернет. Модель распространения программного комплекса в сообществе пользователей определяет форму информационного сопровождения его жизненного цикла. Программные комплексы компьютерного моделирования помимо справочной системы-руководства для пользователя необходимо дополнять документацией, связанной с особенностями его применения к задачам предметной области (например, в форме печатного документа или интерактивного справочного портала). Однако ориентация на композитные приложения, созданные на основе сервисов, разработанных разными группами специалистов, делает такой путь неэффективным. Альтернативой ему является организация профессиональных виртуальных сообществ в Интернете, при этом во главу угла ставится не программный продукт или сервис, а ассоциированные с ним специалисты — эксперты, разработчики, пользователи. В отличие от традиционных социальных сетей, эволюция которых происходит за счет процессов самоорганизации и „самомотерации“, в данном случае устойчивое развитие сообщества обеспечивается за счет мотивации пользователей на получение необходимых им сервисов (включая справочную информацию) и установление соответствующих профессиональных связей. Иными словами, возникновение такого сообщества стимулируется доступностью проблемно-ориентированных сред на основе сервисов. Образующая при этом обратная связь „провоцирует“ дальнейшее развитие инструментария проблемно-ориентированной среды, одновременно формируя рыночную конъюнктуру на предоставляемые услуги и сервисы. Этот аспект является принципиальным с точки зрения вывода на рынок наукоемких инновационных программных продуктов, для которых традиционные способы внедрения являются малоэффективными вследствие кажущегося отсутствия потенциальных потребителей.

Заключение. Характерным примером, в полной мере учитывающим рассмотренные выше особенности, является высокопроизводительный программный комплекс HPC-NASIS для расчета и моделирования свойств наноразмерных структур и наноматериалов [12], опытный образец которого разработан в СПбГУ ИТМО в 2008—2009 гг. Программный комплекс HPC-NASIS предназначен для проведения квантово-механических расчетов *ab initio*, компьютерного моделирования и расчета наноструктур и наноматериалов с заданными свойствами, в различных условиях эксплуатации. Он обеспечивает моделирование электронной структуры и расчет различных характеристик наносистем и наноустройств, включая энергию возбужденных состояний, силу осцилляторов электронных переходов, плотность фононных состояний, оптические и фотоэлектрические свойства ансамблей наночастиц, степень усиления или подавления комбинационного рассеяния, флуоресценции, переноса возбуждения, транспортные свойства нанотрубок и пр.

Архитектурно комплекс HPC-NASIS реализован на основе перспективной концепции iPSE [13] как открытая интеллектуальная проблемно-ориентированная среда, объединяющая распределенные вычислительные сервисы различных разработчиков. В рамках концепции осуществляется интеллектуальная поддержка пользователя на всех технологических этапах выполнения расчетов — от подготовки исходных данных до анализа и обобщения полученных результатов с использованием разнообразных средств человеко-компьютерного взаимодействия. Заложенные в ходе разработки комплекса решения позволяют гибко переносить и адаптировать созданные технологии в другие предметные области.

Работа выполнена при частичной поддержке ФЦП „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007—2012 гг.“,

проект „Создание высокопроизводительного программного комплекса для квантово-механических расчетов и моделирования наноразмерных структур и комплексов“ и ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2007—2013 гг.“, проект „Интеллектуальные технологии распределенных вычислений для моделирования сложных систем“.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sloot P. M. A., Frenkel D., Vorst H. A. Van der et al. Computational e-Science: Studying complex systems in silico. A National Coordinated Initiative. White Paper, February 2007. [Electronic resource]: <<http://www.science.uva.nl/research/scs/papers/archive/Sloot2007a.pdf>>.
2. Gallopoulos S., Houstis E., Rice J. Computer as Thinker/Doer: Problem-Solving Environments for Computational Science // IEEE Computational Science and Engineering. 1994.
3. Cohen S. Ontology and Taxonomy of Services in a Service-Oriented Architecture // The Architecture Journal. 2007. N 11. P. 30—35.
4. Foster I. What is the Grid. A three point checklist. GridToday / July 22, 2002. [Electronic resource]: <<http://www.gridtoday.com/02/0722/100136.html>>.
5. Дунаев А. В., Ларченко А. В., Бухановский А. В. Инструментальная оболочка поддержки принятия решений разработчика высокопроизводительных приложений в Грид // Науч.-технич. ведомости СПбГПУ. 2008. № 5. С. 98—104.
6. Parastadis S. A Platform for All That We Know: Creating a Knowledge-Driven Research Infrastructure // The Fourth Paradigm. Data-Intensive Scientific Discovery. 2009. P. 165—172.
7. Дунаев А. В., Ларченко А. В., Бухановский А. В. Инструментальная оболочка проектирования высокопроизводительных приложений в Грид. Ч. III. Приобретение и формализация знаний // Науч.-технич. вестн. СПбГУ ИТМО. 2008. Вып. 54. С. 46—55.
8. Васильев В. Н. и др. Высокопроизводительный программный комплекс моделирования атомно-молекулярных наноразмерных систем // Там же. С. 3—12.
9. Ковальчук С. В., Бухановский А. В. Параллельная производительность стохастических алгоритмов // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 12. С. 7—14.
10. Ковальчук С. В. и др. Особенности проектирования высокопроизводительных программных комплексов для моделирования сложных систем // Информационно-управляющие системы. 2008. № 3. С. 10—18.
11. Каляев И. А., Левин И. И., Семерников Е. А., Шмойлов В. И. Реконфигурируемые мультимасштабные вычислительные структуры. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2008. 393 с.
12. Васильев В. Н. и др. Ядро высокопроизводительного программного комплекса для квантово-механических расчетов и моделирования наноразмерных атомно-молекулярных систем и комплексов “HPC-NASIS”. Свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 20010610161 от 11.01.2010 г.
13. Бухановский А. В., Ковальчук С. В., Марьин С. В. Интеллектуальные высокопроизводительные программные комплексы моделирования сложных систем: концепция, архитектура и примеры реализации // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 10. С. 5—24.

Сведения об авторах

- 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
- Владимир Николаевич Васильев** — д-р техн. наук, профессор; ректор Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерных технологий; зав. кафедрой

Рекомендована кафедрой
компьютерных технологий

Поступила в редакцию
15.01.10 г.

Е. А. ВОРОБЬЕВА, И. П. ГУРОВ, М. В. ПЕТЕРСОН

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ С ПОВЫШЕННЫМ БЫСТРОДЕЙСТВИЕМ

Рассмотрен метод асинхронной амплитудной демодуляции сигналов в оптической когерентной томографии (ОКТ), основанный на выполнении последовательных операций квадратичного преобразования информативной составляющей интерферометрического сигнала и фильтрации нижних частот. Исследована погрешность восстановления огибающей сигнала при использовании субдискретизации с прореживанием последовательности отсчетов сигнала в условиях влияния аддитивного шума. Представлены результаты восстановления огибающей при использовании фильтра нижних частот Баттерворта для выделения полезной составляющей сигналов в ОКТ.

Ключевые слова: оптическая когерентная томография, субдискретизация сигналов, амплитудная демодуляция.

Введение. Исследования внутренней структуры различных объектов имеют важное значение для биомедицины, материаловедения и высоких технологий. Одним из перспективных методов неразрушающей диагностики микроструктуры объектов является оптическая когерентная томография (ОКТ) [1—8], обеспечивающая высокую разрешающую способность при восстановлении томографических изображений, представляющих трехмерную внутреннюю микроструктуру неоднородных объектов и сред на глубине проникновения оптического излучения. В обзорных статьях [6—8] подробно описаны основные принципы ОКТ и результаты, достигнутые в последние годы.

Одно из важных направлений исследований и разработок — создание систем ОКТ с повышенным быстродействием. Ввиду высокой разрешающей способности ОКТ необходимо обрабатывать большие объемы информации. В последние годы ведутся разработки систем ОКТ, обеспечивающих в режиме реального времени наблюдение и анализ трехмерных микрообъектов и неоднородных сред, изменяющих свое состояние, что особенно актуально для биомедицинских исследований [7].

Известно (см., например, [9, 10]), что наиболее высокую разрешающую способность обеспечивают широкополосные системы ОКТ корреляционного типа. Однако быстродействие таких систем ограничивается характеристиками электронного тракта регистрации и обработки сигналов ОКТ. Повышение быстродействия достигается при использовании метода субдискретизации применительно к узкополосным сигналам [11], когда значение частоты дискретизации ОКТ-сигналов устанавливается ниже предела Найквиста для частоты интерференционных полос [12]. При этом возможно значительно уменьшить количество видеокадров,

регистрируемых в широкополосных системах ОКТ и соответственно снизить требования к системе регистрации и обработки информации.

В работе [13] детально проанализирован метод субдискретизации применительно к классической интерферометрии и продемонстрирована возможность превышения предела Найквиста за счет использования предварительной информации о свойствах интерферометрических сигналов. В работах [12, 14] показано, что метод субдискретизации при определенных условиях позволяет минимизировать погрешность обработки сигналов ОКТ до единиц процентов при выигрыше в быстродействии примерно на порядок.

Метод субдискретизации сигналов ОКТ, предложенный и исследованный в работах [12, 14], включает операцию фильтрации параметров сигналов ОКТ нелинейным фильтром Калмана, что обеспечивает возможность обработки сигналов с изменяющимися значениями несущей частоты интерференционных полос, обусловленными влиянием внешних дестабилизирующих факторов. Однако этот метод относится к классу методов синхронной демодуляции, поэтому при значительных изменениях или непредсказуемых скачках несущей частоты полос в ряде случаев не обеспечивается необходимая устойчивость обработки сигналов ОКТ.

Для решения поставленной задачи можно совместно использовать метод субдискретизации и асинхронной амплитудной демодуляции сигналов ОКТ. Проведенные исследования показали [15], что предпочтительным вариантом асинхронной амплитудной демодуляции является выполнение последовательных операций устранения фоновой составляющей сигнала ОКТ, возведения в квадрат информативной составляющей интерферометрического сигнала и фильтрации нижних частот.

В настоящей работе получены оценки выигрыша в быстродействии при использовании метода субдискретизации с прореживанием последовательности отсчетов и представлены результаты исследований точности метода [15] в условиях влияния помех.

Алгоритм обработки ОКТ-сигналов. Интерферометрический сигнал малой когерентности в ОКТ, сформированный в фиксированной точке (x, y) плоскости наблюдения, при изменении координаты z по глубине исследуемой среды после удаления фоновой составляющей можно представить в виде

$$s(z) = A(z) \cos \Phi(z), \quad (1)$$

где $A(z)$ и $\Phi(z)$ — огибающая и фаза полос соответственно. Огибающая полос содержит полезную информацию о степени отражения измерительной волны по глубине исследуемой среды. Фаза полос $\Phi(z)$ выражается как

$$\Phi(z) = 2\pi f_0 z + \varphi + \delta\varphi(z), \quad (2)$$

где f_0 — несущая частота полос, φ — начальная фаза в точке $z = 0$, которую можно исключить без ограничения общности рассмотрения, $\delta\varphi(z)$ учитывает случайные изменения фазы, обусловленные, в частности, влиянием внешних факторов. Полезная составляющая сигнала (1) искажается также влиянием аддитивного шума наблюдения $n(z)$, при этом

$$s(z) = A(z) \cos \Phi(z) + n(z). \quad (3)$$

Необходимо получить оценки величины $A(z)$ при обработке сигнала $s(z)$ в (3) с высокой разрешающей способностью, помехоустойчивостью и быстродействием.

Схема алгоритма обработки сигнала [15] приведена на рис. 1.

Сигнал $s(z)$ обрабатывается в полосно-пропускающем фильтре для устранения фоновой составляющей и высокочастотного шума. Полоса пропускания фильтра устанавливается достаточно широкой для передачи огибающей интерференционных полос с требуемой разрешающей способностью с учетом возможных отклонений несущей частоты и фазы полос. Полезная составляющая интерферометрического сигнала (1) возводится в квадрат:

$$s^2(z) = \frac{1}{2} A^2(z) [1 + \cos 2\Phi(z)] = \frac{1}{2} A^2(z) + \frac{1}{2} A^2(z) \cos 2\Phi(z). \quad (4)$$

Второе слагаемое в (4) с учетом (2) изменяется быстрее по сравнению с первым и устраняется при помощи фильтра нижних частот с частотой среза, соответствующей максимальной частоте в спектре квадрата огибающей. Извлечение корня квадратного из оставшегося первого слагаемого дает оценку огибающей интерференционных полос.

