

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**



ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ИННОВАЦИОННЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ВУЗОВ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ,
МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

май–июнь 2009

№ 3(61)



ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

д.т.н., профессор В.О. Никифоров

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

д.т.н., профессор А.А. Бобцов, д.т.н. А.В. Бухановский,
д.т.н., профессор В.А. Валетов, д.ф.-м.н., ст.н.с. Т.А. Варганян,
д.т.н. М.А. Ган, д.т.н., профессор Ю.А. Гатчин, д.т.н., профессор А.В. Демин,
к.т.н., доцент Н.С. Кармановский (заместитель главного редактора),
д.ф.-м.н., профессор Ю.Л. Колесников, д.ф.-м.н., профессор С.А. Козлов,
д.т.н., профессор А.Г. Коробейников, д.т.н., профессор В.В. Курейчик,
д.т.н., доцент Л.С. Лисицына, к.т.н., доцент В.Г. Мельников,
д.т.н., профессор Ю.И. Нечаев, д.т.н., профессор Н.В. Никоноров,
д.т.н., профессор А.А. Ожиганов, д.ф.-м.н., ст.н.с. Е.Ю. Перлин,
д.т.н., профессор И.Г. Сидоркина, д.т.н. О.А. Степанов,
д.т.н., профессор В.Л. Ткалич, д.т.н., профессор А.А. Шалыто,
д.т.н., профессор Ю.Г. Якушенков

Секретарь – Г.О. Котелкова

Редактор – к.т.н., ст.н.с. Н.Ф. Гусарова

Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, СПбГУ ИТМО

Телефон: (812) 233 12 70

Факс: (812) 232 02 95 (с пометкой: для редакции
Научно-технического вестника)

[http: //books.ifmo.ru/ntv](http://books.ifmo.ru/ntv)

E-mail:karmanov@mail.ifmo.ru

1. ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ.	
ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ.....	5
Богатырева В.В., Дмитриев А.Л. Инерционный измеритель угловой скорости вращения.....	5
Булгакова С.А., Дмитриев А.Л. Оптическое усиление в волоконном интерферометре Фабри–Перо при накачке маломощным одночастотным полупроводниковым лазером.....	10
Зверев В.А., Суворова И.Ю. Оптическая система переменного преобразования световой трубки.....	14
Киселёв С.С., Никоноров Н.В., Игнатъев А.И. Создание градиентных планарных волноводов на фото-термо-рефрактивном стекле.....	21
2. ФОТОНИКА И ОПТОИНФОРМАТИКА	26
Шполянский Ю.А. Комплексная огибающая произвольного оптического сигнала для описания взаимодействия импульсов с континуумными спектрами и различными центральными частотами в прозрачных нелинейных средах	26
3. АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ.....	35
Борисов П.А., Седнев А.К. Математическое моделирование электропривода постоянного тока с активным выпрямителем.....	35
Овчинников И.Е., Ватунская Н.Г. Динамика системы автоматического поддержания курса корабля на основе рулевого привода с вентильным двигателем	41
4. ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА.....	48
Кораблев В.А., Минкин Д.А., Соколов А.Н., Шарков А.В. Устройство для измерения тепловых потоков с поверхности тепловыделяющего элемента	48
Пилипенко Н.В. Динамические характеристики различных типов приемников тепловых потоков на основе дифференциально-разностных моделей теплопереноса.....	52
5. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И НАНОТЕХНОЛОГИИ	59
Голубок А.О., Левичев В.В., Пинаев А.Л., Стовпяга А.В. Исследование пьезорезонансного датчика локального силового взаимодействия сканирующего зондового микроскопа с зондом в виде микропипетки.....	59
6. КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	63
Балхарет А.А. Автоматизированный модуль оценки напряженности деятельности оператора.....	63
Лукичев А.Н. Анализ организации вычислительного процесса в стандарте IEC61499	68
Бреслав А.А. Средства повторного использования формальных грамматик и их применение для создания диалектов.....	75
7. ЭКОНОМИКА И ФИНАНСЫ. МЕНЕДЖМЕНТ.....	81
Цуканова О.А. Теоретические основы развития предприятия сферы услуг в условиях глобализации	81
Луговской Р.А. Региональная стратегия противодействия коррупции в российском бизнесе ...	86
8. НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ	94
Васильев В.Н., Павлова А.А., Чежин М.С. Жизненный цикл электронного учебно-методического комплекса в системе дистанционного обучения университета.....	94
Вашенков О.Е., Лямин А.В. Методика формирования эталонных наборов входных и выходных данных для анализа результатов выполнения заданий с неразрешимым множеством правильных ответов	99
Бердникова Е.А., Лямин А.В., Русак А.В. Средства построения адаптивных обучающих диалогов в системе AcademicNT на основе концептуальной модели предметной области	105
Фионова Л.Р. К вопросу выбора стратегии управления корпоративным обучением специалистов по документационному обеспечению управления.....	110
SUMMARY.....	118

1. OPTICAL AND OPTICAL ELECTRONIC SYSTEMS. OPTICAL TECHNOLOGIES.....	5
V. Bogatyreva, A. Dmitriev. Inertial device for angular speed measuring	5
S. Bulgakova, A. Dmitriev Optical gain in a fiber Fabry-Perot interferometer at the pumping of low power single-mode semiconductor laser	10
V. Zverev, I. Suvorova The optical system of light tube variable transformation	14
S. Kiselev, N. Nikonorov, A. Ignatiev Fabrication of planar gradient waveguides in photo-thermo- refractive glasses	21
2. PHOTONICS AND OPTICAL INFORMATICS	26
Yu. Shpolyanskiy Complex envelope of arbitrarily-shaped optical field for the description of interaction of pulses with continuum spectra and different central frequencies in transparent nonlinear media	26
3. ANALYSIS AND SYNTHESIS OF COMPLEX SYSTEMS	35
P. Borisov, A. Sednev Mathematical modeling of the direct current electric drive with the active rectifier	35
N. Vatunskaya, I. Ovchinnikov Dynamics of the ship course automatic maintenance system based on steering linkage with AC electronic motor	41
4. THERMAL PHYSICS AND THEORETICAL HEAT ENGINEERING.....	48
V. Korablev, D. Minkin, A. Sokolov, A. Sharkov The device for measurements of heat flux from the heating element surface	48
N. Pilipenko Dynamic characteristics for different types of heat flow receivers based on differential-difference models of heat transfer	52
5. MATERIALS TECHNOLOGY AND NANOTECHNOLOGIES.....	59
A. Golubok, V. Levichev, A. Pinaev, A. Stovpyaga Research of a piezoelectric sensor of local interaction of scanning probe microscope with the probe in the form of the micropipette	59
6. COMPUTER SYSTEMS AND INFORMATION TECHNOLOGIES	63
A. Balhareth Automated assessment module of operator activity tension	63
A. Lukichev Analysis of the computation model implied by IEC 61499	68
A. Breslav Tools for formal grammar reuse and their application for creating dialects	75
7. ECONOMICS AND FINANCES. MANAGEMENT.....	81
O. Tsoukanova The theoretical bases of the enterprises services sphere development under globalization conditions	81
R. Lugovskoy Regional corruption counteraction strategy in Russian business	86
8. NEW TECHNOLOGIES IN EDUCATION.....	94
V. Vasilev, A. Pavlova, M. Chezhin Life cycle of electronic course in the university remote education system	94
O. Vashenkov, A. Lyamin Creation technique of reference entrance and target data sets for the evaluation of tasks with unsolvable set of right answers	99
E. Berdnikova, A. Lyamin, A. Rusak Construction tools of adaptive training dialogues in AcademicNT system on the basis of conceptual model of the subject area knowledge	105
L. Fionova On management strategy choice of specialist's training in administration sphere documentation	110
SUMMARY.....	118

УДК 535.312.3

ИНЕРЦИОННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ
ВРАЩЕНИЯ

В.В. Богатырева, А.Л. Дмитриев

Предложен новый измеритель угловой скорости вращения, основанный на измерении центробежной силы инерции, действующей на чувствительный элемент оптико-механической конструкции прибора. Вызываемое отклонение луча света регистрируется позиционно-чувствительным фотоприемником. Величина выходного сигнала пропорциональна изменению угла между зеркалами и определяется угловой скоростью вращения прибора. Описан алгоритм обработки сигналов на выходе фотоприемника, приведены результаты испытаний лабораторного макета измерителя вращения. Прибор отличается простотой конструкции, экономичностью и найдет практическое применение в технологических процессах, машиностроении и робототехнике.

Ключевые слова: измеритель угловой скорости вращения, центробежная сила, зеркальный умножитель.

Введение

Измерители угловой скорости вращения давно применяются в машиностроении, робототехнике, в различных приборах управления, контроля и навигации. Известны устройства, основанные на различных физических явлениях – эффекте Саньяка, гироскопическом эффекте, явлении Кориолиса и др. [1, 2]. Ввиду массового характера практического использования таких приборов сегодня особенно актуальна разработка компактных и экономичных измерителей вращения, построенных на новых принципах. Одним из них является принцип измерения угловой скорости, основанный на оценке величины центробежной силы, действующей на оптико-механические узлы приборов во вращающейся (неинерциальной) системе координат [3]. В настоящей работе предложены новый принцип действия и конструкция оптико-механического измерителя вращения, отличающиеся простотой и хорошими технико-экономическими характеристиками, что создает перспективы широкого практического применения.

Принцип действия измерителя угловой скорости

Принцип действия измерителя угловой скорости поясняется на рис. 1, где O – ось вращения основания, O' – ось вращения поворотного зеркала, A' и A – положения центров масс груза в состояниях покоя и вращения соответственно.

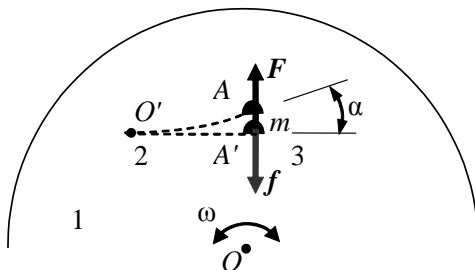


Рис. 1. Отклонение зеркала под действием центробежной силы: 1 – вращающееся основание; 2 – крепежная пластина; 3 – поворотное зеркало

Рассмотрим, как будет действовать центробежная сила на упругую пластину с закрепленным на ней грузом массой m . При вращении основания оптической системы с угловой скоростью ω центробежная сила F , действующая на груз, равна

$$F = m\omega^2 R, \quad (1)$$

где m – масса груза, $R = OA' \approx OA$ – радиус вращения. Центробежная сила вызывает отклонение пластины на угол α в точке крепления груза. Сила упругости, возникающая при изгибе пластины, равна

$$f = k\alpha, \quad (2)$$

где k – коэффициент упругости системы крепления зеркала. В состоянии равновесия $F = f$, следовательно, из (1), (2)

$$\alpha = \frac{mR\omega^2}{k}. \quad (3)$$

Измеряя величину α , при известных m , R и k можно рассчитать угловую скорость ω вращения основания.

Расчет оптической схемы измерителя вращения

Для измерения малых величин α в конструкции измерителя удобно использовать зеркальный умножитель [4] с многократным отражением луча света между двумя плоскими легкими зеркалами, обращенными рабочими поверхностями друг к другу. Одно из зеркал жестко крепится на основании прибора, а второе – на упругой пластине.

Геометрия хода лучей света в измерителе угловой скорости показана на рис. 2. В исходном состоянии положим $\alpha=0$ и угол падения луча на плоскость регистрации P $\theta=90^\circ$. Можно показать, что зависимость смещения Δx луча в плоскости P фотоприемника от величины α представляется формулой

$$\Delta x = d \cos(\theta + \alpha) \cos \theta \sum_{n=1}^N \left[\frac{\operatorname{tg}(\theta + 2(n-1)\alpha) + \operatorname{tg}(\theta + 2n\alpha)}{\cos(\theta + (2n-1)\alpha)} \right] - 2Nd \sin \theta + l \cdot \operatorname{tg}(2N\alpha), \quad (4)$$

где N – число пар отражений, $n = 1, 2, \dots$, d – расстояние между зеркалами. В данном расчете луч света падает на подвижное зеркало в точке, лежащей на оси вращения зеркала.

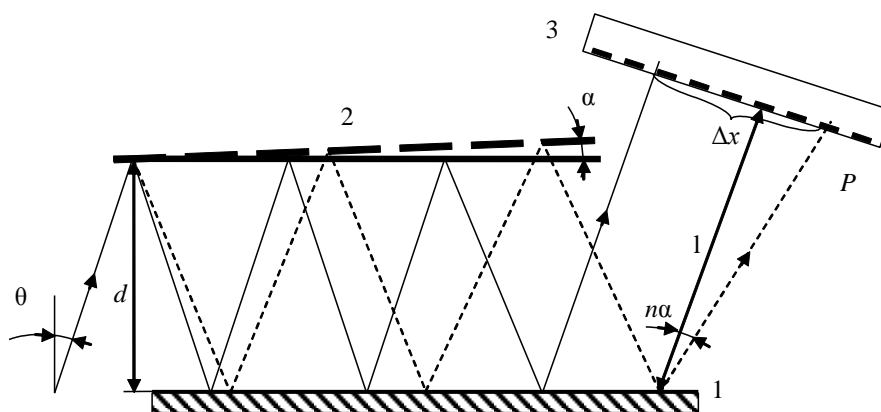


Рис. 2. Изменение координаты центра лазерного пятна на поверхности позиционно-чувствительного фотоприемника: 1 – неподвижное зеркало; 2 – поворотное зеркало; 3 – позиционно-чувствительный фотоприемник (мультискан)

Отклонение луча света от первоначального положения связано с изменением угла α между плоскими поверхностями зеркал. Дополнительное линейное смещение свето-

вого пятна на поверхности позиционно-чувствительного фотоприемника зависит от общего числа отражений и угла падения входного луча θ . Вследствие многократных отражений луча в рассмотренной клиновидной оптической системе угол отклонения регистрируемого луча значительно возрастает, при этом создается практическая возможность измерений весьма малых α , величиной порядка единиц–долей миллирадиана.

Методика проведения экспериментов и их результаты

Общая схема экспериментальной установки для проверки работоспособности предложенного принципа измерений угловой скорости приведена на рис. 3.

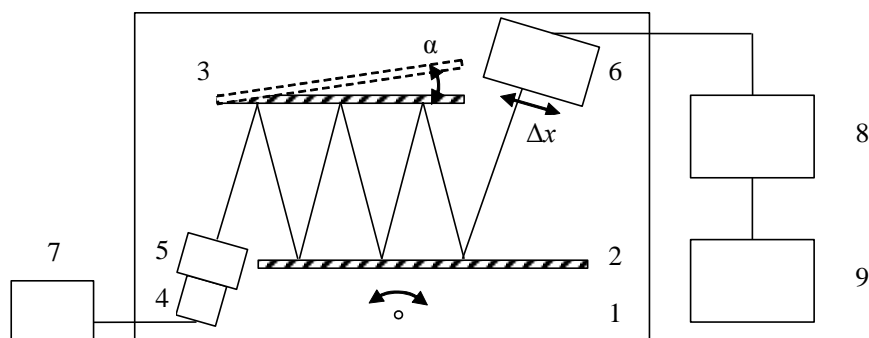


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 – вращающееся основание; 2 – неподвижное зеркало; 3 – поворотное зеркало; 4 – полупроводниковый лазер; 5 – микрообъектив; 6 – позиционно-чувствительный фотоприемник; 7 – источник питания лазера; 8 – цифровой осциллограф; 9 – ПК

Оптико-механические узлы экспериментальной установки закреплены на жестком основании, установленном на поворотном столике гониометра. Юстировка зеркал, обеспечивающая шестикратное отражение света в зеркальном усилителе, выполнялась с помощью регулировочных винтов. Подвижное зеркало нагружалось дополнительной массой для повышения чувствительности измерителя. Общая масса составляла 97,5 г. Расстояние между зеркальными поверхностями в состоянии покоя равнялось 62 мм, радиус вращения подвижного зеркала 150 мм.

В эксперименте использовался позиционно-чувствительный фотоприемник (ПЧФП) мультискан, выходное напряжение которого пропорционально координате медианы светового пятна, сформированного на поверхности фотоприемника. Точность определения положения центра пятна не хуже 5 мкм. Значение медианы определяется сравнением фототоков, обусловленных потоками излучения с обеих сторон от искомой координаты [5]. Преимуществом выбранного ПЧФП является его способность работать в условиях фоновой засветки, превышающей мощность регистрируемого полезного сигнала до 10^3 раз, что позволяет с высокой точностью определять в реальном времени координаты пучка света, например, в режиме прямого солнечного воздействия.

В качестве оптического излучателя использовался полупроводниковый лазер марки ADL-65102TL с рабочей длиной волны 650 нм и мощностью 5 мВт. Выходной сигнал мультискана фиксировался цифровым осциллографом и отображался на мониторе ПК. Среднее значение напряжения U_{cp} , регистрируемого на сопротивлении нагрузки ПЧФП, прямо определялось координатой центра луча, направляемого на мультискан.

При вращении столика гониометра с угловой скоростью 0,0725 град/с амплитуда U_{cp} изменялась в среднем на 0,526 В при первом включении двигателя механической поворотной системы и на 0,280 В – при втором (рис. 4).

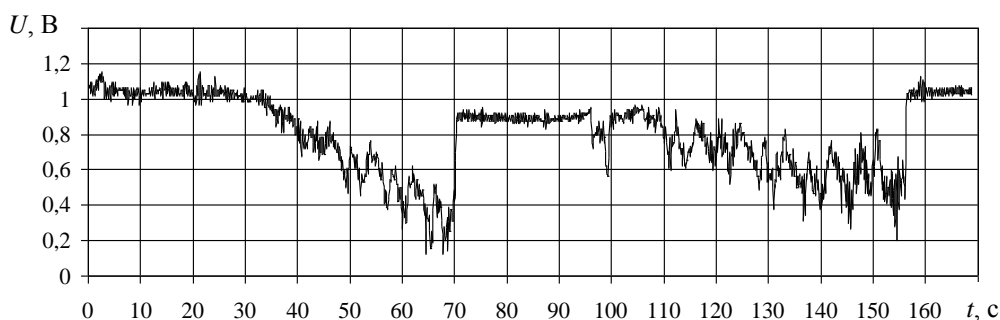


Рис. 4. Временная зависимость выходного сигнала ПЧФП при вращении («вкл») и в отсутствии вращения («выкл») основания: 0–30 с – «выкл»; 30–70 с – «вкл»; 70–95 с – «выкл», 95–155 с – «вкл»; 155–170 с – «выкл»

Как видно из рисунка, аналоговый сигнал, регистрируемый на выходе ПЧФП, заметно флуктуирует. Причины флуктуаций выходного напряжения – неравномерность угловой скорости вращения измерительного столика и случайные колебания чувствительного элемента (подвижного зеркала) измерителя, вызванные внешними вибрационными помехами. Для определения среднего значения измеряемой угловой скорости вращения столика и уменьшения влияния внешних помех на результаты измерений производилась компьютерная обработка полученных данных. Среднее значение выходного сигнала рассчитывалось по методу элонгаций – вычислением среднего арифметического значения максимального и минимального уровней регистрируемого сигнала. При обработке сигнала на первом этапе производится сглаживание данных напряжения на выходе мультискана. В первом приближении находится среднее значение напряжения по пяти отсчетам:

$$U_i = \frac{U_{i-2} + U_{i-1} + \dots + U_{i+2}}{5}. \quad (5)$$

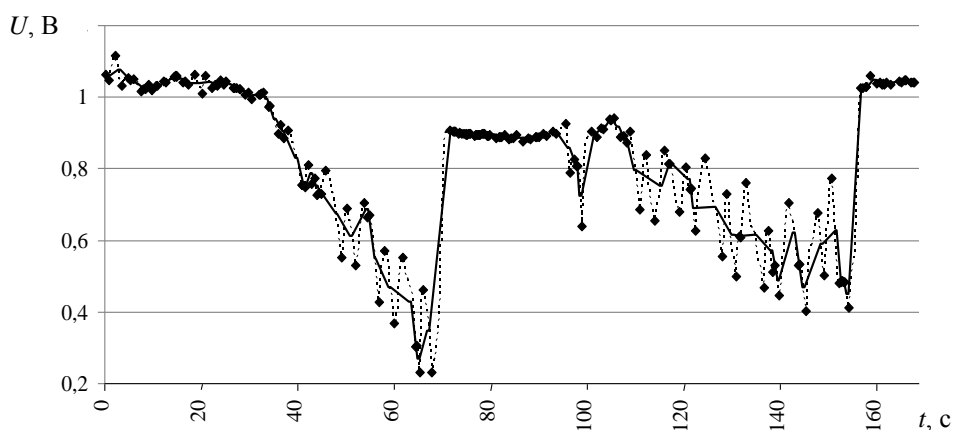


Рис. 5. Выходной сигнал мультискана (пунктир), обработанный по формуле (5) с выделением локальных минимумов и максимумов (метки), и сигнал, обработанный по методу элонгаций (сплошная линия)

Далее рассчитываются локальные минимумы и максимумы напряжения, по парам соседних максимумов и минимумов вычисляется их среднее арифметическое, являющееся конечным результатом измерений (рис. 5).

Для получения искомого значения выходного напряжения ПЧФП, необходимого для расчета угловой скорости вращения, среднее арифметическое значение напряжения рассчитывается по двум или трем парам соседних минимумов и максимумов выходного сигнала. В описываемом эксперименте максимальное и минимальное смещения лазерного луча по поверхности мультискана составили 1,05 и 0,56 мм. Согласно (4), соответ-

ствующие углы отклонения подвижного зеркала равнялись 1,114 и 0,123 мрад. Вычисленная по формуле (3) скорость вращения столика равна 6,123 мрад/с или 0,107 град/с (I) и 6,381 мрад/с или 0,113 град/с (II), при этом расчетное значение угловой скорости примерно в 1,65 раз больше действительного. Такое систематическое расхождение объясняется неравномерностью вращения основания, неточностью в задании величины коэффициента жесткости пластины, на которой крепится подвижное зеркало, а также не вполне корректным выбором интервала вычисления среднего напряжения. Указанные несоответствия будут устранены при усовершенствовании конструкции измерителя и оптимизации используемого в нем алгоритма обработки выходных данных.

В целом эксперимент продемонстрировал практическую возможность измерения угловой скорости вращения величиной порядка десятых–сотых долей град/с при использовании инерционного оптико-механического измерителя, отличительной чертой которого является упрощенная, по сравнению с известными типами оптических гироскопов, конструкция прибора. Указанное значение точности измерений не является предельным для рассмотренного принципа измерений и будет улучшено при усовершенствовании прибора.

Заключение

Предложен новый измеритель угловой скорости вращения, основанный на действии центробежной силы инерции на чувствительный элемент (подвижное зеркало) зеркального умножителя, обуславливающей смещение выходного луча света, направляемого на чувствительную поверхность ПЧФП. Выполнен расчет хода лучей света в зеркальном умножителе, составляющем часть оптической схемы устройства, получена формула зависимости смещения положения выходного луча на поверхности ПЧФП мультискан от угла поворота подвижного зеркала умножителя. Создан лабораторный макет измерителя, выполнены эксперименты, подтвердившие работоспособность и высокую чувствительность рассмотренного нового принципа измерений. Усовершенствование оптико-механической конструкции инерционного измерителя и алгоритма обработки выходных сигналов позволят существенно улучшить технические и экономические характеристики создаваемого прибора, который найдет практическое применение в машиностроении и в робототехнике.

Литература

1. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. – М.: Техносфера, 2007. – 384 с.
2. Удд Э. Волоконно-оптические датчики. – М.: Техносфера, 2008. – 520 с.
3. Заявка на полезную модель № 2008140497 «Измеритель угловой скорости вращения» / Богатырева В.В., Дмитриев А.Л., приоритет от 13.10.2008.
4. Кулагин С.В., Гоменюк А.С., Дикарев В.Н. Оптико-механические приборы. – М.: Машиностроение, 1984. – 352 с.
5. Подласкин Б.Г., Васильев А.В., Гук Е.Г., Токранова Е.А. Построение синтезированной апертуры на фотоприемниках мультискан // Журнал технической физики. – 2000. – Т. 70. – Вып. 10. – С. 110–116.

Богатырева Валерия Владимировна

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, carlo.01@mail.ru, carlo02@yandex.ru

Дмитриев Александр Леонидович

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, alex38d@list.ru

УДК 535.681.787

ОПТИЧЕСКОЕ УСИЛЕНИЕ В ВОЛОКОННОМ ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ ФАБРИ-ПЕРО ПРИ НАКАЧКЕ МАЛОМОЩНЫМ ОДНОЧАСТОТНЫМ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ ЛАЗЕРОМ

С.А. Булгакова, А.Л. Дмитриев

Описано устройство нелинейного волоконного интерферометра Маха–Цендера на основе одномодового оптоволокна с разностью хода от 2 м до 10,3 км. Приведены результаты интерферометрических исследований промышленных одночастотных полупроводниковых лазерных модулей с волоконными решетками Брэгга диапазона 1,32 мкм и 1,55 мкм с шириной линии спектра менее 20 кГц. Показано, что протяженное (несколько километров) плечо интерферометра выполняет функции активного волоконного интерферометра Фабри–Перо, в котором существенны эффекты нелинейного усиления, связанного с вынужденным рассеянием Мандельштама–Бриллюэна (ВРМБ) в оптоволокне, и френелевское отражение света на торцах такого световода. Рассматриваемые нелинейные эффекты впервые наблюдались при очень малых, менее 300 мВт, мощностях излучения в световоде.

Ключевые слова: интерферометр Маха–Цендера, одночастотные полупроводниковые лазеры, ВРМБ, нелинейная интерферометрия, волоконная интерферометрия.

Введение

Явление вынужденного рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (ВРМБ) используется во многих областях оплотехники и приборостроения, таких как волоконные лазерные излучатели, волоконно-оптические усилители, высокочувствительные оптические датчики физических полей и вращений, генерация «медленного света» и многих других. В настоящей статье рассматриваются устройство и особенности работы нелинейного волоконного интерферометра Маха–Цендера с разностью хода от 2 м до 10,3 км. Приведены результаты интерферометрических исследований спектральных характеристик одночастотных полупроводниковых лазеров с волоконными решетками Брэгга (ВРБ) диапазона 1,32 и 1,55 мкм с шириной спектра менее 20 кГц. При использовании в волоконных интерферометрах одночастотных полупроводниковых лазеров с узкой, порядка десятков килогерц, шириной линии излучения, начинают заметно проявлять себя эффекты ВРМБ-усиления в световодах. Пороговая мощность накачки при ВРМБ обратно пропорциональна ширине спектра сигнала накачки и в случае применения одночастотных лазеров с шириной линии порядка 1 МГц обычно составляет величину около 1–1,5 мВт в одномодовом кварцевом оптоволокне. Френелевское отражение на торцах (в разъёмных соединителях) протяженного плеча волоконного интерферометра Маха–Цендера позволяет рассмотреть данную часть оптической схемы как активный волоконный интерферометр Фабри–Перо, в котором происходит генерация линейчатого многочастотного спектра. Рассмотренные нелинейные явления в волоконных интерферометрах при низких уровнях мощности сигнала накачки наблюдаются впервые и имеют большое значение для разработки и совершенствования волоконно-оптических измерителей, датчиков и компонентов оптических систем обработки информации.

Элементарная теория

Электрический сигнал биений $S(t)$ на выходе фотоприемного устройства двулучевого сканирующего интерферометра представляется выражением

$$S(t) = A\sqrt{I_1 I_2} |\gamma_{12}| \tau \left| \cos \left[\int_0^t \omega(x) dx + \delta \right] \right|, \quad (1)$$

где A – коэффициент чувствительности фотоприемника, I_1 и I_2 – мощности выходного излучения в рабочих каналах интерферометра, $|\gamma_{12}(\tau)|$ – степень взаимной когерентности

интерферирующих световых волн, $\tau = (l_1 - l_2)/c$ – средняя временная задержка (l_1, l_2 – оптические длины путей, c – скорость света в вакууме), $\omega(t)$ – мгновенная частота модуляции сигнала биений, δ – постоянная составляющая фазы сигнала биений [6]. Длинное плечо 7 интерферометра Маха–Цендера (рис. 1) ограничено волоконно-оптическими разъемными соединителями, в которых френелевское отражение на торцах волоконных световодов достигает единиц процентов. Этого достаточно, чтобы представить такое плечо как сверхдлинный волоконный интерферометр (резонатор) Фабри–Перо. Мощность излучения I_2 на выходе такого резонатора с оптической длиной nL представляется известной формулой

$$I_2 = I_{20} \left[1 + \frac{4R}{1-R} \sin^2 \varphi \right]^{-1}, \quad (2)$$

где R – френелевский коэффициент отражения торцов оптоволоконна (для кварцевого волокна $R = 0,04$), I_{20} – мощность света, входящего в оптоволоконно, $\varphi = 2\pi nL/\lambda$. Разность частот $\Delta\bar{f}$ соседних четных продольных мод волоконного интерферометра Фабри–Перо равна

$$\Delta\bar{f} = \frac{c}{nL}, \quad (3)$$

где c – скорость света в вакууме, n – показатель преломления материала оптоволоконна.

Оптическое усиление в волоконном световоде вызвано эффектами ВРМБ, роль которых значительна при накачке активной среды узкополосным источником. Величина g ВРМБ-усиления в кварцевом оптоволоконне описывается выражением

$$g = \frac{2\pi n^7 p^2}{c\lambda_p^2 \rho v_A \Delta\nu}, \quad (4)$$

где p – продольный акустооптический коэффициент, λ_p – длина волны накачки, ρ – плотность среды, v_A – скорость акустической волны, $\Delta\nu$ – ширина спектра накачки на уровне 0,5.

Описание экспериментальной установки

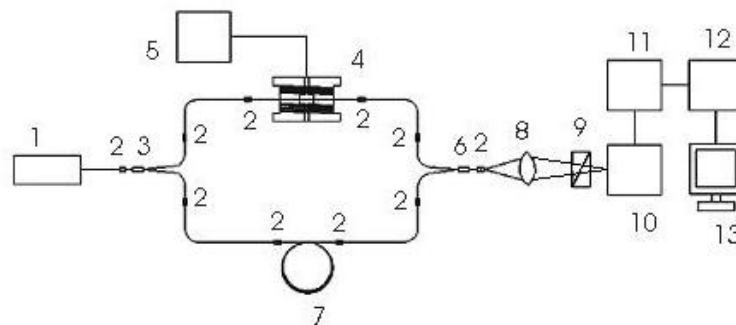


Рис. 1. Принципиальная схема измерительного стенда: 1 – РБЗ-лазер; 2 – разъемные соединители (FC-125-SM коннекторы); 3, 6 – волоконно-оптические разветвители; 4 – фазовый оптический модулятор; 5 – генератор сигналов; 7 – оптическая линия задержки (катушка оптоволоконна); 8 – собирающая линза; 9 – линейный поляризатор (призма Глана); 10 – фотоприемник PD-1180; 11 – широкополосный усилитель У2-8; 12 – цифровой осциллограф PC SCOPE 1Gs/s-50 MHz Velleman Instruments; 13 – ПК

Соединительные устройства и линия задержки интерферометра выполнены на основе одномодового (для длины волны 1,33 мкм либо 1,55 мкм) оптического волокна с потерями 0,35–0,40 дБ/км и показателем преломления, равным 1,467. Выходная мощность одночастотного полупроводникового лазера с волоконной решеткой Брэгга устанавливалась в пределах 0,65–2 мВт. Мощность излучения, вводимого в линию задержки 7, изменялась в пределах 0,2–0,6 мВт.

Одномодовые волоконные компоненты интерферометра, в том числе оптические разветвители и линии задержки, соединялись стандартными FC-125-SM коннекторами. Фазовый акустооптический модулятор (АОМ) выполнен в виде 170 витков одномодового волокна, намотанного на полый цилиндр из дюралюминия диаметром 63 мм и высотой 34 мм. В разрезе стенки цилиндра установлен пьезокерамический ультразвуковой преобразователь, подключенный к генератору синусоидального сигнала на частоте f в диапазоне 1–100 кГц.

Экспериментальные результаты

Типичный спектр сигнала биений, регистрируемого фотоприемником 10 в диапазоне частот 0–120 кГц, при частоте модуляции фазового модулятора $f = 6$ кГц, показан на рис. 2. Вследствие влияния сравнительно медленных (единицы–доли секунд) температурных флуктуаций в оптоволокне на оптическую длину пути nL линии задержки 7 спектр сигнала биений содержал и четные, и нечетные гармоники.

При отключенном фазовом модуляторе или при замене его отрезком оптоволокна длиной 20 м на выходе фотоприемника 10 при мощности оптического излучения, направленного в линию задержки, составляющей 216 мкВт, уверенно регистрировались низкочастотные сигналы биений, типичный спектр которых показан на рис. 3. Причиной наблюдаемых сигналов биений при отключенном модуляторе является интерференция многочастотного оптического сигнала на выходе активного волоконного интерферометра Фабри–Перо (плечо 7 на рис. 1) и опорного одночастотного сигнала, направляемого к фотоприемнику.

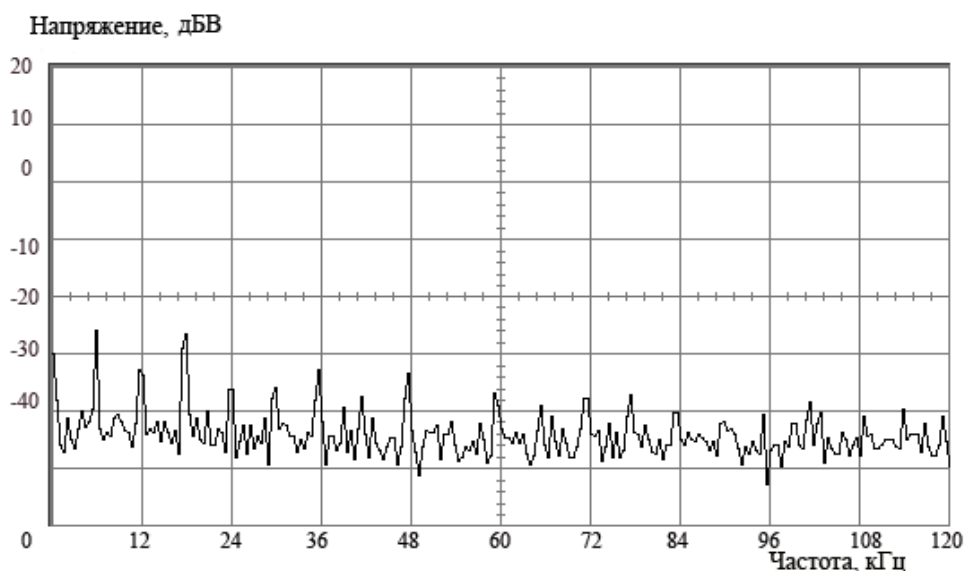


Рис. 2. Спектр биений выходного сигнала интерферометра Маха–Цендера при оптической разности хода 7468 м, частота модуляции $f = 6$ кГц, $\lambda = 1,55$ мкм

Экспериментальный разнос Δf эквидистантно расположенных спектральных несущих на рис. 3 обратно пропорционален оптической длине nL линии задержки 7. Теоретические (расчетные) значения величины разности частот продольных мод систематически, на 4–7%, превышали экспериментальные значения. Такое несоответствие, по-видимому, обусловлено небольшим изменением среднего показателя преломления волоконного световода в режиме ВРМБ-усиления.

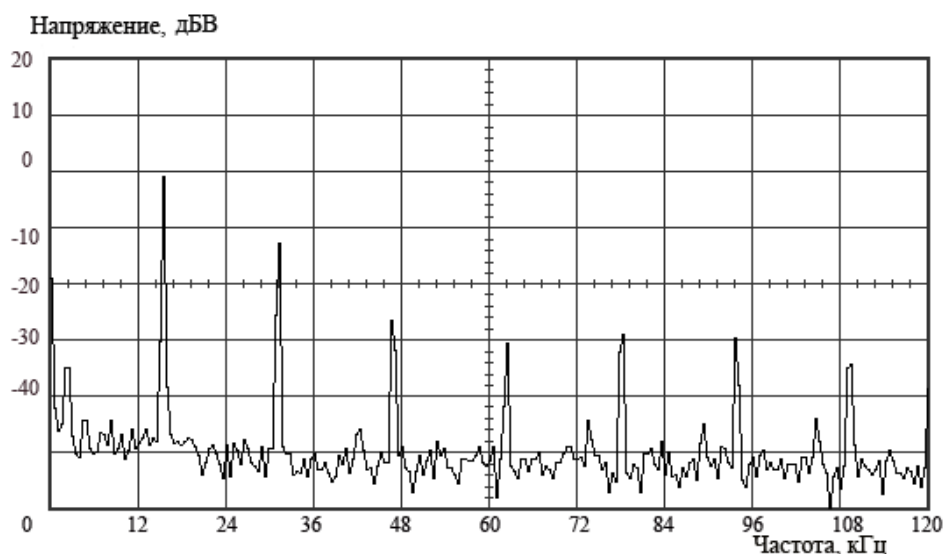


Рис. 3. Спектр биений выходного сигнала интерферометра при оптической разности хода 7468 м, модулятор отключен, $\lambda=1,55$ мкм

При разомкнутом плече интерферометра сигнал биений отсутствовал. Наиболее мощный и устойчивый сигнал биений содержал четные гармоники спектра (рис. 3). Вследствие влияний температурных флуктуаций на оптическую длину пути линии задержки (измерения производились при комнатной температуре), амплитуды спектральных компонент сигнала биений были нестабильны во времени и спектр биений содержал как четные, так и нечетные гармоники (рис. 2, 3).

Выводы

Характер спектра и флуктуации регистрируемых сигналов биений при использовании в схеме интерферометра Маха-Цендера фазового акустооптического модулятора показывают, что кратковременная, длительностью несколько единиц–десятков секунд, ширина спектра полупроводниковых одночастотных лазеров с внешней волоконной решеткой Брэгга составляет менее 20 кГц. Такие излучатели, по-видимому, не являются строго одночастотными и генерируют на нескольких – двух или более – близко расположенных спектральных линиях [6].

При отключенном фазовом модуляторе на выходе интерферометра наблюдается линейчатый спектр сигнала биений. При этом протяженное плечо интерферометра выполняет функции активного волоконного интерферометра Фабри–Перо, в котором происходит генерация продольных мод и существенны эффекты ВРМБ-усиления в оптоволокне. Характерно, что в описанном эксперименте явление ВРМБ-усиления и генерация интенсивных продольных мод имели место в обычном одномодовом кварцевом оптоволокне при очень низких, около 200 мкВт, мощностях накачки. Данный эффект, по-видимому, экспериментально наблюдался впервые.

Изменения величины nL оптической разности хода, связанные с температурными, акустическими, магнитными, явлением Физо и другими оптическими эффектами, обуславливают соответствующие сдвиги наблюдаемых частот биений. Такие частотные сдвиги могут быть точно определены и положены в основу практических разработок перспективных высокочувствительных оптических датчиков и измерителей различных физических полей и перемещений.

Литература

1. Smith R.G. Optical power handling capacity of low loss optical fibers as determined by stimulated Raman and Brillouin scattering // *Appl. Opt.* – 1972. – № 11. – P. 2489–2494.
2. Дураев В.П., Неделин Е.Т., Недобывайло Т.П. и др. Полупроводниковые лазеры с волоконной брэгговской решеткой и узким спектром генерации на длинах волн 1530–1560 нм // *Квантовая электроника.* – 2001. – Т. 31. – С. 529–531.
3. Floch S.L, Cambon P. Theoretical evaluation of the Brillouin threshold and the steady-state Brillouin equations in standard single-mode optical fibers // *J. Opt. Soc. Am.* – 2003. – Vol. 20. – № 6. – P. 1132–1137.
4. Kazushiko Ogusu. Interplay between cascaded stimulated Brillouin scattering and four-wave mixing in a Fabry–Perot resonator // *J.Opt.Soc.Am.B.* – 2003. – Vol. 20. – № 4. – P. 685–694.
5. Abedin Kazi S. Single-frequency Brillouin lasing using single-mode As_2Se_3 chalcogenide fiber // *Optics express.* – 2006. – Vol. 14. – № 9. – P. 4037–4042.
6. Булгакова С.А., Дмитриев А.Л. Волоконный интерферометр Маха–Цендера в измерениях спектральных характеристик одночастотных полупроводниковых лазеров диапазона 1,32 мкм и 1,55 мкм // *Оптический журнал.* – 2008. – № 9. – С. 71–75.