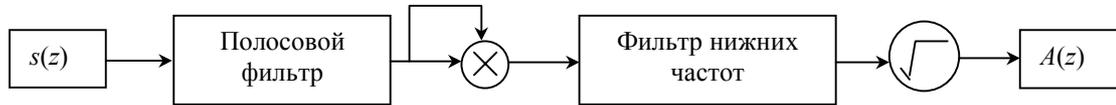


Рис. 1

Преимущество алгоритма (см. рис. 1) состоит в его простоте и отсутствии строгих априорных ограничений на значения параметров интерферометрического сигнала. Алгоритм обеспечивает получение точных результатов, если значение несущей частоты полос f_0 (с учетом случайных отклонений фазы) является более высоким по сравнению с удвоенным значением частоты Найквиста $f_N = 2f_{\max}$, т.е. $f_0 > 4f_{\max}$, для максимальной частоты f_{\max} в спектре огибающей.

При использовании рассматриваемого метода необходимо учитывать свойства алгоритма обработки ОКТ-сигналов при различных соотношениях несущей частоты интерферометрического сигнала и частоты дискретизации, включая область субдискретизации по отношению к критерию Найквиста.

Характеристики спектра при субдискретизации сигналов. При дискретизации сигнала (1) получают последовательность отсчетов

$$s(k) = A(k) \cos \Phi(k), \quad (5)$$

где номер отсчета k соответствует дискретному значению координаты $z_k = k\Delta z$, $k = 0, 1, \dots, K$, Δz — шаг дискретизации.

Рассмотрение процесса взятия отсчетов непрерывного сигнала зависит от способа определения этой операции. В теории дискретизации непрерывных сигналов обычно предполагается (см., например, [11, 16]), что процесс дискретизации состоит в умножении непрерывного сигнала на решетку дельта-функций с шагом Δz . При этом, согласно известной теореме о свертке, спектр дискретизованного сигнала представляет собой набор спектров исходного непрерывного сигнала, разнесенных по частоте на величину $f_s = 1/\Delta z$.

В работе [12] было отмечено, что формирование спектральных порядков при дискретизации имеет место, если последовательность отсчетов априори включает дискретные отсчеты с нулевыми значениями между дельта-функциями. Если субдискретизация проводится с пропуском всех прореженных отсчетов, то наблюдается перенос спектра исходного сигнала на более низкую несущую частоту без формирования других спектральных порядков. Указанное свойство объясняется тем, что при пропуске участков непрерывного сигнала между точками дискретизации масштаб времени задается частотой дискретизации, но не исходным сигналом.

На рис. 2, а, б приведен пример ОКТ-сигнала в виде последовательности отсчетов $s(k)$ и показан модуль спектра сигнала. Сигнал содержит шесть отсчетов на периоде несущей частоты, нормированное значение шага дискретизации Δz принято равным единице, при этом значение несущей частоты примерно 0,17. Получаемые значения модуля спектра определяются известным равенством Парсевала (правилом сохранения энергии) для дискретного представления спектра. При моделировании к полезной составляющей сигнала (см. рис. 2, а) добавлен аддитивный шум $n(k)$ с центрированным нормальным распределением и дисперсией

$\sigma_n^2 = 0,01$, что соответствует среднему квадратическому значению (СКО) шума примерно 3 % от максимального значения огибающей сигнала.

При прореживании последовательности отсчетов сигнала (взятии каждого пятого отсчета в рассматриваемом примере) и заполнении прореживаемых отсчетов нулевыми значениями (см. рис. 2, в) спектр содержит спектральные порядки (см. рис. 2, з). В случае взятия каждого пятого отсчета и пропуска других (рис. 2, д) спектр сигнала (рис. 2, е) имеет вид, подобный спектру исходного сигнала (рис. 2, б).

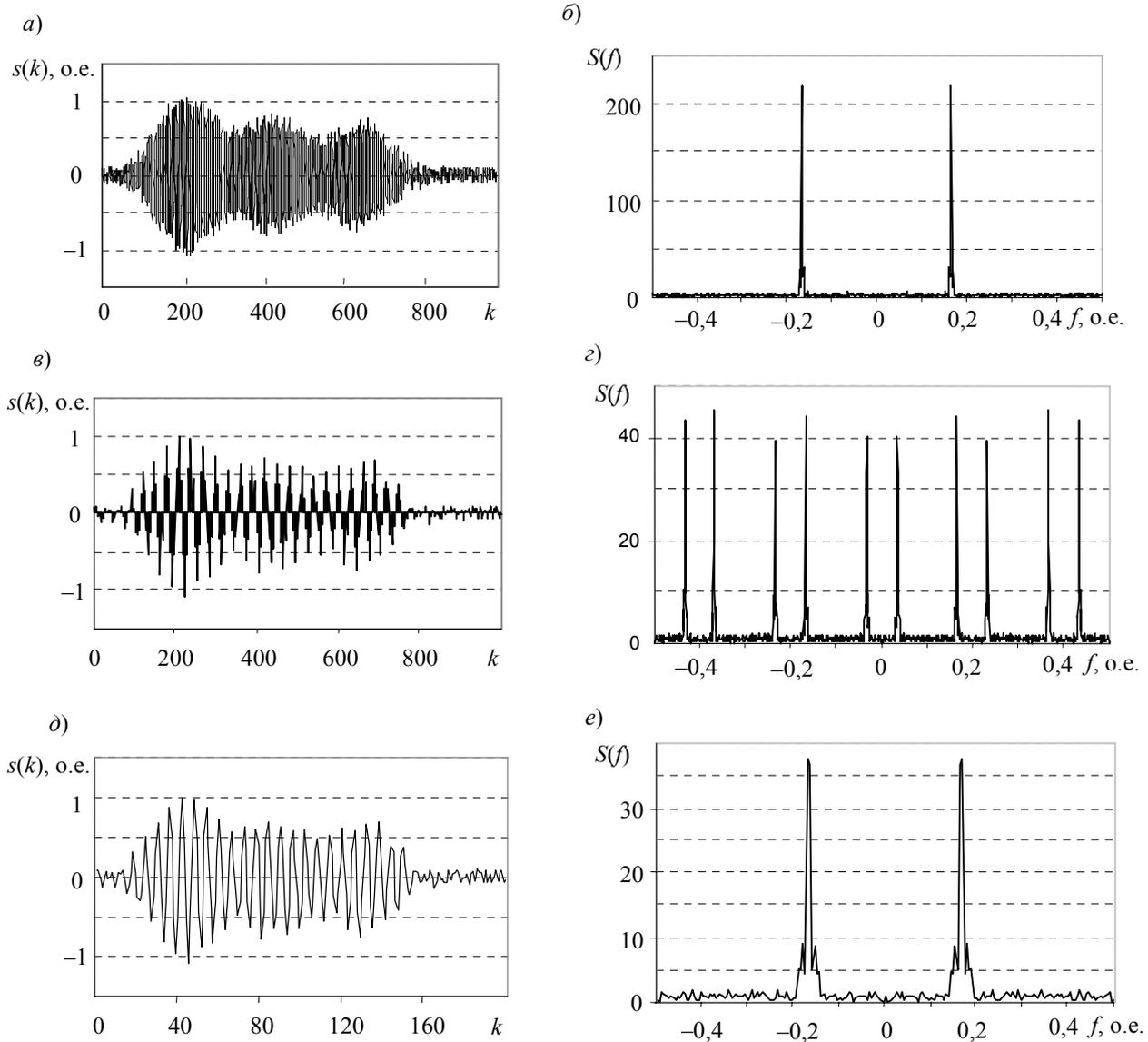


Рис. 2

Получаемое при субдискретизации новое значение несущей частоты f'_0 (см. рис. 2, з) определяется известным условием наложения (маскирования) частот (см., например, [17]), которое имеет вид

$$f'_0 = 2mf_N \pm f_0, \quad (6)$$

где $m = 1, 2, \dots$

Обратимся к рис. 2, в котором $f_0 = 0,17$, $f_s = 0,2$ и $f_N = 0,1$. При субдискретизации (рис. 2, з) при $m = 1$ наблюдаются значения частоты 0,03 и 0,37; 0,23 и 0,43 (третий и пятый пик от нуля) соответствуют значениям $m = 2$ и 3, т.е. $2 \cdot 2f_N - f_0 = 2 \cdot 2 \cdot 0,1 - 0,17 = 0,23$; $2 \cdot 3f_N - f_0 = 2 \cdot 3 \cdot 0,1 - 0,17 = 0,43$. Отметим, что при введенных выше допущениях значения час-

тоты выше 0,5 в спектре не имеют смысла, поскольку понятие (априори неизвестной) частоты не определено при взятии менее двух отсчетов на периоде.

Рассмотрим частотные соотношения при субдискретизации более подробно. Введем операцию дискретизации с использованием гипотетического опорного сигнала

$$s_r(z) = \cos(2\pi f_s z) \quad (7)$$

с частотой f_s . Найдем произведение полезной составляющей сигнала (1) и опорного (7):

$$\tilde{s}(z) = A(z) \cos(2\pi f_0 z) \cos(2\pi f_s z) = \frac{1}{2} A(z) \{ \cos[2\pi(f_0 + f_s)z] + \cos[2\pi(f_0 - f_s)z] \}. \quad (8)$$

Пусть взятие отсчетов осуществляется в точках $z_k = k\Delta z$, соответствующих максимумам опорного сигнала, т.е. $2\pi f_s z_k = 2\pi k$, откуда получаем $z_k = k / f_s$. При этом из (8) получим дискретную последовательность отсчетов в форме

$$\begin{aligned} \tilde{s}(k) &= \frac{1}{2} A(k) \{ \cos[2\pi(f_0 + f_s)k / f_s] + \cos[2\pi(f_0 - f_s)k / f_s] \} = \\ &= \frac{1}{2} A(k) \{ \cos[2\pi(f_0 / f_s)k + 2\pi k] + \cos[2\pi(f_0 / f_s)k - 2\pi k] \} = \\ &= A(k) \cos[2\pi(f_0 / f_s)k]. \end{aligned} \quad (9)$$

Режиму субдискретизации соответствует отношение $f_0 / f_s > 0,5$, когда на период несущей частоты f_0 в (2) приходится менее двух отсчетов. В общем случае при субдискретизации $f_0 / f_N = m + \varepsilon$, $f_N = f_s / 2$, $m \geq 1$ — целое число, ε — дробная часть, $0 \leq \varepsilon < 1$. При этом с учетом периодичности и четности функции косинуса значения $\tilde{s}(k)$ в (9) одинаковы для частот f_0 и $2mf_N \pm f_0$ в соответствии с соотношением (6).

Проведенное рассмотрение спектров при субдискретизации показывает, что во избежание проявления эффекта наложения частот предпочтительно использовать методику прореживания с пропуском промежуточных отсчетов (рис. 2, *д, е*), при которой снижается общее число отсчетов в выборке. Поскольку значение шага дискретизации Δz сигнала (см. рис. 2, *д*), как и ранее, принято равным единице и при прореживании на каждый период исходного сигнала приходится меньшее число отсчетов (что эквивалентно уменьшению общей длительности реализации сигнала), преобразование спектра сигнала определяется известным свойством масштабирования (подобия) для преобразования Фурье

$$F\{s(\alpha k \Delta z)\} = (1/\alpha) S(f/\alpha), \quad (10)$$

где $F\{\cdot\}$ обозначает операцию преобразования Фурье, $S(f)$ — спектр исходного сигнала, α — постоянная (в рассматриваемом примере $\alpha = 5$). Из (10) следует, что при прореживании происходит уширение спектра, пропорциональное степени прореживания α , что иллюстрируется на рис. 2, *е* (ср. с рис. 2, *б*).

Исследование точности алгоритма обработки при субдискретизации ОКТ-сигналов.

Полученные в результате субдискретизации значения сигнала в рассматриваемом алгоритме возводятся в квадрат, согласно (4). При этом имеет место преобразование спектра, которое иллюстрируется на рис. 3, *б, г* для исходной (рис. 3, *а*) и прореженной (рис. 3, *в*) последовательности соответственно.

Из выражения (4) следует, что полезная информация об огибающей сигнала $A(k)$ в (5) содержится в составляющей спектра (см. рис. 3, *г*) в окрестности нулевой частоты. Для выделения этой составляющей следует использовать фильтр нижних частот с частотой среза, соответствующей максимальной частоте в указанной составляющей спектра. Правильный выбор частоты среза с учетом рассмотренного выше эффекта уширения спектра при субдискретизации позволяет минимизировать погрешности получаемых оценок огибающей.

Из (4) и (10) следует, что частота среза фильтра f_c должна удовлетворять условию

$$f_c = 2\alpha f_{\max}. \quad (11)$$

Кроме того, во избежание наложения составляющих спектра (рис. 3, з) должно быть обеспечено значение несущей частоты интерференционных полос

$$f_0 \geq 4\alpha f_{\max}. \quad (12)$$

Источниками погрешностей оценки огибающей являются наличие второго слагаемого в соотношении (4) и влияние шума $n(z)$ в (3). Заметим, что квадратичное преобразование шума приводит к ненулевому среднему значению, которое не вносит значительных изменений в огибающую при достаточно высоких значениях отношения сигнала к шуму, поэтому в качестве основного источника погрешностей следует оценивать влияние второго слагаемого в (4).

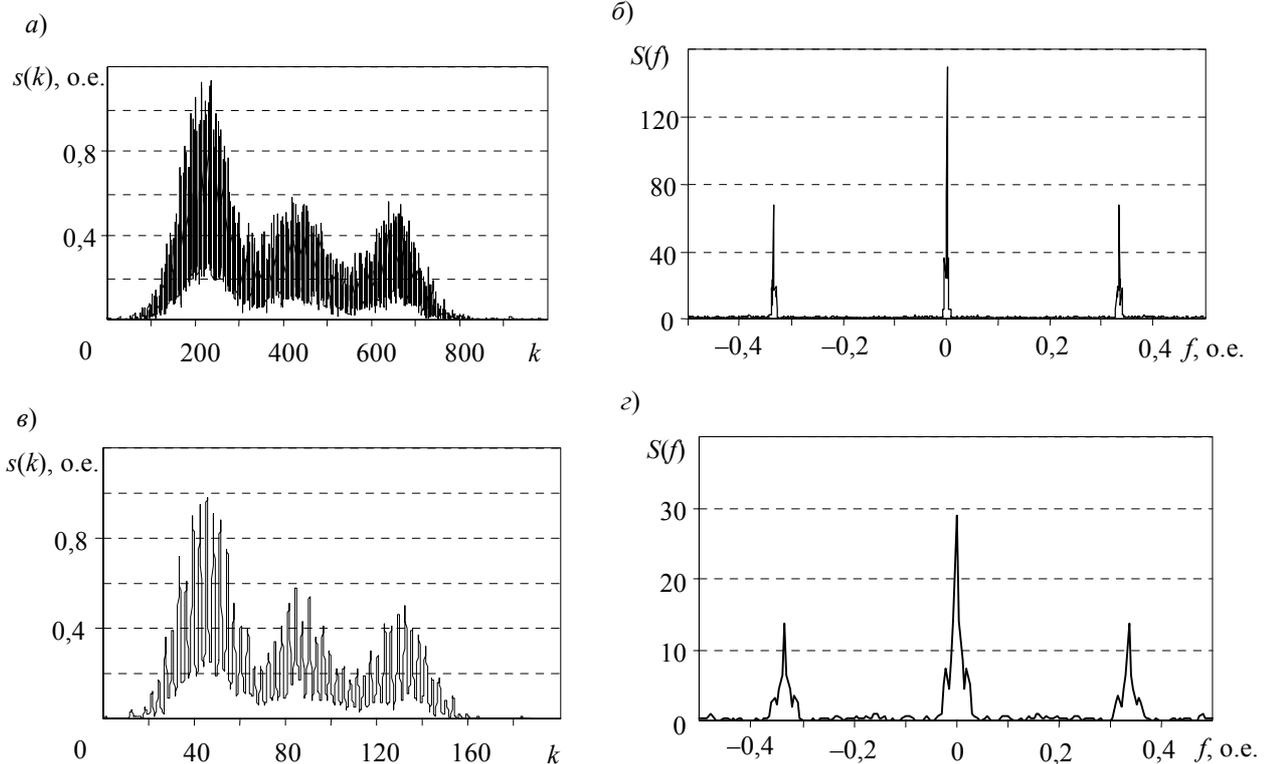


Рис. 3

При рассмотрении удвоенного второго слагаемого в (4) с учетом (2)

$$s_2^2(z) = A^2(z) \cos(4\pi f_0 z + 2\delta\varphi) \quad (13)$$

нетрудно показать, что при флуктуациях фазы с нулевым средним значением $\langle \delta\varphi \rangle = 0$ среднее значение

$$\langle s_2^2 \rangle = A^2(z) \beta \cos 4\pi f_0 z, \quad (14)$$

где

$$\beta = \langle \cos(2\delta\varphi) \rangle. \quad (15)$$

Отметим, что именно средние значения сигналов наблюдаются при формировании томограммы, состоящей из набора огибающих сигналов вида (5).

Известно (см., например, [18]), что при гауссовой плотности вероятности отклонений фазы с дисперсией σ_φ^2 соотношение (15) может быть представлено следующим образом:

$$\beta = \exp(-\sigma_\varphi^2 / 2). \quad (16)$$

Таким образом, с учетом (14) и (16) влияние неинформативной составляющей (13) снижается при увеличении флуктуаций фазы интерференционных полос и способствует помехоустойчивости рассматриваемого алгоритма асинхронной амплитудной демодуляции.

Влияние случайных отклонений частоты δf можно учесть в выражении (13) в форме

$$s_2^2(z) = A^2(z) \cos[4\pi(f_0 + \delta f)z]. \quad (17)$$

Известно (см., например, [19]), что мгновенные значения частоты определяются производной от значений фазы (отклонения фазы в реальной физической ОКТ-системе предполагаются дифференцируемыми), причем в случае гауссовой плотности вероятности отклонений фазы плотность вероятности производной также гауссова, и оба значения плотности вероятности статистически независимы в совпадающие моменты времени. Следовательно, случайные отклонения частоты в среднем снижают влияние неинформативной составляющей (13) аналогично флуктуациям фазы.

Проведенное рассмотрение показывает возможность устранения влияния составляющей (13) при вычислении скользящего среднего с интервалом усреднения $L \approx (2\alpha f_{\max})^{-1}$ подобно тому, как это осуществляется в радиометрии [20]. Однако при значительных отклонениях несущей частоты интерференционных полос в ОКТ возможно частичное наложение составляющих спектра (см. рис. 3, *з*) и невыполнение условия (11), что вызывает возрастание погрешности оценки огибающей интерферометрического сигнала. Поэтому целесообразно использовать фильтр нижних частот с более высокой частотной селективностью по сравнению со скользящим средним.

В качестве фильтра нижних частот для выделения полезной составляющей спектра (рис. 3, *з*) использовался фильтр Баттерворта с передаточной характеристикой вида

$$|H(f)|^2 = [1 + (f/f_c)^{2M}]^{-1}, \quad (18)$$

где M — порядок фильтра.

На рис. 4 представлен пример восстановления огибающей ОКТ-сигнала (см. рис. 2, *а*) с использованием рассматриваемого метода с прореживанием отсчетов ($\alpha=5$) при частоте среза фильтра, соответствующей условию (11), и величине отношения СКО шума к максимальному значению огибающей сигнала 4 %. Сравнение восстановленной огибающей ОКТ-сигнала (сплошная кривая) и исходной огибающей (пунктир) показывает, что метод характеризуется высокой точностью.

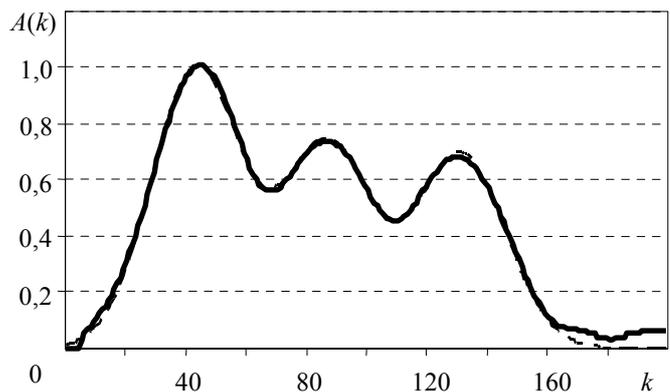


Рис. 4

Исследования точности получаемых результатов проводились при моделировании ОКТ-сигналов с получением оценок величины СКО (δA) полученных значений огибающей $\hat{A}(k)$ от истинных значений в виде

$$\delta A = \left[\frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K (\hat{A}(k) - A(k))^2 \right]^{1/2}. \quad (19)$$

На рис. 5 показаны кривые зависимости погрешности восстановления огибающей от выбранного значения частоты среза фильтра нижних частот при степени прореживания $\alpha=5$. Вычисления проводились при усреднении по ансамблю из 100 реализаций ОКТ-сигнала при

различных уровнях шума (сплошная кривая — сигнал без шума; пунктир — к сигналу добавлен шум с СКО 4 %; штрихпунктир — к сигналу добавлен шум с СКО 6 %).

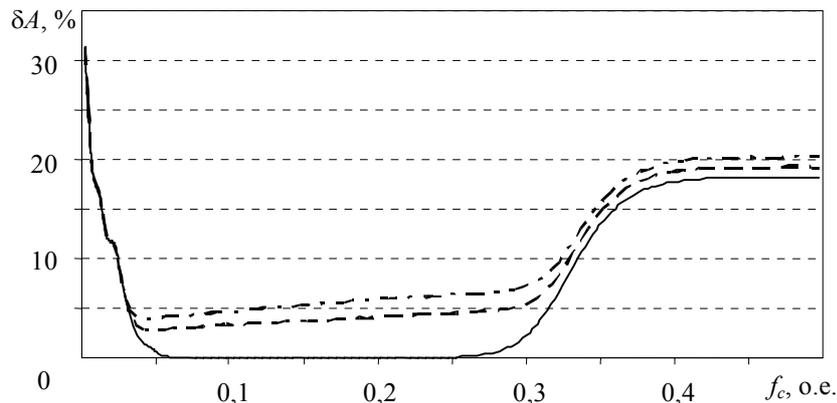


Рис. 5

Из рисунка видно, что при малых значениях частоты среза фильтра нижних частот имеют место существенные погрешности ввиду ограничения ширины спектра полезной составляющей в окрестности нулевой частоты. При увеличении частоты среза погрешность снижается до пренебрежимо малых значений при отсутствии влияния шума. При дальнейшем расширении полосы пропускания фильтра погрешность вновь возрастает за счет влияния составляющей (13). Следует отметить, что увеличение уровня шума приводит к заметному возрастанию погрешности: ввиду уширения спектра полезной составляющей при прореживании (см. рис. 3, з) пропорционально увеличивается остаточная дисперсия шума в полезной полосе частот.

Заключение. Проведенные исследования точности метода асинхронной амплитудной демодуляции сигналов в системах ОКТ, основанного на прореживании последовательности отсчетов сигнала, квадратичном преобразовании информативной составляющей и фильтрации нижних частот, показывают возможность значительного повышения быстродействия получения оценок огибающей сигналов при умеренном возрастании погрешности (до нескольких процентов).

При использовании метода с прореживанием последовательности отсчетов возможен выбор частоты дискретизации, существенно более низкой по сравнению со значением, устанавливаемым критерием Найквиста по отношению к частоте интерференционных полос. Однако при этом следует учитывать эффект уширения спектра огибающей сигнала и, как следствие, возрастание влияния остаточной составляющей дисперсии шума.

Рассмотренный метод прост в реализации и характеризуется высокой помехоустойчивостью по отношению к случайным отклонениям фазы и частоты интерференционных полос при умеренных требованиях к точности задаваемого значения частоты среза фильтра. Метод представляет интерес для использования в системах ОКТ в режиме экспресс-контроля исследуемых объектов при повышенном быстродействии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Huang D., Swanson E. A., Lin C. P. et al. Optical coherence tomography // Science. 1991. Vol. 254. Iss. 5035. P. 1178—1181.
2. Fercher A. F. Optical coherence tomography // J. Biomed. Opt. 1996. Vol. 1. P. 157—173.
3. Schmitt J. M. Optical coherence tomography: a review // IEEE J. Select Topics Quant. Electron. 1999. Vol. 5. P. 1205—1215.
4. Optical low-coherence reflectometry and tomography / Ed. by B. R. Masters // SPIE Milestone Series. 2001. Vol. MS165.