- Булгакова Софья Александровна* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, lija84@mail.ru
- Дмитриев Александр Леонидович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, alex38@list.ru

УДК 535.317.1

ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПЕРЕМЕННОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СВЕТОВОЙ ТРУБКИ

В.А. Зверев, И.Ю. Суворова

Выполнен анализ габаритных свойств и показана возможность применения для формирования световой трубки с переменными параметрами двухкомпонентной оптической системы переменного увеличения с совмещенными осевыми точками предмета и изображения и трехкомпонентной системы переменного увеличения типа «коллектив».

Ключевые слова: лазерная установка, оптическая система, переменное увеличение.

Введение

Промышленная обработка материалов стала одной из областей наиболее широкого использования лазеров и, прежде всего, лазеров высокой мощности. Лазерное излучение применяется для резания и сваривания материалов, сверления отверстий и термообработки, обработки тонких металлических и неметаллических пленок, получения на них рисунков и микросхем. Для повышения эффективности применения и качества

выполнения технологических операций лазерный пучок лучей в рабочей зоне должен иметь форму цилиндра конечной длины и малого диаметра. Эту задачу можно решить, используя свойства так называемой световой трубки.

Преобразование излучения плоского источника в световую трубку

Если угловая величина световых пучков лучей, излучаемых плоским источником, равна $2W$, то, дополнив его оптической системой, фокусное расстояние которой равно f' , можно преобразовать излучение источника в световую трубку цилиндрической формы. При этом в соответствии с рис. 1 должно выполняться условие [1]

$$2f'tgW = D_0 = 2f' \sin \sigma', \quad (1)$$

где D_0 – диаметр параллельного пучка лучей, излучаемых источником (диаметр источника излучения), $\sin \sigma'$ – задняя числовая апертура оптической системы. При малой величине углов условие (1) можно записать в виде

$$W = \sigma'. \quad (2)$$

При малой величине угла W , а, следовательно, и угла σ' , и при достаточно большой величине D_0 требуемая величина фокусного расстояния оптической системы может оказаться весьма большой, т.е. применение оптической системы позволит получить световую трубку диаметром D_0 и весьма большой длины, равной $H = D_0/2W$.

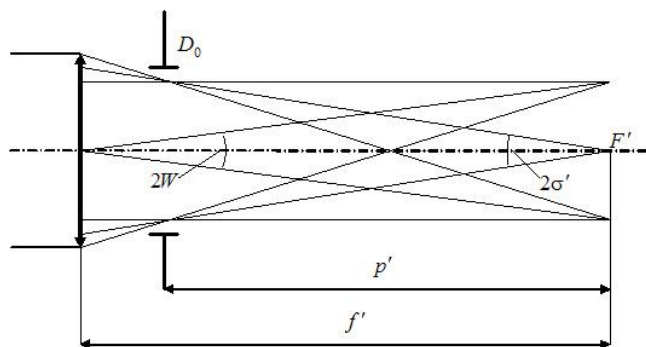


Рис. 1. Световая трубка цилиндрической формы

Для получения световой трубки требуемого диаметра D' и соответствующей длины дополним рассматриваемую оптическую систему афокальной системой кеплеровского типа, формирующей изображение с угловым увеличением, равным

$$|\Gamma| = \left| -\frac{f'_1}{f'_2} \right| = \left| \frac{W'}{W} \right| = \frac{D_0}{D'}. \quad (3)$$

Отсюда следует известное свойство световой трубки:

$$D_0 W = D' W'. \quad (4)$$

Задачу построения требуемой световой трубки можно решить, если рассматриваемую оптическую систему целиком заменить одним телеобъективом. Однако решение задачи с помощью одной афокальной системы или одного телеобъектива практического значения не имеет, поскольку в этом случае изображение одного из торцов световой трубки будет мнимым. Поэтому полученную световую трубку можно считать промежуточной, а для получения действительного изображения световой трубки требуемого диаметра и соответствующей длины дополнить рассматриваемую систему еще одной афокальной системой кеплеровского типа. При этом длина поперечной трубки равна $H' = D'/2W'$. Но $D' = W/W' D$. Тогда $H' = W/2W'^2 D$. При этом

$$\frac{H'}{H} = \frac{W^2}{W'^2}. \quad (4)$$

Переменное преобразование излучения плоского источника в световую трубку

В лазерных технологических установках для повышения эффективности их применения параметры световой трубки должны быть переменными, т.е. угловое увеличение изображения, образованного афокальной системой, должно быть переменным. Для этого второй компонент афокальной системы переместим вдоль оси в направлении распространения света (слева направо) на расстояние L . Если в этом промежутке поместим систему переменного поперечного увеличения V изображения, то угловое увеличение такой системы изображения равно

$$\Gamma = -V \frac{f_1'}{f_2'}. \quad (5)$$

Рассмотрим в промежутке $F_1'F_2 = L$ два тонких оптических компонента φ_1 и φ_2 с таким расчетом, чтобы точки F_1' и F_2 оказались оптически сопряженными. При этом расстояние между компонентами d и поперечное увеличение образованного ими изображения связаны соотношением [2]

$$d = \frac{1}{2} L \pm \sqrt{\frac{1}{4} L^2 - \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{\varphi_1 \varphi_2} L - \frac{1}{\varphi_1 \varphi_2} \frac{1 - V^2}{V}}. \quad (6)$$

Расстояние от первого компонента до осевой точки предмета определяется формулой

$$a_1 = \frac{A \pm B}{2\varphi}, \quad (7)$$

где $A = \varphi_2 (2 - \varphi_1 d) - \varphi L$; $B = \sqrt{\varphi_1 \varphi_2 d^2 + \varphi L (2 - \varphi_1 d) - 4}$; $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_1 \varphi_2 d$.

По сути дела, выражения (6) и (7) представляют собой уравнения перемещения компонентов φ_1 и φ_2 при изменении поперечного увеличения изображения, образованного двухкомпонентной оптической системой. Двойной знак перед квадратным корнем в выражении (7) свидетельствует о том, что существуют две пары оптически сопряженных точек, расстояние между которыми в обоих случаях равно одной и той же величине L . При этом, согласно (7), отрезки $a_{11} = (A + B) / 2\varphi$, а $a_{12} = (A - B) / 2\varphi$.

Заметим, что в соответствии с выражением (6) при $V = 1/\tilde{V}$ расстояние между компонентами $d = \tilde{d}$.

В частном случае построения двухкомпонентной схемы оптической системы переменного увеличения можно положить $L = 0$. При этом формула (6) принимает вид

$$d = \sqrt{-\frac{1}{\varphi_1 \varphi_2} \frac{1 - V^2}{V}}. \quad (8)$$

Отсюда следует однозначная взаимосвязь знаков величин, определяющих расстояние d . В рассматриваемом случае представляет интерес так называемая инверсорная панкратика [3], состоящая из двух тонких компонентов и удовлетворяющая условиям $\varphi_1 + \varphi_2 = 0$, $L = 0$. При этом выражения (8) и (7) принимают вид

$$d = \sqrt{\frac{1 - V^2}{V \varphi_1^2}} \text{ при } d \geq 0; \quad (9)$$

$$a_1 = -\frac{1}{\varphi_1} + \frac{\sqrt{1-V^2} \pm \sqrt{1+V^2}}{2\sqrt{V}\varphi_1^2}; \quad (10)$$

$$\varphi = \varphi_1^2 d = \frac{1}{V} \sqrt{V^2 - 1 - V^2} \varphi_1^2 = \frac{1}{V} \sqrt{V(1-V)^2} \varphi_1^2. \quad (11)$$

Напомним, что вид соотношений (9) и (10), а, следовательно, значение расстояния d и величина отрезков a_1 , остаются одними и теми же при $V = 1/\tilde{V}$. Это свойство полученных соотношений естественным образом определяет диапазон значений поперечных увеличений V и $\tilde{V} = 1/V$ при исследовании зависимости $a_1 = a_1 V : 0 < V \leq 1, 1 \leq \tilde{V} < \infty$. При этом соотношение (10) удобно преобразовать и представить в виде

$$a_{11} = -\frac{1}{\varphi_1} + \frac{\sqrt{1-V^2} + \sqrt{1+V^2}}{2\sqrt{V}\varphi_1^2} = -\frac{1}{\varphi_1} + \frac{1}{\sqrt{V}\varphi_1^2}; \quad (12)$$

$$a_{12} = -\frac{1}{\varphi_1} + \frac{\sqrt{\tilde{V}-1^2} - \sqrt{1+\tilde{V}^2}}{2\sqrt{\tilde{V}}\varphi_1^2} = -\frac{1}{\varphi_1} - \frac{1}{\sqrt{\tilde{V}}\varphi_1^2}. \quad (13)$$

Пусть $\varphi_1 > 0$. Тогда выражения (12) и (13) можно переписать в виде

$$a_{11} = \frac{1 - \sqrt{V}}{\varphi_1 \sqrt{V}}; \quad (14)$$

$$a_{12} = -\frac{1 + \sqrt{\tilde{V}}}{\varphi_1 \sqrt{\tilde{V}}}. \quad (15)$$

Из выражений (14) и (15) следует, что при изменении поперечного увеличения в рассматриваемых пределах значения отрезков a_{11} и a_{12} изменяются соответственно в диапазонах $0 \leq a_{11} < \infty, -\frac{2}{\varphi_1} \leq a_{12} < -\frac{1}{\varphi_1}$. При этом принципиальная схема оптической системы переменного увеличения при двух положениях плоскости предмета (при двух значениях поперечного увеличения изображения) имеет вид, показанный на рис. 2, а–б.

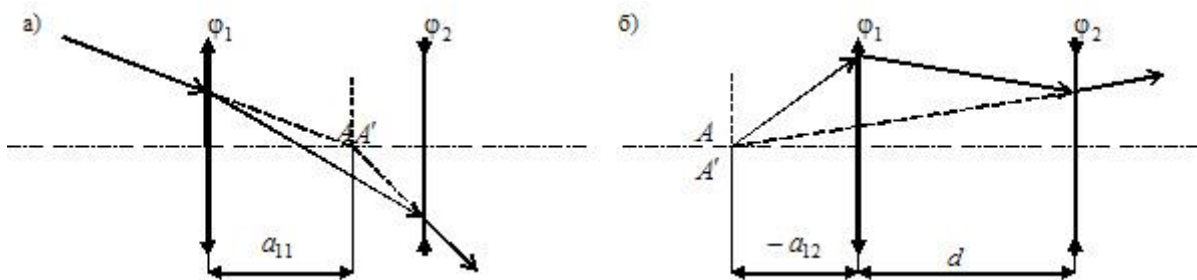


Рис. 2. Принципиальная схема оптической системы переменного увеличения при $\varphi_1 > 0$

При $\varphi_1 < 0$ выражения (12) и (13) принимают вид

$$a_{11} = -\frac{1 + \sqrt{V}}{\varphi_1 \sqrt{V}}; \quad (16)$$

$$a_{12} = \frac{1 - \sqrt{V}}{\varphi_1 \sqrt{V}}. \quad (17)$$

При этом отрезки a_{11} и a_{12} принимают значения в диапазонах $-2/\varphi_1 \leq a_{11} < \infty$, $0 \leq a_{12} < -1/\varphi_1$. В этом случае принципиальная схема оптической системы переменного увеличения при двух положениях плоскости предмета имеет вид, показанный на рис. 3, а–б, а при обратном ходе лучей – рис. 2, б–а.

Пусть $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_0$. Тогда $\varphi = \varphi_0 \cdot 2 - \varphi_0 d$. При этом выражения (6) и (7) принимают вид

$$d = \frac{1}{2} L \pm \sqrt{\frac{1}{4} L^2 - \frac{2}{\varphi_0} L - \frac{1 - V^2}{\varphi_0^2 V}}; \quad (18)$$

$$a_1 = \frac{1}{2} d - L \pm \frac{1}{2\varphi} \sqrt{\varphi_0^2 d^2 + \varphi L \cdot \varphi_0^2 d^2 + \varphi L - 4}. \quad (19)$$

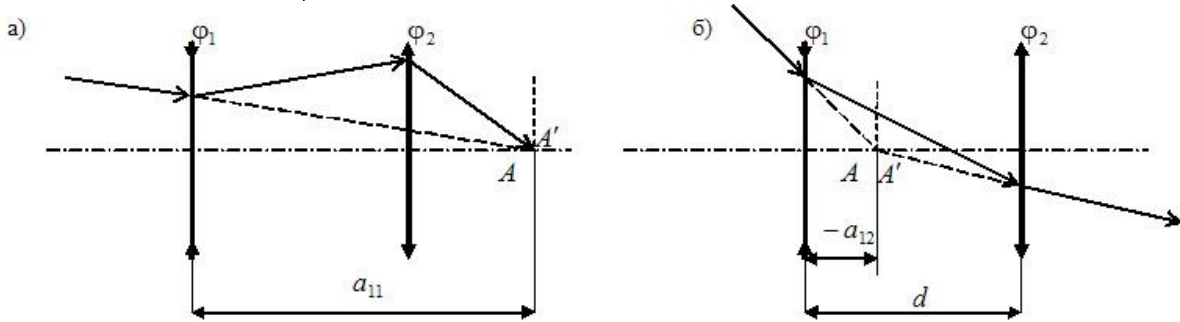


Рис. 3. Принципиальная схема оптической системы переменного увеличения при $\varphi_1 < 0$

В оптической системе из двух тонких компонентов передний и задний фокальные отрезки равны соответственно

$$a_F = -\frac{1 - \varphi_2 d}{\varphi}, \quad a_{F'} = \frac{1 - \varphi_1 d}{\varphi}.$$

При этом расстояние между главными плоскостями системы определяется как

$$d_{HH'} = d - a_F + a_{F'} - \frac{2}{\varphi} = -\frac{\varphi_1 \varphi_2 d^2}{\varphi}. \quad (20)$$

В рассматриваемом случае

$$d_{HH'} = -\frac{\varphi_0 d^2}{2 - \varphi_0 d}. \quad (21)$$

Вариант принципиальной схемы двухкомпонентной оптической системы переменного увеличения, когда оптические силы $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_0$, может получить развитие, если принять $L = d_{HH'}$. Подставив при этом (21) в (19), получаем:

$$a_1 = \frac{d}{2 - \varphi_0 d}. \quad (22)$$

Применив формулу отрезков, находим, что в этом случае

$$a_1' = \frac{a_1}{1 + a_1 \varphi_0} = \frac{1}{2} d. \quad (23)$$

При этом

$$a_2 = a_1' - d = -\frac{1}{2} d \quad (24)$$

и соответственно $a'_2 = -d / (2 - \varphi_0 d) = -a_1$.

Одновременное смещение компонентов в направлении оптической оси на некоторую величину Δ приведет к изменению поперечного увеличения и к расфокусировке изображения, характерным для смещения однокомпонентной оптической системы. Однако из соотношений (23) и (24) следует, что первый оптический компонент образует промежуточное изображение, расположенное внутри воздушного промежутка между компонентами на равном расстоянии от каждого из них. Вполне очевидно, что положение изображения не изменится, если совместить его с третьим оптическим компонентом, как показано на рис. 4, при этом не изменится и ход осевого пучка лучей.

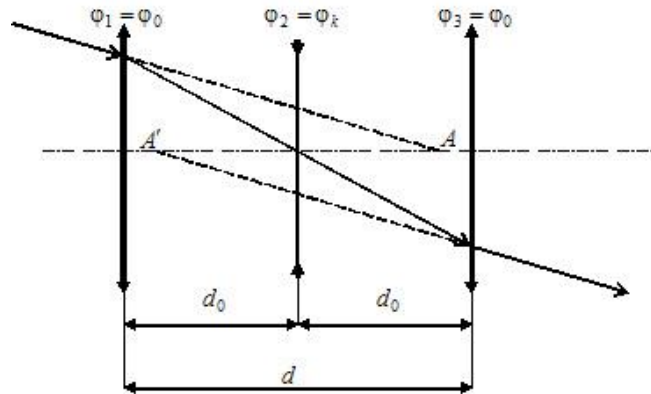


Рис. 4. Принципиальная схема трехкомпонентной оптической системы переменного увеличения типа «коллектив»

Для расчета параметров системы в качестве исходного параметра удобно использовать величину поперечного увеличения V_0 изображения, образованного первым компонентом в начальном положении системы [4]. При одновременном смещении крайних компонентов вдоль оптической оси на расстояние Δ принципиальную схему рассматриваемой оптической системы можно записать в следующем виде:

$$\varphi_1 = \varphi_0$$

$$\varphi_2 = \varphi_k \quad d_1 = d_0 - \Delta$$

$$\varphi_3 = \varphi_0 \quad d_2 = d_0 + \Delta.$$

Положение двух пар оптически сопряженных осевых точек, расстояние между которыми не изменяется при смещении крайних компонентов системы на предельную величину $\Delta = \Delta_0$, определяется выражениями вида

$$a_{011} = \frac{d_0}{V_0}, \tag{25}$$

$$a_{012} = \frac{1 + V_0(1 - V_0)(1 + \tilde{\Delta}_0^2)}{2V_0^2 - 1} d_0, \tag{26}$$

где $\tilde{\Delta}_0 = \Delta_0 / d_0$. При этом расстояние между оптически сопряженными точками равно

$$L_{01} = -2 \frac{1 - V_0}{V_0} d_0, \tag{27}$$

$$L_{02} = 2 \frac{2(1 + V_0) + V_0(1 + \tilde{\Delta}_0^2)}{1 - 2V_0^2} (1 - V_0) d_0. \tag{28}$$

Оптические силы компонентов равны

$$\tilde{\varphi}_0 = \varphi_0 d_0 = 1 - V_0, \quad (29)$$

$$\tilde{\varphi}_k = \varphi_k d_0 = -\frac{2}{1 - V_0} \frac{V_0^3}{(1 + V_0)^2 - V_0^2 \tilde{\Delta}_0^2}. \quad (30)$$

И, наконец, при $\tilde{a}_{01} = \tilde{a}_{011} = a_{011}/d_0 = 1/V_0$ перепад увеличения изображения определяется выражением

$$\mu = 1 + \frac{4V_0(1 + V_0)\tilde{\Delta}_0}{(1 + V_0 - V_0\tilde{\Delta}_0)}. \quad (31)$$

При $\tilde{\Delta}_0 = 1$

$$\mu = (1 + 2V_0)^2. \quad (32)$$

Однако вполне очевидно, что из-за габаритных ограничений осуществить условие $\tilde{\Delta}_0 = 1$ практически невозможно.

Заключение

Приведенные соотношения позволяют определить параметры трехкомпонентной схемы оптической системы переменного увеличения типа «коллектив» при дискретной (оптической) компенсации расфокусировки изображения.

Световую трубку лазерного излучения формируют узкие пучки лучей, что определяет возможность применения любой из рассмотренных схем для построения афокальной системы переменного углового увеличения. При этом в соответствии с формулой (5) угловое увеличение изображения

$$\Gamma = -\frac{\tilde{f}'_1}{\tilde{f}'_2} = -\frac{f'_1}{f'_2},$$

где $\tilde{f}'_1 = Vf'_1$, $\tilde{f}'_2 = f'_2/V$. Вполне очевидно, что при изменении углового увеличения изображения, образованного афокальной системой, положение сформированной световой трубки относительно последнего компонента оптической системы в целом будет изменяться, что и следует учитывать при ее разработке.

Литература

1. Зверев В.А., Суворова И.Ю. Преобразование излучения плоского источника в световую трубку цилиндрической формы // Оптический журнал. – 2008. – Т. 75. – №6. – С. 71–76.
2. Журова С.А., Зверев В.А. Основы композиции принципиальных схем оптических систем переменного увеличения // Оптический журнал. – 1999. – Т. 66. – № 10. – С. 68–86.
3. Чуриловский В.Н. Теория оптических приборов. – М.–Л.: Машиностроение, 1966. – 564 с.
4. Иванова Т.А., Кирилловский В.К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. – Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1984. – 231 с.

Зверев Виктор Алексеевич

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, post_vaz@rambler.ru

Суворова Ирина Юрьевна

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, d22022007@yandex.ru

УДК 535.212:621.372.8:666.22

СОЗДАНИЕ ГРАДИЕНТНЫХ ПЛАНАРНЫХ ВОЛНОВОДОВ НА ФОТО-ТЕРМО-РЕФРАКТИВНОМ СТЕКЛЕ

С.С. Киселев, Н.В. Никоноров, А.И. Игнатьев

Созданы градиентные оптические волноводы на основе фото-термо-рефрактивного стекла методом эффузии и методом ионного обмена при разных температурно-временных режимах. Построены профили показателей преломления, исследовано влияние предварительной фото- и термообработки на оптические свойства полученных волноводов.

Ключевые слова: фото-термо-рефрактивные стекла, планарные волноводы, ионный обмен, эффузия.

Введение

Фото-термо-рефрактивные (ФТР) стекла являются на сегодняшний день перспективным материалом для интегральной оптики. Используемые как эффективный фото-регистрирующий материал для записи объемных фазовых голограмм [1–3], ФТР стекла могут сочетать в себе одновременно лазерные и волноводные свойства, что открывает возможность создания на их основе полифункциональных устройств для интегральной оптики. Следует отметить, что технология получения планарных волноводов на основе ФТР стекла пока не разработана.

Целью данной работы являлось создание градиентных волноводов на ФТР стекле методом эффузии и методом низкотемпературного ионного обмена (НИО) при разных температурно-временных режимах, а также исследование оптических параметров полученных волноводных структур.

Объект исследования и методика эксперимента

В качестве объекта исследования было использовано ФТР стекло [1]. Из сваренной були размером около $120 \times 120 \times 40$ мм³ изготавливались прямоугольные образцы $40 \times 15 \times 3$ мм³ с полированными гранями. Таким образом, все используемые образцы были получены из одной варки, что обеспечивает повторяемость всех свойств стекла в разных экспериментах.

Для создания градиентных волноводов на ФТР стекле методом эффузии [4] была выбрана температура 480°C. Термообработки проводились в муфельной печи, температура измерялась термопарой в непосредственной близости от образцов. Точность измерения и поддержания температуры составляла $\pm 1^\circ\text{C}$. Продолжительности опытов составляли 6, 12, 18 и 24 часа. Кроме того, для каждого опыта использовалось два образца: один необлученный, другой облученный УФ лампой в течение 4 минут. Таким образом, для облученного образца термообработка являлась процессом, приводящим не только к образованию волновода, но и к проявлению скрытого изображения, возникшего после УФ облучения. Сравнивая волноводы, полученные на облученных и необлученных образцах, можно выявить влияние ФТР эффекта на свойства волноводов, полученных методом эффузии. Схема эксперимента приведена на рис. 1.

Создание градиентных волноводов на ФТР стекле методом низкотемпературного ионного обмена [5] K^+ (расплав) \leftrightarrow Na^+ (стекло) проводилось следующим образом: образцы стекла помещались внутри муфельной печи в расплав KNO_3 и выдерживались в течение 3, 6 и 9 часов при температуре расплава 370°C. Для ионного обмена использовалось три образца ФТР стекла: 1) исходное, 2) термообработанное, 3) прошедшее УФ облучение и термообработку. Таким образом, помимо зависимости профиля показателя преломления волновода от времени ионного обмена, изучалось также влияние предва-

рительной термообработки и ФТР кристаллизации в объеме ФТР стекла на его ионообменные свойства. Следует также отметить: из предшествующих опытов было установлено, что при выдержках образцов стекла при температуре $T=370^{\circ}\text{C}$ в течение длительного времени (до 24 часов) эффузионного волновода на поверхности образца не образуется. Схема эксперимента показана на рис. 2.

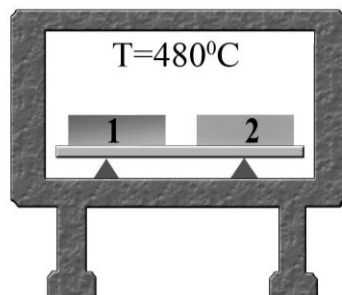


Рис. 1. Схема эксперимента по созданию градиентных волноводов на ФТР стекле методом эффузии: 1 – исходный образец ФТР стекла, 2 – УФ облученный образец ФТР стекла. Продолжительность термообработки – 6, 12, 18 и 24 часа

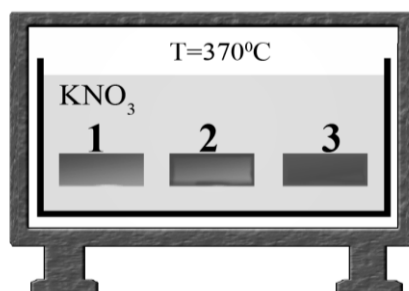


Рис. 2. Схема эксперимента по созданию градиентных волноводов на ФТР стекле методом низкотемпературного ионного обмена (НИО): 1 – исходный образец ФТР стекла, 2 – термообработанный образец ФТР стекла; 3 – УФ облученный и термообработанный образец ФТР стекла. Продолжительность НИО – 3, 6 и 9 часов

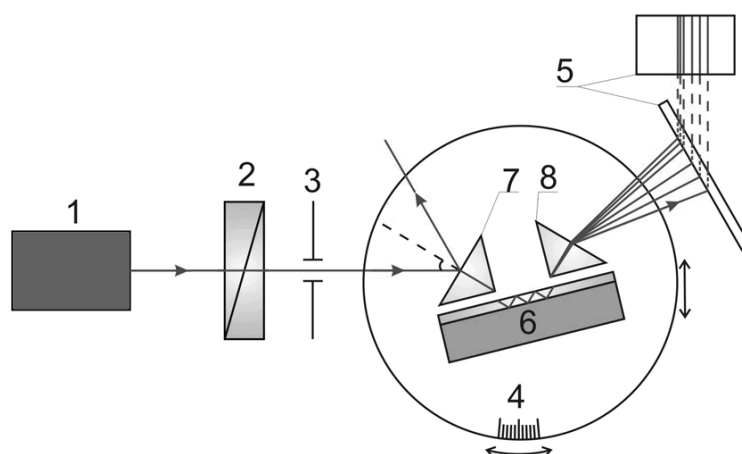


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для определения эффективных показателей преломления волноводных мод: 1 – He-Ne лазер ($\lambda = 0,6328$ мкм), 2 – поляризатор; 3 – диафрагма; 4 – поворотный столик с лимбом; 5 – экран; 6 – исследуемый волновод; 7, 8 – призмы ввода и вывода

Экспериментальное исследование полученных на ФТР стекле волноводов заключалось в измерении эффективных показателей преломления (ПП) волноводных мод методом их селективного резонансного возбуждения при помощи призмных устройств ввода/вывода лазерного излучения в волноводный слой. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 3. Погрешность измерения ПП составляла 2×10^{-4} . По измеренным данным с помощью метода Вентцеля–Крамерса–Бриллюэна (ВКБ) с использованием кусочно-линейной аппроксимации, реализованного в среде MathCad, рассчитывался профиль показателя преломления волновода, т.е. зависимость значения ПП от глубины волноводного слоя.

Результаты

Профили показателей преломления волноводов, полученных на ФТР стекле методом эффузии, приведены на рис. 4. Как видно из рис. 4, максимальное изменение глубины волноводного слоя происходит за 18 часов термообработки. Наибольший прирост ПП составил $\Delta n = 5,5 \times 10^{-3}$ ($\Delta n = n_0 - n_s$, где n_0 – ПП поверхности, n_s – ПП подложки). Следует также отметить, что у всех волноводов, полученных методом эффузии, наблюдалось уменьшение ПП подложки по сравнению с исходным стеклом на $\Delta n_s = 1,6 \times 10^{-3}$ ($n_{исх} = 1,4942$), что, вероятно, связано с релаксационными процессами в стекле при нагревании. У волноводов, полученных на предварительно УФ облученном стекле, наблюдалось увеличение ПП на поверхности в среднем на 7×10^{-4} и незначительное уменьшение ПП подложки в среднем на 3×10^{-4} . Таким образом, прирост ПП был увеличен на 1×10^{-3} по сравнению с необлученным стеклом.

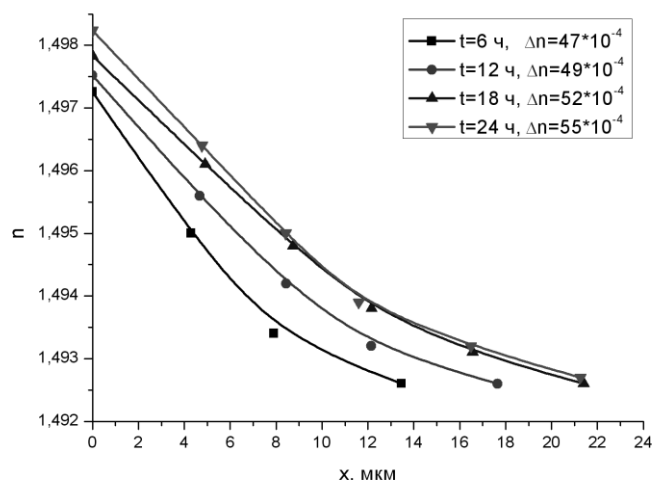


Рис. 4. Профили показателей преломления волноводов, полученных на ФТР стекле методом эффузии при температуре $T=480^\circ\text{C}$ и времени термообработки 6, 12, 18 и 24 часа

Профили показателей преломления волноводов, полученных на исходном ФТР стекле методом K^+ -ионного обмена, приведены на рис. 5. Максимальный прирост ПП был достигнут при трехчасовом ионном обмене и составил $\Delta n = 11 \times 10^{-3}$ (для ТМ-поляризации), что не уступает волноводам, полученным аналогичным методом на основе промышленного стекла К8.

При создании волноводов методом ионного обмена на основе ФТР стекла, прошедшего предварительную термообработку при $T=480^\circ\text{C}$ в течение 18 часов, увеличение ПП в поверхностных слоях образца происходило как за счет возникновения механических напряжений вследствие низкотемпературного ионного обмена ($\text{Na}_c^+ \leftrightarrow \text{K}_p^+$),

так и за счет улетучивания фторидных компонентов с малой поляризуемостью, произошедшего при термообработке. Таким образом, у волноводов на ФТР стекле был получен максимальный прирост показателя преломления $\Delta n = 17 \times 10^{-3}$ (рис. 6).

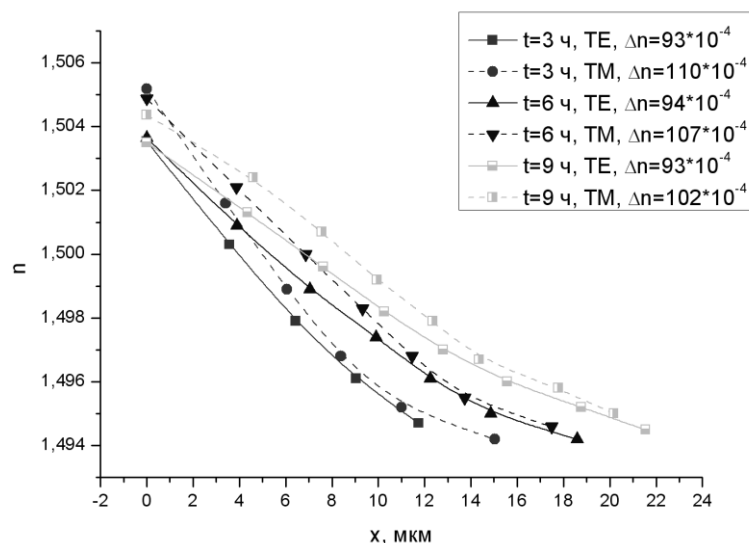


Рис. 5. Профили показателей преломления волноводов (для $\lambda = 632,8$ нм), полученных на исходном ФТР стекле методом K^+ -ионного обмена при температуре $T = 370^\circ C$ и времени ионного обмена 3, 6 и 9 часов

Влияние ФТР кристаллизации в ФТР стекле на его ионообменные свойства в данном эксперименте выявлено не было (изменения профилей ПП – в пределах погрешности). Это связано с тем обстоятельством, что в поверхностных слоях стекла, где происходил ионный обмен, вследствие предварительной термообработки происходили процессы эффузии фторидных компонентов, т.е. уменьшение концентрации фторид-ионов, участвующих в ФТР кристаллизации.

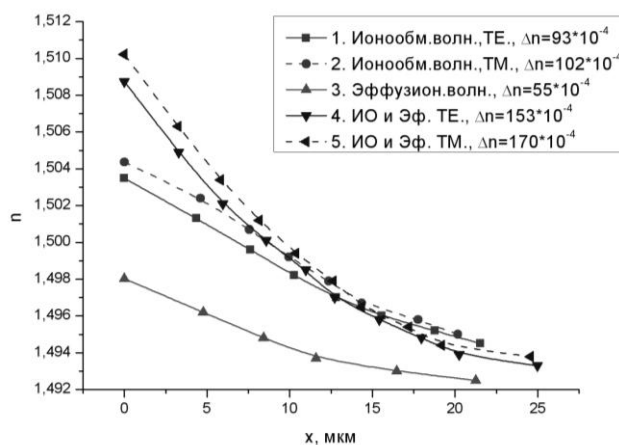


Рис. 6. Профили показателей преломления волноводов, полученных на исходном и прошедшем термообработку ФТР стекле методом K^+ -ионного обмена при температуре $T = 370^\circ C$ и времени ионного обмена 9 часов

Заключение

В работе представлены основы технологии формирования планарных градиентных волноводов на основе ФТР стекла методами НИО и эффузии. Впервые на основе

ФТР стекла получены планарные градиентные волноводы за счет селективной эффузии фторидных компонент с поверхностных слоев стекла, при этом максимальный прирост показателя преломления составил $\Delta n = 5,5 \times 10^{-3}$. Также получены планарные градиентные волноводы методом НИО ($K^+_{\text{p}} \leftrightarrow Na^+_{\text{c}}$) с $\Delta n = 11 \times 10^{-3}$, что не уступает волноводам, созданным аналогичным методом на основе промышленного стекла К8. Кроме этого, в работе показана возможность создания градиентных волноводов на основе ФТР стекла за счет последовательной комбинации методов эффузии и НИО с максимально достижимым $\Delta n = 17 \times 10^{-3}$.

Литература

1. Nikonorov N.V. Volume Bragg gratings in photo-thermo-refractive glass // Proc. US-Russia Partnership Workshop «Communications, Electronics, Lasers, and Optics», St. Petersburg, 2004.
2. Efimov O.M., Glebov L.B., Glebova L.N., Smirnov V.I. Process for production of high efficiency volume diffractive elements in photo-thermo-refractive glass: US Patent. – № 6 586 141 B1; 2003.
3. O.M. Efimov, L.B. Glebov, V.I. Smirnov. High efficiency volume diffractive elements in photo-thermo-refractive glass : US Patent. – № 6 673 497 B2; 2004.
4. Редько В.П., Шляхтичев О.Д. Получение оптических волноводов методом эффузии // Письма в ЖТФ. – 1978. – Т. 4. – № 23. – С. 1414–1416.
5. Никоноров Н.В., Петровский Г.Т. Стекла для ионного обмена в интегральной оптике: современное состояние и тенденции дальнейшего развития (обзор) // Физ. и хим. стекла. – 1999. – Т. 25. – № 1. – С. 21–69.
6. Никоноров Н.В. Механизм формирования планарных диффузионных оптических волноводов на стеклах и образование в них центров окраски; дис. ... докт. техн. наук. – Л., 1985. – С. 36–43.
7. Никоноров Н.В. Влияние ионообменной обработки на физико-химические свойства поверхности стекол и волноводов // Физ. и хим. стекла. – 1999. – Т. 25. – № 3. – С. 271–308.

Киселев Станислав Сергеевич

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, kisel.stas@rambler.ru

Никоноров Николай Валентинович

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, nikonogov@oi.ifmo.ru

Игнатьев Александр Иванович

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, заведующий лабораторией, ignatiev@oi.ifmo.ru

УДК 535.2:621.373.8267

**КОМПЛЕКСНАЯ ОГИБАЮЩАЯ ПРОИЗВОЛЬНОГО
ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА ДЛЯ ОПИСАНИЯ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСОВ С КОНТИНУУМНЫМИ
СПЕКТРАМИ И РАЗЛИЧНЫМИ ЦЕНТРАЛЬНЫМИ ЧАСТОТАМИ
В ПРОЗРАЧНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ СРЕДАХ**

Ю.А. Шполянский

На основе формализма аналитического сигнала получено выражение для комплексной огибающей оптического излучения, составленного из импульсов с континуумными спектрами и различными центральными частотами. Показано, что само- и взаимодействие таких импульсов в нелинейной среде может быть описано одним уравнением для комплексной огибающей их суммарного поля при условии, что дисперсионная зависимость константы распространения от частоты вводится в уравнение в Фурье-пространстве непосредственно, а не в виде аппроксимации несколькими первыми членами ряда Тейлора.

Ключевые слова: континуум, сверхширокий спектр, фемтосекундный, сверхбыстрый, сверхкороткий, предельно короткий, огибающая, аналитический сигнал, взаимодействие, кросс-модуляция.

Введение

Для нелинейной оптики фемто- и аттосекундных импульсов важным и актуальным является вопрос выбора теоретических подходов, на основе которых строятся модели эволюции электромагнитного излучения в прозрачных средах. Фундаментальным для описания динамики квазимонохроматических световых импульсов был подход, основанный на рассмотрении комплексной огибающей их электрического поля [1–3]. Уравнения для огибающих позднее были обобщены на случай фемтосекундных импульсов с широкими, в том числе континуумными, спектрами, ширина которых сопоставима с центральной частотой [4, 5]. Эти уравнения успешно применяются для теоретического описания суживания спектра в оптических волноводах [6] и объемных средах [7–9].

Однако корректность и целесообразность распространения подхода на основе комплексной огибающей на случай излучения с континуумным спектром, а также предельно коротких импульсов (ПКИ) из малого (меньше 10) числа колебаний поля [10] вызывала дискуссии с момента появления таких объектов. Изначально целью введения огибающей в радиофизике и оптике был анализ медленных по сравнению с периодом колебаний изменений комплексной огибающей длинных импульсов и уход от рассмотрения «быстрых» осцилляций электромагнитного поля. В случае ПКИ временной масштаб сопоставим с одним периодом колебаний, и введение огибающей не является необходимым. Поэтому параллельно развивался подход, связанный с рассмотрением эволюции непосредственно электрического поля (спектра) фемтосекундных импульсов. Уравнения для поля часто получают из полной системы уравнений Максвелла в приближении однонаправленного распространения излучения (отсутствие самоотраженной волны) [12–15]. Эти уравнения включают традиционные уравнения для огибающих как предельные случаи [12].

Полевые уравнения позволяют анализировать не только эволюцию одиночных импульсов с континуумными спектрами, но и взаимодействие таких импульсов, в том числе с разными центральными частотами [16], не требуя для этого какой-либо дополнитель-

ной модификации. При рассмотрении огибающих для описания взаимодействия импульсов используют системы связанных уравнений, соответствующих различным несущим частотам [1–3, 11]. В настоящей работе формализм аналитического сигнала [17] применен для получения комплексной огибающей оптического излучения с произвольным временным профилем, в том числе составленного из импульсов с континуумными спектрами и различными центральными частотами. Доказано, что такая огибающая позволяет рассчитывать само- и взаимодействие импульсов в рамках одного уравнения, как и в случае полевого подхода, при условии, что дисперсионная зависимость константы распространения от частоты вводится в уравнение для огибающей в Фурье-пространстве непосредственно, без традиционно используемого разложения в ряд Тейлора.

Комплексная огибающая оптического сигнала с произвольным временным профилем

Будем рассматривать эволюцию линейно поляризованного светового излучения в прозрачном одномодовом оптическом волноводе, считая структуру электрического поля E неизменной в поперечном направлении. В современных книгах и статьях по нелинейной оптике [1–5, 11] вывод уравнений для комплексной огибающей \mathcal{E} стартует с представления электрического поля в виде

$$E(z, t) = \frac{1}{2} \mathcal{E}(z, t) \exp[i(\omega_0 t - k_0 z)] + \text{к.с.}, \quad (1)$$

где z – направление, вдоль которого распространяется излучение; t – время; ω_0 – частота, которую называют «несущей»; $k_0 = k(\omega_0)$; $k(\omega)$ – дисперсионная зависимость константы распространения от частоты ω ; «к.с.» обозначает комплексное сопряжение. Появление (1) в учебниках обычно сразу сопровождается стандартной оговоркой, что огибающая $\mathcal{E}(z, t)$ характеризуется медленными изменениями на расстояниях z порядка длины волны $\lambda_0 = 2\pi c / \omega_0$ и соответственно узким временным спектром по сравнению с ω_0 . На самом деле при зафиксированном параметре ω_0 для любого физически значимого распределения электрического поля можно взаимно однозначно определить его комплексную огибающую, удовлетворяющую (1). Чтобы в этом убедиться, необходимо, кроме (1), иметь однозначную обратную процедуру расчета огибающей \mathcal{E} для любого E .