5. Handbook of optical coherence tomography / Ed. by *B. E. Bouma* and *G. J. Tearney*. NY: Marcel Dekker Inc., 2002.
6. *Fercher A. F., Drexler W., Hitzenberger C. K., Lasser T.* Optical coherence tomography — principles and applications // *Rep. Prog. Phys.* 2003. Vol. 66. P. 239—303.
7. *Гуров И. П.* Оптическая когерентная томография: принципы, проблемы и перспективы // *Проблемы когерентной и нелинейной оптики*. СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. С. 6—30.
8. *Tomlins P. H., Wang R. K.* Theory, developments and applications of optical coherence tomography // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2005. Vol. 38. P. 2519—2535.
9. *Dubois A., Grieve K., Moneron G., Lecaque R., Vabre L., Voccaro C.* Ultrahigh-resolution full-field optical coherence tomography // *Appl. Opt.* 2004. Vol. 43. P. 2874—2883.
10. *Васильев В. Н., Гуров И. П.* Сравнительный анализ методов оптической когерентной томографии // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2007. Т. 50, № 7. С. 30—40.
11. *Макс Ж.* Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. М.: Мир, 1983. С. 86—89.
12. *Васильев В. Н., Гуров И. П., Захаров А. С., Таратин М. А.* Высокопроизводительная обработка сигналов с узкополосным спектром на основе метода субдискретизации и нелинейной фильтрации Калмана // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2006. Т. 49, № 8. С. 47—54.
13. *Greivenkamp J. E.* Sub-Nyquist interferometry // *Appl. Opt.* 1987. Vol. 26. P. 5245—5258.
14. *Gurov I., Taratin M., Zakharov A.* High-speed signal evaluation in optical coherence tomography based on sub-Nyquist sampling and Kalman filtering method // *AIP Conf. Proc.* 2006. Vol. 860. P. 146—150.
15. *Alarousu E., Gurov I., Kalinina N., Karpets A., Margariants N., Myllylä R., Pyykäri T., Vorobeva E.* Full-field high-resolving optical coherence tomography system for evaluating paper materials // *Advanced Laser Technologies* 2007. Proc. SPIE. 2008. Vol. 7022. P. 7022.
16. *Цикин И. А.* Дискретно-аналоговая обработка сигналов. М.: Радио и связь, 1982. С. 85—95.
17. *Бендат Дж., Пирсол А.* Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1974. С. 261—264.
18. *Васильев В. Н., Гуров И. П.* Компьютерная обработка сигналов в приложении к интерферометрическим системам. СПб: БХВ Санкт-Петербург, 1998. С. 83.
19. *Ахманов С. А., Дьяков Ю. Е., Чиркин А. С.* Введение в статистическую радиофизику и оптику. М.: Наука, 1981. С. 122.
20. *Тихонов В. И.* Статистическая радиотехника. М.: Радио и связь, 1982. С. 358—360.

Сведения об авторах

- Елена Александровна Воробьева** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной фотоники; младший науч. сотрудник
- Игорь Петрович Гуров** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной фотоники; E-mail: gurov@mail.ifmo.ru
- Максим Владимирович Петерсон** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной фотоники

Рекомендована кафедрой
компьютерной фотоники

Поступила в редакцию
25.12.09 г.

Н. Н. АРЕФЬЕВА, И. Ю. ДЕНИСЮК

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОИМПРИНТ-ЛИТОГРАФИИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАНО- И МИКРОЭЛЕМЕНТОВ ФОТОНИКИ

Исследованы способы получения полимерных микрооптических элементов с помощью контактного копирования с использованием гибкого штампа. Экспериментально оценено влияние усадок ультрафиолетовой отверждаемой композиции на точность копии. На примере копирования дифракционной решетки 1800 лин/мм экспериментально подтверждена возможность копирования наноразмерных структур на существующем оборудовании.

Ключевые слова: наноимпринт, контактная литография, наноструктуры, фотополимер, силоксан.

Введение. Метод оптической проекционной ультрафиолетовой литографии успешно используется при получении микросхем и микропроцессоров. Возможности метода ограничены дифракционным пределом разрешения проекционных оптических систем. Разрешение, полученное фирмой Intel, составляет 45 нм и достигается применением иммерсионной литографии на длине волны 193 нм с использованием объективов с апертурой, близкой к 18°.

В связи с этим для достижения нанометрового разрешения более простыми методами на первый план выходят контактные методы литографии, обеспечивающие в перспективе возможность получения элементов размером вплоть до 1—1,5 нм [1]. Используемый в настоящей работе метод наноимпринта основан на двукратном копировании оригинала с получением промежуточной „зеркальной“ копии на гибком штампе и второй копии — на УФ-акрилате [2]. На настоящее время наноимпринт является наиболее высокоразрешающим методом литографии, он позволяет получать структуры размером до 10 нм, причем в одном процессе можно изготовить структуры размером от десяти нанометров до сотен микрометров, имеющих вертикальные поверхности и достаточно большую относительную высоту [1]. Фактически это „прорыв“ в нанолитографии благодаря простоте реализации метода и его возможностей по тиражированию наноразмерных структур.

В качестве мастер-штампа (оригинала) для копирования была использована дифракционная решетка — эшелета (изготовленная в ГОИ им. С. И. Вавилова), имеющая частоту до 1800 лин/мм. При этом две перекрещивающиеся решетки имитировали наноразмерные квадратные элементы 300×300 нм, т.е. дифракционная решетка служила только объектом для исследования возможностей метода наноимпринта (копирование не являлось целью настоящей работы).

Материалы и условия эксперимента. Для изготовления гибкого штампа „Силастик Т-4“ фирмы „Пента“ (Санкт-Петербург) использовался материал силоксан. Фотополимеризующаяся мономерная композиция представляла собой смесь из трех мономеров фирмы Aldrich:

Aldrich № 40,833-6 (PEA), № 552348 (CEA); № 41,116-7 (2-Bis), инициатором фотополимеризации служил Aldrich № 19,011-8 в концентрации 0,1 вес. %.

Реализация метода начинается с изготовления гибкого штампа с имеющегося оригинала, выполненного на металле или фоторезисте. В качестве полимера для изготовления штампа использовался „Силастик Т-4“, представляющий собой вязкую текучую прозрачную композицию на основе силиконового каучука, способную переходить в резиноподобное состояние после смешивания с отвердителем. Отверждение происходит при комнатной температуре в течение 24 ч. Оригинал копируемой структуры заливается силоксаном. Как показали проведенные ранее эксперименты, для передачи наноструктур требуется обезгаживание силастика, залитого на матрицу. В отсутствие обезгаживания в силастике остаются микропузыри воздуха, в результате мелкие канавки и острые углы нанометрового размера не прорабатываются. После вакуумирования штамп вулканизируется на воздухе в течение 18—24 ч при комнатной температуре, затем отделяется от образца. Отделение происходит достаточно просто, поскольку силастик не имеет адгезии к подложкам, он гибок и прочен.

УФ полимеризуемые композиции. УФ полимеризуемая (УФ отверждаемая) композиция была подобрана исходя из требуемых физико-химических свойств:

- 1) СЕА (карбоксиэтиловый акрилат) обеспечивает адгезию к стеклу за счет химических связей его кислотных групп с ОН-группами на поверхности стекла;
- 2) 2-Bis (бисфенола глицеролат) обеспечивает поперечную сшивку полимера;
- 3) жидкий компонент РЕА (этиленгликольфениловый акрилат) введен для низкой вязкости неполимеризованного состава;
- 4) диметоксифенилацетофенон использован в качестве инициатора.

Преимуществами УФ полимеризуемых мономерных композиций являются: быстрое отверждение, обеспечивающее высокую производительность, отсутствие растворителей и выделяющихся летучих органических соединений [3].

Известно, что УФ отверждаемые акрилаты ингибируются кислородом воздуха и на воздухе реакции полимеризации не проходит [4]. Поэтому вакуумирование позволяет процессу фотополимеризации начаться.

Штамп из силастика оптически прозрачен на длине волны более 280 нм, поэтому полимеризация УФ-излучением выполняется при экспонировании через гибкий штамп. Реакцию полимеризации обеспечивает фотоинициатор, входящий в состав акриловой композиции, который активизируется под действием энергии фотонов и, расщепляясь, вступает в химическую реакцию с олигомерами и мономерами, сшивая их в длинные трехмерные цепочки.

Метод наноимпринта. Рассмотрим схему реализации метода наноимпринта на примере копирования дифракционной решетки.

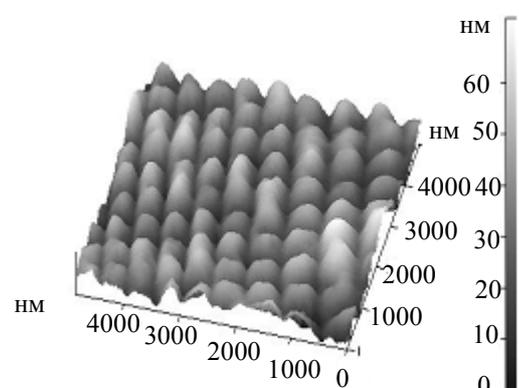
1. Жидкий силастик с введенным инициатором наносится на копируемый образец. Далее штамп полимеризуется и отделяется от образца.
2. Жидкий УФ отверждаемый полимер наносится на подложку и прижимается штампом, акрилат растекается, заполняя мельчайшие структуры поверхности в штампе.
3. Воздействуя на структуру УФ-излучением через штамп, проводят фотополимеризацию акрилата.
4. После фотополимеризации акрилат становится твердым и сохраняет форму, штамп легко отделяется от копии и готов к повторному использованию.

Для экспериментальной реализации метода была разработана установка, обеспечивающая откачку до форвакуума и проведение процесса в среде аргона, что позволяет выполнить все необходимые условия для реализации процесса наноимпринта [5, 6].

С использованием данного метода было выполнено копирование полимерной решетки микропризм и эшелеты с частотой нарезки 1800 лин/мм.

Подробнее рассмотрим процесс копирования эшелеты 1800 лин/мм, представляющей собой две решетки, пересекающиеся под углом 90° с частотой 1800 лин/мм. Следовательно, структура состоит из элементов размером 300×300 нм.

Поверхность шаблона предварительно очищается, далее на оригинал наносится силстик и изготавливается штамп. Под микроскопом видно, что силосан полностью затекает во



все мелкие элементы оригинала, и форма получаемого штампа передается с хорошей точностью, что подтверждается полученными копиями дифракционной решетки.

На рисунке приведено изображение поверхности копии, полученное с помощью атомно-силового микроскопа. При анализе данного изображения необходимо учитывать как возможные неточности атомно-силового микроскопа при сканировании неровной поверхности, так и то, что при изготовлении эшелет с высокой частотой происходит „заваливание“ зубьев за счет выдавливания материала. Фотография показывает, что копия является эшелетой с ориентированным зубом, так же как и оригинал. Следовательно, данный метод пригоден для копирования нанометровых структур.

Также с помощью вышеописанной технологии были получены копии решеток микропризм (IDF II 20, BEF II 90/24, TRAF II) с различными параметрами пленок (фирма 3М, США). В качестве оригинала использовались тонкопленочные структуры на основе акриловой композиции. В качестве подложки для копии использовался лавсан, а сама копия получена на основе акриловой композиции, описанной выше. Каждая из пленок отклоняет свет на определенный угол, таким образом, измерив и сравнив углы отклонения, можно оценить данную технологию.

Результаты измерений углов отклонений приведены в таблице.

| Образец | TRAF II | | BEF II 90/24 | | IDF II 20 | |
|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|
| | $\text{tg}\alpha$ | α | $\text{tg}\alpha$ | α | $\text{tg}\alpha$ | α |
| Оригинал | 121/150=0,807 | 38°54' | 80/150=0,533 | 28°6' | 52/150=0,347 | 19°6' |
| Копия | 116/150=0,773 | 37°42' | 78/150=0,52 | 27°30' | 50/150=0,333 | 18°24' |

Погрешность при копировании ($36'$ — $1^\circ 12'$), вероятно, вызвана усадкой полимера. Действительно, УФ отверждаемые композиции позволяют гибко варьировать их свойства путем простой комбинации акриловых мономеров в необходимом соотношении. Это, несомненно, является их огромным преимуществом, позволяющим как плавно изменять показатель преломления в широких пределах (1,5—1,62), так и задавать необходимые реологические и механические свойства композиции. С другой стороны, изменение соотношения компонентов приводит к изменению таких параметров, как усадка при УФ-отверждении, что необходимо учитывать при разработке технологии создания оптических элементов на основе этих новых материалов [3].

Таким образом, необходимо проведение дальнейших экспериментов для определения соотношения компонентов акриловой композиции с целью уменьшения усадки, а следовательно и погрешности метода.

Выводы. С использованием метода наноимпринта было выполнено копирование решеток микропризм и дифракционной решетки (эшелеты) с частотой нарезки 1800 лин/мм. Копирование эшелеты 1800 лин/мм подтверждает возможность использования метода для нанометровых структур. По измерению углов отклонения решеток микропризм оценено влияние усадок УФ отверждаемой композиции на качество копии. Таким образом, экспериментальная реализация метода показала его пригодность для формирования микро- и нано-

элементов фотоники с высокой точностью при возможности их массового тиражирования. Можно отметить, что для большинства задач по созданию наноструктур наноимпринт является технологией, обеспечивающей высокое качество и гибкую адаптацию к процессу при малых вложениях и простоте реализации.

Работа выполнена при поддержке гранта Рособразования РПН 2.1.1.3937.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Resnicka D. J., Sreenivasan S. V.* Step and flash imprint lithography // *Materials Today*. 2005. February. P. 34—42.
2. *Otto M., Bender M.* Reproducibility and homogeneity in step and repeat UV-nanoimprint lithography // *Microelectronic Engineering*. 2004. N 73—74. P. 152—156
3. *Смирнова Т. В., Бурункова Ю. Э., Денисюк И. Ю.* Измерение усадок УФ-отверждаемых композиций на основе акрилатов и диакрилатов // *Оптич. журн.* 2006. № 5. С. 57—61.
4. *Andrejewska E.* Photopolymerization kinetics of multifunctional monomers // *Progress in polymer science*. 2001. N 26. P. 605—665.
5. *Gates D.* Nanofabrication with molds and stamps // *Materials Today*. 2005. February. P. 44—49.
6. *Sotomayor Torres C.M., Zankovych S.* Nanoimprint lithography: an alternative nanofabrication approach // *Materials Science and Engineering*. 2003. N 23. P. 23—31.

Сведения об авторах

- Наталья Николаевна Арефьева** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптики квантово-размерных систем; младший науч. сотрудник; E-mail: natali-arefeva@mail.ru
- Игорь Юрьевич Денисюк** — д-р физ.-мат. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптики квантово-размерных систем; зав. кафедрой; E-mail: denisiuk@mail.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой
оптики квантово-размерных систем

Поступила в редакцию
25.12.09 г.

П. А. ДМИТРИЕВ, В. М. МУСАЛИМОВ

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ

Изучена динамика плоского движения автомобиля. Определены параметры, устанавливающие возможность мониторинга движения с использованием датчиков скорости и ускорения.

Ключевые слова: плоское движение автомобиля, датчик угловой скорости, угол поворота, угловая скорость, сила трения, обратная связь.

В основе функционирования систем управления движением лежит принцип сопоставления параметров реального движения с программируемым. Речь идет не о системе глобальной навигации, а об инерциальной системе отсчета, связанной с автомобилем. Текущие параметры движения автомобиля определяются с помощью углов поворота передних управляемых колес автомобиля и вычисляются системой датчиков, на основании чего вырабатывается управляющий сигнал корректировки безопасного курса.

Динамика плоского движения автомобиля. Рассмотрим расчетную схему движения автомобиля [см. лит.]. На рис. 1 представлен вид сверху плоской модели автомобиля с управляемыми передними колесами. Введены две системы координат: $Oxyz$ — неподвижная, Oxy — плоскость движения автомобиля, а ось Oz направлена на читателя; $G\xi\eta\zeta$ — подвижная система координат, жестко связанная с кузовом автомобиля, G — центр масс автомобиля, ось $G\xi$ направлена по продольной оси AB автомобиля, ось $G\eta$ перпендикулярна ей, а ось $G\zeta$ направлена на читателя. Пусть φ — угол, образуемый продольной осью AB с осью Ox , а θ — угол поворота передних колес относительно продольной оси AB . Внешние силы, приложенные к автомобилю: F_B — равнодействующая продольных сил реакций дороги, приложенных к задним колесам; R_B — равнодействующая поперечных сил реакций дороги, приложенных к задним колесам; R_A — равнодействующая поперечных сил реакций дороги, приложенных к передним колесам.

Получено [см. лит.] определяющее дифференциальное уравнение для функции $\varphi(t)$:

$$\ddot{\varphi} = \frac{l \operatorname{ctg} \theta \left[\frac{l \dot{\theta} \dot{\varphi}}{\sin^2 \theta} + \frac{F_B}{m} \right]}{k^2 + l^2 \operatorname{ctg}^2 \theta},$$

где k — радиус инерции кузова относительно точки B , $l = a + b$.

Если решение уравнения $\varphi(t)$ получено, то находим v_ξ и v_η — проекции вектора скорости. Затем по формулам преобразования координат для неподвижной системы координат $Oxyz$ получим

$$\begin{aligned}\dot{x}_G &= v_\xi \cos \varphi - v_\eta \sin \varphi = \dot{\phi} l \operatorname{ctg} \theta \cos \varphi - \dot{\phi} b \sin \varphi, \\ \dot{y}_G &= v_\xi \sin \varphi + v_\eta \cos \varphi = \dot{\phi} l \operatorname{ctg} \theta \sin \varphi - \dot{\phi} b \cos \varphi.\end{aligned}$$

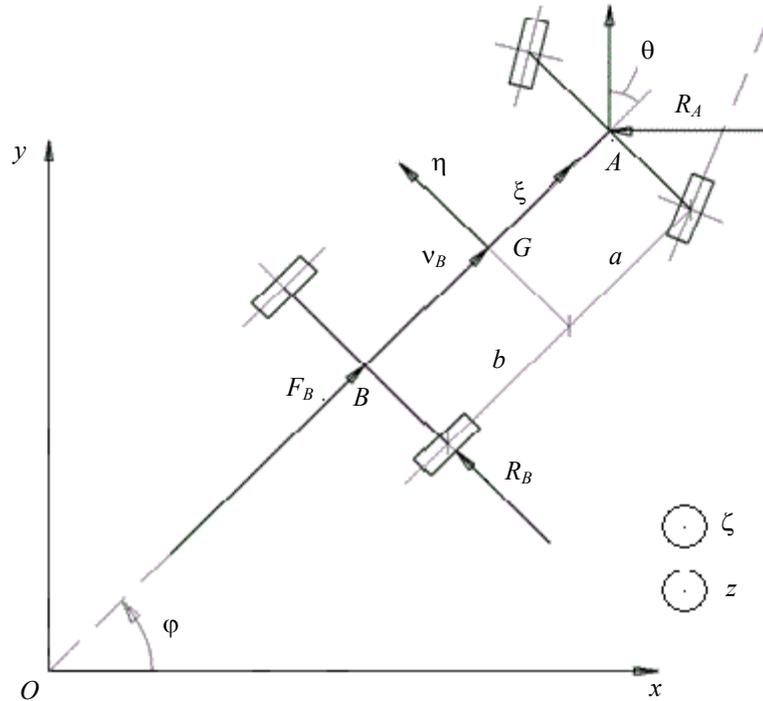


Рис. 1

Поскольку θ есть функция времени, примем $\theta(t) = kt$ (в целях линеаризации уравнения движения), тогда дифференциальное уравнение для функции $\varphi(t)$ принимает вид:

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \frac{d}{dt} \left[\frac{d\varphi}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} \right] = \frac{d}{dt} \cdot \frac{d\varphi}{d\theta} + \frac{d\varphi}{d\theta} \cdot \frac{d^2 \theta}{dt^2} = \frac{d^2 \varphi}{d\theta^2} \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 + \frac{d\varphi}{d\theta} \cdot \frac{d^2 \theta}{dt^2}.$$

Угол θ как угол поворота передних колес автомобиля не может выходить за пределы интервала $0 \leq \theta \leq \pi/2$, что позволяет линеаризовать $\operatorname{ctg} \theta$, $\operatorname{ctg}^2 \theta$, $\sin^2 \theta$ в дифференциальном уравнении движения. Окончательно уравнение движения примет следующий вид:

$$\ddot{\phi} = \frac{l(\pi - 2t) \left(\frac{l\dot{\phi}}{at^2 + bt + c} + \frac{F_B}{m} \right)}{k^2 + l^2(\pi - 2t)^2}.$$

Для исходных данных ($a=2$; $b=0$; $c=1$; $k=0,8$; $l=1$; $\pi=3,14$; $F_B=200$; $m=250$) получены законы изменения $\varphi(t)$ и $\omega(\varphi)$, проиллюстрированные на рис. 2 и 3. На рис. 2 приведена зависимость угла поворота автомобиля от времени $\varphi(t)$. На рис. 3 представлена зависимость угловой скорости вращения от угла поворота автомобиля.

Таким образом, получены зависимости угловой скорости и ускорения автомобиля в функции угла поворота передних колес и равнодействующей F_B . С помощью уравнений находят и реакции опор. Для создания системы управления автомобилем без проскальзывания

при повороте необходимо отслеживать угловую скорость задних колес и сопоставлять ее значения с законом $\varphi(\theta)$ (преобразуя угловую скорость поворота автомобиля вокруг своей оси в угловые скорости задних колес). При отклонении от данного закона необходимо распределять нагрузку между задними колесами или с помощью коробки передач изменять соотношение крутящего момента и скорости вращения задних колес. Важную роль при этом играют вибрационные датчики угловой скорости. Один из датчиков размещают в окрестности центра масс автомобиля, обратная связь осуществляется по кривой зависимости „угол поворота колес—угловая скорость“ с учетом скорости вращения задних колес (равнодействующей F_B).

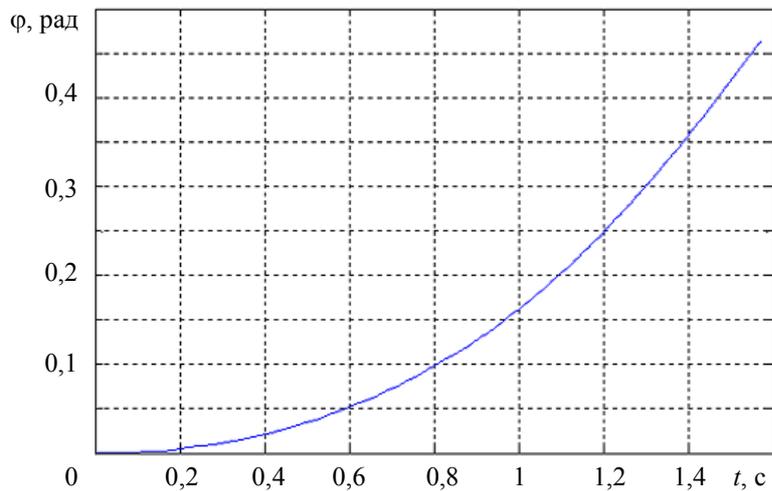


Рис. 2

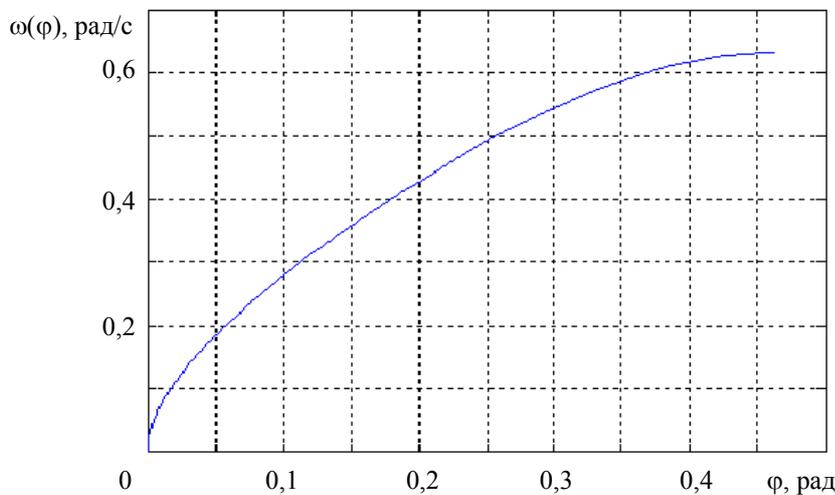


Рис. 3

Парциальные силы трения (движение без проскальзывания). Далее целесообразно определить парциальные силы трения для дальнейшей коррекции движения. Найдем значения скорости и ускорения центра масс (ЦМ), силы трения, действующей на каждое колесо: $F_{\text{тр}1}$, $F_{\text{тр}2}$, $F_{\text{тр}3}$ и $F_{\text{тр}4}$. Расчетная схема задачи приведена на рис. 4.