Такая процедура следует из теории аналитического сигнала [17]. Рассмотрим произвольную вещественнозначную функцию времени $s(t)$, для которой существует преобразование Фурье. Функция $s(t)$ и ее частотный спектр $g(\omega)$ связаны соотношениями

$$g(\omega) = F(s(t)) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \exp(-i\omega t) dt; \quad s(t) = F^{-1}(g(\omega)) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} g(\omega) \exp(i\omega t) d\omega,$$

где ω – частота; F, F^{-1} – прямое и обратное преобразования Фурье. Далее имеем:

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \left[\int_0^{+\infty} g(\omega) \exp(i\omega t) d\omega + \int_{-\infty}^0 g(\omega) \exp(i\omega t) d\omega \right] = a(t) + \text{к.с.} \quad (2)$$

Здесь введена комплексная функция $a(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{+\infty} g(\omega) \exp(i\omega t) d\omega = F^{-1}[H(\omega)g(\omega)]$

– аналитический сигнал [17], спектр которого построен из спектральных компонент функции $s(t)$ на частотах $\omega \geq 0$:

$$H(\omega) = \begin{cases} 1, & \omega > 0, \\ 1/2, & \omega = 0, \\ 0, & \omega < 0. \end{cases} \quad (3)$$

Для получения правой части (2) во втором интегральном слагаемом ω заменено на $-\omega$ и использовано свойство спектра вещественной функции: $g(-\omega) = g^*(\omega)$, где символ звездочки обозначает комплексное сопряжение. Сопоставляя (1) и (2), имеем:

$$\mathcal{E}(z, t) = 2 \exp[-i(\omega_0 t - k_0 z)] \cdot F^{-1}[H(\omega)G(z, \omega)], \quad (4)$$

где $G(z, \omega) = F(E(z, t))$. В частотной области формула (4) переходит в выражение для спектра комплексной огибающей

$$\mathcal{E}(z, \omega - \omega_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \mathcal{E}(z, t) \exp[-i(\omega - \omega_0)t] dt = 2 \exp(ik_0 z) \cdot H(\omega)G(z, \omega) \quad (5)$$

или, что то же самое,

$$\mathcal{E}(z, \omega) = 2 \exp(ik_0 z) \cdot H(\omega + \omega_0)G(z, \omega + \omega_0). \quad (5')$$

Таким образом, с точностью до множителя $2 \exp(ik_0 z)$ частотный спектр огибающей получается из спектральных компонент электрического поля с неотрицательными частотами, сдвинутых влево на ω_0 . Выражения (1), (4) взаимно однозначны, если спектр $\mathcal{E}(z, t)$ не содержит компонент на частотах $\omega < -\omega_0$.

Заметим также, что

$$A(z, t) = |\mathcal{E}(z, t)| = 2 \left| F^{-1}[H(\omega) \cdot F(E(z, t))] \right|, \quad (6)$$

т.е. модуль комплексной огибающей однозначно определяется значениями вещественной функции $E(z, t)$ и не зависит от в общем случае искусственного параметра ω_0 . Функция $A(z, t)$ представляет собой обобщенную временную вещественную огибающую произвольного оптического сигнала $E(z, t)$ [17] (рис. 1).

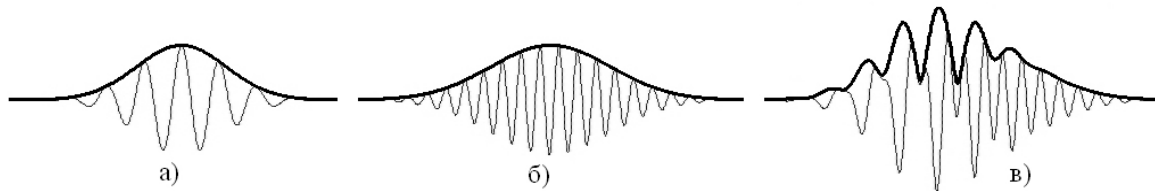


Рис. 1. Электрическое поле E (тонкая линия) и рассчитанная по формуле (6) вещественная огибающая A (жирная линия) для ПКИ на основной (а), удвоенной (б) частоте и суммы импульсов (а), (б), сдвинутых друг относительно друга по времени (в)

Выражения (4), (5) позволяют рассчитать комплексную огибающую и ее частотный спектр для произвольного оптического сигнала. Заметим, что в современной литературе по нелинейной оптике эти выражения практически не встречаются и не обсуждается процедура их получения. Без понимания этой процедуры нельзя сделать вывод о том, что формализм комплексной огибающей – это еще один эквивалентный способ описания вещественного электрического поля, не связанный с какими-либо ограничивающими предположениями на этапе введения огибающей. Кроме этого, без выражений (4), (5) нельзя изучать эволюцию сигнала сложной формы, когда вид огибающей не угадать (рис. 1, в). Универсальность понятия огибающей – одна из фундаментальных причин работоспособности подхода на ее основе в случае импульсов из малого числа колебаний светового поля, а также излучения суперконтинуума.

Уравнение для комплексной огибающей фемтосекундных импульсов со сверхширокими спектрами

При выводе уравнений для огибающей выражение (1) подставляют в уравнения Максвелла, дополненные уравнениями поляризованного отклика среды, или производные из них полевые уравнения и получают уравнения для огибающей. Взаимно однозначные соотношения (1), (4) позволяют преобразовать любое уравнение для поля в прозрачной среде в эквивалентное уравнение для комплексной огибающей с эквивалентными начальными и граничными условиями, а также восстановить $E(z,t)$ по рассчитанному $\mathcal{E}(z,t)$ при любом z . На этом этапе уравнения эквивалентны, и результаты, полученные на их основе, должны быть идентичны.

Различия между подходами появляются, когда в уравнении для огибающей используют не все слагаемые, получаемые при его выводе из полевого уравнения. Пренебрежение частью слагаемых имеет место практически всегда, так как исследователи стремятся уйти от рассмотрения быстрых эффектов, связанных с отдельными осцилляциями, следуя привычному представлению об огибающей. Генерация утроенных частот и их взаимодействие с излучением на основных частотах – пример эффекта, который традиционно игнорируется. Авторы работы [5] удерживают все слагаемые в уравнении для огибающей. Их уравнение повторяет выведенное в [12].

Для моделирования взаимодействия импульсов с континуумными спектрами и сильно различающимися центральными частотами необходимо точно описывать дисперсию оптической среды в очень широком спектральном диапазоне в области прозрачности. Этим свойством обладают уравнения для полей и спектров импульсов, которые, по сути, непосредственно включают линейный и нелинейный поляризационные отклики среды. В уравнениях для огибающих дисперсионная зависимость константы распространения от частоты обычно аппроксимируется первыми слагаемыми разложения в ряд Тейлора относительно «несущей» частоты, и область корректного описания дисперсионного отклика ограничена по построению. Однако и в уравнение для огибающей несложно эквивалентным образом ввести точный дисперсионный отклик среды в Фурье-пространстве, что делает уравнение применимым для описания как само-, так и взаимодействия фемтосекундных импульсов с континуумными спектрами. При этом сложность численного решения уравнения псевдоспектральными методами [3] не увеличивается.

Рассмотрим распространение интенсивного фемтосекундного импульсного излучения, в общем случае со сложным временным профилем и частотным спектром, ширина которого сопоставима или превышает центральную частоту. Будем предполагать, что спектральные компоненты импульса попадают в область прозрачности волновода и далеки от резонансных частот. Показатель преломления $n(\omega)$ оптических сред в области прозрачности часто может быть представлен в виде

$$n(\omega) = N_0 + \Delta n(\omega), \quad \Delta n(\omega) \ll N_0, \quad N_0 = \text{const}(\omega). \quad (7)$$

Константа распространения связана с показателем преломления соотношением $k(\omega) = \omega n(\omega) / c$, где c – скорость света в вакууме.

Нелинейный отклик среды $P^{NL}(E)$ будем считать также нерезонансным:

$$\Delta n^{NL} \ll N_0, \quad (8)$$

где Δn^{NL} – индуцированная нелинейная добавка к показателю преломления.

Предполагая, кроме (7), (8), неизменность поперечного распределения электрического поля и отсутствие самоотраженной волны, можно получить уравнение однона-

правленной (в положительном направлении оси z) эволюции спектральной плотности электрического поля импульса в волноводе [10, 12–14]:

$$\frac{\partial G}{\partial z} = -i \frac{\omega}{c} n(\omega) G - \frac{2\pi}{cN_0} F \left(\frac{\partial P^{NL}(E)}{\partial t} \right). \quad (9)$$

В поле фемтосекундных импульсов из малого числа колебаний светового поля простейшей моделью нелинейного поляризационного отклика является модель безынерционной кубической нелинейности электронной природы:

$$P^{NL} = \chi E^3, \quad (10)$$

где χ – нелинейная кубическая восприимчивость сердцевины волновода.

Если условия (7), (8) имеют место и $\Delta n(\omega)$ плавно меняется с частотой, то сдвиг импульса как целого с групповой скоростью V^g происходит существенно быстрее, чем изменение его временного профиля. Поэтому целесообразен переход в сопровождающую систему координат с «запаздывающим» временем:

$$\tau = t - z/V^g = t - k'(\omega_0)z, \quad (11)$$

где

$$V^g = 1/k'(\omega_0), \quad k'(\omega) = \frac{dk}{d\omega}.$$

Для частотного спектра замена (11) соответствует преобразованию

$$G_\tau = \exp[i\omega k'(\omega_0)z] G,$$

где нижний индекс τ обозначает соответствующие физические величины в сопровождающей системе координат. Для G_τ получаем уравнение

$$\frac{\partial G_\tau}{\partial z} = -i \frac{\omega}{c} [n(\omega) - n^g] G_\tau - \frac{2\pi}{cN_0} F \left(\frac{\partial P^{NL}(E_\tau)}{\partial \tau} \right). \quad (12)$$

В (12) введен групповой показатель преломления n^g :

$$n^g = \frac{c}{V^g}, \quad n^g = n(\omega_0) + \Delta n^g(\omega_0), \quad \Delta n^g(\omega) = \omega \frac{dn}{d\omega}.$$

Используя выражения (1), (5), получим эквивалентное (12) уравнение для комплексной огибающей. Для простоты изложения рассмотрим по отдельности линейную и нелинейную части уравнения (12). Такое разделение связано с тем, что линейная (дисперсионная) часть уравнения имеет более компактный вид в частотной, а нелинейная часть – во временной области. Линейная часть уравнения (12) имеет вид

$$\frac{\partial G_\tau}{\partial z} = -i \frac{\omega}{c} [n(\omega) - n_g] G_\tau. \quad (13)$$

Нелинейное уравнение во временной области записывается как

$$\frac{\partial E_\tau}{\partial z} = -\frac{2\pi}{cN_0} \frac{\partial P^{NL}(E_\tau)}{\partial \tau}. \quad (14)$$

Обе части могут быть формально объединены в одно уравнение применением преобразования Фурье к нелинейному уравнению и суммированием правых частей. Такая же структура уравнения сохраняется и для комплексной огибающей. Используя (4), (5), (11), из уравнения (13) получаем эквивалентное ему линейное уравнение для спектра огибающей в сопровождающей системе координат:

$$\frac{\partial \mathcal{E}_\tau(z, \omega - \omega_0)}{\partial z} = -i [k(\omega) - k_0 - k'(\omega_0) \cdot (\omega - \omega_0)] \mathcal{E}_\tau(z, \omega - \omega_0), \quad (15)$$

которое, как и (13), непосредственно инкорпорирует дисперсионную зависимость прозрачной среды произвольного вида $k(\omega) = \omega n(\omega)/c$, удовлетворяющую условию (7).

Уравнение (15) иногда фигурирует как промежуточное при выводе уравнений для огибающих (см., например, [3]), но обычно далее редуцируется. Точная зависимость $k(\omega)$ заменяется разложением в ряд Тейлора вокруг частоты ω_0 , что позволяет получить простой аналог во временной области после применения обратного преобразования Фурье, в то время как для излучения со сверхшироким спектром, разумеется, корректнее рассматривать точный закон дисперсии среды, например, измеренный экспериментально.

Заметим, что техника разделения уравнений эволюции фемтосекундного излучения на линейную и нелинейную части сейчас общепринята при численном моделировании на основе метода расщепления по физическим процессам с применением быстрого преобразования Фурье для реализации линейного шага [3]. Линейные уравнения для спектра вида (13), (15) могут быть решены аналитически на каждом шаге по z . Трудоемкость компьютерных вычислений не различается для точной записи $k(\omega)$ и его разложения в ряд Тейлора. Поэтому смысл применения ряда Тейлора при численном моделировании эволюции фемтосекундного излучения псевдоспектральными методами полностью теряется.

Несложно убедиться, что нелинейное уравнение для электрического поля (14) с моделью отклика (10) после подстановки (1) переходит в эквивалентное уравнение для огибающей [12,5]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial z} = & -\frac{3\pi\chi}{2cN_0} \left[\frac{\partial}{\partial \tau} (\mathcal{E}|\mathcal{E}|^2) + i\omega_0 \mathcal{E}|\mathcal{E}|^2 \right] - \\ & -\frac{3\pi\chi}{2cN_0} \mathcal{E}^2 \left[\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial \tau} + i\omega_0 \mathcal{E} \right] \exp(2i\{\omega_0 \tau - [k_0 - \omega_0 k'(\omega_0)]z\}). \end{aligned} \quad (16)$$

Кроме экспоненциального множителя, вид нелинейных слагаемых в правой части (16) одинаков в стоячей и сопровождающей системах координат. Поэтому здесь и далее в нелинейных уравнениях нижний индекс τ опущен для краткости.

Покажем, что традиционно рассматриваемые в уравнениях для огибающих нелинейные слагаемые на основных частотах (первое слагаемое в правой части (16) при использовании модели нелинейности (10)) позволяют описывать не только самовоздействие одиночных импульсов в прозрачных средах, но и взаимодействие импульсов с широкими спектрами и различающимися центральными частотами. Для введения огибающей электрического поля взаимодействующих импульсов необходимо представление об огибающей оптического сигнала с произвольным временным профилем (взаимно однозначные выражения (1), (4)). Линейная часть уравнения для огибающей должна корректно описывать дисперсионный отклик прозрачной среды для всех гармоник сверхширокого, в общем случае неплотного (квазидискретного) спектра излучения. Этому требованию удовлетворяет правая часть (15).

Пусть спектры двух взаимодействующих импульсов не пересекаются (энергия компонент в области пересечения спектров мала для проявления нелинейных эффектов). Тогда можно определить некоторую граничную частоту Ω и считать, что компоненты с частотами $\omega < \Omega$ и $\omega > \Omega$ формируют, соответственно, первый и второй импульсы:

$$\begin{aligned} |\omega| \leq \Omega: & \quad G_1(z, \omega) = G(z, \omega), \quad G_2(z, \omega) = 0; \\ |\omega| > \Omega: & \quad G_2(z, \omega) = G(z, \omega), \quad G_1(z, \omega) = 0; \\ G(z, \omega) = & \quad G_1(z, \omega) + G_2(z, \omega), \end{aligned} \quad (17)$$

где $G_1(z, \omega)$, $G_2(z, \omega)$ – спектральные плотности импульсов, $G(z, \omega)$ – суммарная спектральная плотность.

Будем считать ω_1, ω_2 «центральными» частотами спектров G_1, G_2 . При выполнении (17) суммарное электрическое поле можно записать в виде

$$E(z, t) = \frac{1}{2} \mathcal{E}_1(z, t) \exp\{i[\omega_1 t - k_1 z]\} + \frac{1}{2} \mathcal{E}_2(z, t) \exp\{i[\omega_2 t - k_2 z]\} + \text{к.с.}, \quad (18)$$

где $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2$ – комплексные огибающие импульсов, полученные из $G_1(z, \omega), G_2(z, \omega)$ по формуле (4), используя ω_1, ω_2 и $k_1 = k(\omega_1), k_2 = k(\omega_2)$ вместо ω_0, k_0 соответственно.

Определим $\omega_0 = \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)$ и перейдем в систему координат с «запаздывающим» временем (11). Сопоставив (1) и (18), с учетом (11) имеем:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 \exp\{i(\alpha_1 - \alpha_0)\} + \mathcal{E}_2 \exp\{i(\alpha_2 - \alpha_0)\}, \quad \alpha_j = \omega_j \tau - [k_j - \omega_j k'(\omega_0)]z, \quad j = 0, 1, 2. \quad (19)$$

Подставим (19) в нелинейное уравнение (16), пренебрегая последним слагаемым в правой части. Огибающая суммарного поля входит в уравнение в виде комплекса $\mathcal{E}|\mathcal{E}|^2$, который через огибающие отдельных импульсов расписывается в виде

$$\begin{aligned} \mathcal{E}|\mathcal{E}|^2 = & \mathcal{E}_1 \left(|\mathcal{E}_1|^2 + 2|\mathcal{E}_2|^2 \right) \exp\{i(\alpha_1 - \alpha_0)\} + \mathcal{E}_2 \left(|\mathcal{E}_2|^2 + 2|\mathcal{E}_1|^2 \right) \exp\{i(\alpha_2 - \alpha_0)\} + \\ & + \mathcal{E}_1^2 \mathcal{E}_2^* \exp\{i(2\alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_0)\} + \mathcal{E}_1^* \mathcal{E}_2^2 \exp\{i(2\alpha_2 - \alpha_1 - \alpha_0)\}. \end{aligned} \quad (20)$$

Из последних двух слагаемых в правой части (20) видно, что нелинейное взаимодействие приводит к появлению новых спектральных компонент в области частот $|2\omega_1 - \omega_2|, |2\omega_2 - \omega_1|$. В зависимости от значений ω_1, ω_2 эти компоненты могут оказаться близкими или даже совпасть с по частоте с компонентами первого или второго импульсов. В таком случае эффективность их генерации может быть сопоставима с эффективностью фазовой само- и кросс-модуляции, определяемой первыми двумя слагаемыми в правой части (20), так как групповые скорости будут близки.

При изучении взаимодействия вместо огибающей суммарного поля традиционно рассматривают огибающие отдельных импульсов и получают для них систему связанных нелинейных уравнений по числу рассматриваемых импульсов [1–3, 11]. Слагаемыми на комбинационных частотах при этом обычно пренебрегают, так как (а) они содержат осциллирующие составляющие и (б) не ясно, к каким уравнениям их относить. В нашем случае это дает нелинейную часть системы в виде [3]

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathcal{E}_1}{\partial z} = -\frac{3\pi\chi}{2cN_0} \left\{ \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\mathcal{E}_1 \left(|\mathcal{E}_1|^2 + 2|\mathcal{E}_2|^2 \right) \right] + i\omega_1 \mathcal{E}_1 \left(|\mathcal{E}_1|^2 + 2|\mathcal{E}_2|^2 \right) \right\}, \\ \frac{\partial \mathcal{E}_2}{\partial z} = -\frac{3\pi\chi}{2cN_0} \left\{ \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\mathcal{E}_2 \left(|\mathcal{E}_2|^2 + 2|\mathcal{E}_1|^2 \right) \right] + i\omega_2 \mathcal{E}_2 \left(|\mathcal{E}_2|^2 + 2|\mathcal{E}_1|^2 \right) \right\}. \end{cases} \quad (21)$$

Из сказанного выше ясно, что такая система является заведомо менее общей, чем одно уравнение для огибающей суммарного поля, применение которого в случае фемтосекундных импульсов с континуумными спектрами не только корректнее, но и проще. Подстановка представления (18) в уравнение для электрического поля осуществлена в работе [16]. Константа распространения в полученном авторами уравнении для огибающей записана в виде бесконечного ряда Тейлора.

Еще одним важным недостатком перехода к системе уравнений является неоднозначность разбиения суммарного поля на импульсы, так как оно требует искусственного введения граничных частот, как это сделано в (17). Такое разбиение может быть корректным на входе в оптическую среду, но оказаться неправомерным по мере сужения спектров импульсов. Комплексная огибающая суммарного поля (4) взаимно однозначна с электрическим полем (1) и перечисленных недостатков лишена.

Заключение

Приведены выражения для комплексной огибающей электрического поля оптического излучения с произвольной временной структурой, в том числе составленного из импульсов с континуумными спектрами и различными центральными частотами. Указано, что поле и его комплексная огибающая взаимно однозначны, поэтому подходы на их основе математически эквивалентны. Различия появляются, если в уравнениях для огибающих учитываются не все слагаемые, получаемые при их выводе из полевых уравнений. Приведенные выражения (4), (5) восполняют пробел, существующий в современной научной литературе, посвященной выводу уравнений для огибающих оптического излучения со сверхшироким спектром, так как в них необходимая процедура получения огибающей не обсуждается.

Показано, что само- и взаимодействие в прозрачной нелинейной среде импульсов со сверхширокими спектрами и различными центральными частотами может быть описано одним уравнением для комплексной огибающей их суммарного поля при условии, что дисперсионная зависимость среды вводится в уравнение в Фурье-пространстве непосредственно, а не в виде аппроксимации несколькими первыми членами ряда Тейлора. Такое уравнение является более точным, чем система уравнений для огибающих отдельных импульсов, обычно применяемая для анализа процесса их взаимодействия. Указано, что процедура введения огибающих отдельных импульсов в общем случае неоднозначна, так как их спектры могут сливаться и перекрываться в результате взаимодействия в нелинейной среде.

Автор признателен д.ф.-м.н., профессору С.А. Козлову и к.ф.-м.н. М.А. Бахтину за полезные обсуждения.

Литература

1. Шен И.Р. Принципы нелинейной оптики. – М.: Наука, 1989. – 560 с.
2. Ахманов С.А., Выслоух В.А., Чиркин А.С. Оптика фемтосекундных лазерных импульсов. – М.: Наука, 1988. – 312 с.
3. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. – М.: Мир, 1996. – 323 с.
4. Brabec Th., Krausz F. Nonlinear optical pulse propagation in the single-cycle regime // *Phys. Rev. Lett.* – 1997. – V. 78. – № 7. – P. 3282–3285.
5. Genty G., Kinsler P., Kibler B., Dudley J.M. Nonlinear envelope equation modeling of sub-cycle dynamics and harmonic generation in nonlinear waveguides // *Optics Express.* – 2007. – V. 15. – № 9. – P. 5382–5387.
6. Dudley J.M., Genty G., Coen S. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber // *Rev. Mod. Phys.* – 2006. – V. 78. – № 4. – P. 1135–1184.
7. Кандидов В.П., Голубцов И.С., Косарева О.Г. Источники суперконтинуума в мощном фемтосекундном лазерном импульсе при распространении в жидкости и газе // *Квантовая электроника.* – 2004. – Т. 34. – № 4. – С. 348–354.
8. Akozbek N., Trushin S.A., et al. Extending the supercontinuum spectrum down to 200 nm with few-cycle pulses // *New Journal of Physics.* – 2006. – V. 8. – № 9. – P. 177–188.
9. Serebryannikov E.E., Goulielmakis E., Zheltikov A.M. Generation of supercontinuum compressible to single-cycle pulse widths in an ionizing gas // *New Journal of Physics.* – 2008. – V. 10. – № 9. – P. 093001 (1–19).
10. Brabec Th., Krausz F. Intense few-cycle laser fields: Frontiers of nonlinear optics // *Rev. Mod. Phys.* – 2000. – V. 72. – № 2. – P. 545–591.
11. Boyd W.R. *Nonlinear Optics.* – 2 ed. – San Diego, CA: Academic, 2003. – 593 p.

12. Bespalov V.G., Kozlov S.A., Shpolyanskiy Yu.A., Walmsley I.A. Simplified field wave equations for the nonlinear propagation of extremely short light pulses // *Physical Review A*. – 2002. – V. 66. – P. 013811 (1–10).
13. Husakou A.V., Herrmann J. Supercontinuum generation of higher-order solitons by fission in photonic crystal fibers // *Phys. Rev. Lett.* – 2001. – V. 87. – № 20. – P. 203901 (1–4).
14. Kolesik M., Moloney J.V. Nonlinear optical pulse propagation simulation: From Maxwell's to unidirectional equations // *Phys. Rev. E*. – 2004. – V. 70. – № 3. – P. 036604 (1–11).
15. Bergé L., Skupin S. Few-Cycle light bullets created by femtosecond filaments // *Phys. Rev. Lett.* – 2008. – V. 100. – № 11. – P. 113902 (1–4).
16. Бахтин М.А., Козлов С.А. // *Оптика и спектроскопия*. – 2005. – Т. 98. – № 3. – С. 470–475.
17. Gabor D. Theory of communication // *J. IEE*. – 1946. – V. 93 (pt. 3). – P. 429–457.
18. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1973. – 720 с.

Шполянский Юрий Александрович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, shpolyan@mail.ru

УДК 621.314.333, 621.314.6

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА
ПОСТОЯННОГО ТОКА С АКТИВНЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ**

П.А. Борисов, А.К. Седнев

Рассмотрена структура энергетической подсистемы с сетевым понижающим трансформатором и активным выпрямителем, обеспечивающая двухсторонний обмен энергией между питающей сетью и электрической машиной, для низковольтных электроприводов постоянного тока. В пакете MATLAB/Simulink с применением приложения SimPowerSystems разработана модель замкнутой системы электропривода постоянного тока с активным выпрямителем на базе низковольтной машины ПБВ-100М, проведено моделирование и проанализированы его результаты.

Ключевые слова: активный выпрямитель, замкнутая система подчиненного регулирования, широтно-импульсный преобразователь, электропривод постоянного тока, энергия рекуперации.

Введение

В настоящее время основные усилия по энергосбережению сконцентрированы в сфере потребления электроэнергии. Учитывая, что более 60% всей вырабатываемой электроэнергии потребляют электроприводы, высокую актуальность приобретают задачи энергосбережения при проектировании, эксплуатации, а также модернизации современных систем электропривода.

Широкое применение в промышленном и научном приборостроении и других отраслях получили замкнутые системы электропривода постоянного тока (ЗС ЭППТ) малой и средней мощности, построенные по двухзвенной структуре [1]: выпрямитель – промежуточное звено постоянного тока (ЗПТ) – транзисторный широтно-импульсный преобразователь (ШИП). С точки зрения улучшения электромагнитной совместимости и экономичности использования электроэнергии целесообразно использовать активные выпрямители на управляемых ключах, что при обратимости самого ШИП позволит рекуперировать в первичный источник энергию вращающихся частей машины и тем самым повысить к.п.д. всей системы в целом [1].

Энергетические подсистемы (ЭП), построенные на базе активных выпрямителей напряжения (АВН), при питании непосредственно от сети (бестрансформаторные схемы) могут использоваться только в высоковольтных установках, так как напряжение в ЗПТ у таких схем в рабочем режиме существенно превышает амплитуду напряжения сети. В статье рассматривается структура ЭП с сетевым понижающим трансформатором и АВН, обеспечивающая двухсторонний обмен энергией между питающей сетью и электрической машиной, применимая для низковольтных электроприводов постоянного тока. Разработана модель ЗС ЭППТ с АВН на базе низковольтной машины ПБВ-100М, проведено моделирование в пакете MATLAB/Simulink с применением приложения SimPowerSystems, проанализированы его результаты.

Структура электропривода постоянного тока с активным выпрямителем

Современные системы автоматизированного электропривода проектируются на базе двух подсистем – энергетической и информационной. Энергетическая подсистема включает в себя силовые цепи первичного источника питания, полупроводникового и электромеханического преобразователей (электрической машины) и осуществляет

двухсторонний обмен энергией между первичным источником питания и электрической машиной посредством коммутации силовых ключей. Полупроводниковый преобразователь является неотъемлемой частью современных систем автоматизированного электропривода и обеспечивает их электрической энергией требуемого вида и качества. Информационная подсистема включает в себя систему управления полупроводниковым преобразователем с информационно-измерительной частью и осуществляет реализацию заданного алгоритма регулирования координат электропривода. Предельные динамические возможности электропривода определяются параметрами энергетической подсистемы, так как информационная подсистема не может обеспечить требуемые моменты, скорости и ускорения двигателя, если они не заложены в ЭП [1].

Наиболее массовое практическое применение в регулируемых электроприводах получили двухзвенные преобразователи с промежуточным звеном постоянного тока. В современных системах электропривода постоянного тока энергетическая подсистема, если нет необходимости в автономном источнике питания, включает в себя силовые цепи сети переменного тока, выпрямитель, диодный или на управляемых ключах, т.е. с инвертором рекуперации (ИР), силовой фильтр (СФ), тормозную цепь (ТЦ), силовой каскад транзисторного ШИП, двигатель постоянного тока (ДПТ).

В настоящее время основой построения унифицированных систем автоматизированного электропривода в отечественной и зарубежной практике служит структура подчиненного регулирования [1], содержащая ряд замкнутых контуров, последовательно охватывающих друг друга. Структура подчиненного регулирования, кроме удобства построения унифицированных систем на ее основе, привлекает своей простотой и однозначностью соотношений для расчета параметров регуляторов из условия обеспечения заданных динамических качеств. Поэтому будем рассматривать только системы электропривода, построенные по структуре подчиненного регулирования, в которой электрическая цепь машины является объектом для подчиненного контура регулирования тока, а механическая часть – объектом для контура регулирования скорости вращения.

При торможении электропривода кинетическая энергия, которой обладают вращающиеся массы привода в начальный момент торможения, превращается в электрическую энергию и возвращается в звено постоянного тока. Избыточную энергию необходимо аккумулировать или преобразовывать в другую форму. Принципиально существует три возможности:

- аккумуляция (запас) энергии в конденсаторе силового фильтра;
- использование ТЦ, состоящей из прерывателя и тормозного сопротивления (преобразование энергии в тепло);
- рекуперация (возврат) энергии в сеть посредством ИР (использование электрической энергии другим пользователем).

Методика структурно-параметрического анализа и синтеза ЗС ЭППТ при двухстороннем энергообмене между источником и электрической машиной изложена в [2, 3] и позволяет выбрать наиболее эффективный способ использования энергии рекуперации и правильно определить структуру ЗПТ ЗС ЭППТ, а также выбрать состав оборудования ЭП (СФ, ТЦ и АВН), определить электромагнитные нагрузки на их элементы в зависимости от величины рекуперированной энергии вращающихся частей электропривода, уровня токоограничения и циклограмм работы ЗС электропривода.

С точки зрения улучшения электромагнитной совместимости и экономичности использования электроэнергии целесообразно использовать активные выпрямители на управляемых ключах, что при обратимости самого ШИП позволит рекуперировать в первичный источник энергию вращающихся частей машины и тем самым повысить к.п.д. всей системы в целом.

Преобразователи, обеспечивающие двухстороннее энергопотребление, т.е. возможность работы в 4 квадрантах комплексной плоскости на стороне переменного тока, носят в отечественной литературе [4] название активных преобразователей. В англоязычной литературе используется обобщенный термин – преобразователь переменного/постоянного тока, соответствующий терминологии стандарта МЭК 60050-551 (AC/DC Converter). Управляемые силовые модули, на базе которых строится преобразователь, могут иметь разное исполнение, обеспечивая полную управляемость им в режиме потребления нагрузкой энергии и (или) рекуперации энергии в сеть.

Активный выпрямитель напряжения представляет собой автономный инвертор напряжения, выполненный на силовых ключах с обратными диодами, обращенный на сторону переменного тока. В режиме рекуперации энергия возвращается в сеть через инвертор рекуперации. Неуправляемый выпрямитель (НУВ) структурно входит в состав АВН, и выпрямление осуществляется через обратные диоды. Для обмена реактивной мощностью, включающей мощность высших гармоник, между сетью переменного тока и АВН используется конденсатор СФ ЗПТ. В принцип работы АВН заложен импульсный повышающий напряжение регулятор, поэтому он обязательно содержит в своем составе токоограничивающий дроссель, устанавливаемый на стороне переменного тока. По этой причине в АВН могут быстро развиваться аварийные процессы, и построение устройства защиты здесь требует особого внимания [5].

Моделирование ЗС ЭППТ с АВН в пакете MATLAB/Simulink

Структурно-имитационная модель ЗС ЭППТ с трехфазным АВН и транзисторным ШИП, реализованная в пакете MATLAB/Simulink с применением приложения SymPowerSystems, представлена на рис. 1.

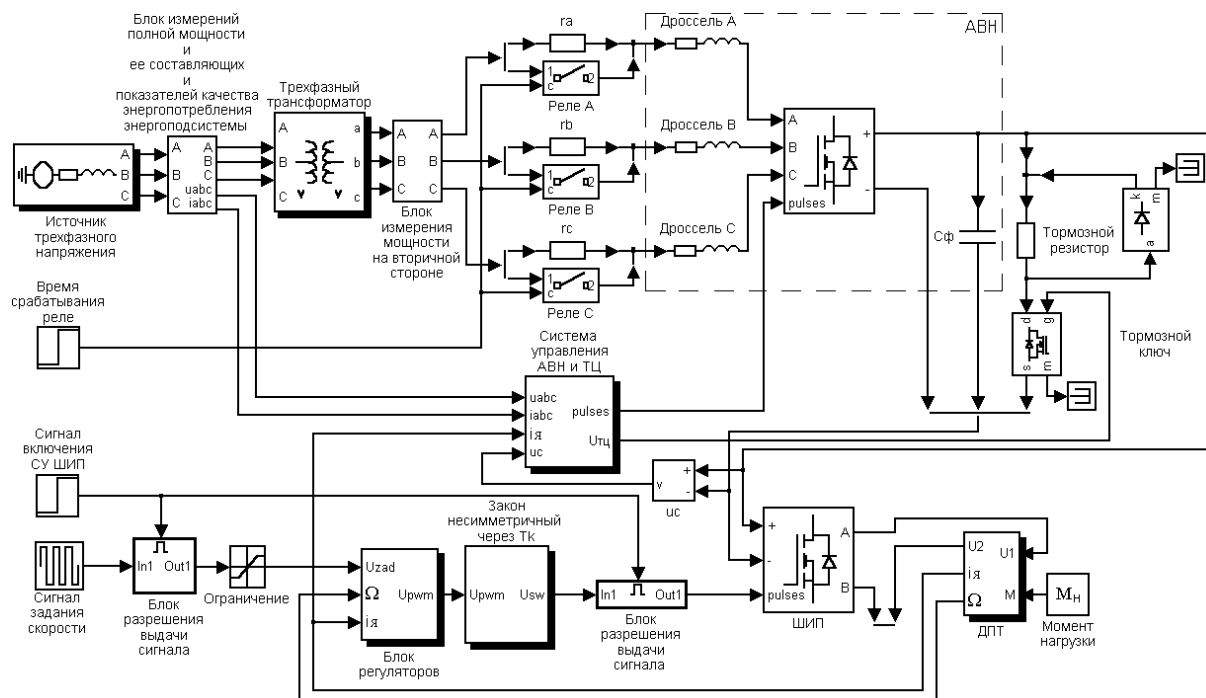


Рис. 1. Модель ЗС ЭППТ с трехфазным АВН и транзисторным ШИП

В нее входят элементы ЭП, часть которых выполнена в виде подсистем:

- источник трехфазного напряжения и трехфазный трансформатор;

- вентильный блок выпрямителя с инвертором рекуперации (т.е. АВН), цепью запуска и токоограничивающими дросселями;
- силовой фильтр ЗПТ с тормозной цепью;
- ШИП на полевых транзисторах (MOSFET), также возможен выбор IGBT;
- схемно-структурная модель ДПТ.

В информационную подсистему входят:

- блок измерений, состоящий из измерительной схемы полной мощности и составляющих ее трехфазных трехпроводных несимметричных ЭП и вычислителя показателей качества энергопотребления ЭП [6, 7];
- система управления и регулирования АВН и тормозной цепью;
- система управления ШИП, состоящая из блока регуляторов двухконтурной системы подчиненного регулирования скорости и формирователя сигналов управления ключами ШИП по несимметричному поочередному «через T_K » закону управления;
- виртуальные датчики измерения сетевых токов и напряжений, напряжения в ЗПТ, тока якоря и скорости.

Расчет регуляторов скоростной системы подчиненного регулирования производится по известным методикам, исходя из настроек на заданный переходный процесс [1]. Система регулирования АВН выполнена подчиненной двухконтурной с внешним контуром регулирования напряжения ЗПТ с пропорционально-интегральным (ПИ) регулятором и внутренним контуром регулирования сетевых токов, выполненным на базе трех релейных регуляторов. По параметрам автоколебаний, возникающих в замкнутой системе, определяются на модели требуемые настройки ПИ-регулятора (метод Циглера–Николса). Помимо регулирования ширины сигналов управления АВН, в модели организована фазоследящая система. Таким образом, независимо от характера реактивности в нагрузке, система автоматически регулирует фазу сетевого тока, обеспечивая высокие коэффициенты мощности и сдвига.

Отметим, что при снятых импульсах управления АВН модель (рис. 1) позволяет проводить анализ ЗС ЭППТ с ЭП на базе НУВ.

При проектировании ЭП необходимо определить максимальные электромагнитные нагрузки на ее элементы [3]. Наиболее тяжелым режимом работы ЗС ЭППТ с ШИП, при котором эти нагрузки максимальны, является режим периодического реверса скорости с выходом в зону ограничения тока якоря на заданном уровне I_0 [3]. Результаты моделирования ЗС ЭППТ с АВН на базе машины ПБВ-100М при работе в режиме периодического реверса скорости с токоограничением приведены на рис. 2 и 3 в виде осциллограмм электромеханических и электромагнитных процессов (в относительных единицах).

Основные технические данные двигателя серии ПБВ-100М: номинальный момент $M_n = 7,16$ Н·м, номинальная частота вращения $n = 1000$ об/мин, частота вращения холостого хода $n_{xx} = 1080$ об/мин, напряжение питания $U_n = 52$ В, номинальный ток $I_n = 18$ А, сопротивление обмотки якоря $r_y = 0,22$ Ом. Уровень ограничения тока якоря $I_0 = 2I_n$. Согласно методикам [2, 3], напряжение $u_{сф}$ на конденсаторе СФ ЗПТ приводится к U_n , ток якоря i_y – к току короткого замыкания $I_{кз} = U_n / r_y$, скорость вращения Ω – к скорости холостого хода. Фазные напряжения и токи на первичной стороне трансформатора отнесены к амплитуде напряжения фазы $U_{1m} = 311$ В и амплитуде номинального тока фазы $I_{1m} = 5$ А первичной стороны трансформатора.