Так как движение происходит без проскальзывания, мгновенный центр скоростей (МЦС) должен лежать на прямой Ox , а углы θ_1 и θ_2 подобраны таким образом, что прямые, перпендикулярные направлению векторов линейных скоростей передних колес, пересекаются на оси Ox (если ось проходит через центры задних колес). На рис. 4 обозначены расстоя-

ния от МЦС до каждого из четырех колес: h_1 , h_2 , h_3 и h_4 . Обозначим расстояния от центра масс до колес — d_1 , d_2 , d_3 и d_4 соответственно.

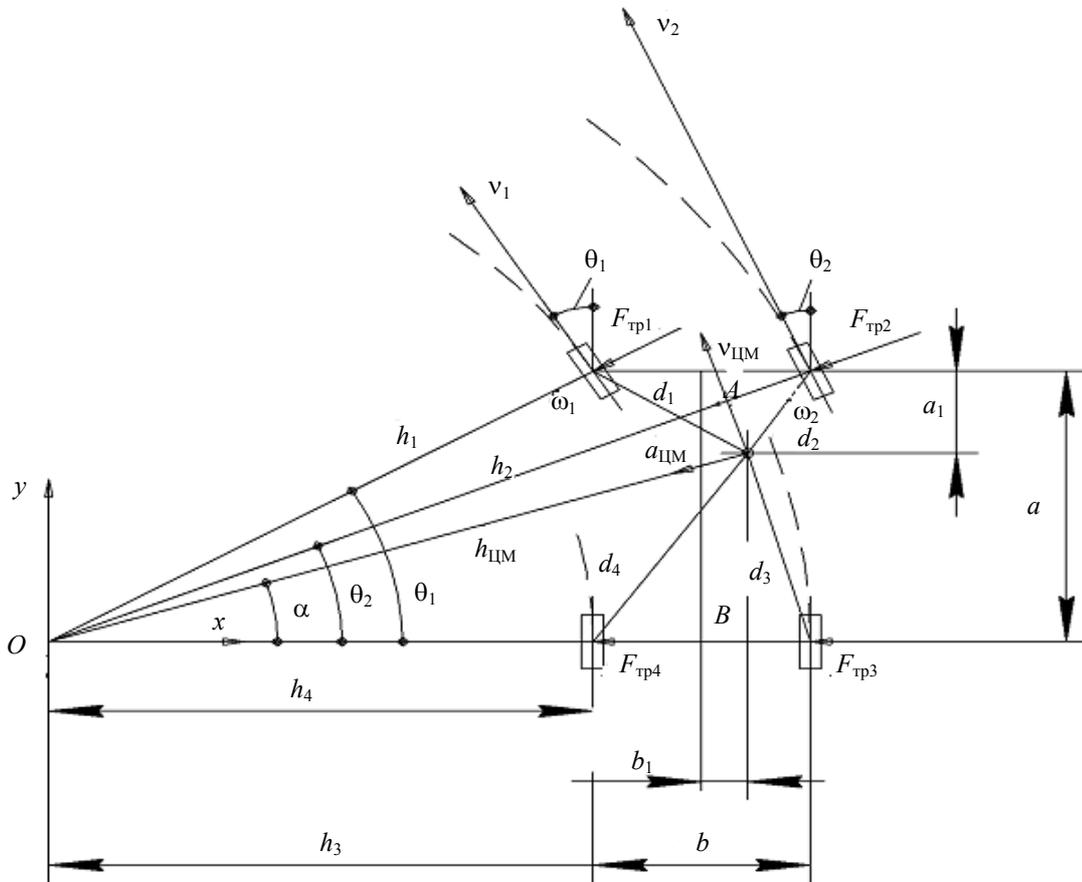


Рис. 4

Найдем значение h_4 из треугольника, обозначенного точками h_4 , h_1 и a :

$$\operatorname{tg}\theta_1 = \frac{a}{h_4} \text{ или } \operatorname{tg}\theta_2 = \frac{a}{h_4 + b},$$

рассчитаем h_2

$$h_2 = \sqrt{a^2 + (h_4 + b)^2}.$$

Найдем расстояние от МЦС до центра масс

$$h_{\text{ЦМ}} = \sqrt{(a - a_1)^2 + \left(h_4 + \frac{b}{2} + b_1\right)^2}.$$

Вычислим угол α :

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{a - a_1}{h_4 + \frac{b}{2} + b_1},$$

далее получим

$$\begin{aligned} d_4 &= \sqrt{h_{\text{ЦМ}}^2 + h_4^2 - 2h_{\text{ЦМ}}h_4 \cos \alpha}, \\ d_3 &= \sqrt{h_{\text{ЦМ}}^2 + (h_4 + b)^2 - 2h_{\text{ЦМ}}(h_4 + b) \cos \alpha}, \\ h_1 &= \sqrt{h_4^2 + a^2}, \end{aligned}$$

$$d_1 = \sqrt{h_1^2 + h_{ЦМ}^2 - 2h_1 h_{ЦМ} \cos(\theta_1 - \alpha)},$$

$$d_2 = \sqrt{h_2^2 + h_{ЦМ}^2 - 2h_2 h_{ЦМ} \cos(\theta_2 - \alpha)}.$$

Все точки системы движутся с постоянной угловой скоростью

$$\omega = v_1 h_1 = \omega_1 r h_1$$

и линейная скорость центра масс равна

$$v_{ЦМ} = \omega h_{ЦМ}.$$

Центростремительное ускорение определим следующим образом:

$$a_{ЦМ} = \frac{v_{ЦМ}^2}{h_{ЦМ}} = \omega^2 h_{ЦМ}.$$

Приведенные значения массы колес вычисляются по формулам

$$m_1 = \frac{m}{d_1 + d_2 + d_3 + d_4} d_1, \quad m_2 = \frac{m}{d_1 + d_2 + d_3 + d_4} d_2,$$

$$m_3 = \frac{m}{d_1 + d_2 + d_3 + d_4} d_3, \quad m_4 = \frac{m}{d_1 + d_2 + d_3 + d_4} d_4.$$

Вычислим значения силы трения:

$$F_{тр1} = m_1 a_{ЦМ1} = m_1 \omega^2 h_1, \quad F_{тр2} = m_2 a_{ЦМ2} = m_2 \omega^2 h_2,$$

$$F_{тр3} = m_3 a_{ЦМ3} = m_3 \omega^2 h_3, \quad F_{тр4} = m_4 a_{ЦМ4} = m_4 \omega^2 h_4$$

Таким образом, постоянно получая с датчиков данные о положении передних колес, скорости вращения колес и распределения массы, можно вычислять значения силы реакции опоры (силы трения). Задача нахождения углового ускорения при известной равнодействующей продольной силы реакции требует дополнительного рассмотрения. Установлено, что достаточно эффективно система управления может быть аппаратно реализована с использованием обратной связи по зависимости „угол поворота колес—угловая скорость“. Для дополнительной коррекции систем управления целесообразно использовать парциальные составляющие сил трения.

ЛИТЕРАТУРА

Розенблат Г. М. Гироскопические эффекты в механике твердых тел. М.: Едиториал УРСС, 2003. 96 с.

Сведения об авторах

- Павел Александрович Дмитриев** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники
- Виктор Михайлович Мусалимов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: musalimov@mail.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой
мехатроники

Поступила в редакцию
25.12.09 г.

Г. Н. Дульнев, Н. В. Пилипенко, В. П. Ходунков

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЦЕССА ПСЕВДООЖИЖЕНИЯ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Рассматривается актуальность тепловых измерений для исследования динамики процессов псевдоожигения, применяемых в современных энерготехнологиях. Приводятся основные методы и устройства для измерения теплофизических и структурно-гидродинамических параметров систем.

Ключевые слова: псевдоожигение, тепловые измерения, нестационарные методы, пульсации температуры, тепловой поток, ресурсосбережение.

Современными особенностями развития мировой энергетики являются резкое ужесточение экологических требований, переход на высокоэффективные энергоресурсосберегающие технологии и попытки поиска альтернативных источников энергии. Сегодня основной вклад в мировое производство электроэнергии дает уголь (40 %), заметно меньше — газ (19 %), атомная энергия и гидроэнергетика (по 16 %). И в будущем (прогноз до 2030 г.) уверенное лидерство по приросту генерирующих мощностей будет принадлежать углю, далее идут газ, гидроэнергия, возобновляемые источники (биомасса и отходы, ветер, солнечная энергия, геотермальное и сбросное тепло), и совсем небольшая роль отводится атомной энергии. В России наибольший вклад в производство электрической энергии вносит газ (46 %) и лишь 18 % — уголь.

Однако ситуация в России начинает изменяться в сторону общемировых тенденций, о чем свидетельствует официально принятая „Энергетическая стратегия развития России на период до 2020 года“ [1].

В соответствии с данной стратегией необходимо создавать горелочные устройства для низкотемпературного сжигания (при температуре 600—700 °С) твердого и жидкого топлива в псевдоожигенном слое катализатора, предназначенные, главным образом, для муниципальных нужд [2]. Создание топочных устройств на базе ныне действующих теплоэлектростанций особенно актуально для районов Поволжья и Сибири. Довольно остро также стоит проблема оптимизации и ресурсосбережения в таких энергоемких производствах, как обжиг руд и нерудных материалов, термообработка, сушка, катализ, пиролиз, кристаллизация, основанных на применении принципа псевдоожигения. Это актуально для электронной промышленности (выращивание кристаллов редкоземельных металлов), фармацевтики, химической промышленности (производство минеральных удобрений, серной и азотной кислоты) и т.д. Например, в последнее время активно разрабатываются кристаллизаторы-грануляторы псевдоожигенного слоя для производства лекарственных препаратов, искусственных кристаллов для микроэлектроники, сушильные агрегаты для сельскохозяйственных нужд и т.д.

Для создания и оптимизации таких технологических устройств необходимо детально исследовать все происходящие процессы (химические, тепловые, гидродинамические и др.). Теплофизические параметры характеризуют технологический процесс в целом. Исследование

таких параметров требует адекватных методов экспериментальной диагностики и математического моделирования [3].

Процессы, основанные на применении псевдооживленного слоя, описываются обобщенной блок-схемой (рис. 1). Ядром технологической цепочки является реактор псевдооживленного (кипящего) слоя, а вспомогательные системы, узлы и агрегаты должны обеспечивать его оптимальное функционирование. Главный критерий эффективной работы реактора — максимальный выход готового продукта при минимуме энергозатрат вспомогательного оборудования, что может быть достигнуто заданием оптимального теплового и гидродинамического режима кипящего слоя на стадии проектирования, стабильностью его поддержания средствами мониторинга и управления при эксплуатации.

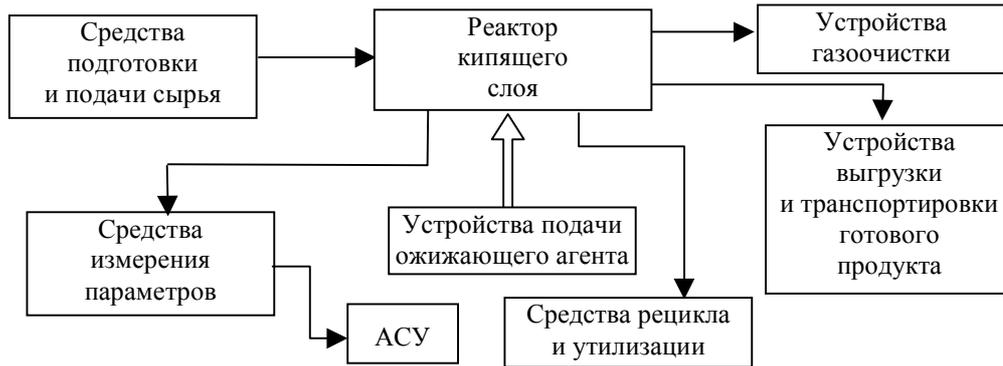


Рис. 1

Тепловой и гидродинамический режимы псевдооживленного слоя характеризуют качество работы всей системы. Основными структурно-гидродинамическими и тепловыми параметрами псевдооживленного слоя являются порозность, эффективная теплопроводность и температуропроводность слоя, коэффициент перемешивания (диффузии), скорость движения (циркуляции) твердых частиц и оживающего газа, потеря динамического напора по высоте слоя, температура слоя, тепловой поток и коэффициент теплоотдачи от поверхности к двухфазной среде, высота слоя, качество псевдооживления и т.д.