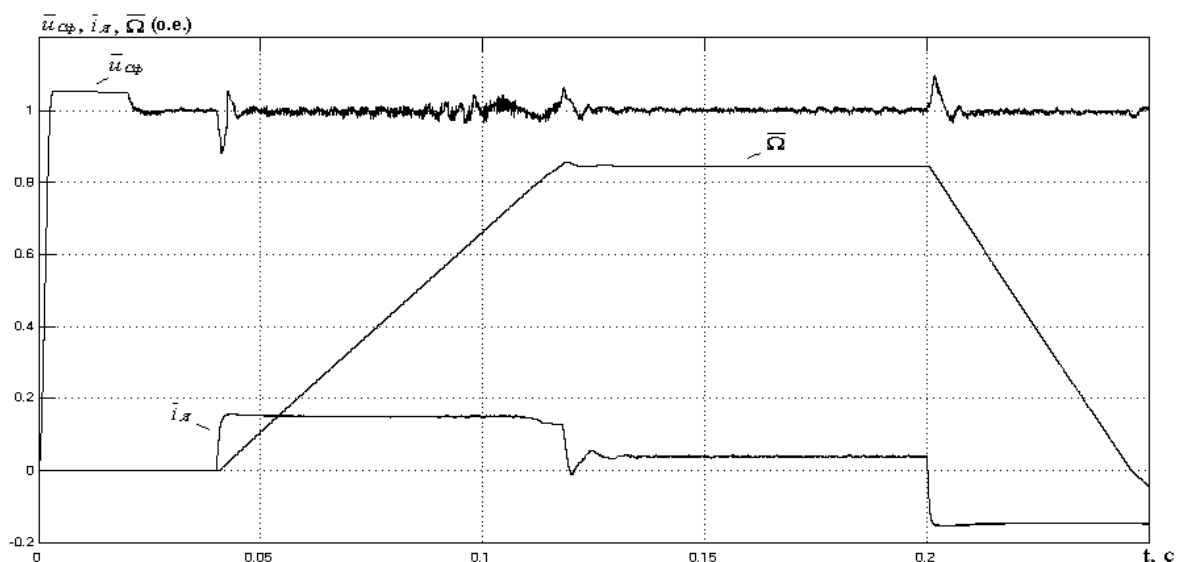


Рис. 2. Осциллограммы (в относительных единицах) напряжения на конденсаторе СФ ЗПТ $\bar{u}_{сф}$, тока якоря $\bar{i}_я$, скорости $\bar{\Omega}$ в ЭП ЗС ЭПТТ на базе АВН

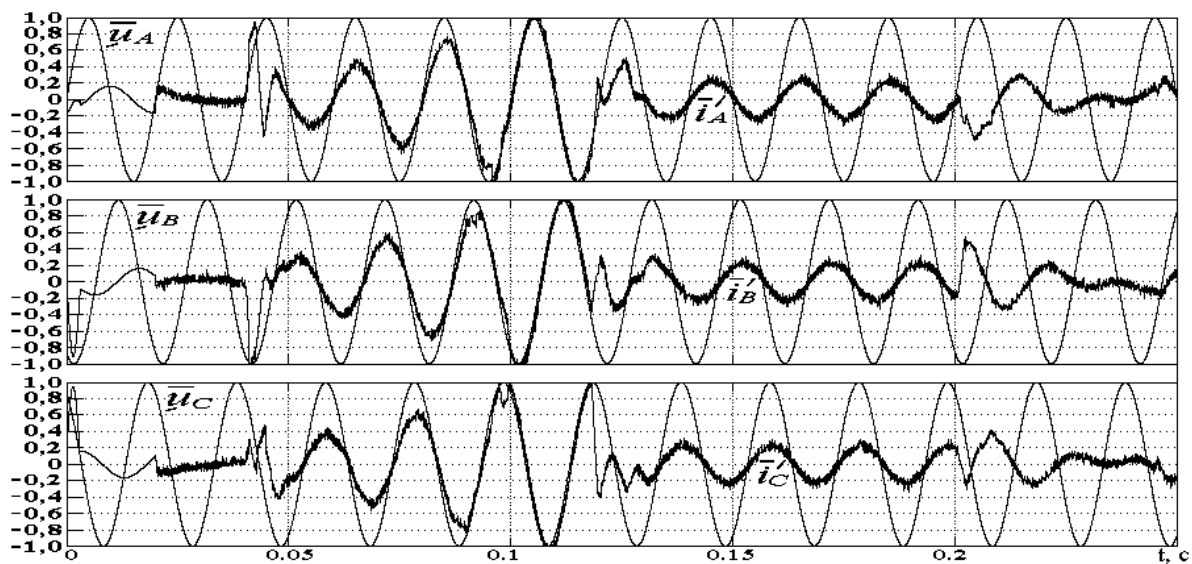


Рис. 3. Осциллограммы (в относительных единицах) фазных напряжений \bar{u}_A , \bar{u}_B , \bar{u}_C и токов \bar{i}_A , \bar{i}_B , \bar{i}_C на первичной стороне трансформатора в ЭП ЗС ЭПТТ на базе АВН

По результатам моделирования ЗС ЭПТТ с ЭП на базе АВН выявлены ее достоинства.

1. В ЭП на базе НУВ величина емкости конденсатора СФ ЗПТ выбирается согласно методике [2] в целях ограничения напряжения на нем в режиме рекуперации, когда ТЦ и АВН не используются. В ЭП с АВН требуемая величина емкости конденсатора СФ ЗПТ снижена относительно ЭП на базе НУВ с 34,5 до 2 мФ, что позволяет при наличии сетевых токоограничивающих дросселей не использовать цепь запуска и улучшить тем самым массогабаритные показатели системы.

2. В начале моделирования импульсы управления АВН сняты (см. рис. 2 и 3), затем АВН вступает в работу и стабилизирует напряжение ЗПТ в режиме холостого хода до U_n (рис. 2). По данным моделирования (рис. 2) видно, что АВН позволяет стабилизировать и регулировать напряжение в ЗПТ как в режиме потребления энергии, в том числе в режиме холостого хода, так и в режиме рекуперации энергии в сеть.

Ожидаемые «колебания» напряжения ЗПТ имеют место в следующих случаях: при «набросе» нагрузки (см. момент старта на рис. 2); при выходе на заданный уровень ограничения сетевого тока (см. окончание интервала разгона на рис. 2 и 3), который определяется мощностью сетевого трансформатора; при реверсе в системе, т.е. в момент начала рекуперации.

3. АВН обеспечивает рекуперацию энергии в сеть, так как на интервале торможения сетевой ток находится в противофазе с напряжением (рис. 3), за счет чего повышается энергетическая эффективность системы электропривода.

4. Показатели качества энергопотребления ЭП с АВН, определенные с помощью соответствующего вычислителя [6, 7], в квазиустановившемся режиме лучше, чем ЭП на базе НУВ. Так, для интервала движения с постоянной скоростью величина коэффициента мощности увеличена с 0,73 до 0,98, величина коэффициента гармоник (коэффициент искажения синусоидальности кривой тока) снижена с 0,52 до 0,16.

Заключение

Рассмотрена структура ЭП с сетевым понижающим трансформатором и АВН, обеспечивающая двухсторонний обмен энергией между питающей сетью и электрической машиной, применимая для низковольтных электроприводов постоянного тока. Разработана модель ЗС ЭППТ с АВН на базе низковольтной машины ПБВ-100М, проведено моделирование в пакете MATLAB/Simulink с применением приложения SimPowerSystems, проанализированы его результаты. Установлено, что применение АВН в ЭП ЗС ЭППТ с ШИП позволяет:

- снизить емкость конденсатора СФ ЗПТ и его установленную мощность;
- стабилизировать напряжение в ЗПТ и регулировать его с заданной динамикой;
- обеспечить рекуперацию энергии в сеть и тем самым повысить энергетическую эффективность системы электропривода;
- улучшить показатели качества энергопотребления ЭП.

Литература

1. Козярук А.Е., Томасов В.С. История и перспективы развития полупроводниковой преобразовательной техники и систем электропривода на ее основе // Известия вузов. – Приборостроение. – 1998. – Т. 41. – № 1–2. – С. 85–93.
2. Борисов П.А., Томасов В.С. Методика выбора наиболее эффективного способа использования энергии рекуперации в системах электропривода на базе ШИП – ДПТ в зависимости от режима работы // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2004. – Выпуск 15. – С. 335–339.
3. Борисов П.А. Определение электромагнитных нагрузок на элементы энергоподсистемы автоматизированных электроприводов постоянного тока с ШИП // Труды IV Международной (XV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу «Автоматизированный электропривод в XXI веке: пути развития». – Магнитогорск, 2004. – Ч. I. – С. 332–334.
4. Ефимов А.А., Шрейнер Р.Т. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока / Под общей ред. д-ра техн. наук, проф. Р.Т. Шрейнера. – Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2001. – 250 с., ил.
5. Борисов П.А., Томасов В.С. Моделирование и анализ электромагнитных процессов в силовых цепях активных выпрямителей напряжения // Труды V Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии и электроматериаловедение». МКЭЭЭ–2003. – Часть I. – Алушта, 2003. – С. 727–730.

6. Борисов П.А., Томасов В.С. Определение составляющих полной мощности энергоподсистем электротехнических комплексов // Exponenta Pro. Математика в приложениях. – 2004. – № 1. – С. 40–44.
7. Борисов П.А. Применение MATLAB/Simulink для измерения и оценки качества электроэнергии в трехфазных симметричных системах с активными преобразователями // Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB. Труды II-й Всероссийской научной конференции. – М., 2004. – С. 1372– 1387.

Борисов Павел Александрович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, borisov@ets.ifmo.ru

Седнев Алексей Константинович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, sednev-aleksey@yandex.ru

УДК 681.532.8

ДИНАМИКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОДДЕРЖАНИЯ КУРСА КОРАБЛЯ НА ОСНОВЕ РУЛЕВОГО ПРИВОДА С ВЕНТИЛЬНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

И.Е. Овчинников, Н.Г. Ватунская

Рассматривается нелинейная задача динамики управления курсом корабля с вентильным двигателем в приводе рулевой машины. Синтезируется закон управления, выбираются коэффициенты усиления и передаточное отношение редуктора.

Ключевые слова: вентильный двигатель, привод рулевой машины, закон управления, коэффициенты усиления, передаточное отношение редуктора.

Введение

Применение вентильных двигателей в приводах рулевых механизмов судов разных типов представляется перспективным с точки зрения известных преимуществ этого класса электрических машин, таких как отсутствие необходимости обслуживания, высокий длительный момент на единицу массы двигателя, высокий к.п.д. Все эти факторы достаточно важны для автономных транспортных объектов, какими и являются морские и речные суда.

Вентильные двигатели, несмотря на общность свойств и характеристик с двигателями постоянного тока, обладают специфическими отличиями, связанными с нелинейностью механических характеристик [1]. В этой связи поставлена задача изучения некоторых динамических процессов, возникающих в замкнутой системе управления курсом корабля с помощью рулевой машины, приводимой в движение вентильным двигателем.

Вывод динамики управления курсом корабля

На рис. 1 показан контур корабля C в плане, причем продольная ось X и связанный с ней вектор скорости корабля \vec{V} отклонены от заданного направления на угол $\Delta\Psi$. Начальное значение отклонения равно Ψ_0 и соответствует положению продольной оси OX_0 . Текущее изменение угла Ψ и ошибка отработки угла связаны зависимостью $\Delta\Psi = \Psi_0 - \Psi$. Изменение курсового угла Ψ и отработка рассогласования $\Delta\Psi$

осуществляются поворотом лопасти руля *РП* на угол δ относительно продольной оси OX , а поворот руля – через редуктор управляемым вентильным двигателем.

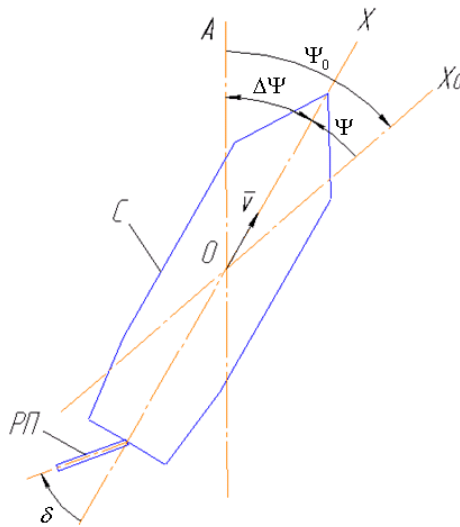


Рис. 1. Контур корабля и его угловые координаты

Структурная схема системы управления курсом корабля показана на рис. 2, где *И* – управляемый полупроводниковый инвертор (коммутатор), питающий вентильный двигатель *Д*; $f(\vartheta)$ – импульсная функция, распределяющая импульсы управления с датчика положения ротора (на схеме не показан) на соответствующие ключи инвертора *И*; ϑ – угол поворота ротора; *P* – редуктор с передаточным отношением i ; δ – угол поворота (закладки) руля; *РП* – рулевая поверхность руля; *Г* – блок гироскопов (курсового, вырабатывающего сигнал, пропорциональный Ψ и $\Delta\Psi$, и демпфирующего, вырабатывающего сигнал, пропорциональный производной $\dot{\Psi}$); k_1, k_2, k_3, k_4 – коэффициенты усиления соответствующих сигналов; U – напряжение питания инвертора; U_y – сигнал управления инвертором; M_{c1} – момент сопротивления повороту корпуса судна при изменении курса; M_{c2} – момент сопротивления повороту рулевой поверхности в гидравлической среде; $M_{p\Sigma}$ – суммарный момент руля, передаваемый на корпус корабля *C*.

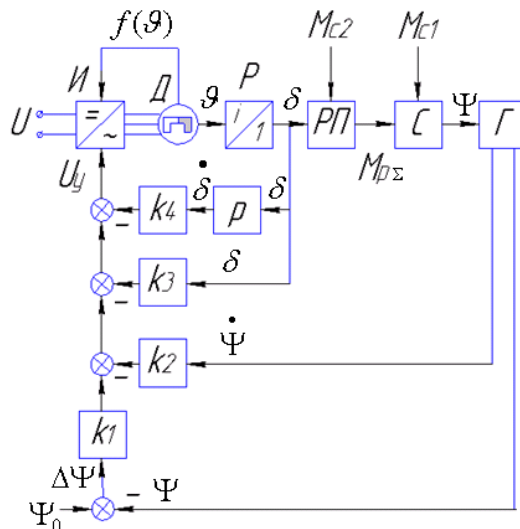


Рис. 2. Структурная схема системы управления курсом корабля

Прежде всего определим моменты, действующие на корпус корабля и руль. Опуская вывод формул моментов, действующих на корабль и на руль и обусловленных движением в воде, приведем лишь конечный результат.

Момент сопротивления повороту корпуса судна в воде равен

$$M_{C1} = \frac{1}{64} c \gamma \omega_k^2 L_e^4 H \operatorname{sign} \omega_k = \frac{1}{64} c \gamma \omega_k^2 L_e^4 H \left| \frac{d\Psi}{dt} \right|, \text{ Нм},$$

где c – коэффициент гидравлического сопротивления, который может быть принят равным [2] $c \approx 1,11$; γ – плотность воды, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $\omega_k = \frac{d\Psi}{dt}$ – угловая скорость поворота корпуса корабля; L_e, H – эквивалентная длина и высота части корпуса, погруженной в воду, м. Момент сопротивления повороту рулевой поверхности в воде равен

$$M_{C2} = \frac{1}{8} c \gamma \omega_p^2 S_2 R^3 \operatorname{sign} \omega_p = \frac{1}{8} c \gamma \omega_p^2 S_2 R^3 \left| \frac{d\delta}{dt} \right|, \text{ Нм},$$

где $\omega_p = \frac{d\delta}{dt}$ – угловая скорость поворота руля, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$; S_2, R – площадь рулевой поверхности и максимальный вылет (радиус) руля, м. Рабочий момент руля при отклонении на угол δ равен

$$M_p = \frac{1}{4} c \gamma V^2 S_2 R \sin \delta, \text{ Нм},$$

где V – линейная скорость корабля, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$. Моменты M_{C1} и M_{C2} должны изменять знак при изменении знака скорости. С учетом записей выражений для моментов имеем:

$$\begin{aligned} M_{C1} &= C_1 \cdot \frac{d\Psi}{dt} \cdot \left| \frac{d\Psi}{dt} \right|, \\ M_{C2} &= C_2 \cdot \frac{d\delta}{dt} \cdot \left| \frac{d\delta}{dt} \right|, \\ M_p &= C_p \cdot \sin \delta, \end{aligned} \quad (1)$$

$$C_1 = \frac{1}{64} c \gamma L_e^4 H, \quad C_2 = \frac{1}{8} c \gamma S_2 R^3, \quad C_p = \frac{1}{4} c \gamma S_2 R V^2.$$

Суммарный момент, действующий на руль, равен

$$M_{p\Sigma} = M_p + M_{C2}. \quad (2)$$

Теперь приступим к написанию уравнений динамики. Уравнение поворота корпуса судна относительно оси Z , проходящей через точку O и перпендикулярной плоскости рис. 1,

$$J_Z \frac{d^2\Psi}{dt^2} = M_{p\Sigma} - M_{C1}, \quad (3)$$

где J_Z – момент инерции корабля относительно оси Z . Уравнение движения вала двигателя

$$J_M \frac{d^2\vartheta}{dt^2} = M_D - k_p \cdot M'_p, \quad (4)$$

где J_M – момент инерции, приведенный к валу двигателя; M_D – электромагнитный момент двигателя; k_p – коэффициент, учитывающий потери в редукторе (далее принимается $k_p = 1$); $M'_p = \frac{M_{p\Sigma}}{i}$ – момент на руле, приведенный к валу двигателя; i – переда-

точное отношение редуктора. Далее уравнение (4) удобно привести к валу редуктора, имея соотношение $\vartheta = i \cdot \delta$:

$$J_M i^2 \frac{d\delta}{dt} = iM_D - M_{p\Sigma}. \quad (5)$$

Момент, создаваемый двигателем, учитывая инерционность системы, обусловленную большим моментом инерции корпуса корабля, примем в виде [1]

$$M_D = \frac{3\sqrt{3}}{2 \cdot \pi} p w_{1e} \Phi \cdot \frac{\left(U_y - \frac{3\sqrt{3}}{\pi} p w_{1e} \Phi \Omega \right) \cdot R_1}{R_1^2 + 0,3 \left(\frac{3}{2} L_1 \Omega \right)^2} = \frac{C_M}{R_1} \cdot \frac{\left(U_y - C_M i \frac{d\delta}{dt} \right) R_1}{1 + 0,3 \left(T_e i \frac{d\delta}{dt} \right)^2}, \quad (6)$$

где p, w_{1e}, Φ – число пар полюсов, эффективное число витков фазы и поток на пару полюсов соответственно; R_1, L_1 – активное сопротивление и индуктивность фазы; Ω – угловая скорость ротора, выражаемая через угловую скорость закладки руля, $\Omega = i \frac{d\delta}{dt}$;

U_y – управляемое напряжение в звене постоянного тока (или напряжение, подаваемое на двигатель); $\frac{3\sqrt{3}}{2\pi} p w_{1e} \Phi = C_M$; $\frac{3}{2} \frac{L_1}{R_1} = T_e$.

На основании исследования аналогичной линеаризованной системы было установлено, что формирование управляющего напряжения U_y , содержащего только сигналы от курсового и демпфирующего гироскопов вида $U_y = k_1 \cdot \Delta\Psi - k_2 \cdot \Delta\dot{\Psi} = k_1 \cdot \Psi_0 - k_1 \cdot \Psi - k_1 \cdot \dot{\Psi}$, не обеспечивает необходимого качества переходного процесса. Процесс затухает медленно и сопровождается большой колебательностью. В связи с этим был принят закон регулирования, применяемый в автопилотах курса самолета [3],

$$U_y = k_1 \cdot \Delta\Psi - k_2 \cdot \dot{\Psi} - k_3 \cdot \delta - k_4 \cdot \dot{\delta}. \quad (7)$$

В итоге система уравнений динамики, включающая изменение курса корабля Ψ , поворота руля δ и напряжение на коммутаторе (двигателе) U_y , записанная с учетом того, что отклонение курса $\Delta\Psi = \Psi_0 - \Psi$, $\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{d\Delta\Psi}{dt}$, принимает вид (уравнения (3), (5), (6), (7)):

$$J_Z \frac{d^2 \Delta\Psi}{dt^2} + C_1 \frac{d\Delta\Psi}{dt} \cdot \left| \frac{d\Delta\Psi}{dt} \right| = -C_p \sin \delta - C_2 \frac{d\delta}{dt} \left| \frac{d\delta}{dt} \right|,$$

$$J_M i^2 \frac{d^2 \delta}{dt^2} + \frac{i^2 C_M^2}{R_1 \left[1 + 0,3 \left(T_e i \frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right]} \frac{d\delta}{dt} + C_2 \frac{d\delta}{dt} \left| \frac{d\delta}{dt} \right| + C_p \sin \delta = \frac{i C_M U_y}{R_1 \left[1 + 0,3 \left(T_e i \frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right]}, \quad (8)$$

$$U_y = k_1 \cdot \Delta\Psi + k_2 \cdot \Delta\dot{\Psi} - k_3 \delta - k_4 \cdot \dot{\delta}.$$

Мы получили систему существенно нелинейных дифференциальных уравнений, к которой не применим в полной мере аппарат анализа и синтеза, широко развитый для линейных систем автоматического регулирования, в том числе электропривода. Приведем систему уравнений (8) к безразмерной форме, введя безразмерные величины: на-

пряжение управления $u = \frac{U_y}{(U_y)_{\max}}$, $-1 \leq u \leq 1$, момент $\mu = \frac{M}{M_\sigma}$, $M_\sigma = \frac{\sqrt{3}}{2} p w_{1e} \Phi \frac{(U_y)_{\max}}{R_1}$.

Поделив первое и второе уравнение системы (8) на базовый момент M_σ , а третье – на базовое напряжение $(U_y)_{\max}$, получим систему уравнений в виде

$$\frac{J_z}{M_\sigma} \cdot \frac{d^2 \Delta \Psi}{dt^2} + \mu_{C1} \frac{d\Delta \Psi}{dt} \left| \frac{d\Delta \Psi}{dt} \right| = -\mu_p \sin \delta - \mu_{C2} \frac{d\delta}{dt} \left| \frac{d\delta}{dt} \right|,$$

$$\frac{J'_p}{M_\sigma} \frac{d^2 \delta}{dt^2} + \frac{9}{\pi^2} \cdot \frac{i^2}{\Omega_\sigma \left[1 + 0,3i^2 T_e^2 \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right]} \frac{d\delta}{dt} + \mu_{C2} \frac{d\delta}{dt} \left| \frac{d\delta}{dt} \right| + \mu_p \sin \delta = \frac{3}{\pi} \frac{i u}{\Omega_\sigma \left[1 + 0,3i^2 T_e^2 \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right]}, \quad (9)$$

$$u = k'_1 \cdot \Delta \Psi + k'_2 \frac{d\Delta \Psi}{dt} - k'_3 \delta - k'_4 \frac{d\delta}{dt}.$$

Здесь $\Omega_\sigma = \frac{(U_y)_{\max}}{\sqrt{3} p w_{1e} \Phi}$, $\mu_{C1} = \frac{C_1}{M_\sigma}$, $\mu_{C2} = \frac{C_2}{M_\sigma}$, $\mu_p = \frac{C_p}{M_\sigma}$, $J'_p = J_p + J_0 \cdot i^2$ – момент инерции руля с учетом момента инерции ротора J_0 .

Моделирование системы

Исходные данные, принятые при моделировании системы нелинейных дифференциальных уравнений (9), следующие: $L = 11$ м, $H = 2,6$ м, $S = 0,96$ м², $J_z = 2 \cdot 10^5$ кг·м², $J_p = 7,7$ кг·м², $M_\sigma = 160$ Нм, $(U_y)_{\max} = 100$ В, $\Omega_\sigma = 300$ 1/с, $T_e = 2,5 \cdot 10^{-3}$ с, $V = 5$ М/с и

$V = 10$ М/с, $\mu_{C1} = \frac{7 \cdot 10^5}{M_\sigma} \text{ с}^2$, $\mu_{C2} = \frac{30}{M_\sigma} \text{ с}^2$, $\mu_p = \frac{80 \cdot V^2}{M_\sigma}$. Выбору подлежат передаточное

отношение редуктора i и коэффициенты усиления k'_1, k'_2, k'_3, k'_4 . Анализ линеаризованной системы (9), «усеченной» до 3-го порядка, позволил по диаграмме Вышнеградского [3] выбрать коэффициенты k'_1 и k'_2 , а затем подобрать коэффициенты k'_3 и k'_4 , обеспечивающие слабоколебательный, достаточно быстро затухающий процесс с учетом большой инерционности системы, обусловленный моментом инерции корпуса корабля J_z . Таким образом, было принято $k'_1 = 1,5$, $k'_2 = 13,68$, $k'_3 = 0,31$, $k'_4 = 2,42$.

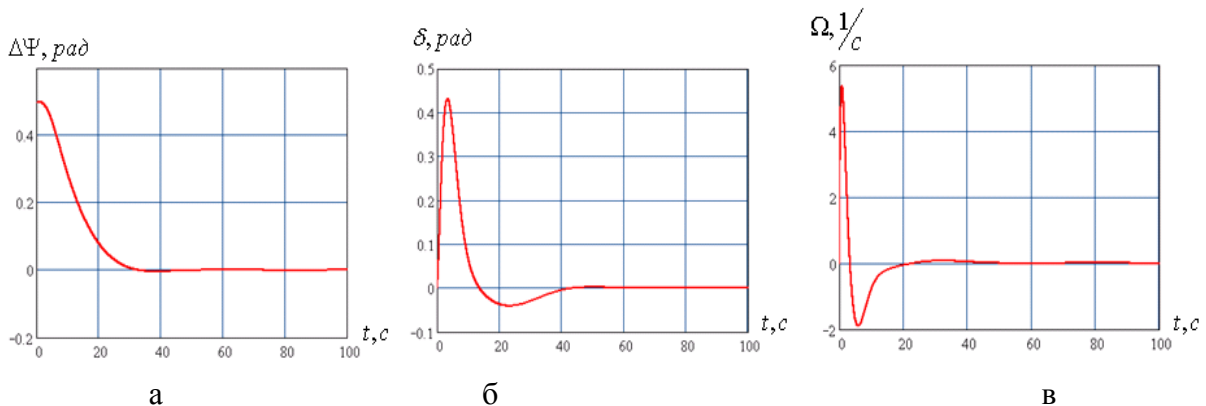


Рис. 3. Переходные процессы при передаточном отношении редуктора $i = 25$:

- а) угол рассогласования курса, б) угол закладки руля,
в) угловая скорость ротора двигателя

На рис. 3 изображены результаты моделирования системы уравнений (9) в виде графиков переходных процессов для угла рассогласования курса $\Delta\Psi$ (а), угла закладки руля δ (б) и скорости ротора двигателя (в). Можно видеть, что при начальном рассогласовании $\Delta\Psi_0 = 0,5$ рад процесс заканчивается достаточно быстро, за 40–50 с, является плавным для угла курса $\Delta\Psi$ и слабо колебательным для угла закладки руля δ . Передаточное отношение редуктора в данном случае соответствует величине $i = 25$.

При уменьшении передаточного отношения до $i = 10$ (рис. 4) плавность переходного процесса сохранилась практически прежней, однако время отработки рассогласования $\Delta\Psi_0$ увеличилось и составило теоретически 80–100 с, хотя с практической точки зрения (малые углы ошибки $\Delta\Psi$) его вполне можно оценить как 60–70 с (рис. 4, а).

Моделирование показало вполне удачный выбор коэффициентов усиления сигналов, формирующих управляющее напряжение U_y , а также нецелесообразность уменьшения передаточного отношения редуктора ниже $i = 10$.

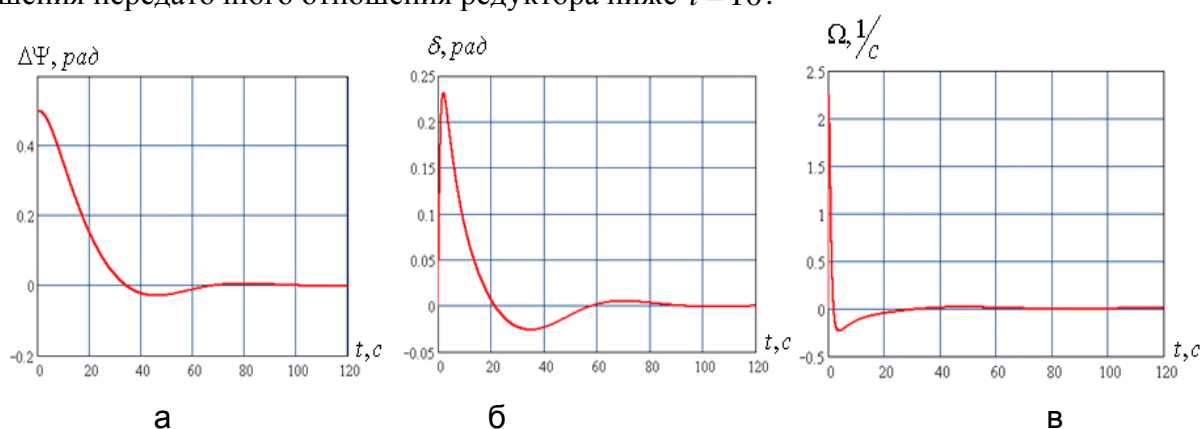


Рис. 4. Переходные процессы при передаточном отношении редуктора $i = 10$: а) угол рассогласования курса, б) угол закладки руля, в) угловая скорость ротора двигателя

Изменение угловой скорости ротора двигателя Ω , представленное на рис. 3, 4, в, показывает, что максимум скорости в переходном процессе весьма невелик по отношению к скорости холостого хода ($\Omega_{0,xx} = \Omega_0 = 300 \text{ с}^{-1}$) и составляет всего лишь 6 с^{-1} (рис. 3, в) и $2,5 \text{ с}^{-1}$ (рис. 4, в). Это говорит о том, что двигатель работает практически в режиме моментного двигателя, и для данной задачи более целесообразным оказался бы низкооборотный двигатель с равным или большим пусковым (стопорным) моментом.

Заключение

1. Применение вентильного двигателя в приводе рулевой машины позволяет обеспечить отработку угла рассогласования курса при хорошем качестве и ограниченной длительности переходного процесса. При этом управляющий сигнал содержит четыре составляющих (две – по отклонению курса и отклонению руля и две – по производным от этих отклонений).
2. Для заданного сочетания исходных данных и параметров возможное передаточное отношение редуктора должно быть оценено величиной $i = 10\text{--}25$. Увеличение i приведет к возрастанию стоимости и массы редуктора, а снижение – к увеличению длительности переходного процесса.
3. Для решения рассматриваемой задачи целесообразным является применение низкооборотного вентильного двигателя.

Литература

1. Овчинников И. Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе. — СПб: Корона-Век, 2006.
2. Кухлинг Х. Справочник по физике. — М.: Мир, 1982.
3. Попов Е.П. Динамика систем автоматического регулирования. — М.: ИТТЛ, 1954.

Овчинников Игорь Евгеньевич — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, ludimit@yandex.ru

Ватунская Наталья Геннадьевна — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, Tawechka@yandex.ru

УДК 536.2

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ
С ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА****В.А. Кораблев, Д.А. Минкин, А.Н. Соколов, А.В. Шарков**

Описана конструкция устройства для измерения тепловых потоков с поверхности тепловыделяющего элемента. Устройство позволяет измерять тепловые потоки в пределах от 5 до 100 Вт с погрешностью не более 10 %.

Ключевые слова: тепловой поток, измерительная система, калориметр.

Введение

В современных приборах происходят сложные преобразования энергии из одного вида в другой, в конечном итоге энергия переходит в теплоту, для отвода которой предназначены системы обеспечения теплового режима (СОТР). При экспериментальной отработке и тепловом моделировании СОТР аппаратуры измерение тепловых потоков от элементов поверхностей является важной задачей оптимизации СОТР. Для измерения тепловых потоков существуют устройства, реализующие различные методы: калориметрический, термоэлектрический, фотометрический, метод вспомогательной стенки [1]. Определять потоки энергии с помощью таких устройств возможно, однако не все они могут обеспечивать высокоэффективный теплоотвод с поверхности испытуемых приборов и аттестоваться как средства измерения.

В настоящей работе предложена конструкция устройства, реализующего калориметрический метод измерения теплового потока от поверхностей приборов в стационарном тепловом режиме.

Конструкция

Особенность разработанного устройства состоит в возможности измерять тепловые потоки с приборов, имеющих несколько теплоотводящих поверхностей. Это реализуется путем измерения тепловых потоков одновременно с нескольких участков. Принципиальная схема устройства измерения теплового потока (УИТП) для одной поверхности показана на рис. 1. В состав устройства входят термостат 1, ротаметр 2, калориметр 3, вольтметр 4, термометр дифференциальный 5, блок холодных спаев, блок переключения датчиков температуры. Калориметр, термостат и ротаметр соединены шлангами, образуя единый циркуляционный контур.

Калориметр представляет собой теплообменник, во входном и выходном сечениях которого установлены рабочие концы дифференциального термоэлектрического термометра. Теплообменник выполняется из меди М0 и состоит из двух деталей – основания и крышки. Для повышения перепада температур между рабочими спаями дифференциального термометра необходимо интенсифицировать теплообмен на исследуемой тепловыделяющей поверхности, поэтому на внутренней поверхности основания теплообменника выполнено оребрение, как показано на рис. 2. Основание представляет собой радиатор с прямоугольными ребрами, в каналах между которыми прокачивается теплоноситель. Параметры оребрения рассчитывались при наибольших допустимых значениях температур теплообменника и теплоносителя, максимальных тепловых потоках [2, 3].

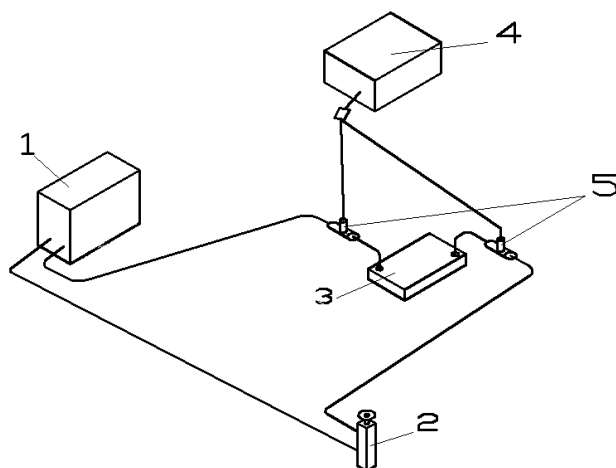


Рис. 1. Принципиальная схема устройства для измерения тепловых потоков:
1 – термостат ТЖ-ТС-01/12-100, 2 – ротаметр с регулировочным краном
РМА-01 0,0063 ЖУЗ, 3 – калориметр, 4 – цифровой вольтметр,
5 – термометр дифференциальный

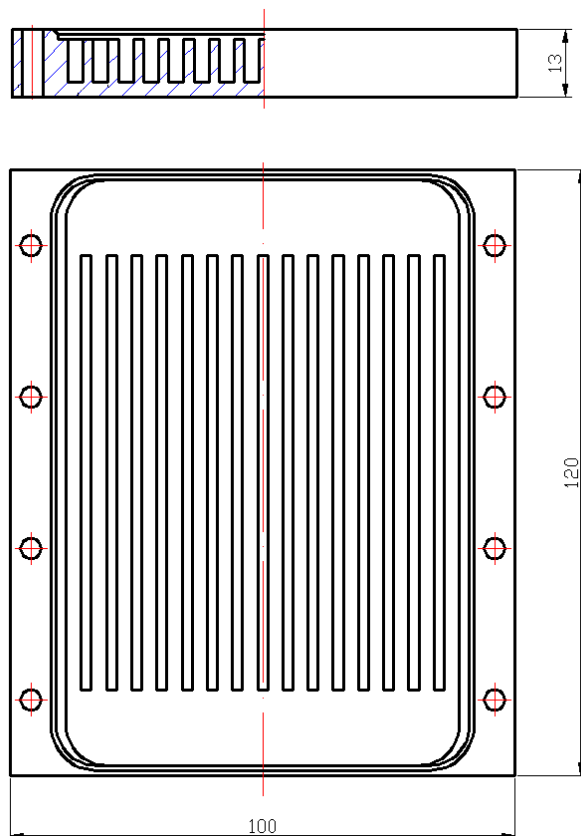


Рис. 2. Основание теплообменника

Термостат ТЖ-ТС-01/12-100 предназначен для поддержания заданной температуры на входе в устройство и прокачивания теплоносителя в циркуляционном контуре. Производительность насоса термостата составляет до 7 л/мин, точность поддержания температуры $\pm 0,1$ °С. Термостаты такого типа зарегистрированы в Государственном реестре средств измерений под № 20444-02 и допущены к применению в Российской Федерации (сертификат № 13677).

Объемный расход измеряется с помощью ротаметров типа РМА-01 0,0063 ЖУЗ. Для определения величины расхода в паспорте прибора приведен градуировочный график. Ротаметр имеет следующие технические характеристики: максимальный расход по воде составляет 0,0063 м³/ч; температура измеряемой среды составляет от 5 до 50 °С; погрешность измерения расхода ±4 % от верхнего предела измерения. Каждый ротаметр при выпуске с производства прошел поверку в Федеральном государственном учреждении «Нижегородский центр стандартизации, метрологии и сертификации» и имеет свидетельство о поверке.

Перепад температуры между входом и выходом калориметра измеряется нестандартным термометрическим устройством – термостолбиком. Его основу представляет собой пятиспайная дифференциальная медь-константановая термопара. Использование многоспайной термопары обусловлено необходимостью повысить чувствительность при измерении малых перепадов температур. Рабочие спаи устанавливаются непосредственно в поток жидкости с помощью приспособления, конструкция которого представлена на рис. 3. Свободные концы термостолбика подключены к мультиметру типа Agilent 34405A. На термостолбик получен сертификат о калибровке средства измерения № Н241-3/1769. Калибровка проведена Федеральным государственным унитарным предприятием «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева». Погрешность измерения перепада температуры не более ±1 %.

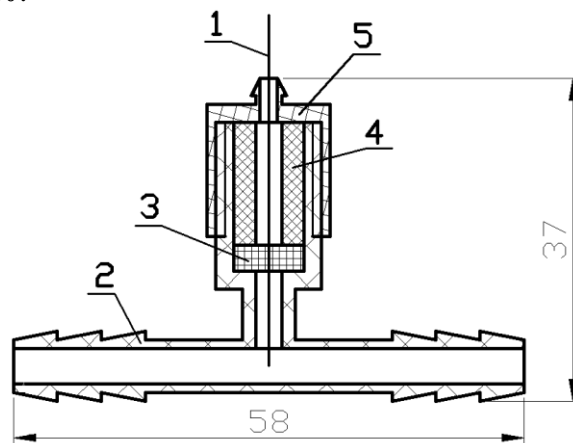


Рис. 3. Конструкция для монтажа дифференциального термометра: 1 – многоспайная термопара, 2 – фитинг, 3 – уплотнительная прокладка из вакуумной резины, 4 – втулка-толкатель из фторопласта, 5 – гайка

Блок переключения датчиков температуры предназначен для снятия показаний дифференциальных термометров на различных калориметрах.

Измерение теплового потока

Тепловой поток, отводимый с тепловыделяющей поверхности устройств газовой криогенной машины, определяется по измеренным значениям расхода теплоносителя и перепада температуры. Формула для определения теплового потока имеет вид

$$\Phi = c_p \rho G_v (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}) = K G_v (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}), \quad (1)$$

где Φ – измеренный тепловой поток, Вт; c_p – удельная теплоемкость жидкости, Дж/(кг·К); ρ – плотность жидкости, кг/м³; G_v – измеренный объемный расход жидкости, м³/с; $t_{\text{вых}}$ – температура на выходе из калориметра, °С; $t_{\text{вх}}$ – температура на входе в калориметр, °С; $K = \rho \cdot c_p$ – градуировочный коэффициент [4].

Определение теплового потока в УИТП сопровождается рядом явлений, которые негативно сказываются на точности получаемых результатов: нестационарность процесса, наличие контактных тепловых сопротивлений. По этой причине в процессе подготовки УИТП к работе проводится ряд мер для снижения погрешности измерений. Все используемые измерительные приборы проходят государственную аттестацию, насос термостата включается в электрическую сеть через стабилизатор напряжения, калориметр устанавливается на теплоотводящую поверхность устройства газовой криогенной машины через пасту или теплопроводящую прокладку для исключения контактного теплового сопротивления, проводится калибровка УИТП.

Использование градуировочного коэффициента K позволяет повысить точность измерений. Из формулы (1) значение K вычисляется как:

$$K = \frac{\Phi_k}{G_v(t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}})}, \quad (2)$$

где Φ_k – известное значение теплового потока, подаваемого на УИТП при калибровке, Вт.

Заключение

Разработано и создано устройство для измерения теплового потока с приборов, имеющих несколько теплоотводящих поверхностей. На средства измерения в составе УИТП получены сертификат и свидетельство федерального агентства по техническому регулированию и метрологии.

Экспериментальные исследования показали, что УИТП отвечает предъявленным требованиям и может быть использовано для проведения тепловых испытаний объектов приборостроения. Устройство позволяет определять тепловые потоки в пределах от 5 до 100 Вт с погрешностью не более 10 %.

Литература

1. Геращенко О.А. Современное состояние теплотриии в СССР // Инженерно-физический журнал. – 1990. – Т. 59. – № 3. – С. 516–522.
2. Керн Д., Краус А. Развитые поверхности теплообмена / Пер. с англ. – М.: Энергия, 1977. – 462 с.
3. Ройзен Л.И., Дулькин И.Н. Тепловой режим орбренных поверхностей. – М.: Энергия. 1977. – 256 с.
4. Калориметрия. Теория и практика / В. Хеммингер, Г. Хене. – М.: Химия, 1990. – Пер. изд.: ФРГ, 1984. –176 с.

Кораблев Владимир Антонович	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, ktf@grv.ifmo.ru
Минкин Дмитрий Алексеевич	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, mindim-spb@mail.ru
Соколов Антон Николаевич	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, dioux@rambler.ru
Шарков Александр Ваасильевич	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, sharkov@grv.ifmo.ru

УДК 536.6

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ПРИЕМНИКОВ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ НА ОСНОВЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-РАЗНОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОПЕРЕНОСА

Н.В. Пилипенко

Рассмотрен численно-алгоритмический метод получения динамических характеристик различных типов тепломеров на основе дифференциально-разностных моделей теплопереноса. Приведен способ уменьшения порядка передаточных функций по известным каналам воздействия на тепломер.

Ключевые слова: нестационарная теплотметрия, динамические характеристики тепломеров, дифференциально-разностная модель теплопереноса.

Введение

К динамическим характеристикам различных типов приемников тепловых потоков (ПТП) будем относить как переходную, импульсно-переходную, амплитудно- и фазочастотную, так и переходную матрицу, характеризующую тепловые связи в ПТП, матричную импульсно-переходную передаточную функцию, определяющую соотношения входов \vec{U} и выходов \vec{Y} , а также матрицу передаточных функций.

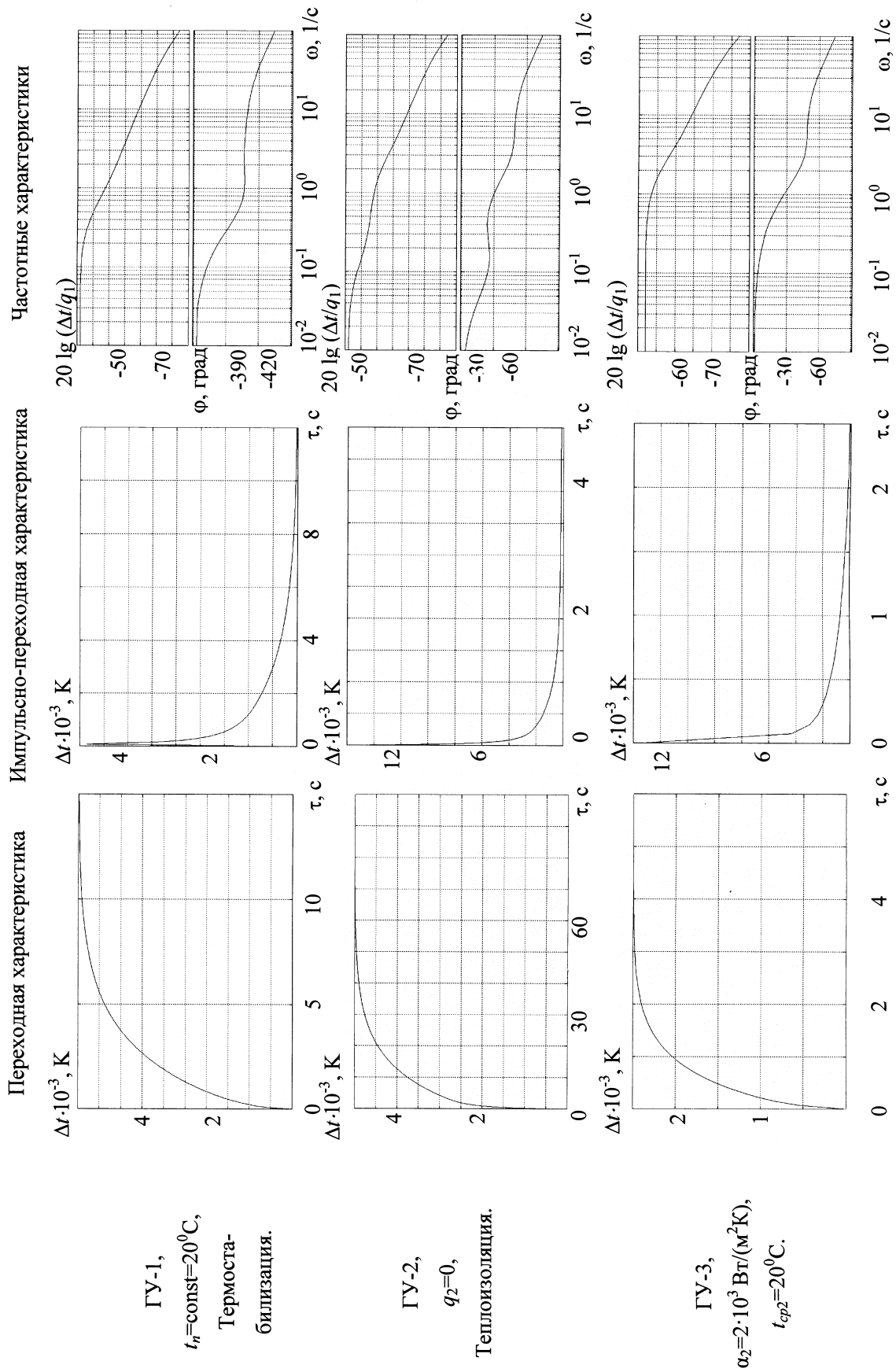
Нами были получены перечисленные динамические характеристики для всех пространственных ПТП, схемы и топологии которых приведены в [1]. Для получения переходных, импульсно-переходных, амплитудно- и фазочастотных характеристик была использована дифференциально-разностная модель (ДРМ) теплопереноса в ПТП [1], из которой определены матрицы обратных связей F и управления G . При известных значениях F и G , а также матрицы измерений H , которая показывает, в каких точках ПТП измеряется температура $t(\tau)$, получение указанных характеристик с помощью программного комплекса (ПК) MATLAB не вызывает затруднений.

На динамические характеристики существенное влияние оказывают условия размещения различных ПТП на объекте исследования. При одномерном теплопереносе в системе ПТП–объект переходная характеристика одного и того же ПТП может меняться значительно. В качестве примера на рис. 1 показаны переходная, импульсно-переходная, амплитудно- и фазочастотные характеристики однородного градиентного ПТП с различными граничными условиями (ГУ) на тыльной стороне. При этом толщина ПТП $\delta = 5 \cdot 10^{-3}$ м, теплопроводность $\lambda = 15$ Вт/(м·К), температуропроводность $a = 3,8 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Как видно из рис. 1, времена установившегося теплового режима ПТП в случаях ГУ-2 и ГУ-3 отличаются более, чем на порядок. В связи с этим при постановке эксперимента необходимо тщательно анализировать условия размещения ПТП, величину контактного теплового сопротивления и другие особенности.

Остановимся более подробно на остальных динамических характеристиках.

Методы получения динамических характеристик

Основной динамической характеристикой ПТП в пространстве его состояний является переходная матрица $\Phi(\tau, \tau_0)$, которую необходимо рассматривать на значительном промежутке времени $\Delta\tau = \tau - \tau_0$. Она имеет размерность $(n \times n)$ и записывается в виде



ГУ-1,
 $t_{\pi} = \text{const} = 20^{\circ}\text{C}$,
 Термоста-
 билизация.

ГУ-2,
 $q_2 = 0$,
 Теплоизоляция.

ГУ-3,
 $\alpha_2 = 2 \cdot 10^3 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$,
 $t_{\text{сп}2} = 20^{\circ}\text{C}$.

Рис. 1. Динамические характеристики однородного градиентного ПТП с различными ГУ на тыльной стороне

$$\Phi(\tau, \tau_0) = \begin{vmatrix} \varphi_{11}(\tau, \tau_0) & \cdot & \varphi_{1n}(\tau, \tau_0) \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \varphi_{n1}(\tau, \tau_0) & \cdot & \varphi_{nn}(\tau, \tau_0) \end{vmatrix}. \quad (1)$$

Элемент $\varphi_{ij}(\tau, \tau_0)$ представляет собой переходный процесс по температуре i -го блока ПТП от единичного начального условия по температуре j -го блока, протекающий в свободной системе $\dot{\vec{T}}(\tau) = \vec{F}\vec{T}$ при нулевых начальных условиях по температурам остальных блоков. Таким образом, переходная матрица количественно отражает тепловые связи в ПТП самых сложных конструкций.

В практических расчетах используется дискретная форма переходной матрицы в следующем виде:

$$\Phi_k = \begin{vmatrix} \varphi_{11,k} & \cdot & \varphi_{1n,k} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \varphi_{n1,k} & \cdot & \varphi_{nn,k} \end{vmatrix}, \quad (2)$$

где $\Phi_k = \Phi(\tau_k, \tau_0) = \Phi(k\Delta\tau, 0)$, а $\varphi_{ij}(\tau, \tau_0) = \varphi_{ij}(\tau_k, \tau_0) = \varphi_{ij}(k\Delta\tau, 0) = \varphi_{ij,k}$.

Для вычисления Φ_k используется следующий способ [2, 3]: если для момента времени $\tau_0 = 0$ ($k=0$) установить единичное начальное t_{j_0} условие для j -ой составляющей вектора состояния \vec{T}_0 , а все остальные положить равными 0, то полученные в результате решения свободной системы значения t_i ($i=1, 2, \dots, n$) вектора \vec{T}_k будут j -м столбцом матрицы Φ_k . Если подобную операцию выполнить n раз ($j=1, 2, \dots, n$), то будут получены все n столбцов матрицы Φ_k .

Математическую модель ПТП как компонента теплоизмерительной системы составляют уравнения теплопереноса и измерений [1]:

$$\dot{\vec{T}}(\tau) = \vec{F}\vec{T}(\tau) + \vec{G}\vec{U}(\tau), \quad (3)$$

$$\vec{Y}(\tau) = \vec{H}\vec{T}(\tau), \quad (4)$$

где \vec{T}, \vec{Y} и \vec{U} – векторы состояния, измерения и управления.

Соотношения «вход $\vec{U}(\tau)$ –выход $\vec{Y}(\tau)$ » для системы (3) характеризуются матричной импульсной переходной характеристикой $\Omega(\tau, 0)$. Она описывает переходные процессы в теплоизмерительной системе с нулевыми начальными условиями по различным выходам y_j ($j=1, 2, \dots, m$) (измеренным температурам или их перепадам), вызванные единичными воздействиями – тепловыми потоками $q_1(\tau) = \delta(\tau-0)$ или $q_2(\tau) = \delta(\tau-0)$, где $\delta(\tau-0)$ – δ -функция Дирака. В случае ПТП с $j = m$ измерениями и двумя граничными условиями на рабочей и тыльной поверхностях размерность $\Omega(\tau, 0)$ составляет $m \times 2$.

Известно, что матричная импульсно-переходная характеристика в дискретной форме $\Omega_k = \Omega(\tau_k, 0)$ выражается через матрицы измерения H , переходную F и управления G следующим образом [4]:

$$\Omega_k = H\Phi_k G = \begin{vmatrix} \Omega_{11,k} & \Omega_{12,k} \\ \vdots & \vdots \\ \Omega_{m1,k} & \Omega_{m2,k} \end{vmatrix}, \quad (5)$$

где $\Omega_{j1,k}$ и $\Omega_{j2,k}$ – импульсно-переходные характеристики по различным выходам ПТП от единичных входных воздействий $q_1(\tau)=\delta(\tau-0)$ или $q_2(\tau)=\delta(\tau-0)$. Как правило, практический интерес вызывает составляющие $\Omega_{j1,k}$ по каналам воздействия $q_1(\tau)$.

Для получения передаточных функций ПТП преобразуем его модель (3) по Лапласу:

$$s\vec{T}(s)=F\vec{T}(s)+G\vec{U}(s),$$

$$\vec{Y}(s)=H\vec{T}(s),$$

откуда получим

$$\vec{T}(s)=[sI-F]^{-1}\times G\vec{U}(s), \quad (6)$$

$$\vec{Y}(s)=H[sI-F]^{-1}\times G\vec{U}(s), \quad (7)$$

где $\vec{T}(s)$, $\vec{Y}(s)$, $\vec{U}(s)$ – изображения по Лапласу векторов $\vec{T}(\tau)$, $\vec{Y}(\tau)$, $\vec{U}(\tau)$ соответственно.

Уравнение (6) определяет следующий вид матрицы $W(s)$ передаточных функций ПТП:

$$W(s) = \underset{(m \times 2)}{H} \underset{(m \times n)}{[sI - F]^{-1}} \cdot \underset{(n \times n)}{G} = \underset{(n \times 2)}{G} \begin{vmatrix} W_{11}(s) & \cdot & W_{12}(s) \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ W_{m1}(s) & \cdot & W_{m2}(s) \end{vmatrix}, \quad (8)$$

где $W_{j1}(s)$ – передаточная функция по каналу воздействия $q_1(\tau) \rightarrow y_j(\tau)$; $W_{j2}(s)$ – то же по каналу $q_2(\tau) \rightarrow y_j(\tau)$; $y_j(\tau)$ – j -я составляющая вектора измерения $\vec{Y}(\tau)$ ($j=1, 2, \dots, m$).

Матрица передаточных функций $W(s)$ имеет такую же структуру и размерность, как и рассмотренная выше матричная импульсно-переходная характеристика $\Omega(\tau, 0)$. Вид $W(s)$ при постоянном составе вектора входных воздействий $\vec{U}(\tau)=|q_1(\tau) \quad q_2(\tau)|^T$ определяется, в основном, составом вектора измерений $\vec{Y}(\tau)$.

Так как в качестве модели ПТП используется ДРМ в виде системы (3) обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, то передаточные функции измерительных каналов ПТП $W_{j1}(s)$ и $W_{j2}(s)$ имеют классическую форму в виде соотношения полиномов от комплексного параметра s :

$$W(s) = \frac{\beta_1 s^{n-1} + \beta_2 s^{n-2} + \dots + \beta_n}{s^n + \alpha_1 s^{n-1} + \alpha_2 s^{n-2} + \alpha_n}, \quad (9)$$

в котором порядок полинома числителя на единицу меньше порядка полинома знаменателя.

Общей особенностью полиномов как числителя, так и знаменателя является высокий порядок передаточных функций (9) для большинства рассмотренных ПТП. Так как это обстоятельство, вызванное стремлением охватить излишний для реальных ПТП диапазон высоких частот входных воздействий, существенно усложняет дальнейшее использование передаточных функций, то было предложено провести программное уменьшение порядка указанных полиномов. Оно основано на эквивалентировании логарифмических частотных характеристик и в ПК MATLAB реализуется командами `balreal(sys)`, `minreal(sys)` и `modred(sys, elim)`, где `sys=ss(F, G, H, D)`, `elim` – вектор, указывающий на подлежащие удалению переменные вектора состояния [5].

Функция `balreal` возвращает сбалансированную реализацию модели в пространстве состояний (ss) с равными грамианами управляемости и наблюдаемости. Чтобы на выходе функции получить как новую сбалансированную модель `sysb`, так и вектор `g` с

диагональными элементами сбалансированного грамиана, необходимо выполнить команду

```
[sysb, g] = balreal(sys).
```

Если значения первых диагональных элементов сбалансированного грамиана g значительно больше последующих, то можно понизить порядок модели, удалив соответствующие малозначачие переменные состояния. Для этого применяется одна из двух модификаций функции `modred`:

```
rsys= modred(sysb, elim, 'mdc');
```

```
rsys= modred(sysb, elim, 'del').
```

В первом случае (`mdc`) гарантируется сохранение коэффициента передачи, так как метод заключается в приравнении производных удаляемых переменных состояния нулю и решении системы уравнений для определения установившихся значений. Во втором случае (`del`) просто удаляются переменные состояния, метод не гарантирует сохранение коэффициента передачи, но более точно аппроксимирует переходные процессы в модели.

Результаты имитационного моделирования

В качестве иллюстрации приведем результаты понижения порядка полинома передаточной функции $W(s)$ по каналу $q_1 \rightarrow \Delta t_{1-11} = t_1 - t_{11}$ для однородного градиентного ПТП с указанными выше свойствами [1]. Его исходная передаточная функция, полученная с использованием матриц F, G и H , имеет вид

$$W(s) = \frac{0,00051s^{10} + 0,15s^9 + 20s^8 + 1400s^7 + 6,2 \times 10^4 s^6 + 1,7 \times 10^6 s^5 + 2,7 \times 10^7 s^4 + 2,5 \times 10^8 s^3 + 1,2 \times 10^9 s^2 + 2,2 \times 10^9 s + 0,029}{s^{11} + 330s^{10} + 4,8 \times 10^4 s^9 + 3,9 \times 10^6 s^8 + 1,9 \times 10^8 s^7 + 6,1 \times 10^9 s^6 + 1,2 \times 10^{11} s^5 + 1,4 \times 10^{12} s^4 + 9,5 \times 10^{12} s^3 + 2,9 \times 10^{13} s^2 + 2,6 \times 10^{13} s + 0,012}, \quad (10)$$

а передаточные функции $W_{\text{mdc}}(s)$ и $W_{\text{del}}(s)$ упрощенных моделей, которые получены методами `mdc` и `del` команды `modred`, представляются в виде

$$W_{\text{mdc}}(s) = \frac{1,1 \times 10^{-5} s^2 + 0,00013s + 1,8 \times 10^{-15}}{s^2 + 1,6s + 7,1 \times 10^{-16}}, \quad (11)$$

$$W_{\text{del}}(s) = \frac{0,00021s + 3,2 \times 10^{-15}}{s^2 + 2,9s + 1,3 \times 10^{-15}}. \quad (12)$$

На рис. 2 представлены переходные и частотные характеристики моделей, описываемых передаточными функциями (11) и (12).

Заключение

В заключение отметим, что рассмотренные динамические характеристики различных типов ПТП позволили получить новые экспериментальные результаты при исследовании энергоемких технологических процессов и обеспечить энергоресурсосбережение [6].

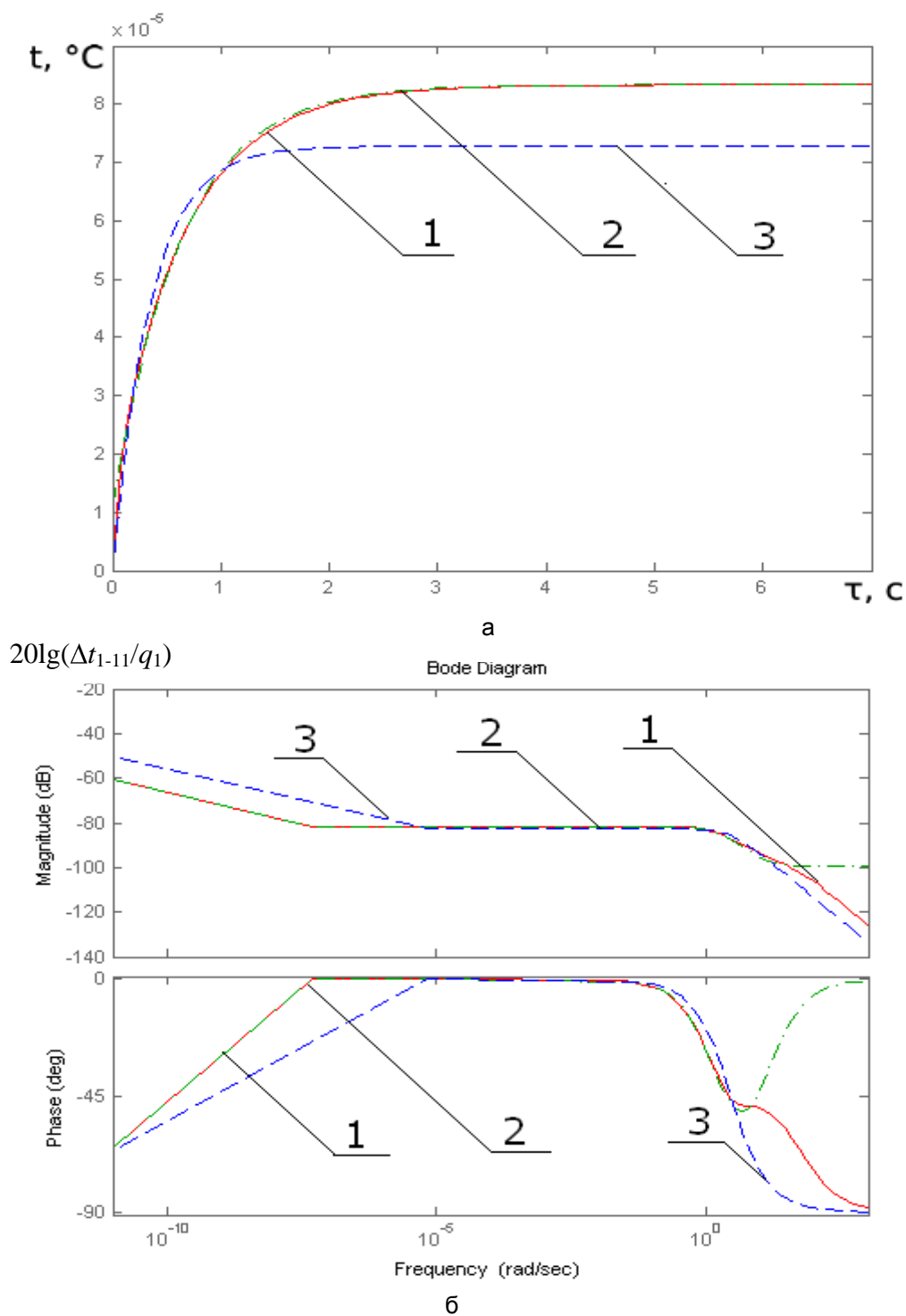


Рис. 2. Переходные (а) и частотные (б) характеристики ($q_1 \rightarrow \Delta t_{1-11}$):
 1 – полная модель; 2, 3 – упрощенные mdc и del модели

Литература

1. Pilipenko N. Parametrical Identification of Differential-difference Heat Transfer Models in Non-stationary Thermal Measurements // Heat Transfer Research. – 2008. – Vol. 39. – №. 4. – P. 311–315.
2. Деруссо П., Рой Р., Клоуз Ч. Пространство состояний в теории управления. – М.: Наука, 1970. – 620 с.

3. Медич Дж. Статистические оптимальные линейные оценки и управление. – М.: Энергия, 1973. – 440 с.
4. Симбирский Д. Ф. Температурная диагностика двигателей. – Киев: Техника, 1976. – 208 с.
5. Дьяконов В.П. MATLAB 6.5 SP1/7.0 + Simulink 5/6 в математике и моделировании. – М.: Солон-Пресс, 2005. – 567с.
6. Пилипенко Н.В., Кириллов К.В. Определение нестационарных условий теплообмена в энергетических установках // Приборы. – 2008. – № 9. – С. 21–25.

Пилипенко Николай Васильевич – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, pilipenko@grv.ifmo.ru

УДК 53.084.2

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЬЕЗОРЕЗОНАНСНОГО ДАТЧИКА
ЛОКАЛЬНОГО СИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
СКАНИРУЮЩЕГО ЗОНДОВОГО МИКРОСКОПА
С ЗОНДОМ В ВИДЕ МИКРОПИПЕТКИ****А.О. Голубок, В.В. Левичев, А.Л. Пинаев, А.В. Стовпяга**

Исследован пьезорезонансный датчик для сканирующего зондового микроскопа зондом в виде стеклянной микропипетки. Измерены резонансная частота и добротность датчика в воздушной и жидкой средах. Продемонстрировано пространственное разрешение с использованием тестовой решетки. Сделан вывод о возможности использования датчика с микропипеткой в жидкой среде с одновременной работой в полуконтактной силовой моде и в моде измерения ионных токов.

Ключевые слова: сканирующая зондовая микроскопия, микропипетка.

Введение

В основе сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) лежит идея использования зависимости локального взаимодействия, возникающего при сближении твердотельного нанозонда с поверхностью исследуемого образца, от расстояния зонд–образец. Информацию об исследуемой поверхности получают в процессе прецизионного механического сканирования в системе «зонд–образец», при этом для стабилизации параметров наноконтакта «зонд–образец» используется следящая система (СС) с обратной связью. Исполнительным звеном СС является пьезосканер, изменяющий в процессе сканирования расстояние между зондом и образцом и, следовательно, взаимодействие между ними, которое, в свою очередь, измеряется датчиком локального взаимодействия и стабилизируется с помощью СС. Существуют различные виды СЗМ [1], работа которых основана на измерении отдельных видов локального взаимодействия между зондом и образцом, такие, например, как сканирующий туннельный микроскоп (СТМ), сканирующий силовой микроскоп (ССМ), оптический микроскоп ближнего поля (ОМБП) и т.п. В связи с этим представляются перспективными исследования, направленные на создание СЗМ с многофункциональными датчиками, обеспечивающими детектирование различных видов локального взаимодействия зонда с образцом. Также представляют интерес СЗМ с датчиками-картриджами, обеспечивающими простой переход к измерениям с различными видами локального взаимодействия. Целью данной работы было исследование пьезорезонансного датчика локального силового взаимодействия с зондом в виде стеклянной микропипетки. Такой датчик может оказаться весьма эффективным, например, при исследовании биологических клеток в функционально активном состоянии, поскольку предоставляет возможность визуализировать топографию клетки, построить карты механической жесткости клеточной мембраны и распределения ионных токов.

Эксперимент

Конструкция датчика представляет собой модификацию пьезорезонансного датчика с вольфрамовым зондом [2]. Датчик (рис. 1) представляет собой пьезокерамическую трубку (1) длиной $l = 5\text{--}10$ мм, диаметром $d = 1,0\text{--}1,5$ мм и толщиной стенки $h = 0,20\text{--}0,30$ мм, жестко закрепленную с одного конца.

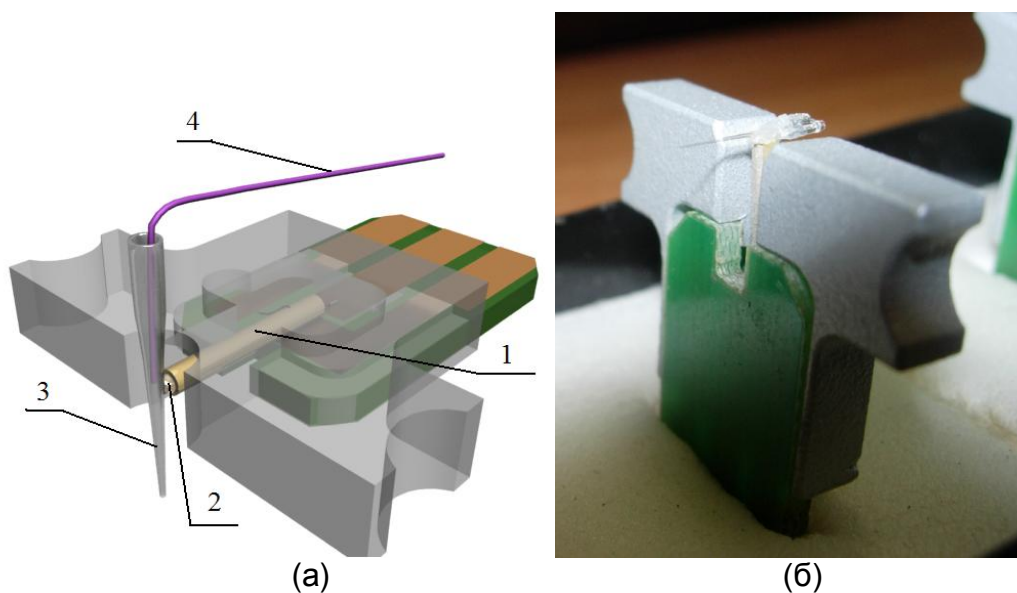


Рис. 1. Пьезорезонансный датчик локального силового взаимодействия с зондом в виде микропипетки: а – схема датчика, б – внешний вид

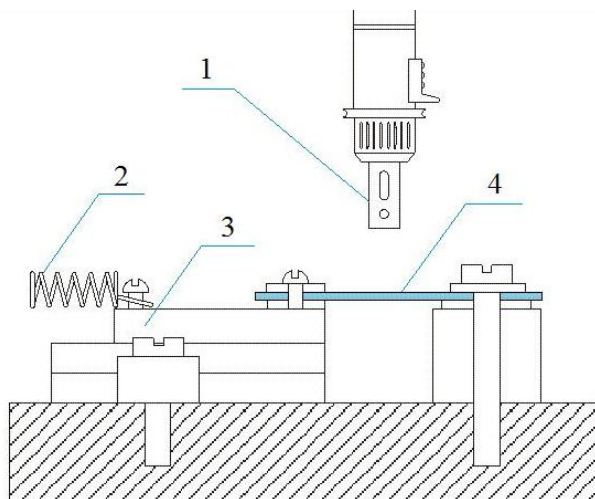


Рис. 2. Схема вытяжки микропипетки с помощью горелки: 1 – газовая горелка, 2 – пружина, 3 – каретка, 4 – стеклянный капилляр

На внутреннюю поверхность трубки нанесен проводящий электрод, а на внешнюю поверхность трубки – два электрически изолированных полуцилиндрических электрода. Одна часть трубки при прикладывании к ней напряжения от генератора играет роль пьезовибратора. Напряжение, снимаемое при этом со второй части трубки, пропорционально амплитуде возникающих механических колебаний. К свободному концу трубки с помощью капли клея (2) прикреплена стеклянная микропипетка (3). Использовались двухкомпонентный клей «РОХИРОЛ», клей «Момент» или аналогичные им. Для достижения максимальной твердости клея обеспечивалась неподвижность датчика с микропипеткой в течение 24 часов. Сверху во внутреннюю полость микропипетки вводится электрод в виде тонкой проволоки (4), инертной к рабочей жидкой среде. Предполагается, что такой датчик может работать в стандартной полуконтактной силовой моде, когда нижний конец микропипетки постукивает по исследуемой поверхности. Если во внутренней полости микропипетки находится рабочий электролит (например, слабый раствор соли в воде), то, наряду с силовыми измерениями, появляется возможность измерять ионный ток, проходящий через внутреннее отверстие микропипетки. Заполнение внутреннего объема микропипетки жидкостью производится под

действием капиллярных сил. На рис. 1, б, представлен внешний вид датчика с зондом в виде микропипетки.

Микропипетки изготавливались методом механической вытяжки из стеклянных капилляров при тепловом нагреве (рис. 2). Для нагрева можно использовать газовую горелку или лазерное излучение. В качестве натягивающего элемента используется цилиндрическая пружина или резиновый жгут с регулируемым натяжением. Применяя такой способ вытягивания, можно получить микропипетки с внешним диаметром приблизительно 0,5–2 мкм.

Результаты и обсуждение

Тестирование датчика проводилось в СЗМ «NanoEducator», так как его конструктивные посадочные размеры совпадали с посадочными размерами штатного датчика с вольфрамовым зондом. На рис. 3, а, б, представлены резонансные кривые, измеренные для штатного датчика СЗМ «NanoEducator» и датчика с зондом в виде микропипетки. Резонансные кривые имели похожий характер. Резонансная частота датчиков с микропипетками лежала в диапазоне 4,7–6,6 кГц при добротности $Q = 20,6–26,0$.

Резонансная частота датчиков с вольфрамовыми зондами лежала в диапазоне 8–10 кГц. Более низкая резонансная частота датчиков с микропипетками объясняется превышением веса микропипеток над весом вольфрамовых зондов. Была также измерена резонансная кривая при погружении кончика микропипетки в каплю воды. При этом отличий от добротности датчика, измеренной в воздушной среде, обнаружено не было.

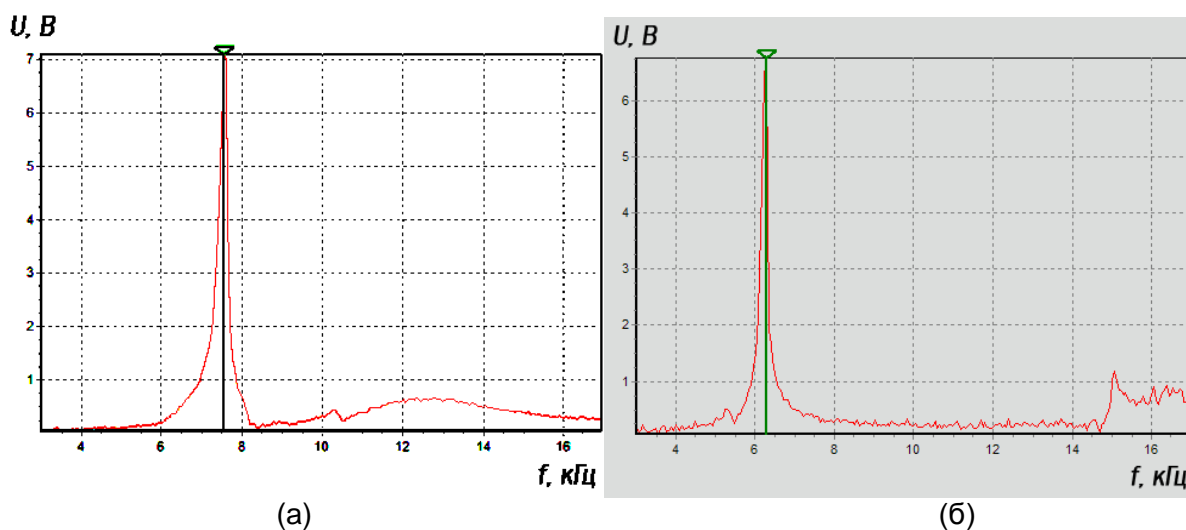


Рис. 3. Резонансные кривые: (а) датчик с вольфрамовым зондом $Q=25,1$; (б) датчик с микропипеткой $Q=28,9$

На рис. 4, а, б, представлены СЗМ-изображения тестовых решеток, полученные в СЗМ «NanoEducator» в полуконтактной силовой моде с использованием вольфрамовых зондов с радиусом закругления вершины приблизительно 200 нм (рис. 3, а) и зондов в виде стеклянных микропипеток с внешним диаметром приблизительно 2 мкм (рис. 3, б). Сравнение этих изображений, а также их поперечных сечений показывает, что на рис. 3, а, наблюдается лучшее пространственное разрешение. Вместе с тем пространственное разрешение, достигнутое на рис. 3, б, значительно лучше того, которое можно было бы ожидать от применения зонда с внешним диаметром приблизительно 2 мкм. Наблюдаемое в эксперименте пространственное разрешение можно связать с присутствием на торце микропипетки случайного острого выступа с характерным размером менее 1 мкм, который образовался в процессе вытяжки.

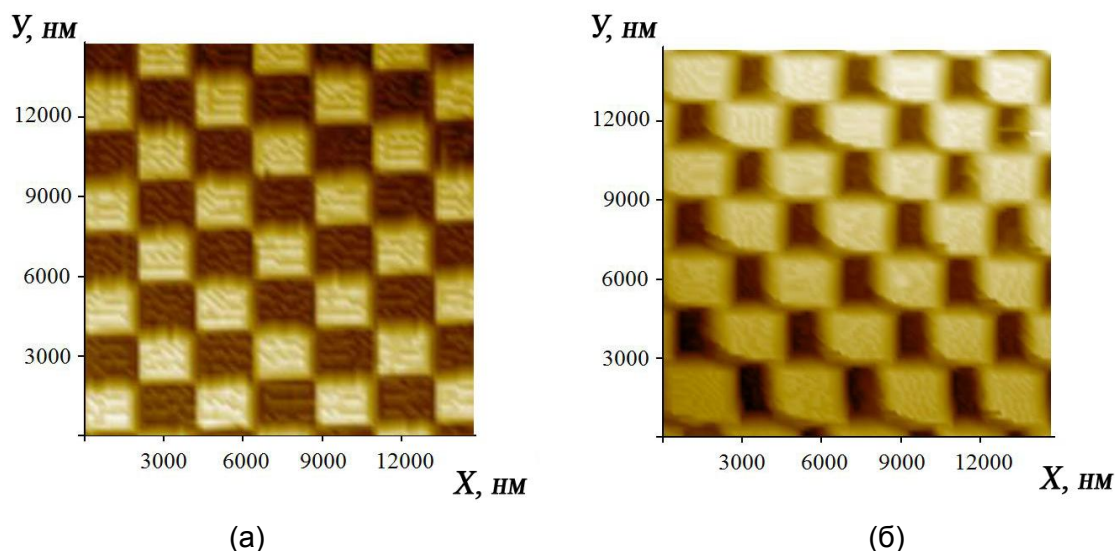


Рис. 4. СЗМ-изображения тестовых решеток, полученные в полуконтактной силовой моде: (а) вольфрамовый зонд; (б) зонд в виде микропипетки

Заключение

Таким образом, исследование пьезорезонансного датчика с микропипеткой в качестве зонда показало, что он обладает пространственным разрешением, превышающим внешний диаметр микропипетки. Добротность датчика с микропипеткой близка к добротности датчика с вольфрамовым зондом. Жидкая среда не влияет на добротность датчика. Пространственное разрешение датчика с микропипеткой определяется микровыступами, формирующимися в процессе вытяжки микропипетки. На основании результатов исследования можно сделать вывод о возможности применения датчика с микропипеткой в жидкой среде с одновременной работой в полуконтактной силовой моде и в моде измерения ионных токов.

Работа поддержана грантом Министерства образования и науки № 2.1.2/4187 «Многофункциональные нанозонды для сканирующей зондовой микроскопии, спектроскопии и литографии (СЗМ-С-Л): концепция, технология, характеристика, применение» и грантом Carl Zeiss «Создание и исследование зондов на основе стеклянных микропипеток для сканирующих зондовых микроскопов». Исследования выполнены на оборудовании фирмы Carl Zeiss в НОЦ-ИТ СПбГУ ИТМО.

Литература

1. Yasoot A., Koenders L. // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2008. – V. 41. – Is. 10. – P. 103001.
2. Голубок А.О., Васильев А.А., Кerpелева С.Ю., Котов В.В., Сапожников И.Д, Датчик локального силового и туннельного взаимодействия в сканирующем зондовом микроскопе // Научное приборостроение. – 2005. – Т. 15. – № 1. – С. 62–69.

<i>Голубок Александр Олегович</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, зав. кафедрой, golubok@ntspb.ru
<i>Левичев Вадим Вячеславович</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, преподаватель, levicev_vadim@mail.ru
<i>Пинаев Александр Леонидович</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, pinaich@mail.ru
<i>Стонига Александр Владимирович</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, sanja100v@mail.ru

УДК 004.413.5

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МОДУЛЬ ОЦЕНКИ
НАПРЯЖЕННОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРА**

А.А. Балхарет

Разработан подход к оценке деятельности оператора, основанный на использовании информационно-программного модуля (инструмента), фиксирующего напряженность деятельности оператора.

Ключевые слова: напряженность деятельности, оператор, самооценка, автоматизированный опросник, требования, информационно-программный модуль.

Введение

Ввиду развития различных автоматизированных систем их разработчики часто не обращают достаточного внимания на удобство интерфейса, с которым взаимодействует оператор. При работе с такими информационно-программными продуктами у оператора может возникнуть состояние психической напряженности, которое оказывает сильное влияние на эффективность его деятельности и от которого в будущем может зависеть отношение оператора к конкретному виду деятельности (задаче). Напряженность деятельности оператора в значительной степени зависит от организации его деятельности, вида и формы представления информации, других компонент интерфейса, где неудачное представление материала может повлиять на качество деятельности. Чаще всего напряженность деятельности и ее возможные изменения оценивают на основе постоянного измерения изменений различных физиологических параметров (давления, кожно-гальванической реакции и др.) [1, 3]. При этом, несмотря на огромное число работ по психофизиологии, физиологии и др., понятие напряженности деятельности на сегодняшний день не имеет достаточно четкого определения.

В ряде случаев напряженность деятельности оператора может являться одним из важнейших критериев правильной организации рабочего процесса, процесса подготовки, а также интерфейса.

**Влияние изменения напряженности деятельности оператора
на время выполнения задачи**

Для обозначения психических состояний оператора в трудных условиях работы исследователи пользуются разными понятиями, среди которых наиболее популярно понятие «напряженность». Состояние психической напряженности возникает при выполнении человеком продуктивной деятельности в трудных условиях и оказывает сильное влияние на ее эффективность. Характер этого влияния определяется как самой ситуацией, так и особенностями личности, ее мотивацией и т.д.