К настоящему времени набор методик и аппаратных средств измерения указанных параметров крайне ограничен, а для некоторых параметров — отсутствует.

В силу специфики псевдооживленных систем — изменяющихся во времени тепловых и гидродинамических условий — представляется логичным использовать нестационарные методы измерений параметров системы. Перспективными и наиболее адекватными для данной ситуации являются методы нестационарной теплотрии, позволяющие разработать универсальные средства для одновременного измерения нескольких параметров.

Цель настоящей работы — создание специальных зондирующих устройств лабораторного и диагностического назначения, средств и методов мониторинга, включая электронные системы обработки и визуализации информации о параметрах.

Рассматриваемые ниже методы и устройства базируются на использовании теории теплопроводности и теплообмена, обратных задач теплопроводности, пространства состояний и параметрической идентификации динамических систем, теплофизического эксперимента и численного моделирования [4].

Для быстропротекающих процессов теплообмена поверхностей с псевдооживленным слоем разработана методика, предполагающая регистрацию пульсаций температуры и теплового потока на границе раздела псевдооживленного слоя и малоинерционного первичного преобразователя, размещенного на массивном теле.

Расчетные зависимости для определения нестационарного теплового потока $q(\tau)$ получены из решения задачи (1)—(4) для системы тел (рис. 2):

$$\frac{dt_i}{d\tau} = a_i \frac{d^2 t_i}{dx^2}, \quad i = 1, 2, \quad (1)$$

$$q(\tau) = \lambda_1 \left. \frac{dt_1}{dx} \right|_{x=-\delta}, \quad (2)$$

$$\lambda_1 \left. \frac{dt_1}{dx} \right|_{x=0} = \lambda_2 \left. \frac{dt_2}{dx} \right|_{x=0}, \quad \left. \frac{dt_2}{dx} \right|_{x \rightarrow \infty} = 0, \quad (3)$$

$$t_1|_{x=0} = t_2|_{x=0}, \quad t_i|_{\tau=0} = t, \quad (4)$$

где $t_1, t_2, \lambda_1, \lambda_2, a_1, a_2$ — температура, теплопроводность и температуропроводность материала первичного преобразователя 1 и массивного тела 2 соответственно; δ — толщина первичного преобразователя, τ — время. Уравнения для определения нестационарного теплового потока имеют следующий вид:

$$q(\tau) = C_1 \frac{dt_1(\tau)}{dx} + \frac{\lambda_2}{\sqrt{\pi a_2}} \int_0^\tau \frac{t_1'(\tau - z)}{\sqrt{z}} dz, \quad (5)$$

$$q(\tau) = q'(\tau) + q''(\tau) = \frac{\lambda_1}{\sqrt{\pi a_1}} \left\{ 1 + \sum_{m=1}^{\infty} \left[1 + \left(\frac{1-\varphi}{1+\varphi} \right)^m \exp\left(\frac{-m^2 A^2}{4\tau} \right) \right] \right\} \Delta t(\tau) +$$

$$+ \frac{\lambda_1}{\sqrt{2\pi a_1}} \int_0^\tau \frac{\Delta t(\tau) - \Delta t(\zeta)}{\sqrt{(\tau - \zeta)}} \left\{ 1 - \sum_{m=1}^{\infty} \left[1 + \left(\frac{1-\varphi}{1+\varphi} \right)^m \frac{(m^2 A^2 - 2(\tau - \zeta))}{2(\tau - \zeta)} \exp\left[-\frac{m^2 A^2}{4(\tau - \zeta)} \right] \right] \right\} d\zeta, \quad (6)$$

$$\varphi = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}, \quad A = \frac{\delta}{\sqrt{a_1}},$$

где C_1 — теплоемкость материала первичного преобразователя, z и ζ — переменные интегрирования.

В случае медленно меняющихся потоков рассматривается модель градиентного тепломера, для высокочастотных пульсаций — модель пленочного тепломера, расположенного на полуграниченном теле. Мгновенные значения теплового потока восстанавливаются решением обратной задачи теплопроводности путем параметрической идентификации дифференциально-разностной модели теплопереноса с использованием рекуррентного алгоритма фильтра Калмана [5]. С помощью проточного калориметра определяются средние значения теплового потока и коэффициент теплоотдачи.

Для измерения температуры псевдооживленного слоя предлагается метод, базирующийся на линейной зависимости средней амплитуды пульсаций температуры пленочного термоприемника от разности температур между ним и псевдооживленным слоем [6]. Для обоснования этого положения рассмотрим процесс теплообмена поверхности с дисперсной средой. Уравнение теплового баланса для пакета твердых частиц и газовой фазы с учетом наличия газового зазора δ в пристенной зоне (рис. 3) имеет вид:

$$dQ_p = \frac{\lambda_f}{\delta} S_p (T_w - \theta_p) d\tau = C_p \gamma_p V_p d\theta_p, \quad (7)$$

$$dQ_f = \alpha_f S_f (T_w - \theta_f) d\tau = C_f \gamma_f V_f d\theta_f,$$

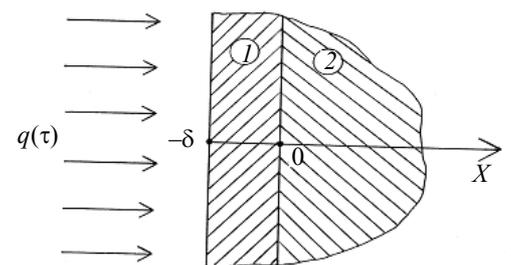


Рис. 2

где $C_p, C_f, \gamma_p, \gamma_f, V_p, V_f$ — удельная теплоемкость, плотность и объем твердой фазы (пакета) и газовой фазы (пузыря) соответственно; λ_f — теплопроводность газовой фазы, α_f — коэффициент теплоотдачи, T_w — температура поверхности, S_p, S_f — эффективная площадь теплообменных поверхностей пакета и газового пузыря.

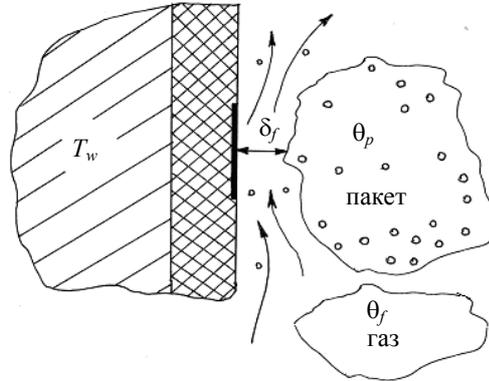


Рис. 3

После интегрирования уравнений (7) и проведения ряда преобразований получим выражение для среднего значения изменения температуры j -го пакета $\Delta\bar{\theta}_{pj}$ и j -й газовой фазы $\Delta\bar{\theta}_{ff}$ за время контакта с поверхностью:

$$\Delta\bar{\theta}_{pj} = \frac{1}{\tau_p} \int_0^{\tau_p} \Delta\theta_p(\tau) d\tau = \frac{(T_w - T_b)}{\tau_p k_p} (\tau_1 k_1 - 1) + \frac{(T_w - T_b) \exp^{-k_p \tau}}{\tau_p k_p} = k'_{pj} (T_w - T_b), \quad (8)$$

где

$$\Delta\bar{\theta}_{ff} = k'_{ff} (T_w - T_b), \quad k_p = \frac{\lambda_p S_p}{\delta C_p \gamma_p V_p}, \quad k_f = \frac{\alpha_f S_f}{C_f \gamma_f V_f}, \quad (9)$$

T_b — температура слоя, δ_f — толщина газового зазора между слоем и поверхностью.

При условии, что средняя амплитуда пульсаций температуры поверхности равна среднему перегреву двухфазной среды у поверхности за один период гравитационных колебаний слоя, получим:

$$\Delta\bar{T}_{wj} = \Delta\bar{\theta}_j = \sum_{j=1}^n \left[(1 - f_{vj}) \Delta\bar{\theta}_{pj} + f_{vj} \Delta\bar{\theta}_{ff} \right] = \sum_{j=1}^n \frac{(\tau_{pj} k'_{pj} + \tau_{ff} k'_{ff})}{(\tau_{pj} + \tau_{ff})} (T_{wj} - T_b) = B (T_{wj} - T_b), \quad (10)$$

где f_{vj} — доля времени, в течение которого поверхность омывается газовой фазой. При расчетах искомой температуры псевдооживленного слоя удобнее воспользоваться методом наименьших квадратов, в результате получена окончательная формула:

$$T_b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{wi} - \frac{\sum_{i=1}^n \left(T_{wi} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{wi} \right) \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta\bar{T}_{wi}}{\sum_{i=1}^n \left(T_{wi} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{wi} \right) \Delta\bar{T}_{wi}}, \quad (11)$$

где n — число устанавливаемых при измерениях разностей температур $i = \overline{0, n}$ ($T_w - T_b$).

Измерение скорости движения (циркуляции) твердой фазы v_p основывается на регистрации последовательных пульсаций температуры, вызванных локальным изменением усло-

вий теплообмена вблизи поверхности [6]. Значение скорости определяется величиной временной задержки сигналов на заданном базовом расстоянии первичного преобразователя.

На рис. 4 приведена принципиальная схема устройства измерений скорости движения твердой фазы: а) 1 — массивное тело; 2, 3 — термометры сопротивления; 4 — узел крепления, б) конфигурация термометров сопротивления. На рис. 5 представлена временная диаграмма сигналов (ε — порозность кипящего слоя; U_1, U_2 — сигналы термометров сопротивления) термоприемников.

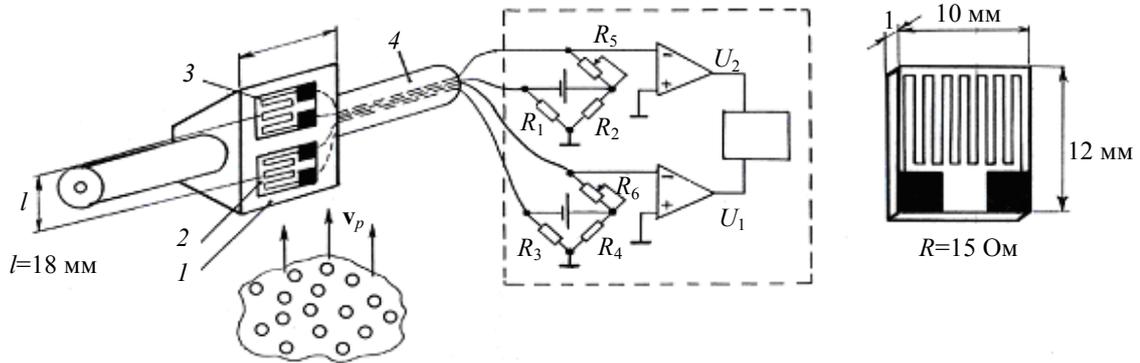


Рис. 4

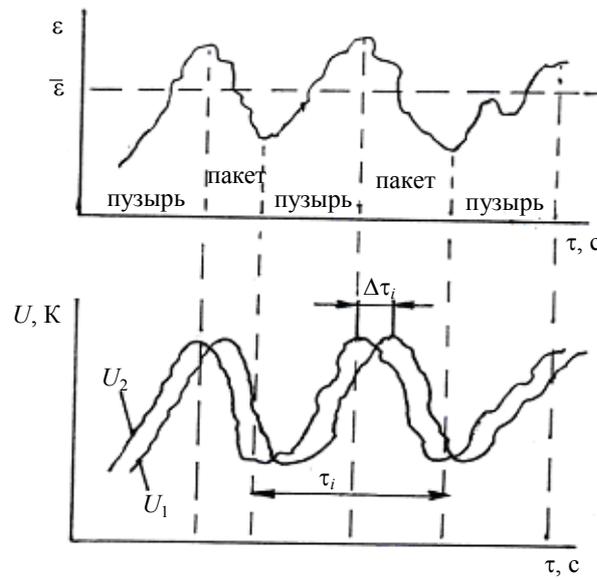


Рис. 5

Расчетная формула скорости имеет вид:

$$v_p = \frac{nL}{\sum_{i=1}^n \Delta\tau_i}, \quad (12)$$

L — базовое расстояние между датчиками, м; $\Delta\tau_i$ — значение временного сдвига сигналов ($i=0, n$) с термоприемников, с.