Предлагается подход к измерению степени напряженности деятельности оператора, основанный на использовании информационно-программного модуля, фиксирующего напряженность деятельности оператора.

Рассмотрим пример, иллюстрирующий изменение динамики напряжения деятельности оператора в случае возможного многократного решения задачи (до успеха).

Оператор выполняет некоторую рабочую операцию, после чего результат выполнения контролируется (вручную или автоматически). Если контроль признал, что операция выполнена неправильно, то оператор вынужден повторить ее выполнение.

Неправильное решение задачи может повлиять на напряженность деятельности оператора: оператор может начать нервничать, что повлечет снижение безошибочности выполнения операций; оператор может начать работать медленнее (аккуратнее, с его точки зрения); оператор может начать торопиться, и т.д. При различных технологиях реализации решения задачи напряженность деятельности оператора будет по-разному влиять на его работу и, следовательно, на общее время решения поставленной задачи. Ориентировочная оценка общего времени выполнения задачи на ранней стадии проектирования алгоритма деятельности позволит заранее более детально оценивать деятельность оператора (пользователя) в целом.

Далее рассмотрены четыре частных случая изменения характеристик деятельности оператора, для каждого из которых получены аналитические зависимости оценки времени решения задачи в целом.

1. Продолжительность выполнения рабочей и контрольной операции возрастают.
2. Увеличивается только время рабочей операции.
3. Время выполнения и рабочей, и контрольной операции уменьшаются.
4. Уменьшается только время рабочей операции.

Получены формулы, позволяющие вычислять среднее время решения задачи оператором для каждого случая. Рассмотренный комплекс частных моделей изменения времени выполнения операций дает возможность оценки среднего времени выполнения задачи в зависимости от построения (организации) процесса деятельности.

Автоматизированная оценка напряженности

Для оценки влияния изменения напряженности деятельности оператора на ее результативность и на ее привлекательность следует использовать субъективную оценку операторами напряженности их деятельности. Заметим, что, хотя истинное значение напряженности деятельности неизвестно, ее субъективная оценка операторами в конкретные моменты времени может быть как пессимистической, так и оптимистической, т.е. может зависеть от некоторых предпочтений операторов. Таким образом, у каждого оператора для конкретных видов деятельности преобладают либо те, либо другие, либо квазиобъективные оценки. Ввиду того, что субъективная оценка оператором напряженности деятельности (пессимизм, реализм или оптимизм) является постоянной для каждого конкретного оператора и конкретного вида деятельности, она может быть достаточно адекватно реализована в виде самооценки. Таким образом, предполагается получение информации от оператора в виде реакции на задаваемый вопрос (предъявляемое изображение).

Информационно-программный модуль

Ввиду того, что в деятельности оператора преобладает его взаимодействие с информационной моделью [4], модуль автоматизированной оценки напряженности деятельности (далее МОДУЛЬ) должен удовлетворять следующим требованиям:

1. функционировать параллельно с основной программой;
2. обладать дружественным интерфейсом с операторами (быстрое освоение; минимум времени на ответную реакцию; минимальное отвлечение от основной деятельности; отсутствие влияния на основную деятельность оператора);
3. обеспечивать получение информации от оператора в определенные моменты времени – достаточно часто, чтобы получить наиболее точную оценку напряженности, но не слишком часто, чтобы не надоест оператору, не мешать процессу работы, не

вызвать раздражения и негативной реакции, что может исказить получаемую информацию.

Необходимо заметить, что удовлетворение первого требования реализуется не всегда достаточно просто при работе с прикладным программным продуктом (ППП). Выполнение второго и третьего требований связано с проработкой психологической составляющей опросника, видом предъявляемой информации, способом ее представления, периодичностью предъявления и др.

Опросник

Для опросника разработана специальная шкала градаций напряженности от 1 до 9. Оператору предъявляется изображение (рис. 1, верхняя часть), соответствующее шкале 1–9 (рис. 1, нижняя часть).

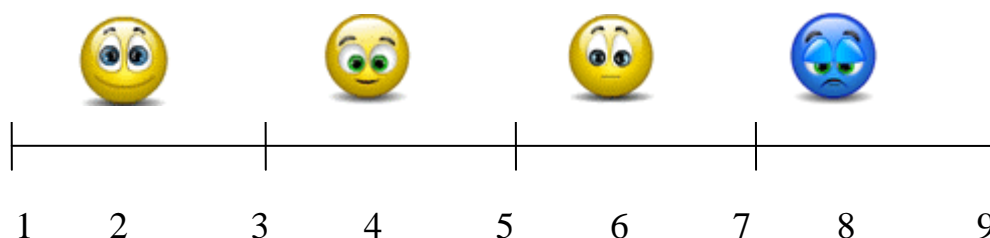


Рис. 1. Изображение, предъявляемое оператору, и шкала

Оператору предлагается оценить мгновенное значение собственной напряженности, отметив ее как одну из предъявляемых картинок. Если, по мнению оператора, значение его напряженности в данный момент времени находится между изображениями, то оператор отмечает промежуточное значение по специальной шкале.

Частота предъявления опросной информации

Если интервал времени между опросами равен $\Delta t = T/n$, где n – число опросов за время T , то точность вычислений растет с увеличением числа n . При оценке средней напряженности ошибка зависит от возможных резких перепадов напряженности деятельности оператора. Для более-менее стабильной деятельности без резких изменений напряженности возможно не очень частое предъявление картинки-вопроса оператору. Для деятельности с резкими перепадами напряженности достаточно редкое фиксирование субъективной оценки напряженности оператора могло бы привести к значительному искажению результата. Однако в реальности, ввиду запаздывания самооценки, искажение получается меньше. Величина запаздывания зависит как от напряженности деятельности и скорости ее изменения, так и от личностных особенностей оператора. Частота опроса может быть определена на основе установления наиболее благоприятного (в психологическом смысле) соотношения $T_{\text{отв}}/\Delta t$, где $T_{\text{отв}}$ – время реакции и ответа на заданный вопрос. Необходимо заметить, что соотношение $T_{\text{отв}}/\Delta t$ предъявления каждого вопроса может быть неожиданным. При увеличении $T_{\text{отв}}/\Delta t$ уменьшается время, отводимое оператору на основную работу. Предполагается, что соотношение $T_{\text{отв}}/\Delta t$ должно находиться в интервале 0,01–0,03 [1, 2]. Принимая во внимание, что при данном построении опросного материала $T_{\text{отв}}$ находится в интервале от 3 с до 5 с, интервал времени между опросами должен находиться в пределах 5–10 мин.

Модуль автоматизации оценки напряженности

При оценке степени напряженности деятельности оператора при взаимодействии с информационно-программным средством (ИПС), автоматизация оценки напряженности (АОН) осуществляется параллельно с основной деятельностью (рис. 2).

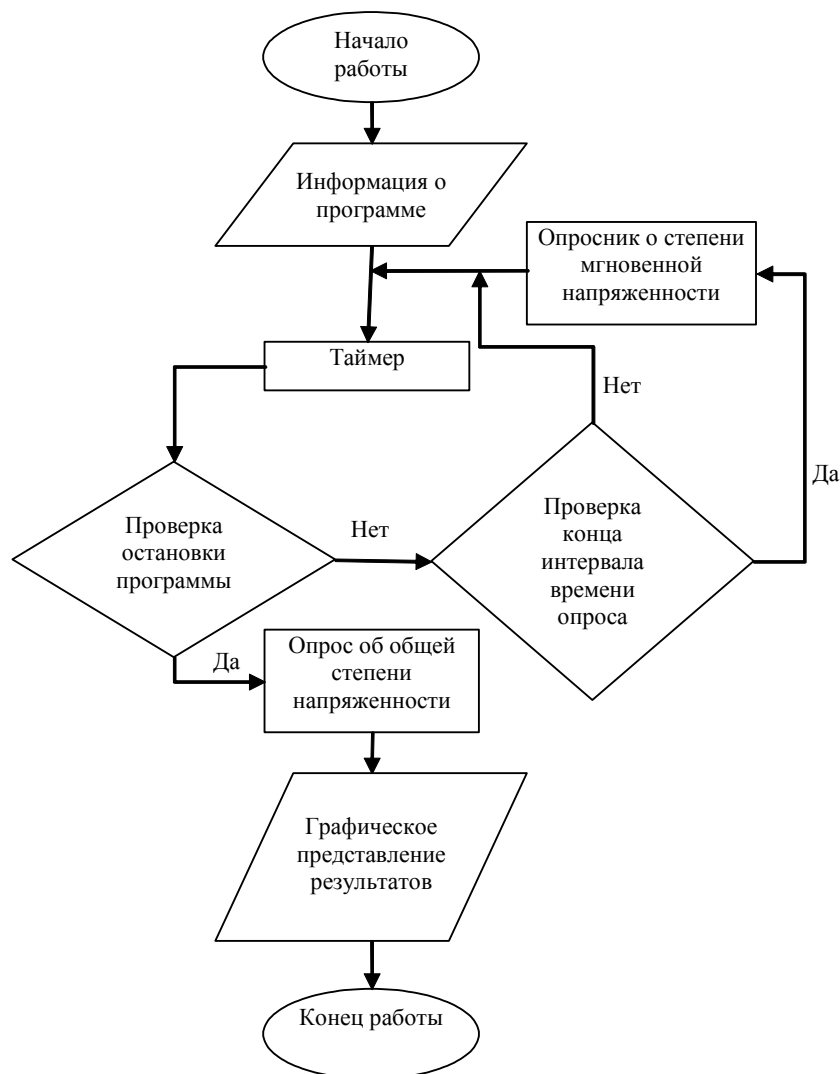


Рис. 2. Схема алгоритма работы модуля автоматизированной оценки напряженности

Последовательность взаимодействия модуля с оператором представляется следующим образом.

1. В начале работы модуль показывает окно с информацией о программе.
2. После того как работа начинается, в верхней левой части экрана основного окна программы показывается дата и таймер (часы, минуты, секунды), который пользователь может остановить в конце работы с помощью специальной кнопки.
3. По истечении определенного периода времени (5–10 минут) в верхней левой части экрана предьявляется (всплывает) другое окно (верхняя часть рис. 1) одновременно со звуковым сигналом. Таким образом, модуль запрашивает пользователя о степени напряженности. Пользователь реагирует кликом по одной из картинок.
4. После реакции пользователя это окно закрывается, а основное окно сохраняется.

5. Окно с вопросом о степени напряженности (картинки) всплывает через определенные периоды времени, т.е. шаги 3 и 4 повторяются до конца работы.
6. В конце работы пользователь нажимает кнопку остановки таймера, и ему показывается новое окно в верхней левой экрана, которое запрашивает у пользователя мнение о степени его напряженности за время работы в целом. Пользователь может либо выбрать одну из пяти картинок, которые определяют уровень напряженности, либо дать более точный ответ, если степень напряженности, по его мнению, находится между предлагаемыми уровнями.
7. После оценки степени напряженности пользователь нажимает кнопку ОК, чтобы закрыть окно, и ему предъявляются следующие результаты: продолжительность работы, график изменения напряженности работы пользователя, рассчитанное среднее значение напряженности работы пользователя и самооценка напряженности его деятельности за все время работы.

Пользователь может изменить способы графического представления результатов (цвет текста, фон, цвет оси и графика), стиль графика.

Исследования эффективности предлагаемого подхода

Модуль АОН был испытан на группе обучаемых в системе дистанционного обучения. Целью эксперимента была оценка эффективности технологии представления учебных материалов в дистанционном обучении (текст, аудио, видео). Было выбрано три различных лекции, для каждой из которых были возможны три различных представления информации (текст, аудио, видео). Девять вариантов лекций были распределены случайным образом по обучаемым, чтобы каждый обучаемый получил три различные лекции в различных представлениях. Сформированы и предъявлены вопросы по каждой лекции независимо от способа ее представления для оценки уровня усвоения материала. В результате эксперимента получили следующие результаты.

1. Средняя степень напряженности деятельности обучаемого при видеолекции меньше, чем в других случаях (текстовые лекции – 3,5; аудиолекции – 4,3; видеолекции – 2,9).
2. Средняя степень уровня усвоения видеолекции больше, чем в других случаях (текстовые лекции – 86%, аудиолекции – 71%; видеолекции – 90%).
3. Степень уровня усвоения лекции не всегда правильно отражает степень напряженности деятельности обучаемого (у некоторых обучаемых была выше степень напряженности деятельности, но и больше степень усвоения материала).
4. Модуль АОН не вызывает раздражения и негативной реакции. Для выяснения этого в процессе одной из видеолекций была протестирована степень напряженности без модуля АОН (устным опросом обучаемых в конце лекции о степени напряженности). Замечено, что средняя степень напряженности деятельности обучаемого с использованием модуля АОН и без него практически одинакова (3,3 и 3,2 соответственно).
5. Оценка степени напряженности деятельности обучаемого без модуля АОН может не всегда отражать реальную степень напряженности. В качестве примера была выбрана тестовая аудиолекция невысокой сложности, усложняемая лишь в последние 10 минут. Была протестирована степень напряженности без модуля АОН и замечено, что многие обучаемые выбирали большую степень напряженности, забыв, что 90% лекции составлял очень простой материал (для сравнения: степень оценки с модулем АОН составила 3,1, без модуля АОН – 5,7).
6. Модуль АОН позволяет узнать степень напряженности деятельности обучаемого на каком-то определенном интервале времени.

Заключение

Предложен подход, основанный на автоматизированном фиксировании самооценки напряженности деятельности оператора, выявляемой в процессе его работы путем автоматизированного опроса. Решены вопросы реализации программы и создания модуля автоматизированного опросника, функционирующего параллельно с основной деятельностью оператора. Опросник основан на предъявлении оператору разработанных изображений специального вида, его реакции на предъявляемый материал. Модуль обеспечивает обработку полученных материалов.

Проведенные исследования подтвердили целесообразность использования разработанного автоматизированного модуля для оценки напряженности деятельности оператора.

Литература

1. Информационно-управляющие человеко-машинные системы. Исследование, проектирование, испытания: Справочник / Под общ. ред. А.И. Губинского, В.Г. Евграфова. – М.: Машиностроение, 1993. – 512 с.
2. Падерно П.И., Попечителей Е.П. Надежность и эргономика биотехнических систем. – СПб: Изд-во СПбГЭТУ, 2007. – 288 с.
3. Дружинин Г.В. Учет свойств человека в моделях технологий – М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2000. – 327 с.
4. Советов Б.Я., Цехановский В.В., Чертовской В. – Теоретические основы автоматизированного управления. – М.: Высш. шк.. 2006. – 463 с.

Балхарет Ахмед Абдулла Саид – Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», аспирант, balhareth_ru@hotmail.com

УДК 004.415.2

АНАЛИЗ ОРГАНИЗАЦИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА В СТАНДАРТЕ IEC 61499

А.Н. Лукичев

В статье проводится анализ организации вычислительного процесса в распределенных системах управления, описываемой стандартом IEC 61499. Выявляются основные недостатки организации и описываются способы их решения.

Ключевые слова: распределенные системы управления, модели вычислений, встроенные системы.

Введение

Стандарт IEC 61499 [1] был принят в 2005 г. Международной электротехнической комиссией после почти 10 лет предварительного обсуждения. Стандарт описывает организацию распределенных систем мониторинга и управления промышленными процессами, предоставляет языковые средства для их описания и требования к реализации на вычислительной платформе. В настоящее время организационной и исследовательской деятельностью по развитию стандарта занимается некоммерческий консорциум O³NEIDA при поддержке IEC. Различные вопросы, связанные с использованием IEC 61499, регулярно обсуждаются на таких конференциях, проводимых IEEE, как ETFA (Emerging Technologies and Factory Automation), ISORC (International Consortium on Ob-

ject-oriented Real-time distributed Computing), INDIN (Conference on Industrial Informatics) и другие.

Несмотря на значительное время, в течение которого стандарт обсуждался перед принятием, множество вопросов организации вычислений в распределенных системах управления (PCY) осталось за рамками стандарта. Многие из них препятствуют использованию в полной мере таких основных достоинств IEC 61499 по сравнению с широко используемым в настоящее время IEC 61131, как распределенность и параллелизм вычислений. В статье проводится краткий анализ и подчеркиваются существенные проблемы организации вычислительного процесса, регламентируемой стандартом.

Функциональные блоки

Функциональный блок (ФБ) представляет собой компонент вычислительного процесса, воспринимающий входные сигналы, активизирующий вычисления и генерирующий выходные сигналы в зависимости от наличия событий на входах и своего состояния. У ФБ должен быть хотя бы один вход, воспринимающий события, по которым он активизирует вычисления. У ФБ может быть один или несколько входов данных, один или несколько выходов событий, генерируемых по завершении вычислений, и один или несколько выходов данных, состояние которых может обновляться также по завершении вычислений.

Стандарт описывает ФБ трех типов: простые (basic), сервисные (service) и составные (composite). Простой ФБ содержит набор алгоритмов обработки данных, внутренние данные и логику их выбора и активизации, описываемую управляющим конечным автоматом (ЕСС, Execution Control Chart). Основные элементы простого ФБ изображены на рис. 1. Алгоритмы простого ФБ могут использовать входы данных и внутренние данные, генерируя на выходах результаты вычислений. Переходы между состояниями ЕСС могут быть активизированы по событиям на входах событий. С каждым состоянием ЕСС может быть связано одно или несколько действий, выполняемых при переходе в него. Каждое такое действие представляет собой активизацию одного из алгоритмов и/или генерацию события на одном или нескольких выходах событий по завершении алгоритма.

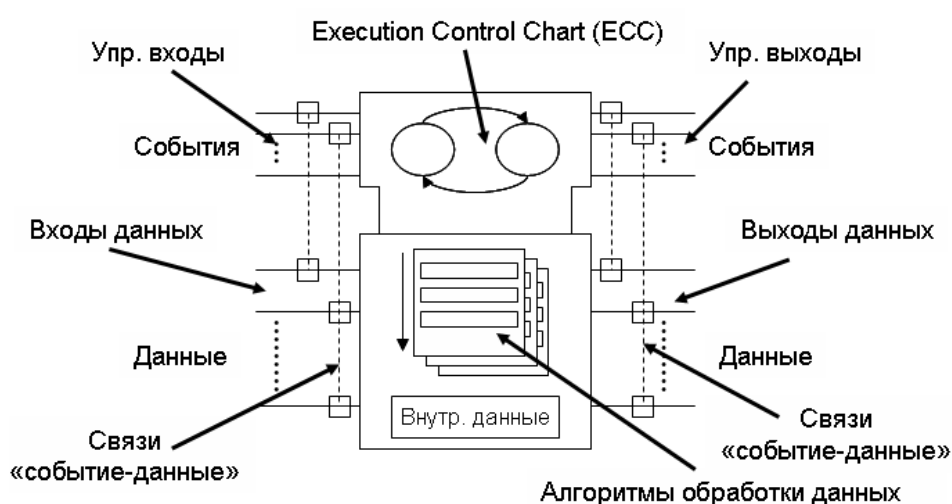


Рис. 1. Простой (basic) функциональный блок

Для обеспечения контроля за взаимодействием ФБ в распределенной системе стандарт требует, чтобы каждый вход данных был связан с входом событий, если по

событию на нем может быть выбран алгоритм, который будет использовать указанный вход данных. Стандарт требует, чтобы все входы данных были связаны хотя бы с одним из входов событий. То же самое касается и выходов данных. Если после обновления данных на выходе может быть сгенерировано событие на выходе событий, то указанный выход данных должен быть связан с выходом событий, и все выходы данных ФБ должны быть связаны хотя бы с одним выходом событий.

Стандарт также предусматривает существование сервисных ФБ, предназначенных для отображения коммуникационных и других сервисов платформы на функциональные блоки. При этом регламентируется лишь внешний интерфейс сервисного ФБ (всего для двух типов – для коммуникационных и для управления приложением, хотя платформа может предоставлять и другие, совершенно различные сервисы), но его внутренняя реализация не регламентируется. Для приложения сервисный ФБ выглядит как простой ФБ, в котором отсутствует спецификация ЕСС и алгоритмов.

Составной ФБ отличается от простого тем, что вместо набора алгоритмов и ЕСС он содержит сеть простых, сервисных и составных ФБ. Важно отметить, что для составного ФБ также необходимо указывать связи между входами данных и событий и выходами данных и событий. При этом они не обязательно должны соответствовать связям в его внутренней сети.

Поведение ФБ

Несмотря на то, что проект стандарта обсуждался почти 10 лет перед тем, как был принят в 2005 г., многие вопросы организации вычислений в описываемой им распределенной системе остались открытыми. Исследователи отмечают возможность неоднозначного понимания поведения отдельных ФБ и координации вычислений, приводящую к несовместимости приложений, платформ и инструментов проектирования от различных производителей [2, 4, 5].

Рассмотрим управляющий автомат простого ФБ на рис. 2. Пусть в начальный момент времени автомат находится в состоянии State1, а условие Cond, формируемое внутренними данными ФБ, выполняется.

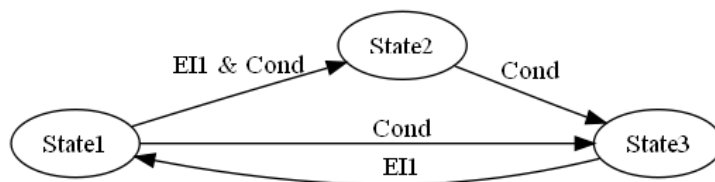


Рис. 2. Пример ЕСС, допускающего неоднозначное поведение в рамках IEC 61499

Стандарт требует, чтобы анализ выполнения условий переходов ЕСС производился после возникновения одного или нескольких событий на входе ФБ. Таким образом, автомат может перейти в другое состояние только при возникновении события на одном из входов событий, например на входе E1. Однако в этом случае будет возможен переход как в State2, так и в State3. Согласно стандарту, анализ условий переходов выполняется в любом заранее заданном порядке, например, в порядке перечисления переходов в формальной спецификации ЕСС. Это вносит неоднозначность в спецификации ЕСС с помощью диаграмм, так как часто при создании диаграмм переходов между состояниями руководствуются принципами читаемости и компактности, не имеющими ничего общего с поведением системы. Эта проблема может возникнуть и при автоматизированном создании графического представления ЕСС из текстовых описаний. Тем не

менее, пусть в рассматриваемый момент времени выбирается переход в состояние State3, и событие на входе EI1 остается «непрочитанным». Стандарт не отвечает на вопрос, будет ли сразу после этого возможен переход обратно в состояние State1 или «непрочитанные» события теряются при переходе между состояниями.

С другой стороны, допустим, что был выбран переход в состояние State2, и после его выполнения значение условия Cond стало равно false. Из состояния State2 возможен единственный переход по условию Cond, которое зависит только от внутренних данных ФБ и может изменить свое значение только после очередного перехода в результате выполнения соответствующего алгоритма. В данном случае изменение Cond невозможно, и ЕСС останется в состоянии State2 при возникновении любых событий на входе ФБ. Поскольку выбор алгоритма и его активизация производится только один раз при переходе ЕСС в одно из состояний, в данном случае при возникновении любых событий на входе ФБ, когда его ЕСС находится в состоянии State2, не будет производиться обработка данных. ФБ будет заблокирован. Несмотря на тривиальность приведенного примера, подобные ситуации могут возникнуть в неочевидных случаях и вполне допускаются стандартом [2].

Сеть ФБ

Стандарт не решает множество вопросов координации вычислений в сети ФБ. К примеру, стандарт допускает существование сети, изображенной на рис. 3. Как видно из рисунка, обновление данных на входе двух ФБ-приемников может быть не согласовано с событиями на их входе. Это может привести к нестабильности исходных данных вычислений, производимых ФБ. В процессе выполнения алгоритма в ФБ-приемнике данные на его входе могут измениться без появления соответствующего события, так как оно генерируется не источником данных.

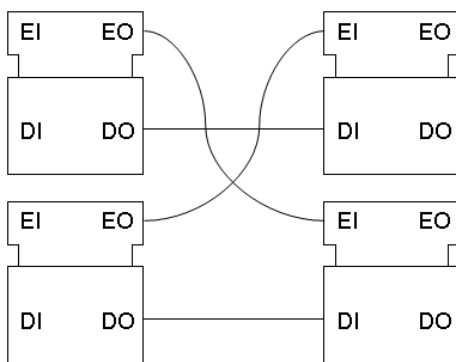


Рис. 3. Сеть ФБ, в которой данные не согласованы с событиями

Кроме чрезмерной универсальности предполагаемой стандартом модели вычислений, эта модель представляется довольно усложненной. С одной стороны, для простых ФБ внутренняя реализация довольно подробно описывается, а с другой, для сервисных ФБ она совершенно не регламентируется. Кроме того, составной ФБ в иерархической модели не может быть представлен как простой ФБ, так как простой ФБ должен иметь текущее состояние управляющего автомата и набор алгоритмов. Очевидно, далеко не для любой сети ФБ, реализующей составной ФБ, можно задать эти два компонента (тем более что в ней могут присутствовать сервисные ФБ).

Это обстоятельство существенно затрудняет анализ, верификацию и реализацию на платформе вычислительного процесса, описываемого в рамках стандарта, и вынуждает прибегать к преобразованию иерархической модели (в которой присутствуют со-

ставные ФБ) в «плоскую» (в которой они отсутствуют) [5, 6]. При таком преобразовании возникает сложность перехода от составного ФБ к реализующей его сети. Как видно из рис. 4, наличие у составного ФБ собственных связей между событиями и данными не позволяет в общем случае просто заменить его на его внутреннюю сеть. Требуется создание специальных ФБ-адаптеров, обеспечивающих такие связи.

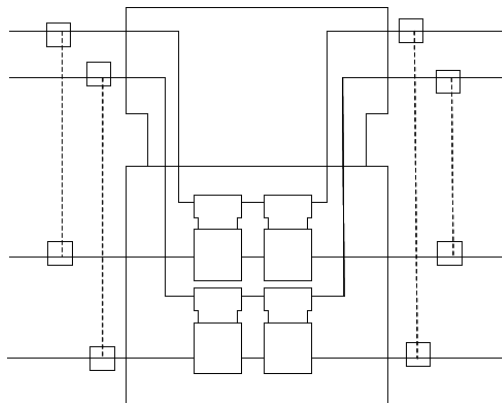


Рис. 4. Составной ФБ и его связи «событие-данные»

Требования реального времени

Стандарт называет такие временные характеристики простых ФБ, как WCET (Worst-Case Execution Time, максимальное время выполнения) алгоритмов, время реакции ЕСС на событие, минимальные интервалы между входными событиями. Тем не менее, этим характеристикам не уделяется достаточного внимания. В стандарте нет ни ограничений, ни описания зависимостей между ними, ни правил, которым эти и другие временные характеристики должны удовлетворять. Таким образом, временной аспект поведения системы остается за рамками стандарта.

Это однозначно неприемлемо при проектировании управляющих систем, которые в большинстве являются системами реального времени. Не имея возможности судить о временных характеристиках отдельного ФБ, невозможно говорить о времени ответа, задержке управления и других важных свойствах проектируемой управляющей системы. Поскольку временные свойства системы не регламентируются стандартом, они автоматически становятся зависимыми от инструментов автоматизированного синтеза и используемой вычислительной платформы. Это существенно снижает портируемость проектов, несмотря на то, что это свойство декларируется как одно из основных достоинств стандарта.

Координация распределенных вычислений

Другим основным достоинством стандарта является акцент на распределенность вычислительного процесса, однако и этим вопросам в нем уделено недостаточно внимания. Речь идет не об общей организации системы (сеть устройств, каждое устройство содержит ресурсы, каждый ресурс выполняет вычисления, а приложение отображается на эту совокупность ресурсов и т.д.), а о вопросах координации распределенных вычислений. Декларируется, что потенциально коммуникационный сервис в системе не может считаться надежным (события и данные в распределенной системе могут теряться или доставляться с непредсказуемыми задержками), однако не оговариваются действия при потере или превышении допустимого времени доставки информации. Не предлагается никаких способов решения этой проблемы.

Несмотря на декларируемую простоту распределения компонентов приложения по вычислительным узлам платформы (устройствам и ресурсам), это требует внесения изменений в модель (а, возможно, и ее существенной переработки), так как взаимодействие с ФБ, находящимися в другом ресурсе, производится с помощью специальных сервисных ФБ, т.е. модель зависит от структуры платформы.

Выводы

IEC 61499 представляет собой развивающийся и перспективный стандарт описания вычислений в распределенных системах управления. В последнее время, с момента его принятия в 2005 г., к нему проявляется повышенный интерес: он активно обсуждается на конференциях, создан консорциум для его поддержки и развития, появляются различные инструменты автоматизированного проектирования в рамках стандарта. Основными достоинствами стандарта являются акцент на платформенную независимость (независимость от программно-аппаратной реализации) и лежащая в его основе распределенность вычислительного процесса, отличающая его от IEC 61131.

Тем не менее, несмотря на свою перспективность, стандарт имеет ряд существенных недостатков, препятствующих использованию в полной мере указанных достоинств.

Модель вычислений [3], предполагаемая IEC 61499, допускает блокировку части сети ФБ или даже одного простого ФБ. В то же время анализ возможности такой блокировки для простых ФБ связан с проблемами верификации управляющего автомата, представляющими собой отдельное актуальное направление исследований.

Наличие трех различных типов ФБ с различной степенью детализации поведения, а также другие приведенные выше особенности модели вычислений делают практически невозможным системный анализ моделей, описанных в рамках стандарта.

Не решено множество вопросов координации распределенных вычислений. В частности, допускается такая тривиальная ситуация, как нестабильность данных на входах ФБ. Не накладывается никаких ограничений на коммуникационную подсистему. Это приводит к необходимости ручной реализации протоколов, обеспечивающих должный уровень ее надежности. В то же время надежность и предсказуемость коммуникационной подсистемы являются часто неотъемлемыми требованиями при проектировании распределенных систем управления [7], и средства для их обеспечения можно было бы включить в стандарт.

Не обсуждаются требования реального времени и не предлагается никаких средств для их анализа в процессе проектирования. Модель вычислений IEC 61499 фактически делает их анализ невозможным, так как для простых ФБ нет ограничений на число выполняемых алгоритмов (пусть даже с известными WCET) и генерируемых событий и данных. Соответственно, в общем случае невозможно предсказать время его реакции, интенсивность генерации данных и другие временные характеристики. Анализ временных характеристик составных ФБ также невозможен, так как в них могут присутствовать сервисные ФБ, для которых вообще не существует каких-либо ограничений.

Отсутствие средств учета требований реального времени в стандарте описания систем управления, которые в основном являются системами реального времени, значительно снижает ценность этого стандарта.

Наличие указанных выше и многих других недостатков заставляет членов консорциума O³NEIDA вести исследования по его дополнительной конкретизации и разработке «профилей совместимости» (compliance profile), в которых решаются многие из присутствующих в IEC 61499 вопросов. В то же время предлагаемые решения [2, 5, 6], в

основном, касаются вопросов реализации проекта на вычислительной платформе, тогда как многие концептуальные вопросы модели вычислений, лежащей в основе стандарта, остаются до сих пор открытыми. Актуально решение этих вопросов – в первую очередь, вопросов учета требований реального времени и анализа временных характеристик сетей ФБ.

С этой точки зрения подход, предложенный в [4] для анализа схожей модели вычислений, выглядит перспективным. Подход основан на формальном описании вычислительного процесса, при котором его временные характеристики учитываются с самого начала (лежат в основе понятий события, сигнала и ФБ), на использовании для этих целей соответствующего математического аппарата и на унификации понятий «простой (атомарный) ФБ» и «составной ФБ». Это позволяет рассматривать иерархические модели на различных уровнях абстракции и заменять отдельные сети «простыми» ФБ, не прибегая к введению «вспомогательных» компонентов. Также это позволяет вычислять временные характеристики отдельных ФБ и всей системы, такие как время реакции и задержка управления, анализировать такие системные свойства, как детерминизм и живучесть. Разработка соответствующего «профиля совместимости» IEC 61499 с учетом такого подхода может решить указанные проблемы стандарта.

Литература

1. International Electrotechnical Commission. IEC 61499. Function Blocks for Industrial Process Measurement and Control Systems. Part 1 – Architecture. – Geneva, 2005
2. Dubinin V., Vyatkin V. Towards a Formal Semantic Model of IEC 61499 Function Blocks // IEEE International Conference on Industrial Informatics, 16–18 August, 2006. – P. 6–11.
3. Лукичев А.Н. Денотативно-объектная модель вычислений для встроенных систем: дис. ... канд. техн. наук. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://fppo.ifmo.ru/file/dis/a_68.pdf, своб.
4. Лукичев А.Н. Вычисление временных характеристик объектно-событийных моделей встроенных систем // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2008. – Вып. 46. – С. 62–68.
5. Schwab C., Tangermann M., Lueder A., Kalogeras A., Ferrarini L. Mapping of IEC 61499 Function Blocks to Automation Protocols within the TORERO Approach // Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Informatics. – 2004. – P. 149–154.
6. Ferrarini L., Veber C. Implementation Approaches for the Execution Model of IEC 61499 Applications // Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Informatics. – 2004. – P. 612–617.
7. Постников Н.П. Динамические инструментальные компоненты // Научно-технический вестник СПбГИТМО(ТУ). Информационные, вычислительные и управляющие системы. – 2002. – № 6. – С. 83–88.

Лукичев Александр Николаевич – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, ассистент, sash1@mail333.com

УДК 004.434

СРЕДСТВА ПОВТОРНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФОРМАЛЬНЫХ ГРАММАТИК И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ДИАЛЕКТОВ

А.А. Бреслав

Современные средства разработки конкретного синтаксиса предоставляют три основных механизма повторного использования: модули, шаблоны и аспекты. В работе рассмотрены эти механизмы и степень полноты их реализации в существующих инструментах, а также предложены их расширения и рассмотрено применение расширенных версий для создания диалектов языков программирования.

Ключевые слова: синтаксис, грамматика, шаблон, аспект, диалект.

Введение

Механизмы повторного использования во многом определяют пригодность средств разработки для промышленного программирования. С распространением предметно-ориентированных языков [1] вопросы повторного использования синтаксических определений (формальных грамматик и формализмов на их основе) встали особенно остро, поскольку традиционные средства разработки синтаксиса [2–4] слабо его поддерживали. Более современные инструменты сильно продвинулись в этом смысле.

В настоящей работе обсуждаются используемые ныне механизмы повторного использования синтаксических определений и возможности их улучшения.

Одним из наиболее мощных современных инструментов для генерации синтаксических анализаторов является SDF [5]. Эта система поддерживает модульные определения и параметризованные модули. Параметрами модуля являются символы грамматики, что позволяет создавать правила, использующие не заранее зафиксированные символы, а значения параметров.

Не менее мощный инструмент Rats! [6] также поддерживает параметризованные модули, но параметрами могут быть лишь другие модули, а не символы, как в SDF, таким образом в Rats! можно варьировать лишь наборы символов, используемые модулем, а не отдельные символы. Кроме этого, Rats! позволяет модифицировать существующие правила, добавляя, удаляя или заменяя отдельные продукции.

Несколько иной подход выбран в генераторе компиляторов LISA [7]. Этот инструмент поддерживает наследование грамматик без параметризации. Шаблоны (параметризованные определения) используют только задания семантических действий. Кроме того, для присоединения семантических действий к грамматике используются аспекты в интерпретации, сходной с AspectJ [8].

Как легко заметить, так или иначе используются три механизма: модули (повторно используемые наборы правил), шаблоны (параметризованные определения) и аспекты (изменения или дополнения грамматики, определенные вне ее). Наследование грамматик в LISA по сути эквивалентно подключению модулей с небольшими расширениями, которые обобщаются при помощи параметризации отдельными символами. Модификации грамматики в Rats! – это упрощенные аспекты. Легко заметить и то, что два более сложных механизма – шаблоны и аспекты – используются в очень ограниченной версии: параметризация – только по символам или модулям, аспекты – только на уровне всей продукции.

Предлагается подход, использующий полноценные шаблоны и аспекты для повторного использования грамматик. Кратко описывается система Grammatic [9], в рамках которой этот подход реализуется. Подробно рассматриваются возможности полноценных шаблонов и аспектов, а затем демонстрируется их использование для создания диалектов существующих языков без написания кода на низком уровне абстракции.

Система разработки текстового синтаксиса *Grammatic*

Система *Grammatic* разрабатывается как инструмент, позволяющий манипулировать синтаксическими определениями на высоком уровне абстракции и применять другие средства разработки (такие, например, как генераторы синтаксических анализаторов) к этим определениям.

Основу системы составляет язык описания грамматик, основанный на расширенной форме Бэкуса–Наура (Extended Backus–Naur Form, EBNF) и использующий нотацию, принятую во многих инструментах:

```
rule : NAME metadata? ':' production ('||' production)* ';' ;
```

Основной особенностью этого языка является возможность аннотирования грамматики произвольными метаданными. Метаданные позволяют сопровождать синтаксическое определение семантической информацией, которая требуется сторонним инструментам. Например, в качестве метаданных могут быть описаны семантические действия, предикаты или декларативные средства разрешения конфликтов, правила обратного преобразования дерева разбора в текст, правила расстановки переводов строк и пробелов и т. д. Вот пример определения символа с сопоставленными ему метаданными (указаны в фигурных скобках):

```
COMMENT {lexical; channel=hidden} : '/' ([^'\n'])* '\n';
```

Как видно из примера, метаданные представляют собой набор именованных атрибутов, которые могут иметь значения различных типов или вовсе не иметь значения (в этом случае учитывается лишь факт наличия самого атрибута).

Модули и шаблоны

Grammatic поддерживает модули аналогично SDF или Rats!, т.е. позволяет описывать модуль в отдельном файле и подключать его с помощью предложения `import`. Основное отличие *Grammatic* состоит в понимании концепции шаблонов, а именно в том, что параметром (и результатом применения) шаблона может быть не только модуль или символ, а любой объект, который может упоминаться в определении грамматики – часть синтаксического описания, метаданные, перечисление символов и т.д.

Для примера возьмем конкретный синтаксис для метаданных самого *Grammatic*. В его определение входят правила для различных типов значений атрибутов, правило для значения атрибута вообще задается таким шаблоном:

```
Symbol template attributeValue<Production* other> {
  attributeValue : character
    | INT
    | STRING
    | NAME
    | metadata
    | '{{' term* '}}'
    | <other> ;
}
```

В базовом определении этот шаблон инстанцируется так (параметр `other` имеет значение пустого набора продукций):

```
import attributeValue<>;
```

Допустим, что в какой-то грамматике, использующей это определение, нужно добавить продукцию, позволяющую использовать символы грамматики в виде значений метаданных. Это легко сделать, передав в качестве параметра шаблона эту продукцию:

```
import attributeValue<| '#' symbolReference>;
```

Как видно из примера, полноценные шаблоны позволяют реализовать функциональность, которая реализована в других инструментах отдельным механизмом.

Аспекты

Многие инструменты используют языки, расширяющие EBNF специальным образом, например, к стандартной нотации добавляются типы возвращаемых значений и параметры для правил, код на языке общего назначения для семантических действий и т.д. Если эти расширения интенсивно используются, полученные определения становятся очень плохо читаемыми из-за смешения различных видов информации. В связи с этим возникает потребность выносить дополнительную информацию за пределы синтаксического определения, что улучшает модульность системы, разделяя синтаксис и прочие элементы определения.

В Grammatic все расширения языка определений выражаются метаданными, поэтому такое разделение сводится к вынесению метаданных за пределы определения грамматики. Это обеспечивается механизмом точек присоединения и дополнений (point-cut and advice, [8]), аналогичным используемому в AspectJ. Чтобы присоединить метаданные к грамматике, необходимо обозначить те объекты, к которым они присоединяются. Эта задача решается с помощью структурных запросов. Запрос регламентирует свойства объектов, которые необходимо найти, например, «найти символ, в определении которого есть продукция, начинающаяся с него самого»:

```
$$ |> $$ ..
```

К выбранным объектам (сохраненным в переменные) можно присоединять метаданные. По аналогии с AspectJ и другими аспектными языками наборы таких правил присоединения метаданных называются аспектами, поскольку каждый такой набор действительно отражает определенный аспект системы, улучшая тем самым логическое разделение информации.

Важным свойством аспектов в Grammatic является то, что они могут быть не привязаны к конкретным правилам грамматики: запросы выражают общие свойства объектов, поэтому их можно применять в любом контексте.

Проиллюстрируем использование аспектов (и шаблонов) для решения задачи создания диалектов.

Создание диалектов

Диалекты, т.е. языки, немного модифицирующие синтаксис (и иногда – семантику) других языков, довольно широко распространены. Так, Java 5 во многом представляет собой диалект Java 2, практически каждый генератор синтаксических анализаторов использует свой диалект EBNF, а каждая СУБД – свой диалект SQL. Будем рассматривать диалекты, не привносящие новых семантических единиц, т.е. по сути вводящие так называемый «syntax sugar». Нередко этого достаточно, особенно если исходный язык спроектирован для создания диалектов (например, в языке предусмотрены метаданные достаточно произвольной структуры). Как нетрудно заметить, язык определений Grammatic спроектирован как раз таким образом, что позволит нам легко специализировать его, делая его использование незаметным для пользователей, привыкших к другим инструментам. Для этих целей используются аспекты.

В качестве примера рассмотрим создание диалекта Grammatic, имитирующего синтаксис генератора ANTLR [3] – одного из наиболее популярных на сегодняшний день среди программистов на Java. Определение символа в ANTLR выглядит так:

```
qualifiedName [SymbolTable table] returns [Variable result]
: objectName=name '.' variableName=name
{
  result = table.lookup(objectName, variableName);
};
```

Нетрудно видеть, что оно заметно отличается от определения в *Grammatic*: добавлены формальные параметры и тип возвращаемого значения, имена для ссылок в правой части и код семантического действия. Несмотря на то, что смешение различных типов информации считается вредным, мы, тем не менее, опишем здесь способ заставить *Grammatic* вести себя так же, чтобы продемонстрировать удобство создания диалектов.

Итак, рассмотрим определение в *Grammatic*, аналогичное приведенному выше (вся дополнительная информация вынесена в метаданные):

```
qualifiedName {
  parameters = {{{type = 'SymbolTable'; name = 'table'}}} ;
  returns = {type = 'Variable'; name = 'result';} ;
}: name{variable = 'objectName'} '.' name {variable = 'variableName'}
@{
  after = 'result = table.lookup(objectName, variableName);';
};
```

Метаданные позволяют легко выразить те же понятия, однако синтаксис отличается. Для решения таких задач *Grammatic* позволяет создавать специальные аспекты, модифицирующие синтаксис и сопоставляющие таким модификациям семантику в терминах исходного языка. Во время выполнения новые синтаксические конструкции просто транслируются в метаданные. Начнем с простого – поддержим имена переменных:

```
atom |> $symbolName:NAME
[[
  $symbolName.before = {
    syntax = <<(NAME '=')?>>;
    transformTo = {{$symbolName.variable := NAME;}};
  };
]];
```

Это правило из обыкновенного аспекта, сопоставляющее элементам определения метаданные. Выбрана точка расширения – использование символа *NAME* в качестве ссылки на символ, и ей сопоставлен атрибут *before*, определяющий модификацию синтаксиса, добавляющую конструкцию перед ним. Атрибут *syntax* содержит описание добавляемой конструкции, оно соответствует префиксу для символа в ANTLR. Атрибут *transformTo* описывает преобразование добавленной синтаксической конструкции в метаданные: во время выполнения будет создан атрибут *variable*, и ему присвоится значение токена *NAME*.

Эти метаданные сами по себе ничего не значат, чтобы они «заработали», необходима программа, которая их интерпретирует. Такой интерпретатор входит в *Grammatic* – он отвечает за модификацию определений с помощью аспектов.

Продолжим создавать наш диалект. Добавим возможность писать в конце продукции семантические действия:

```
production --> $pre:('@' metadata)? alternative $post:('@' metadata)?
[[
  $pre.instead = { syntax = << >>; };
  $post.instead = {
    syntax = << $code:STRING_IN_CURLY >>;
    transformTo = {{
      alternative.after := $code;
    }};
  };
]];
```

Здесь выбраны две точки расширения – метаданные перед и после продукции, и для обеих используется замещение, т.е. точка расширения заменяется новой синтаксической конструкцией. В первом случае замещающая конструкция пуста, что соответствует удалению части исходного правила. Во втором случае использован токен «строка

в фигурных скобках», соответствующий синтаксису определяемого расширения. Во время выполнения значение этой строки будет записано в атрибут `after`.

Последнее расширение будет наиболее многословным, поскольку для него придется определить два новых правила – `parameter` и `parameters`, определяющие синтаксис параметра и списка параметров в ANTLR (сами эти определения опущены для краткости):

```
rule
--> $ruleName:NAME metadata? ':' production ('||' production)* ';'
[[
  metadata.instead = { syntax = << >>; };
  $ruleName.after = {
    syntax = <<$p:parameters? ('returns' '['$r:parameter']')?>>;
    transformTo = {{
      parameters := $p;
      result := $r;
    }}
  ];
]];
```

Произвольные метаданные для символа удаляются, зато после имени символа добавляются определения параметров и возвращаемого значения, транслируемые в соответствующие атрибуты.

Этот механизм полностью реализует идеи АОР, перенесенные на почву формальных грамматик. Он позволяет достичь большой гибкости и значительно расширяет возможности разработчика по сравнению с упомянутыми выше инструментами.

Заключение

Рассмотрены современные подходы к повторному использованию формальных грамматик: модули, шаблоны и аспекты. Предложены обобщения этих подходов, существенно расширяющие их возможности по сравнению с существующими реализациями.

Предложено использование шаблонов с параметрами произвольных типов и полноценные аспекты, основанные на точках присоединения и дополнениях. Предложенные подходы реализуются в системе `Grammatic`, разработанной автором.

Показано, что использование предложенных обобщений позволяет не только полностью реализовать функциональность, доступную в существующих инструментах, но и получить принципиально новые возможности. В частности, полноценные аспекты позволяют создавать диалекты существующих языков, не требующие дополнения их семантической структуры, без вмешательства в код семантического анализатора, что как правило, не достигается при других подходах.

Механизм создания диалектов проиллюстрирован на примере самой системы `Grammatic`, язык определений которой может быть специализирован для упрощения работы с метаданными определенной структуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке в форме гранта Правительства Санкт-Петербурга № 3.11/4-05/55.

Литература

1. Ledeczi A., Bakay A., Maroti M., Volgyesi P., Nordstrom G., Sprinkle J., Karsai, G. Composing domain-specific design environments // *Computer*. – 2001. – Vol. 34. – № 11. – С. 44–51.
2. Johnson S.C. *Yacc: Yet another compiler compiler* – UNIX Programmer's Manual, Vol. 2. – Holt, Rinehart, and Winston, New York, 1979. – P. 353–387.

3. Parr T. The definitive ANTLR reference // The Pragmatic Bookshelf, 2007.
4. Gagnon E., Hedren L. SableCC, an Object-Oriented Compiler Framework // Technology of Object-Oriented Languages and Systems, 1998.
5. Klint P.A. Meta-Environment for generating programming environments // ACM Transactions on Software Engineering and Methodology. – 1993. – Vol. 2. – № 2. – P. 176–201.
6. Grimm R. Better extensibility through modular syntax – ACM PLDI '06, New York, 2006. – P. 38–51.
7. Gagnon E., Hendren L. An object-oriented compiler framework // TOOLS, 1998. – P. 140–154.
8. Kiczales G., Hilsdale E., Hugunin J., Kersten M., Palm J., Griswold W. G. An overview of AspectJ // Proceedings of the 15th European Conference on Object-Oriented Programming. – London, Springer-Verlag, 2001. – P. 327– 53.
9. Бреслав А.А., Попов И.Ю. Применение принципов MDD и аспектно-ориентированного программирования к разработке ПО, связанного с формальными грамматиками // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2008. – Вып. 57. – С. 87–97.

Бреслав Андрей Андреевич

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, abreslav@gmail.com

УДК 338.4

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗВИТИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ СФЕРЫ
УСЛУГ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛИЗАЦИИ**

О.А. Цуканова

Проанализированы существующие теоретические и концептуальные основы развития хозяйствующих субъектов в условиях глобализации. Данные аспекты конкретизированы для сферы услуг. Выделены характерные черты современного международного предприятия, проведен анализ понятий «дивергенция – конвергенция» касательно сферы услуг, сформирована методологическая база стратегического планирования на международном предприятии.

Ключевые слова: глобализация, дивергенция, конвергенция, гибридная стратегия.

Введение

Глобализация – основной процесс, происходящий в современном мире, который необходимо учитывать при разработке плана стратегического развития любого предприятия. При этом теоретические основы развития предприятия сферы услуг в условиях глобализации в отечественной научной литературе разработаны недостаточно подробно. Таким образом, цель данной статьи – проанализировать существующие теоретические и концептуальные основы развития хозяйствующих субъектов в условиях глобализации и конкретизировать их для сферы услуг.

Основные черты современного международного предприятия сферы услуг

В прошлом международные предприятия решали достаточно простые задачи, касающиеся производства и реализации товаров. В последние десятилетия стали возникать сети мультинационального обслуживания, в которых неотъемлемыми частями являются предприятия сферы услуг. При этом глобальная сеть такого рода увеличивает эффективность всей системы в целом. По мнению автора, на определенном этапе происходит накопление критической массы компетентности хозяйствующего субъекта, которая позволяет ему выйти на глобальный уровень и, соответственно, получать все эффекты этого уровня.

Международное движение капитала, рабочей силы и различная хозяйственная деятельность предприятий невозможны без сферы услуг. Услуги стали неотъемлемой частью мировой глобализации экономики через финансово-промышленные группы (ФПГ), транснациональные компании (ТНК), международные альянсы. В начале XXI века международная хозяйственная деятельность стала всеобъемлющим и всепроникающим феноменом современной цивилизации. При этом можно отметить, что темпы роста рынка услуг были выше в относительных показателях, чем темпы роста рынка товаров в международном масштабе. Динамика изменения объема мировой торговли материальными товарами и услугами в течение 2001–2003 г.г. представлена в табл. 1.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что экспорт услуг на мировом рынке относится к экспорту товаров примерно как один к четырем. По мнению автора, данные цифры могут быть занижены, так как многие виды услуг, вовлекаемых в международный оборот, фиксируются в статистике торговли услугами неполностью или включаются в экспорт товаров. Так, ВТО разбивает эту торговлю на три вида – транспортные услуги, туризм и прочие услуги.

Выделим характерные черты современного международного предприятия в сфере услуг.

- Сложная взаимосвязь национального и интернационального: эффективная стратегия в эпоху глобализации должна содержать в себе национальные черты.
- Доступность и всеобщность: на современном этапе развития хозяйствующие субъекты имеют значительно больше возможностей для ведения деятельности в другой стране, чем это было несколько десятилетий назад.
- Технологическая глобализация: широкое использование компьютерных сетей принципиально изменило характер взаимодействия между отдельными странами и подразделениями предприятий.
- Финансиаризация: финансовые операции становятся центром международной хозяйственной деятельности [2]. Термин *финансиаризация*, по мнению автора, подразумевает не только получение прибыли – финансовой категории, но и использование достижений финансового менеджмента, без которых невозможно получение международных конкурентных преимуществ. В целом финансиаризация определяет эффективность любой хозяйственной деятельности в международном масштабе.

	Экспорт				Импорт			
	Оборот, млрд долл. США	Темпы роста, % (по сравнению с 2000 г.)			Оборот, млрд долл. США	Темпы роста, % (по сравнению с 2000 г.)		
		2003	2001	2002		2003	2001	2002
Товары	7274	-4	4	16	7557	-4	4	16
Услуги	1763	0	6	12	1743	-1	5	12

Таблица 1 . Мировая торговля товарами и услугами в 2001–2003 г.г.
(на основе данных ВТО [1])

Стратегические и тактические решения в международной хозяйственной деятельности должны базироваться на результатах анализа экономической, политической, правовой и культурной составляющих внешней среды. При этом не все результаты функционального анализа различных составляющих внешней среды используются при формировании стратегического плана развития предприятия. Основными данными для экономического анализа внешней среды при выходе на международные рынки для предприятий сферы услуг, по мнению автора, будут следующие:

- население страны, его половозрастная структура, демографические характеристики;
- структура общества и удельный вес отдельных социальных слоев с характеристиками их душевого дохода;
- уровни оплаты труда в интересующей отрасли, формы оплаты труда;
- наличие конкуренции на местных рынках;
- показатели экономического роста страны, ВВП;
- основные элементы валютного регулирования в стране;
- перечень главных экономических проблем в стране (инфляция, безработица).

Одним из наиболее важных направлений при анализе внешней среды для предприятий сферы услуг будет анализ культурной составляющей. В научной литературе обсуждается острая проблема «дивергенция – конвергенция». Ряд специалистов утверждает, что глобализация ведет к конвергентному развитию, т.е. устранению различий культур и формированию общей культуры, другие же, напротив, настаивают, что в мире будут преобладать дивергентные процессы, ведущие к обострению противоречий

между культурами [2]. По мнению автора, в эпоху глобализации в сфере услуг влияние будут оказывать дивергентные процессы, и, таким образом, необходимо приспособляться к культурным условиям той или иной местности, в то время как на международном рынке физических товаров, различных технологий преобладает конвергентное развитие. Таким образом, культурные различия будут оказывать значительное влияние на формирование стратегического плана развития хозяйствующих субъектов сферы услуг.

В теории международной деятельности выделяют следующие группы ценностей: базовые, т.е. конечные ценности, ради которых индивид живет и работает, и инструментальные, посредством которых достигаются базовые [3]. Услуги рекламно-издательского характера, по мнению автора, будут относиться именно к инструментальным средствам, следовательно, их продвижение следует рассматривать именно с этой позиции.

Конкуренция среди предприятий сферы услуг, занятых рекламно-издательской деятельностью на международном рынке, будет носить многонациональный характер, т.е. для организационно-правовых структур такого рода не существует единого мирового рынка, а есть набор самостоятельных национальных рынков. Таким образом, достигнутые на одном рынке региона конкурентные преимущества ограничатся его пределами и не могут быть использованы при ведении хозяйственной деятельности в других географических областях. Для каждого рынка общая стратегия должна быть скорректирована с учетом культурной, экономической и политической сред разных национальных рынков. Основная цель многонациональной стратегии рекламно-издательского предприятия – обеспечение соответствия местным условиям страны, адаптация к специфике национального спроса, культуре и обычаям.

Таким образом, целевая ориентация предприятия сферы услуг, принявшего решение выходить на международный рынок, может осуществляться по следующим направлениям:

- поиск и освоение новых рынков;
- поиск и использование ресурсов;
- использование дополнительных возможностей для более эффективного ведения хозяйственной деятельности за рубежом.

Можно сделать вывод о том, что при формировании стратегического плана развития предприятия в эпоху глобализации необходимо использовать результаты анализа внешней среды, которая содержит в себе как значительные возможности, так и опасности, становящиеся решающими факторами в принятии стратегических и тактических решений.

Стратегическое планирование на международном предприятии

Методологическая база стратегического планирования на международном предприятии носит интернациональный характер, и особенности стратегического планирования обуславливаются расширением географии ее хозяйственной деятельности за пределы страны базирования. Система стратегического планирования должна включать в себя совокупность операций, реализация которых требует создания управленческих структур, описания правил их функционирования, наличия квалифицированного персонала и актуализированной информационной базы. В целом стратегическое планирование является процессом определения целей организационно-правовой структуры и разработки стратегий, направленных на достижение этих целей в долгосрочном периоде.

Стратегическая деятельность предприятия на международных рынках должна выработаться в составе общей стратегии, которая является результатом функционирования системы стратегического планирования.

Интернационализация хозяйственной деятельности предприятия ведет к появлению ряда целей, которые связаны с освоением новых рынков, и, таким образом, увеличивается количество объектов, создаваемых в результате выполнения совокупности решений. Вместе с тем в эпоху глобализации растет число неконтролируемых внешних факторов, которые субъекту управления необходимо учитывать при формировании стратегического плана.

Миссия международного предприятия формируется с учетом складывающегося на определенный момент окружения хозяйствующего субъекта и его внутреннего состояния. По мнению автора, миссия должна быть адаптирована к новым местам деятельности, но, в общем, отражать принятую генеральную цель предприятия в долгосрочном периоде.

Цели и задачи предприятия, ведущего хозяйственную деятельность на международном рынке, по структуре практически не отличаются от общего перечня целей и задач, но часть из них может быть, по мнению автора, неактуальной, а часть необходимо корректировать с учетом изменившихся внешних условий (в большей степени это затронет финансовые цели). К основным финансовым целевым показателям для предприятия сферы услуг, выходящего на международный рынок, будут относиться объем продаж услуг, темпы роста и прироста этих показателей, доля зарубежного рынка хозяйствующего субъекта. При этом все цели конкретизируются в ряде задач. Цели международного предприятия сферы услуг особенно важны в отношении персонала. На таких предприятиях может быть использована система внешнего и внутреннего рекрутинга. Внутренний рекрутинг основан на использовании возможностей собственного персонала. Данная система более экономична по сравнению с внешним рекрутингом, так как не требуются затраты на поиск, отбор и адаптацию сотрудников к корпоративным требованиям.

Функционирование международного предприятия сферы услуг невозможно без использования системы внешнего рекрутинга, ориентированного на местный рынок труда. Данная система позволяет снизить адаптационные проблемы в зарубежной культурной среде, использовать опыт работы на местных рынках будущих сотрудников.

По мнению автора, в международных программах в сфере услуг целесообразно использовать внутреннюю систему рекрутинга для утверждения главного исполнительного директора или генерального менеджера, ответственного за контроль всех операций заграничного отделения. Система внешнего рекрутинга может быть эффективно применена при наборе специалистов различных направлений. Обе системы рекрутинга целесообразно использовать при назначении руководителей функциональных подразделений дочернего предприятия, руководителей кризисного направления.

Международная стратегия хозяйствующего субъекта сферы услуг будет содержать в себе описание действий для реализации международных целей. При этом необходимым условием достижения высокой эффективности и результативности деятельности является наличие конкурентных преимуществ на международном рынке.

Международная стратегия хозяйствующего субъекта должна быть адаптированной к внешним условиям. Это условие особенно актуально при выходе на рынки с нестабильными законодательными и прочими условиями хозяйствования.

Ряд ученых считает, что на международном уровне наиболее эффективной и результативной станет гибридная стратегия [2] как сочетание конкурентной стратегии и стратегии сотрудничества между предприятиями и их объединениями. По мнению автора, хозяйствующим субъектам сферы услуг в эпоху глобализации целесообразно в ряде случаев разрабатывать именно гибридную стратегию, подразумевающую оптимальный баланс сотрудничества и конкуренции с другими организационно-правовыми структурами. Процесс разработки гибридной стратегии осуществляется по схеме, представленной на рис. 1.

Так, для реализации эффективной стратегии предприятие должно достичь баланса между сотрудничеством, конкуренцией и опорой на собственные силы по всей цепочке взаимоотношений с потребителями, поставщиками, контактными аудиториями. При этом возможность конфликта между контрагентами должна быть исключена.

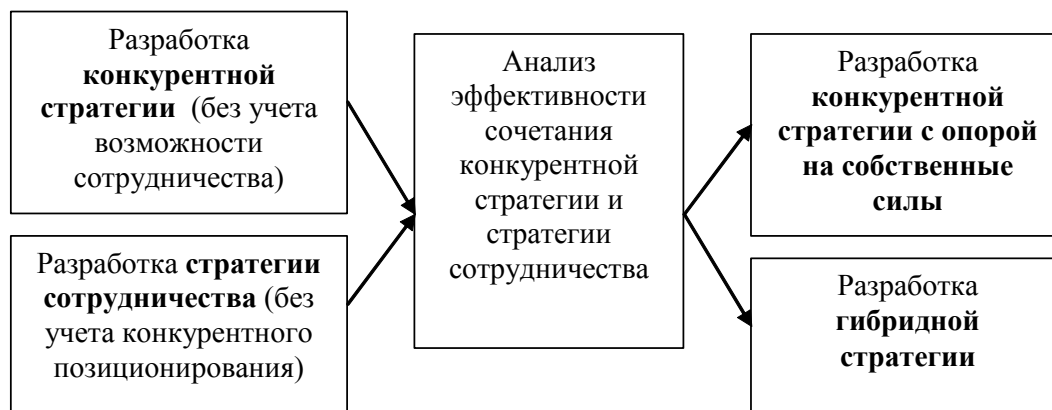


Рис. 1. Процесс разработки гибридной стратегии

Для эффективной деятельности предприятия за рубежом целесообразно разработать стратегические альтернативы. Для хозяйствующего субъекта сферы услуг выбор может производиться по таким аспектам, как направленность сбытовой политики, варьирование ассортимента товаров и услуг, замена факторов производства, приобретение других организационно-правовых структур и объединение предприятий. Стратегические альтернативы позволят предприятию эффективно функционировать даже в условиях сильной конкуренции и динамично изменяющихся внешних факторов.

Эффективность действий предприятия на рынке определяется соотношением уровня и динамики доли рынка, принадлежащего хозяйствующему субъекту, с соответствующими целевыми показателями.

При планировании стратегического плана развития хозяйствующего субъекта мегаполиса в условиях глобализации целесообразно применять одноименный глобальный научный подход, смысл которого заключается в том, что современное развитие новых информационных технологий на основе мировой электронной сети позволяет значительно упростить и ускорить международную интеграцию предприятий. Глобальный подход, по мнению автора, применяется при решении вопросов мировой стандартизации услуг, информационного обеспечения управления различными объектами, проведения финансовых операций.

В рамках глобального подхода можно выделить виртуальный подход, сущность которого состоит в применении при управлении хозяйствующими субъектами сети Интернет с целью формирования виртуальных предприятий, более эффективного использования и передачи информации, возможности обслуживать потребителей, территориально удаленных от производителя услуг. Таким образом, с помощью виртуальной интеграции можно организовать удовлетворение потребности не посредством производства соответствующего продукта и оказания услуги, а посредством технологии, с помощью которой потребитель сам сможет проектировать и планировать удовлетворение своих потребностей. При этом технология может быть создана как самим предприятием, так и другими хозяйствующими субъектами. В последнем случае виртуальное предприятие будет являться совместной собственностью и стратегическим альянсом, связывающим индивидуальные цели участников и скоординированные для этого усилия. Таким обра-

зом, происходит объединение ключевых компетенций различных предприятий для удовлетворения потребности на рынке.

В рамках международной кооперации субъектам управления продуцентами услуг целесообразно также прибегать к стандартизационному подходу, который помогает поддерживать качество услуг на должном уровне, а также дает предприятию возможность функционировать в условиях динамично развивающейся сетевой коммерции и глобального использования информационных технологий.

Заключение

Проанализированы и конкретизированы для сферы услуг существующие теоретические и концептуальные основы развития хозяйствующих субъектов в условиях глобализации. Их необходимо учитывать при разработке стратегического плана развития продуцента услуг при выходе на международный рынок.

Литература

1. International Trade Statistics, 2003 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.wto.org>, свободный.
2. Rokeach J. The Nature of Human Values. – NY: Free Press, 1973.
3. Пивоваров С.Э., Тарасевич Л.С., Майзель А.И. Международный менеджмент. – СПб: Питер, 2006. – 656 с.

Цуканова Ольга Анатольевна – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат экономических наук, доцент, zoa1999@mail.ru

УДК 351.824.5

РЕГИОНАЛЬНАЯ СТРАТЕГИЯ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ КОРРУПЦИИ В РОССИЙСКОМ БИЗНЕСЕ

Р.А. Луговской

Рассмотрено воздействие коррупции на бизнес в сфере торговли, создающее препятствия в развитии данной сферы деятельности в Российской Федерации на разных уровнях. Предложено эффективное направление формирования региональной стратегии в данной области государственного регулирования.

Ключевые слова: бизнес, противодействие коррупции, торговля, региональная стратегия.

Введение

Практически все исследователи и политики согласны с тем, что коррупция аморальна и вредит развитию любой страны. Историко-правовые исследования показывают, что возникновение разнообразных форм человеческого поведения, объединенных понятием «коррупция», связано с существованием управленческого аппарата. Взяточничество известно во всех государствах. Корни этого явления уходят в глубь веков. О взяточничестве судей говорится и в Моисеевом законодательстве, и в знаменитых Законах XII таблиц Древнего Рима. Первое упоминание о коррупции в системе госслужбы относится ко второй половине XXIV века до н.э. и нашло отражение в древнейшем из известных человечеству памятнике государственности – архиве Древнего Вавилона, где говорится о вымогательстве чиновников у храмового персонала.

Правоведы считают, что сам термин «коррупция» появился в римском праве путем сложения слов «corruptio» – несколько участников в одной из сторон обязательного отношения по поводу единственного предмета и «impere» – ломать, повреждать, нарушать, отменять. Из этих двух слов образовался самостоятельный термин «corruptio», который трактуется как участие в деятельности нескольких (не менее двух) лиц, целью которых является «порча», «повреждение» нормального хода судебного процесса или процесса управления делами общества.

Теоретические и практические аспекты возникновения коррупции и ее последствия

В современном понимании коррупция – разновидность *добровольного* оппортунистического поведения чиновника, возникающая вследствие высокого уровня асимметрии информации между гражданами и чиновниками. Последние, в свою очередь, располагают более полной информацией, а также заинтересованы в повышении асимметрии информации между ними и гражданами. При этом заинтересованность должна быть добровольной, в противном случае – это шантаж или вымогательство. Коррупция появляется и из-за противоречий общества, государства, его подвластных структур, между желанием и возможностью чиновников обогатиться и распоряжаться чужими ресурсами.

Коррупция не является однородным явлением и распространяется на различные аспекты политической, экономической и социальной жизни общества.

В существующих публикациях, посвященных данной тематике, можно встретить типологизацию коррупции по следующим основным критериям:

- субъект (инициируется взятодателем или взякополучателем);
- степень избирательности коррупционного обмена (принудительная / добровольная);
- сфера возникновения и распространения;
- степень централизации;
- степень предсказуемости.

Коррупция подразумевает координирование чиновником коррупционных трансакций, т.е. действий индивида (взякодателя) в форме отчуждения прав собственности на те или иные блага в пользу государственного служащего в обмен на перераспределительные, экономические преимущества (блага) в результате изменения существующего институционального устройства или же выбора институциональной формы поведения, их обеспечивающей. Реализация коррупционных трансакций в рамках частного рынка институтов позволяет обеспечить выгоды и преимущества взятодателю в условиях существующих правил игры, в то время как коррупционные трансакции, реализуемые на политическом рынке институтов, обеспечивают данные выгоды посредством изменения существующего институционального устройства.

В табл. 1 представлена классификация типов коррупции по уровню властной иерархии и дана их характеристика в разрезе ключевых параметров.

Низовая административная коррупция предполагает оказание чиновником услуги населению. Средняя административная коррупция, как правило, помогает преодолеть барьер, верховая административная – распределяет государственные расходы, а верховая государственная – перераспределяет преимущества.

Современная низовая коррупция чаще оказывается оторванной от вертикальных сетей. В соответствии с исследованиями Мирового банка, в 2000 г. в странах СНГ в условиях высокого уровня административной коррупции фирмы расходовали на подобные выплаты до 25% прибыли. Наиболее негативное влияние административная коррупция оказывает на малый бизнес. В среднем доля взяток в общем объеме выручки мелких фирм более чем в 2 раза превышает аналогичный показатель крупных компа-

ний. Небольшие предприятия становятся лакомым куском для чиновников (особенно на региональном уровне), о чем свидетельствуют результаты опросов в некоторых странах с переходной экономикой. В соответствии с ними объем взяток, выплачиваемый домохозяйствами, сильно коррелирует с участием в предпринимательской деятельности, в том числе в сфере торговли.

Тип	Субъект		Избирательность	Возникновение и распространение	Степень централизации	Предсказуемость
	Взятополучатель	Взятодатель				
Низовая административная	Чиновник	Население (средние и бедные слои)	Избирательный, неизбирательный	Бюрократическая коррупция (частный рынок институтов)	Менее централизованная	Случайная
Средняя административная		Малые и средние предприниматели				
Верховая административная		Предприниматели, в т.ч. часть крупных, локальные власти	Избирательный			
Верховая государственная коррупция (элитно-властная)	Элементы политической элиты (федеральные и региональные)	Крупный бизнес, локальные власти, иные заинтересованные лица		Политич. коррупция (политический рынок институтов)	Более централизованная	Наиболее предсказуемая

Таблица 1. Классификация и характеристики типов коррупции

Следует особо отметить, что административная коррупция в отношении фирм связана с повышенным уровнем неопределенности, так как при нелегальной трансакции отсутствует механизм принуждения к исполнению условий соглашения. Также практика показывает, что темпы роста фирм, участвующих в коррупции, значительно превышают темпы роста фирм, которые не участвуют в коррупционных делах.

В России, несмотря на различия отечественных и иностранных исследователей в оценке динамики административной коррупции, единогласно фиксируется ухудшение ситуации. Реальные масштабы коррупции достаточно сложно оценить. Большинство респондентов не сознают в даче взятки должностному лицу, так как это уголовное преступление. В лучшем случае можно лишь выявить наличие тенденции к сокращению или росту коррупции. Общественная палата Российской Федерации подготовила в 2007 г. доклад о масштабах коррупции в России и рекомендуемых ею мерах борьбы с этим злом. Ежегодно коррупцией съедается 6–7% ВВП, а ущерб от коррупции составляет около 250 млрд. долларов США. «Низовая» коррупция вырастает преимущественно из социального неравенства, а «верховая» – из безнаказанности. Выбор исполнителя статей бюджетных расходов находится в руках чиновников, поэтому возможностей для получения отката от заинтересованных лиц или фирм оказывается более чем достаточно.

Для российского управленческого аппарата характерны следующие проявления коррупции:

- совместительство в коммерческих структурах, подконтрольных государственному или муниципальному служащему или заинтересованных в сотрудничестве с ним;
- организация коммерческих структур должностными лицами с использованием своего положения;
- использование служебного положения при рассмотрении вопросов собственности, в том числе приватизации предприятий и земли с целью получения их в собственность себе, родным, знакомым или заинтересованным лицам;
- нецелевое использование государственных средств с целью получения выгоды (преимущества получения кредитов, субсидий, льгот, ссуд, ценных бумаг и т.п.);

- использование в личных или групповых целях предоставленных для служебной деятельности помещений, транспорта и т.д.;
- получение завуалированных премий, надбавок, комиссионных, явно завышенных гонораров и пр. за деятельность, не связанную со служебной (покровительство кого-либо);
- получение денежных средств, существенных подарков или услуг за содействие в чем-либо (содействие в организации проверок конкурентов, получение госзаказа и т.п.).

Криминологическая информация свидетельствует о распространенном «бюрократическом рэкете» при оформлении и выдачи различной разрешительной документации.

Коррупцию в ряде случаев можно рассматривать как особую нелегальную форму лоббирования, в основе которой лежит механизм взаимодействия групповых и общественных интересов. Формы, методы и средства лоббирования весьма разнообразны. Особенностью российской практики является связь лоббизма с теневой экономикой, тогда лоббирование принимает криминальный характер, наносящий обществу большой вред. С позиции государственного управления принципиальное отличие цивилизованного лоббизма от коррупции заключается в первую очередь в наличии при лоббировании четкой, определенной законом или другим нормативно-правовым актом процедуры, обеспечивающей свободное участие в ней заинтересованных сторон, и принятие решений по результатам конкурса. Коррупция может интерпретироваться как приватизация административного ресурса, приносящего его обладателю определенную ренту.

Отсутствие эффективных мер по снижению уровня коррупции приводит, в конечном итоге, к неблагоприятным экономическим и социальным результатам:

- обнищанию народа;
- сдерживанию развития малого и среднего бизнеса;
- трудностям в реализации поставленных перед страной и регионами целей и задач;
- снижению притока интеллектуальной и талантливой молодежи в вузы;
- ухудшению инвестиционного климата, вынуждая оставшиеся предприятия гнаться за скорой прибылью (в основном за счет торговли);
- удорожанию содержания чиновничьего аппарата;
- разложению управленческого аппарата во всех сферах, снижая стимулы для честной работы;
- росту народного недовольства;
- снижению эффективности регулирования экономическими процессами;
- перераспределению власти, смещению целей управления в пользу узкой группы лиц и росту организованной преступности;
- угрозе демократии в результате ослабления у населения нравственных стимулов к участию в выборах.

За счет низовой и средней административной коррупции перераспределяются личные доходы, снижается качество государственных услуг, растет социальное недовольство, прибыль фирм перераспределяется, сокращаются инвестиции в развитие, растет общая неопределенность. Все это формирует спрос на развитие верхней коррупции. Верхняя административная коррупция позволяет перераспределить бюджет за «вознаграждение» чиновникам, увеличивает долю высокочатратных проектов, приводит к снижению доли бюджета, направляемой на образование и здравоохранение. Коррупция на самом верхнем государственном уровне смещает цели управления в пользу узкого круга лиц («перedel собственности»), увеличивает количество административных барьеров и ухудшает возможности граждан и бизнесменов по защите своих прав. Новым заинтересованным группам предоставляется преференциальный режим. Такие фирмы характеризуются быстрым развитием, однако в долгосрочной перспективе ин-

вестиции в них снижаются. Например, в ряде регионов России наблюдалась положительная связь между концентрацией предпочтений, ростом ВРП и совокупными региональными инвестициями, в долгосрочной же перспективе проявлялась негативная связь между концентрацией предпочтений и производительностью труда, что может привести к снижению уровня социальных расходов.

Рассматривая различные модели перехода от авторитаризма к демократии, особенно в восточноевропейском и советском вариантах, можно констатировать, что рост коррупции обуславливается, прежде всего, следующими факторами:

- неустойчивостью политической системы, частыми конфликтами и хаосом, отсутствием контроля, т.е. неопределенностью процедур и результатов, политической нестабильностью;
- слабостью гражданского общества, которая проявляется в деформировании социальной структуры (неравенстве), бедности, отсутствии мощного среднего класса, отсутствии идеологической основы преобразований;
- низким уровнем правовой культуры, в том числе законодательства, правоохранительных органов и судебной системы;
- низкой заработной платой чиновников, относительно слабой ответственностью за коррупционность и широкими коррупционными возможностями;
- неэффективностью институтов власти, выраженной в сильной децентрализации принятия решений (советская коррупция характеризовалась высокой степенью централизации);
- экономическим упадком и ростом теневой экономики;
- развитостью организованной преступности;
- появлением новых видов бизнеса, формирующих спрос на специальные услуги власти и способствующих тем самым возникновению предложения.

Природа коррупции также разнообразна. В регионах с более высоким уровнем образования и среднедушевыми доходами она более завуалирована, так как может встретить достаточно серьезное сопротивление различных социальных слоев. При любом уровне коррупции взятка представляет собой вычет из сбережений граждан – источника накоплений данной страны (кроме сферы недвижимости) в пользу личного потребления. Когда бизнесмены участвуют в коррупции, то взятка чиновнику представляет собой вычет из инвестируемых финансовых ресурсов. Поэтому в административной коррупции наиболее существенное влияние на экономический рост оказывает коррупция, охватывающая деятельность среднего и крупного бизнеса, а также сферу государственных инвестиций. Выбор более затратных государственных проектов порождает недоинвестирование в других областях, дисбалансирует сферу торговли и затормаживает социально-экономическое развитие региона.

Большее влияние на преодоление коррупции в целом ряде государств оказывают международные правовые акты. Как показывает опыт азиатских стран, эффективность антикоррупционных мер определяется минимум двумя факторами: адекватностью мер по борьбе с коррупцией и стимулами политической элиты. Антикоррупционные меры должны не только пресекать коррупцию, но бороться с источниками ее возникновения. Значительным шагом в этом направлении стала Конвенция Организаций Объединенных Наций против коррупции (31.10.2003) и Конвенция Совета Европы об уголовной ответственности за коррупцию (27.01.1999).

Меры по противодействию коррупции в российском бизнесе

Решение проблем противодействия коррупции стало особо актуальным в последнее время. 19 мая 2008 г. Указом Президента РФ образован Совет при Президенте РФ

по противодействию коррупции, который предлагает, координирует и контролирует деятельность по противодействию коррупции в России. В 2008 г. Президентом РФ был подготовлен и внесен законопроект «О противодействии коррупции». В проекте заложены правовые основы для формирования координирующего органа по противодействию коррупции. Однако в документе не определены ни структура этого органа, ни порядок его формирования, ни круг полномочий. Решение этих вопросов передано на усмотрение Президента Российской Федерации. Таким образом, данный законопроект дает лишь возможность дальше развивать систему борьбы с коррупцией. В целях придания системности законодательному регулированию противодействия коррупции проект необходимо принимать в пакете с проектами федеральных законов «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», которые бы учли и международные нормативно-правовые акты.

Система мер по противодействию коррупции, предусмотренная проектом, строится на использовании, прежде всего, мер упреждения, направленных, в частности, на создание в государственной и муниципальной службах атмосферы «невыгодности» коррупционного поведения. В частности:

- госслужащие должны предоставлять данные о доходах и имуществе в соответствующие органы (уже применяется), при этом предусмотрен усиленный контроль за проверкой этих данных и соответствующая ответственность;
- в течение двух лет после увольнения со службы чиновники имеют право замещать должности в коммерческих и некоммерческих организациях, если отдельные функции государственного управления данными организациями входили в их должностные обязанности, только с согласия специальных органов.

В целях создания механизма ответственности юридических лиц, в том числе и иностранных, за коррупционные правонарушения в проекте устанавливается общая норма, согласно которой в случае, когда от имени или в интересах юридического лица передается взятка или осуществляется коммерческий подкуп, к юридическому лицу в порядке, предусмотренном административным и гражданским законодательством Российской Федерации, могут быть приняты такие меры ответственности, как, в частности, предупреждение и административный штраф.

Эффективную борьбу с коррупцией, по мнению автора, необходимо осуществлять по следующим направлениям.

Формирование четкого курса политической системы. Для этого следует:

- утвердить в соответствующих законах концепции развития страны, регионов и программы социально-экономического развития, обеспечивающие их реализацию;
- ускорить принятие закона «О противодействии коррупции» и обязать Государственную Думу РФ осуществлять не выборочную, а сплошную проверку законов на коррупционность;
- укреплять полномочия представительных органов власти на уровне страны и регионов, в противном случае возрастает вероятность коррупционных отношений со стороны исполнительных органов власти. Региональные законодатели должны иметь больше прав в принятии программ, их изменений и корректировке.

Создание и развитие институтов гражданского общества. Гражданское общество обладает большим потенциалом в решении проблем противостояния коррупции на низовом уровне. Соответствующие институты и органы местного самоуправления должны способствовать усилению воздействия на чиновников, обеспечению прозрачности их работы и исполнения законов. Значимость этого направления обуславливается также сложностью контроля над деятельностью подчиненных регионального эшелона ввиду незнания местной специфики государственными чиновниками высших этажей власти.

Разработка системы мер по предупреждению проникновения коррупции. Борьба с коррупцией не должна сводиться только к выявлению и наказанию участвовавших в «сговоре». Целесообразно сделать общедоступной информацию о деятельности государственных и подведомственных учреждений, финансовых потоках, а также о фирмах, которые участвуют в тендерах на госзаказы или получают иную субсидию. Такая информация должна быть в газетах, на сайтах институтов и организаций. В комиссии по проведению конкурсов и тендеров следует включать представителей общественных организаций и независимых экспертов.

Необходимы наличие серьезной ответственности и фамильная огласка за участие в коррупционном сговоре. Следует провести четкую грань между коррупционным дисциплинарным проступком, коррупционным административным правонарушением, коррупционным уголовным преступлением по признаку тяжести наступления последствий как для гражданина, так и для порядка управления в государстве. В настоящее время предусмотрена уголовная ответственность (в том числе ст. 201, 204, 285, 291 УК РФ), административная же ответственность до сих пор отсутствует. Дисциплинарные взыскания, согласно ст. 419 ТК РФ, как правило, не применяются. Также отсутствует возмещение вреда гражданам и юридическим лицам, понесшим убытки (вред) в результате коррупционных действий.

Совершенствование механизма выбора судей. Процесс выбора судей следует сделать общенародным, совместив его с президентскими, думскими выборами и выборами в органы законодательной и муниципальной власти. Такие меры помогут бизнесменам быть более уверенными в честности судебной системы при рассматривании своих дел.