Одновременно, что особо важно, можно определить значение локального коэффициента эффективной температуропроводности слоя (a_b) в пристенной зоне по следующему соотношению (рис. 5):

$$a_b = \frac{1 - \varepsilon}{4\pi} v_p^2 T, \quad (13)$$

где $T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i$ — среднее значение периода пульсаций температуры, с.

Следует подчеркнуть, что интегральное значение эффективной температуропроводности псевдооживленного слоя \bar{a}_b , характеризующее процессы тепломассопереноса по всему объему слоя, может существенно отличаться от его локальных значений a_b , но также может быть определено из временной диаграммы термоприемников, при этом в расчете используется низкочастотная составляющая энергетического спектра пульсаций температуры (f_{i2}), выделяемая при спектральном анализе. Полученная нами зависимость для \bar{a}_b имеет вид:

$$\bar{a}_b = f_{i2} D^2 = 0,12 (f_0 H_0)^{0,6} D^{1,2} \approx 0,08 H_0^{0,3} D^{1,2}, \quad (14)$$

где f_0 — частота гравитационных колебаний, Гц; H_0 — высота насыпного слоя, м; D — диаметр реактора, м.

Для оценки интенсивности тепловых и гидродинамических процессов в псевдооживленном слое введен параметр качества псевдооживления, равный f_0/f_{i2} [8]. По данному параметру можно управлять технологическим процессом псевдооживления вне зависимости от его типа [9].

Технологический параметр, характеризующий структуру псевдооживленного слоя, — порозность слоя — в настоящее время может измеряться различными методами [10]. Наибольшее распространение получили емкостные методы, их суть заключается в регистрации сигнала с датчика-конденсатора, между обкладками которого проходит неоднородная среда. Главной задачей при создании устройств для измерения порозности является уменьшение методической погрешности, связанной с присутствием в слое датчика. Ранее применялись пластинчатые первичные преобразователи, датчики стержневого типа. Наиболее перспективными представляются планарные емкостные преобразователи [11], в наименьшей степени

искажающие гидродинамику процесса вблизи теплообменной поверхности. Кроме того, их можно использовать совместно с аналогичными термопреобразователями планарного типа. В частности, было установлено, что два первичных преобразователя (емкостной и тепловой), размещенные на одной поверхности, регистрируют сигналы с коэффициентом взаимной корреляции более 0,95. Для этого необходимо обеспечить равенство зон реагирования первичных преобразователей (рис. 6), что достигается выполнением условия

$$0,3\delta_f \leq x_1 \leq 0,8\delta_f \text{ при } x_1 = 0,6x_4, \quad (15)$$

где δ_f — толщина теплового пограничного слоя у поверхности.

На рис. 6 представлен комплексный планарный преобразователь (1 — емкостной чувствительный элемент; 2 — термопреобразователь; 3 — подложка; 4 — массивное тело; 5 — подвод хладагента).

Рассмотренные выше подходы к определению основных структурно-гидродинамических и тепловых параметров псевдооживленных систем могут успешно заполнить образовавшийся в последние годы пробел в создании методов и устройств в данной области тепло-

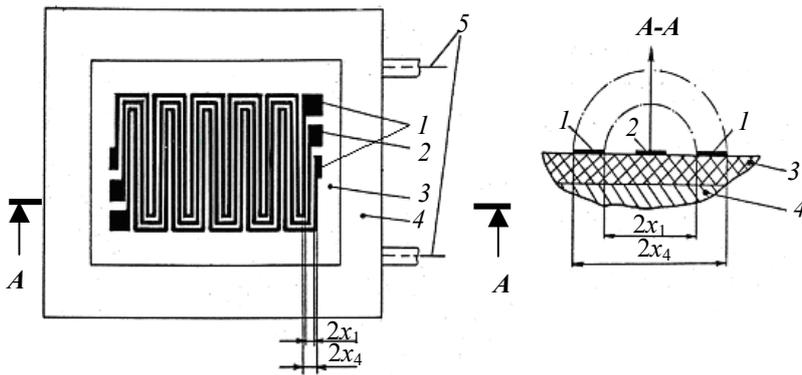


Рис. 6

физических измерений, что особенно важно для развивающихся ресурсосберегающих технологий. Из проведенного анализа следует, что измерение большинства режимных параметров возможно производить тепловыми методами, при этом открываются новые перспективы для углубления знаний о процессах теплопереноса в псевдооживленных системах, физического моделирования, создания новых методов и устройств для исследований, диагностики и управления технологическими процессами. Предоставляются также дополнительные возможности для решения проблемы масштабирования, возникающей при проектировании новых установок для энергоемких технологических процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетическая стратегия России на период до 2020 года. Распоряжение Правительства РФ от 28.08.2003 г., № 1234-р.
2. Безруких П. П., Стребков Д. С. Возобновляемая энергетика: Стратегия, ресурсы, технологии. М.: ВИЭСХ, 2005. 263 с.
3. Алексенко С. В. Теплофизические основы новых энергетических технологий // Наука в Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. № 15.
4. Кондратьев Г. М., Дульнев Г. Н., Платунов Е. С., Ярышев Н. А. Прикладная физика. Теплообмен в приборостроении. СПб: СПб ГУ ИТМО, 2003. 560 с.
5. Пилипенко Н.В. Нестационарная теплотметрия на основе параметрической идентификации дифференциально-разностных моделей теплопереноса в одномерных приемниках: Автореф. дис. докт. техн. наук. СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. 35 с.
6. А.с. 1597600 СССР. Способ определения температуры взвешенного слоя / В. П. Ходунков, А. Л. Вассель. 1990. Б.И. № 37.
7. А.с. 1282012 СССР. Устройство для определения скорости движения частиц неоднородной дисперсной среды / Н. В. Пилипенко, В. М. Ключев, В. П. Ходунков. 1987. Б.И. № 1.
8. А.с. 1395997 СССР. Способ определения качества псевдооживления и устройство для его осуществления / Н. В. Пилипенко, В. М. Ключев, В. П. Ходунков. 1988. Б.И. № 18.
9. А.с. 1272077 СССР. Способ управления технологическими процессами в аппаратах с кипящим слоем / О. М. Тодес, О. Б. Цитович, В. М. Чушев, Н. В. Пилипенко, В. М. Ключев, В. П. Ходунков. 1986. Б.И. № 43.
10. Протодьяконов И. О., Глинский В. А. Экспериментальные методы исследования гидродинамики двухфазных систем в инженерной химии. Л.: Изд-во ЛГУ, 1982. 196 с.
11. А.с. 1499199 СССР. Планарный датчик порозности псевдооживленного слоя / Н. В. Пилипенко, В. П. Ходунков. 1989. Б.И. № 29.

Сведения об авторах

- Геннадий Николаевич Дульнев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра энергофизического мониторинга и компьютерной теплофизики
- Николай Васильевич Пилипенко** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра энергофизического мониторинга и компьютерной теплофизики
- Вячеслав Петрович Ходунков** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра энергофизического мониторинга и компьютерной теплофизики

Рекомендована кафедрой
энергофизического мониторинга
и компьютерной теплофизики

Поступила в редакцию
25.12.09 г.

SUMMARY

P. 39—50.

LARGE AZIMUTHAL TELESCOPE

The history of development of the Large Azimuthal Telescope is presented. Basic features of the telescope design are described.

Keywords: telescope, altazimuth mounting, optical design, astronomical spectrograph.

Data on author

Viktor A. Zverev — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics

P. 51—59.

SPACEBORNE OPTICAL-DIGITAL SYSTEMS AND COMPLEXES

Tendencies of the progress in main lines of development of optical-digital systems for remote sensing of the Earth from the space are reviewed on the base of public data.

Keywords: spaceborne optical-digital systems, remote sensing of the Earth, astrometry, linear resolution, spacecraft.

Data on authors

Anatoly V. Dyemin — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Information and Applied Mathematics; E-mail: dav_60@mail.ru

Andrei V. Denisov — Post-graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Information and Applied Mathematics; E-mail: www.denisoff@mail.ru

Alexander V. Letunovsky — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Information and Applied Mathematics

P. 60—64.

MODERN E-SCIENCE SOFTWARE PACKAGES FOR COMPUTER MODELING

Basic features of modern software packages for computer modeling in the frames of e-Science paradigm are considered. The packages architecture, specifics of installation on a computation platform, dataware characteristics, implementation, and life cycle support are described.

Keywords: problem-oriented shell, services, supercomputer technologies, intellectual technologies, virtual community.

Data on authors

Alexander V. Boukhanovsky — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Scientific Research Institute of Science-intensive Computer Technologies; Director; E-mail: avb_mail@mail.ru

Vladimir N. Vasilev — Dr. Techn. Sci., Professor; Rector of St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Chief of Department of Computer Technologies

P. 65—73.

INVESTIGATION OF A SIGNAL PROCESSING METHOD FOR HIGH-SPEED OPTICAL COHERENT TOMOGRAPHY SYSTEMS

Method of asynchronous signal amplitude demodulation in optical coherent tomography is considered. The method is based on successive execution of quadratic transformation of informational component of the interferometric signal and low-pass filtering. Error in signal envelope restoration with the use of sub-discretization and decimation of signal readings is estimated with the account for additive noise effect. Examples are presented of signal envelope restoration with the use of Butterworth low-pass filter for useful signal detection in optical coherent tomography.

Keywords: optical coherent tomography, sub-discretization of signals, amplitude demodulation.

Data on authors

- Elena A. Vorobyeva* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Photonics; Junior Scientist
- Igor P. Gurov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Photonics; E-mail: gurov@mail.ifmo.ru
- Maxim V. Peterson* — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Photonics

P. 74—77.

APPLICATION OF NANOIMPRINT LITHOGRAPHY TO MANUFACTURE NANO- AND MICROELEMENTS IN PHOTONICS

Manufacturing of polymer micro-optical elements by contact duplication with the use of flexible stamp is considered. The effect of shrinkage of UV-hardened composition on duplication accuracy is studied experimentally. Possibility of nano-sized structure duplication with existing equipment is confirmed by experiment with 1800 Grooves/mm diffraction grating.

Keywords: nanoimprint, contact lithography, nanostructure, photopolymer, siloxane.

Data on authors

- Natalya N. Arefeva* — St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optics of Quantum-size Systems; Junior Scientist;
E-mail: natali-arefeva@mail.ru
- Igor Yu. Denisyuk* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optics of Quantum-size Systems;
E-mail: denisiuk@mail.ifmo.ru

P. 78—82.

KINEMATIC AND DYNAMIC PARAMETERS OF AUTOMOBILE MOVEMENT

Dynamics of plane movement of an automobile is considered. Parameters are defined that make it possible to monitor the movement with the use of velocity and acceleration sensors.

Keywords: automobile plane movement, angular velocity sensor, turning angle, force of friction, feedback.

Data on authors

- Pavel A. Dmitriev* — Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mechatronics
- Viktor M. Musalimov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Mechatronics; E-mail: musalimov@mail.ifmo.ru

P. 83—89.

THERMOPHYSICAL ASPECTS OF FLUIDIZATION IN GENERATING UNIT

Significance of thermal measurements for exploration of dynamics of fluidization processes in modern generating technologies. Basic methods and instruments to measure thermal and structural hydrodynamic parameters of the systems are described.

Keywords: fluidization, thermal measurements, non-stationary methods, temperature pulsation, heat transfer rate, resource saving.

Data on authors

- Gennady N. Dulnev* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Physical Energy Monitoring and Computer Thermal Physics
- Nikolay V. Pilipenko* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Physical Energy Monitoring and Computer Thermal Physics
- Vyacheslav P. Hodunkov* — Post-graduate Student; St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Physical Energy Monitoring and Computer Thermal Physics