Формирование идеологических и нравственных основ борьбы с коррупцией. Улучшение качества образования, начиная со школьного, приведет к созданию необходимых моральных устоев общества, а обоснованная дифференциация доходов обеспечит лояльное отношение к ней граждан.

Создание серьезной ответственности за участие в коррупционном сговоре также будет являться барьером на пути разрастания коррупции. Каждый должен знать, как и с помощью чего (кого) он сможет защитить себя и свой бизнес.

Ужесточение требований к подбору исполнителей. Ответственные за реализацию закона «О противодействии коррупции» должны быть честными, неподкупными, открытыми для общества. Для этого исполнители должны хорошо оплачиваться, периодически менять города и более эффективно бороться с организованной преступностью, а их ответственность за противоправные действия (бездействия) должна быть ужесточена.

Реальная поддержка малого и среднего бизнеса. Развитие предпринимательства, в том числе в сфере торговли, является важнейшей составляющей укрепления экономики регионов и страны. Одновременно мощный средний класс является существенным препятствием для развития коррупции.

Заключение

В данной статье предложен общий перечень отсутствующих на сегодняшний день антикоррупционных мер, который состоит из семи направлений:

- формирование четкого курса политической системы;
- создание и развитие институтов гражданского общества;
- разработка системы мер по предупреждению проникновения коррупции;
- совершенствование механизма выбора судей;
- формирование идеологических и нравственных основ борьбы с коррупцией;
- ужесточение требований к подбору исполнителей;

- реальная поддержка малого и среднего бизнеса.

Комплекс предложенных мер подразумевает следующее: развитие соответствующей законодательной базы, отсутствующей в настоящее время; ответственность чиновников, препятствующих развитию бизнеса, в частности, в торговле; рекомендации по развитию (в том числе через образовательную систему) самосознания общества и коммерсантов, которые боятся обращаться за помощью в различные инстанции; антикоррупционные направления в других сферах.

Взаимоувязанная и поэтапная реализация в регионах комплекса мер, предусмотренных в рамках перечисленных направлений, осуществляемая органами власти при всесторонней поддержке населения, позволит, по мнению автора, существенно снизить объемы коррупции в обществе и обеспечить эффективную работу экономической системы российского государства, в том числе в сфере торговли и услуг.

Литература

1. Григорьев Л.М., Овчинников М.А. Коррупция и развитие. – М.: ТЕИС, 2008.
2. Кимлацкий О., Мачульская И. Реальная угроза национальной безопасности. О коррупции в Российской Федерации. Всероссийские парламентские слушания «Закон против коррупции». // Парламентское обозрение. Совет Федерации: компетентно о главном. – М.: Пресс-служба Совета Федерации. – Выпуск № 17 (73), октябрь 2008. – С. 18–30.
3. Пылин В.В. Проблемы противодействия коррупции среди лиц, замещающих государственные и муниципальные должности // Управленческое консультирование. Актуальные проблемы государственного и муниципального управления. Научно-практический журнал Северо-Западной академии государственной службы. – 2008. – № 1. – С. 33–47.
4. Романов В.Л. Коррупция как предельная аномалия государственной службы и государственно-общественных отношений // Управленческое консультирование. Актуальные проблемы государственного и муниципального управления. Научно-практический журнал Северо-Западной академии государственной службы. – 2008. – № 1. – С. 20–32.
5. Шиян Н.И., Ланцевич Ю.М., Левченко Н.П., Петровский Д.Н. // Юридический вестник. Противодействие коррупции: актуальные вопросы экспертизы нормативных правовых актов и их проектов – Федеральное Собрание Российской Федерации. – 2008. – № 1–2.

Луговской Роман Андреевич

– Санкт-Петербургский торгово-экономический институт, аспирант, rluговskoy@yandex.ru

УДК 007.51; 371.261; 004.588

ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ЭЛЕКТРОННОГО УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА В СИСТЕМЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ УНИВЕРСИТЕТА**В.Н. Васильев, А.А. Павлова, М.С. Чежин**

Настоящая статья описывает этапы жизненного цикла электронного учебно-методического комплекса (УМК) в системе дистанционного обучения, а также рассматривает предлагаемый инструментарий системы и возможности работы пользователей с УМК и его элементами на каждом этапе.

Ключевые слова: жизненный цикл, этапы проектирования, система дистанционного обучения, УМК.

Введение

С 2005/2006 учебного года в учебном процессе Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики используется система дистанционного обучения (ДО) AcademicNT (<http://de.ifmo.ru>). Учебно-методические материалы, используемые в системе ДО, должны быть представлены в виде электронного учебно-методического комплекса (УМК). Каждый УМК включает рабочую программу дисциплины и электронные курсы, содержащие оглавление курса, список элементов курса, правила формирования рейтинга, правила фиксации состояний, правила организации работы с курсом. Элементы электронного курса представляют собой аттестующие, обучающие и информационные сценарии [1]. Форматы всех элементов электронного УМК должны быть разработаны с использованием современных подходов и обеспечивать возможность использования новых педагогических инструментов, которые становятся доступными благодаря компьютерным технологиям [2]. Возможности системы ДО позволяют организовать учебный процесс на основе модульных принципов обучения и способствуют внедрению новых, прогрессивных принципов организации учебного процесса. При этом перед авторами электронного УМК ставится задача максимально эффективно и полно использовать возможности системы ДО. В данной статье предлагается алгоритм решения поставленной задачи и набор необходимых инструментов.

Модель жизненного цикла электронного УМК

Как и любой проект, электронный УМК имеет свой жизненный цикл, под которым понимается ряд событий, происходящих с УМК в период времени от начала его создания до окончания его востребованности. При разработке УМК для системы AcademicNT принят итеративный подход (разновидность спирального цикла создания сложных систем), при котором выполнение работ производится параллельно с непрерывным анализом полученных результатов и корректировкой предыдущих этапов работы [3]. Проект при таком подходе, как показано на рисунке, в каждой фазе развития проходит повторяющийся цикл: планирование – реализация – тестирование – использование. К фазам развития УМК относятся, например, начальная версия, модернизация, модификация.

Принципы, на которых построена система AcademicNT, позволяют при необходимости проводить расширение учебных материалов или, в связи с изменениями задач проектирования, модифицировать уже размещенные в ней учебные материалы курса.

Модульная структура электронного УМК решает задачи по покрытию всевозможных потребностей группы разработчиков. Наличие механизмов получения статистической информации по использованию элементов УМК и развитая система обратной связи с пользователями позволяют разработчикам контролировать качество материалов и своевременно вносить в них изменения.

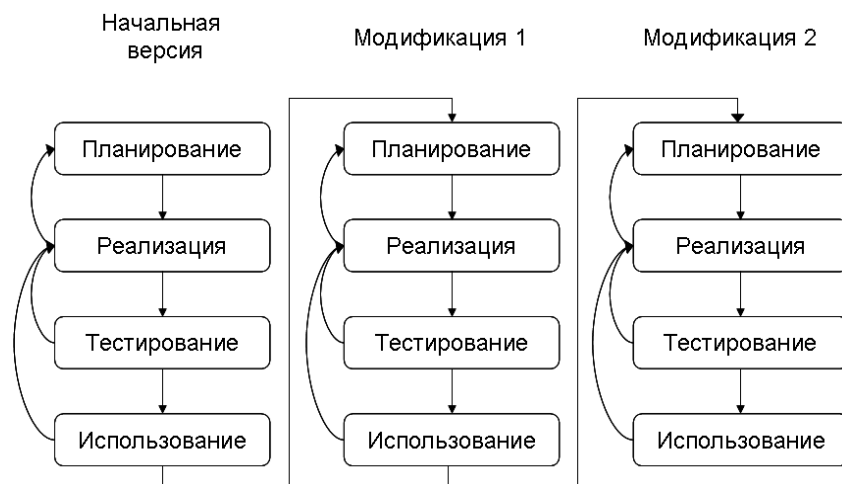


Рис. Этапы жизненного цикла электронного УМК

Для создания и поддержки работы электронного УМК рекомендуется сформировать группу разработчиков, в которой можно выделить:

- преподавателя-предметника, обеспечивающего предоставление учебных материалов в рамках курса;
- методиста, консультирующего преподавателя-предметника по достижению учащимися необходимых компетентностей в ходе обучения, выбору методик изложения учебного материала и т.д.;
- программиста, выполняющего оформление учебно-методического материала в формате AcademicNT, реализующего разработку отдельных компонентов курса в программном коде;
- специалиста по аудио- и видеонаполнению, занимающегося записью или оцифровкой проектируемых учебно-методических материалов;
- художника-аниматора, обеспечивающего создание анимированных демонстраций и высокое качество графического наполнения учебного курса;
- педагогического дизайнера, позволяющего выбрать наиболее эффективные пути решения задач проектирования;
- руководителя проекта, координирующего всех участников группы разработчиков, следящего за выполнением в срок всех этапов проектирования и устраняющего возникающие проблемы.

Представленный состав группы разработчиков может меняться в зависимости от этапа разработки.

Этап планирования электронного УМК

От того, как будет спроектирован учебный курс, какие принципы будут в нем заложены, каково будет качество учебно-методических материалов, зависит качественный уровень образовательного процесса. Планирование учебного курса необходимо начать с изучения учебно-программной документации.

Прежде всего, на основе анализа учебного плана устанавливают место дисциплины в системе подготовки бакалавров, специалистов, магистров, ее объем, сроки изучения, смежные учебные дисциплины, на которые можно либо опираться, либо рассчитывать на то, что в процессе их изучения будут закрепляться знания и умения, полученные при работе с проектируемыми учебными материалами. Кроме этого, учебный план дает общее представление об организации изучения дисциплины, поскольку в нем указываются формы организации учебного процесса, а также количество часов, отводимых на лабораторные, практические занятия, курсовое проектирование и другие виды самостоятельной работы, формы завершения учебного курса (зачет, экзамен, курсовой проект), обязательные рубежные проверки (контрольные работы, зачеты, экзамены). Поскольку при формировании содержания обучения в качестве ограничения выступает такой весьма значимый фактор, как время работы в аудитории, лаборатории или компьютерном классе, процесс отбора учебной информации и состава практических занятий, лабораторных и курсовых работ весьма важен. Однако дистанционное обучение, основанное на сетевых Интернет-технологиях, позволяет устранить этот временной недостаток. Система AcademicNT способна четко организовать самостоятельную работу студента с учебным курсом в удобное для него время и с приемлемым темпом. Познакомиться с учебным планом можно в системе AcademicNT, используя инструмент «Электронный журнал» или соответствующий отчет из группы «Справочник».

На этапе планирования разработчики электронного УМК должны проанализировать требования государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования, а также требования, определяемые организацией учебного процесса в университете. Например, на младших курсах СПбГУ ИТМО внедрена балльно-рейтинговая система оценивания индивидуальных результатов обучения студентов, используемая при реализации технологии модульного обучения. Подобная система предъявляет особые требования к организации аттестующих элементов УМК.

Рабочая программа дисциплины является обязательным компонентом основной образовательной программы вуза и определяет цели и задачи, содержание, технологии обучения и оценивания, а также учебно-методическое и информационное обеспечение учебного процесса по дисциплине. Авторами учебного курса выявляются компетенции, которые необходимо будет приобрести обучаемому для достижения образовательных целей. Студент приобретает заложенные в курсе компетенции в ходе работы с проектируемым курсом. Компетентностный подход реализуется как в освоении отдельно взятого учебного курса, так и в приобретении паспорта бакалавра, специалиста или магистра. Для достижения выбранных компетенций могут выбираться различные механизмы развертывания материала.

На основании обозначенных требований выполняется отбор и формирование учебного материала для УМК. Содержание материалов должно охватывать все темы и разделы дисциплины. Модульный принцип построения электронного курса предоставляет широкие возможности разработчикам и делает систему ДО более гибкой в использовании, так как отдельные виды учебной работы могут обеспечиваться блоками из нескольких модулей, что даст наиболее полное соответствие авторскому замыслу. Количество элементов электронных учебных курсов и их объем должны соответствовать видам учебной работы и их трудоемкости, предусмотренным рабочей программой дисциплины, и должны быть разработаны на основе государственных образовательных стандартов.

У разработчиков существует возможность организации в системе ДО [4]:

- электронных энциклопедий и глоссариев;
- виртуальных лабораторий и тренажеров;

- адаптивных обучающих диалогов;
- электронных практикумов, реализующих формирование вариантов курсовых проектов, тем рефератов и докладов на семинарах;
- контрольно-измерительных мероприятий;
- широкого набора информационно-справочных ресурсов.

Далее можно переходить к созданию прототипа учебного курса и составлению сценария работы с ним. На этой стадии необходимо заложить общую идею курса и придерживаться ее на протяжении всех дальнейших этапов проектирования. При этом группа разработчиков параллельно решает вопросы, связанные с учебно-методической и программно-технической осуществимостью прототипа учебного курса.

Этап реализации

На этапе реализации осуществляется преобразование спроектированных прототипов с учетом сценариев работы в электронные учебно-методические материалы, подготовленные в соответствии с требуемыми целями и задачами обучения. Все элементы электронного УМК должны быть выполнены в полном соответствии с форматами представления элементов системы AcademicNT, описанных в «Техническом руководстве по разработке учебно-методического комплекса для системы дистанционного обучения», актуальная версия которого публикуется на сайте системы дистанционного обучения СПбГУ ИТМО в разделе «Информация авторам». Для контроля за соответствием разработанных элементов требуемым форматам в этом же разделе размещена ссылка на валидатор, осуществляющий проверку XML-документов на соответствие схеме. Способствовать успешному выполнению проекта должны приведенные там же примеры оформления элементов УМК и шаблоны для импорта простых форм тестовых заданий, выполненные в виде электронных таблиц.

Первоначальное размещение элементов электронного УМК в базе данных системы ДО осуществляется методистами центра ДО с помощью специального программного обеспечения. Дальнейшая отладка, изменение и модернизация учебно-методического материала выполняется посредством веб-интерфейса системы.

Этап тестирования элементов УМК

На этапе первоначального тестирования проверка элементов электронного УМК осуществляется разработчиками. Особое внимание при тестировании требуется уделить контролю работы аттестующих элементов курса. Для тестирования разработанного УМК могут быть привлечены студенты, которые проверят учебно-методические материалы в процессе апробации.

Необходимым элементом данного этапа разработки является проведение экспертизы УМК. Согласно положению о рецензировании и экспертизе элементов компьютерного обучения системы ДО университета, которое направлено на обеспечение качества учебно-методических материалов, УМК может использоваться в учебном процессе СПбГУ ИТМО только после положительного заключения экспертизы. В СПбГУ ИТМО процедура рецензирования и независимой экспертизы учебно-методических материалов реализуется в 3 этапа.

1. Кафедральное рецензирование учебно-методических материалов, осуществляемое методической комиссией кафедры, на которой преподается данная дисциплина. При рецензировании материалов устанавливается, прежде всего, актуальность их содержания и соответствие определенным требованиям. По результатам рецензирования на заседании кафедры принимается решение о рекомендации размещения разрабо-

танных учебно-методических материалов в информационно-образовательной среде вуза.

2. Рецензирование независимым экспертом, которое осуществляется преподавателем родственной кафедры, как правило, из другого вуза. При рецензировании устанавливается соответствие учебно-методических материалов государственным образовательным стандартам.
3. Экспертиза комиссией, отвечающей за развитие информационных технологий и принимающей решение о размещении разработанных учебно-методических материалов в информационно-образовательной среде вуза и пробной их эксплуатации в течение учебного семестра. По истечении указанного срока и после внесения необходимых изменений и учета положительных отзывов со стороны преподавателей и студентов настоящие учебно-методические материалы включаются в состав информационных ресурсов системы.

Этап использования УМК в учебном процессе

Этап использования разработанных учебно-методических материалов в учебном процессе сопровождается накоплением статистических данных по работе с учебным курсом. При этом происходит оценка результатов учебной деятельности, осуществляется мониторинг образовательных показателей при взаимодействии участников учебной деятельности, анализируются их отзывы и замечания, и в результате полученные данные используются для корректировки учебных материалов.

Мониторинг использования элементов УМК в системе AcademicNT осуществляется с помощью системы отчетов, среди которых в данном случае можно отметить отчеты группы «Статистика»: «Коэффициенты сложности тестовых заданий электронного курса», «Коэффициенты сложности заданий практикумов электронного курса», «Коэффициенты сложности заданий виртуальных лабораторий электронного курса».

Организация обратной связи со студентами, использующими УМК, осуществляется как встроенными средствами электронного общения (внутрисистемная электронная почта и тематические форумы), так и специальной системой отзывов на материалы УМК. Важно повторить, что выполнение отдельных этапов проектирования группой разработчиков циклично и приводит к постоянной коррекции учебного курса на каждом этапе. Устранение замечаний, исправление ошибок, внесение изменений и дополнений в УМК осуществляется в режиме on-line, может не требовать создания новой версии, и в этом случае нет необходимости вывода УМК из учебного процесса. Это относится к ситуациям, вызванным:

- дополнением УМК новыми обучающими модулями;
- устранением ошибок в управлении траекторией обучения и формировании рейтинга студента;
- устранением ошибок, выявленных на основе статистической обработки результатов аттестаций;
- устранением ошибок, выявленных по замечаниям студентов.

Постоянная корректировка и программирование спроектированного курса позволяет более тонко настроить его под образовательные задачи, заложенные на первом этапе проектирования. Однако в ряде случаев необходимо создание модифицированных версий УМК. Это должно происходить в случаях:

- изменений в программе дисциплины;
- изменений в системе оценивания;
- изменений в видах учебной работы;
- появление новых контрольно-измерительных модулей.

Заключение

Электронные учебно-методические материалы должны разрабатываться с учетом как можно большего перечня условий их дальнейшего использования в педагогической практике, где определяющую роль играют организационные формы и методы учебной работы, мотивация студентов, квалификация преподавателей, материально-техническая база и многое другое. От того, как будет спроектирован учебный курс, какие принципы деятельностного подхода будут в нем заложены, каково будет качество учебно-методических материалов, зависит качественный уровень образовательного процесса.

Литература

1. Васильев В.Н., Лямин А.В., Чежин М.С. Система дистанционного обучения второго поколения // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2007. – Выпуск 45. Информационные технологии. – С. 148–157.
2. Осин А.В. Мультимедиа в образовании: контекст информатизации. – М.: Агенство «Издательский сервис», 2004. – 320 с.
3. Ройс У. Управление проектами по созданию программного обеспечения. Унифицированный подход. – М.: Лори, 2002. – 434 с.
4. Лямин А.В., Чежин М.С. Модульное построение электронных учебно-методических комплексов для системы дистанционного обучения // Труды XII Всероссийской научно-методической конференции «Телематика'2005». – Т. 2. – СПб, 2005. – С. 511–512.

Васильев Владимир Николаевич

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, ректор, vasiliev@mail.ifmo.ru

Павлова Анастасия Алексеевна

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, программист, nastya@cde.ifmo.ru

Чежин Михаил Сергеевич

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, зам. директора ЦДО, msch@cde.ifmo.ru

УДК 004.588

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ЭТАЛОННЫХ НАБОРОВ ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЙ С НЕРАЗРЕШИМЫМ МНОЖЕСТВОМ ПРАВИЛЬНЫХ ОТВЕТОВ

О.Е. Вашенков, А.В. Лямин

В работе представлена структура системы AcademicNT, роль и функции виртуальных лабораторий и методы разработки эталонных наборов для качественной оценки результатов виртуального эксперимента. Исследование проводилось для виртуальной лаборатории по информатике. Такой подход может быть использован для любых виртуальных лабораторий.

Ключевые слова: виртуальная лаборатория, информационно-образовательная среда, электронное обучение.

Введение

В рамках информационно-образовательной среды виртуальные лаборатории необходимы для формирования и проверки креативных навыков. В отличие от электронных тестов, задания виртуальных лабораторий имеют неразрешимое множество пра-

вильных ответов. Для таких заданий нельзя описать правильный ответ конечным множеством или формальным выражением, например, в виде регулярных выражений. Электронные задания, выполненные по технологии виртуальных лабораторий, используются в различных дисциплинах, позволяя проводить эксперименты и контролировать методику их выполнения [1, 2]. Ярким примером использования данной технологии стал многостилевой редактор кода, который предназначен для проверки навыков реализации алгоритмов с возможностью кодирования на наиболее распространенных языках программирования [2–4].

Следует отличать виртуальные лаборатории от тренажеров и интерактивных демонстраций. Виртуальная лаборатория позволяет организовать автоматическую проверку. Тренажеры и демонстрации не предназначены для проверки заданий средствами информационно-образовательной среды.

Взаимодействие модулей системы AcademicNT

Компоненты виртуальной лаборатории активно взаимодействуют с модулями информационно-образовательной среды AcademicNT. При запросе задания клиенту передается интерактивный элемент лаборатории – апплет. После взаимодействия с апплетом пользователь отправляет ответ на сервер с помощью управляющих элементов HTML-страницы. При этом используется язык сценариев JavaScript для получения данных из апплета и заполнения HTML-формы. Взаимодействие между клиентом и сервером организовано по протоколу HTTP, что накладывает ограничение на символы, используемые в ответе пользователя. Поэтому задача апплета – корректное экранирование ответа пользователя перед отправкой. Сервер перенаправляет HTTP-запрос веб-приложению, выполненному по технологии Java Servlet. Сервлет организует вызов хранимой процедуры на стороне системы управления базами данных (СУБД) и передает ей ответ пользователя. Процедура вызывает команду на стороне сервлета для отправки XML-сообщения на проверяющий сервер. Сообщение содержит ответ пользователя и эталонные данные. Вместе с командой на проверку сервлету передается ряд дополнительных переменных и список процедур, которые требуется вызвать после проверки. Проверяющий сервер осуществляет проверку для каждой пары эталонных наборов и возвращает результат сервлету в форме XML-сообщения. Взаимодействие между сервлетом и проверяющим сервером происходит по протоколу RLCP (Remote Laboratory Control Protocol – протокол управления удаленной лабораторией) [4]. После получения ответа сервлет разбирает XML-ответ и последовательно вызывает хранимые процедуры для занесения результатов проверки. Связи между модулями представлены на рис. 1.

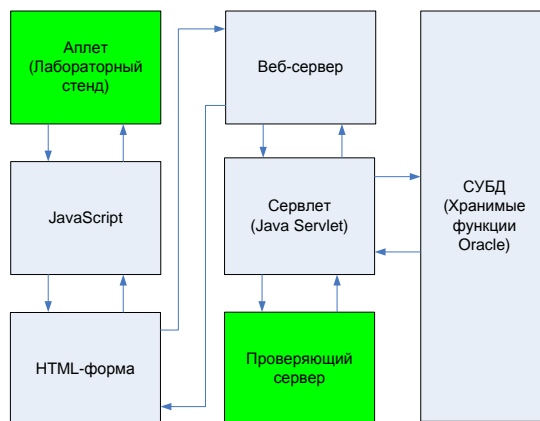


Рис. 1. Схема взаимодействия модулей информационно-образовательной среды

Технология виртуальных лабораторий

В общем случае ответ на задание виртуальной лаборатории содержит описание некоторой системы с определенным набором входов и выходов. Эта система конструируется в соответствии с заданием на специализированном виртуальном стенде из объектов и отношений предметной области. Знание о правильном ответе может быть представлено в виде пар эталонных наборов входных и выходных данных. Для оценки правильности ответа необходимо получить реакцию описанной системы на заданном наборе входных данных и сравнить ее с соответствующим эталонным набором выходных данных. Совпадение реакции системы с эталонным набором выходных данных будет свидетельствовать о правильности ответа. Для получения реакции системы, описанной в ответе, на заданном наборе входных данных используется специализированная виртуальная машина. Организация взаимодействия виртуального стенда и виртуальной машины, входящих в состав лаборатории, формирование заданий, эталонных наборов входных и выходных данных, протоколирование выполненных действий и полученных результатов – функции информационно-образовательной среды.

Для удобства разработки проверяющих серверов лабораторий был создан каркас, в котором организовано взаимодействие с системой AcademicNT, обработка RLCP-запросов и формирование RLCP-ответов. Основными требованиями для авторов виртуальных лабораторий является разработка лабораторного стенда (апплета), алгоритмов проверки ответа и XML-описаний сценария, заданий и установки в формате AcademicRM. От лабораторного стенда требуется только поддержка метода для получения ответа испытуемого в текстовом виде.

Использование каркаса для разработки проверяющего сервера позволяет абстрагироваться от низкоуровневой сетевой передачи и протокола RLCP, фокусируя внимание только на алгоритмах проверки.

С помощью эталонных наборов автор описывает соответствие между заданными входными и выходными данными. Задача проверяющего сервера – установить эталонные входные данные перед выполнением работы, а после выполнения сверить эталон с данными, полученными в ходе автоматического эксперимента. Эталонные наборы должны быть описаны для каждого задания отдельной виртуальной лабораторной работы. Автор может разработать один и более наборов. Итоговая оценка за задание устанавливается системой как процент успешно пройденных наборов.

Эталонные наборы представляются в XML-описании как текстовые данные. Например, если требуется перечислить последовательность целых чисел, набор может выглядеть следующим образом: 0 1 12 15 3 4 5 8. Программный модуль проверяющего сервера получает эту строку, а ее интерпретация – задача автора лаборатории. Например, в виртуальной лаборатории «Многостилевой редактор кода» допустимыми являются следующие эталонные наборы:

- целочисленный массив: $a=[0, 1, 2, 3, 4, 5]$;
- строковая переменная: $b="answer"$;
- вещественная переменная с допустимой ошибкой – 10%: $c\{10\% \}="1.2E+3"$.

Задача проверяющего сервера – корректно разобрать входные данные и произвести сравнение эталонных выходных данных со значениями, полученными в результате выполнения программы испытуемого.

Разработка эталонных наборов

Виртуальная лаборатория по информатике была разработана для проведения единого государственного экзамена по информатике в компьютерной форме. Цель работы

– проверка навыка испытуемых в разработке алгоритмов решения стандартных задач. Далее будут рассмотрены особенности данной виртуальной лаборатории и методика формирования эталонных данных. Сложности в составлении эталонных наборов заключаются в выборе необходимых и достаточных данных для полноценной проверки работы. Например, при наличии одного эталонного набора оценка работы сводится к двоичному «правильно»/«неправильно», для более детальной дифференциации оценки требуется провести анализ влияния входных данных на выполнение программы, разработанной испытуемым.

В качестве примера рассмотрим типовые задачи по информатике – поиск минимума и сортировка массива. Первая задача звучит следующим образом: найти индекс последнего минимального элемента в целочисленном массиве из десяти элементов. На рис. 2 представлен интерфейс виртуальной лаборатории по информатике с решением задачи и использованием стиля кодирования, аналогичного языку С.

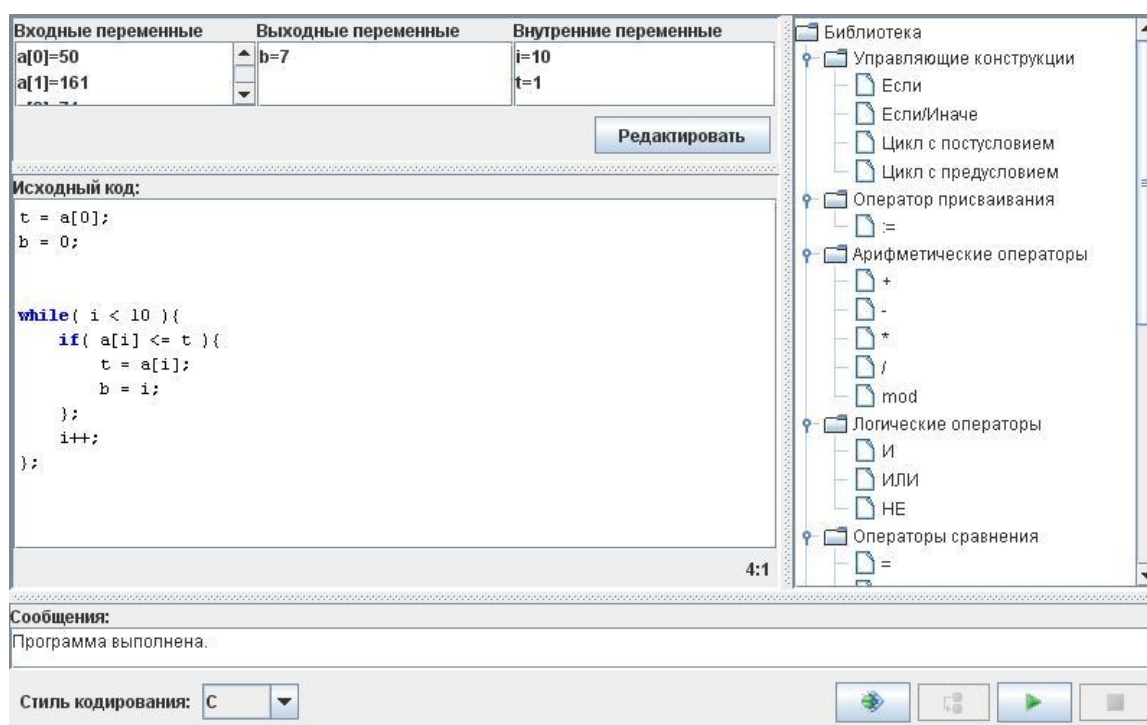


Рис. 2. Решение задачи о поиске минимума в массиве

В приведенных ниже примерах переменная a принадлежит набору входных данных, а b – эталонным выходным данным. В самом простом случае проверка может быть организована на основе одного набора:

$a=[10, 10, 10, 10, 10, 1, 10, 10, 10, 10]$ $b=5$

В таком случае не учитывается вариант, когда программа некорректно обрабатывает граничные случаи. Такие случаи могут быть связаны с ошибками в операторах управления (условия, циклы). В данной программе таких операторов два.

В инварианте цикла может быть допущена ошибка в условии или при инициализации переменной цикла. В таком случае может возникнуть исключение времени выполнения (выход за границы массива) или пропуск крайних элементов. Исключение времени выполнения в данной работе может быть обнаружено при локальной отладке программы в среде редактора кода. Пропуск крайних элементов найти сложнее, и программа в таком случае может считаться «частично» рабочей. Для проверки можно добавить два дополнительных набора:

a=[0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9] b=0
 a=[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 0] b=9

По заданию требовалось найти последний минимальный элемент. Ошибка в операторе условия может привести к нахождению первого из минимальных элементов. Для проверки этого условия требуется добавить следующий набор:

a=[0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 0] b=9

Таким образом, вместо двоичной оценки было получено четыре критерия для проверки.

Вторая задача звучит следующим образом: отсортировать целочисленный массив из десяти элементов по возрастанию. Решение задачи с использованием стиля языка C можно записать следующим образом:

```
i = 0; j = 0;
while( i < 10 ){
  j = j + 1;
  while( j < 10 ){
    if( b[j] < b[i] ){
      t = b[j];
      b[j] = b[i];
      b[i] = t;
    }
    j++;
  }
  i++;
}
```

Наиболее простой случай проверки можно описать одним набором:

a=[0, 1, 2, 4, 3, 5, 6, 7, 8, 9] b=[0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]

Данная программа содержит три оператора управления, следовательно, дополнительные эталонные наборы позволят обнаружить ошибки, связанные с этими операторами. Первый оператор – цикл с предусловием. Ошибка в инициализации переменной цикла или в операторе условия может привести к пропуску граничных элементов массива. Второй оператор также представляет собой цикл с предусловием, и инвариант цикла может сказаться на пропуске граничных элементов. Ошибка в записи третьего оператора условия может привести к обратному порядку сортировки или к лишним операциям обмена. Последнее сложно проверить, так как для таких простых программ разница во времени будет незначительной.

Для проверки инварианта первого цикла можно использовать следующий набор:

a=[1, 0, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9] b=[0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]

Инвариант второго цикла влияет на обработку граничных элементов справа. Для проверки требуется следующий набор:

a=[0, 1, 2, 3, 9, 4, 5, 6, 7, 8] b=[0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]

Если автор лаборатории примет решение, что сортировка в порядке, обратном заданию, также является верной, можно добавить набор для проверки оператора условия:

a=[0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9] b=[9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1, 0]

Таким образом, для дифференцирования оценки можно использовать четыре эталонных набора вместо одного для выявления не критических ошибок в алгоритмах.

Заключение

Одним из основных достоинств среды AcademicNT является наличие встроенного механизма для построения виртуальных лабораторий, которые необходимы для формирования и проверки навыков. В данной статье приведены схема взаимодействия модулей информационно-образовательной среды, принципы функционирования виртуальных лабораторий, требования к оформлению эталонных наборов данных и методика

разработки эталонных наборов для наиболее точного оценивания результатов виртуальных экспериментов.

Основные результаты статьи проиллюстрированы на примере виртуальной лаборатории «Многостилевой редактор кода», которая предназначена для проверки навыков реализации алгоритмов с возможностью кодирования на наиболее распространенных языках программирования.

Представленные в статье результаты прошли апробацию и продемонстрировали свою эффективность в ходе реализации следующих проектов:

- система дистанционного обучения СПбГУ ИТМО (<http://de.ifmo.ru>);
- система для проведения Интернет-олимпиад и экзаменов (<http://de.ifmo.ru/exam>).

Рассмотренный подход к разработке проверяющих наборов и виртуальная лаборатория используются в электронном курсе «Информатика». Использование дополнительных эталонных наборов позволило более точно оценить навыки студентов.

Литература

1. Вашенков О.Е., Лямин А.В., Тарлыков В.А. Оценивание результатов обучения в среде электронного учебно-методического комплекса по дисциплине «Когерентная оптика» // Оптика и образование – 2006: Сб. трудов конф. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – С. 70–71.
2. Васильев В.Н., Лисицына Л.С., Лямин А.В. Технология проведения ЕГЭ по информатике в компьютерной форме // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2007. – Выпуск 45. – С. 126–143.
3. Васильев В.Н., Лисицына Л.С., Лямин А.В. Сетевая технология проведения вступительных испытаний по информатике в режиме on-line // В сб.: Использование информационно-коммуникационных технологий в процессе оценки качества образования. – СПб, 2008. – С. 55–70.
4. Вашенков О.Е., Лямин А.В. Технология разработки виртуальных лабораторий в информационно-образовательной среде AcademicNT на примере работы по информатике // Проблемы разработки учебно-методического обеспечения перехода на двухуровневую систему в инженерном образовании: Материалы межвуз. н.-метод. конф. — М.: МИСиС, 2008. – С. 239–249.

Вашенков Олег Евгеньевич – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, программист, vashenkov@cde.ifmo.ru

Лямин Андрей Владимирович – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, lyamin@mail.ifmo.ru

УДК 007.51; 371.261; 004.588

СРЕДСТВА ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНЫХ ОБУЧАЮЩИХ ДИАЛОГОВ В СИСТЕМЕ ACADEMICNT НА ОСНОВЕ КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Е.А. Бердникова, А.В. Лямин, А.В. Русак

Настоящая статья описывает алгоритмы построения адаптивных обучающих диалогов в системе дистанционного обучения с целью оптимизации процесса выявления, конкретизации и последующего устранения площадей незнания, а также рассматривает возможность автоматизированной генерации таких диалогов на основе концептуальной модели предметной области знаний.

Ключевые слова: обучение, адаптивный диалог, обучающая система, концептуальная модель, онтология.

Введение

Компьютерное тестирование можно отнести к инструменту проверки оценки уровня подготовки студента [1]. Однако, как правило, такое тестирование проводится на основе выборки одной длины, с одинаковым уровнем сложности для всех студентов без учета их индивидуальных особенностей. Очевидно, что использование одного и того же набора заданий для всех студентов не является эффективной стратегией построения траекторий обучения. На сегодняшний день остается актуальной задача разработки алгоритмов адаптивного тестирования, базирующегося на принципе обратной связи. В СПбГУ ИТМО на базе сетевой Интернет-технологии была разработана и внедрена в учебный процесс университета система дистанционного обучения «AcademicNT» с возможностью построения адаптивных обучающих диалогов [2, 3]. При этом перед авторами обучающих диалогов возникают задачи: как оптимальным образом выявить и конкретизировать область незнания испытуемого; каким образом автоматизировать генерацию адаптивных обучающих диалогов. В данной статье предлагаются решения поставленных задач на основе построения концептуальной модели предметной области.

Построение концептуальной модели предметной области

Существуют различные подходы, методы и языки описания данных и знаний, среди которых все большее распространение получают онтологии. Под онтологией понимается формализованное представление основных понятий конкретной области знаний и связей между ними. Иными словами, онтология – это попытка формализации предметной области знаний с помощью концептуальной модели.

Концептуальная модель – это определенное множество понятий и связей между ними, являющихся смысловой структурой рассматриваемой предметной области. Концептуальную модель можно представить в виде графа, вершинами которого являются объекты предметной области, а ребра отражают связи между ними (рис. 1).

Для описания онтологий существуют различные языки и системы, при этом визуальный подход к онтологическому инжинирингу является наиболее наглядным и продуктивным, наряду с потенциалом исчисления предикатов семантических сетей. Разработки в области сетевых языков для моделирования различных предметных областей привели к появлению концептуальных графов. В настоящее время воплощением идей концептуальных графов является семантическая паутина (Semantic Web), где логика предикатов поддерживается с помощью языка описаний онтологий OWL, языка разметки онтологической информации RDF, языка запросов к RDF-документам SPARQL и языка описания правил RIF для систем логического вывода [4].

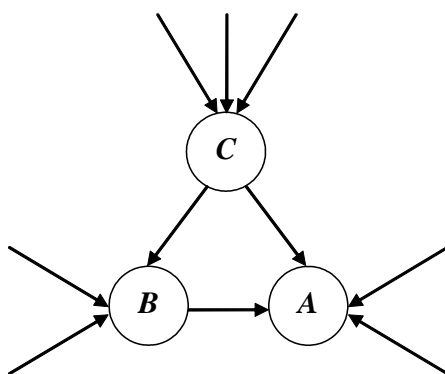


Рис. 1. Представление концептуальной модели в виде графа

При построении концептуальной модели предметной области задачей автора является разработка заданий на проверку каждого узла графа. Известно, что все понятия предметной области можно разделить на базисные (аксиоматические, неопределяемые) и формализуемые (определяемые через базисные). Направление дуг графа отражает, с помощью каких базисных терминов определяются формализуемые понятия, т.е. все ребра графа направлены от формализуемых понятий к базисным. Таким образом, если по определенным правилам будет размечена понятийная база предметной области, то дальнейшую формализацию можно будет автоматизировать.

Рассмотрим построение концептуальной модели предметной области «Моделирование систем» на примере определения понятия «система». Существует множество определений этого понятия, остановимся на следующем: система задается парой множеств U , Y и отношением $S \subseteq U \times Y$, где U – множество входов, Y – множество выходов. При таком определении для понимания термина «система» студенту требуется знание понятий «множество» и «отношение». Поскольку последнее также определяется через «множество», то термин «множество» в данном случае является базисным неформализуемым понятием.

Исходя из положения, что для отличника путь проверки знаний должен быть минимальным, построение адаптивного обучающего диалога следует начинать с проверки формального термина «верхнего уровня», в данном примере это понятие «система». При этом задание должно проверять не знание (заучивание определений), а понимание студентом термина, поэтому начинать проверку рекомендуется с абстрактной задачи обратного типа (рис. 2). Например, для проверки понимания понятия «система» можно предложить следующую задачу: «Система описывается уравнением $y=x^2$. Необходимо определить входное и выходное множества и построить их отношение». Данная задача требует понимания не только термина «система», но и понятий «отношение» и «множество». Поэтому студентов, справившихся с поставленной задачей, можно не проверять на знание этих терминов, а предложить им задачи на знание и понимание свойств систем, способы исследования систем и т.д. Если же студент не справился с первой предложенной задачей, необходимо выяснить, что конкретно он не понимает. Для этого можно последовательно предложить ему задачи на понимание понятия «отношения», знание свойств отношений. Такая задача может быть реализована с помощью других креативных форм. Если же эти задачи также вызвали затруднение, необходимо перейти к заданиям на понимание понятия «множество», знание основных определений и операций над множествами. На этом уровне основными формами построения диалога могут выступить задания на соответствие, где необходимо установить соответствие между двумя группами смысловых единиц, или закрытой формы, где предлагается выбрать один или несколько правильных ответов из предложенного набора.

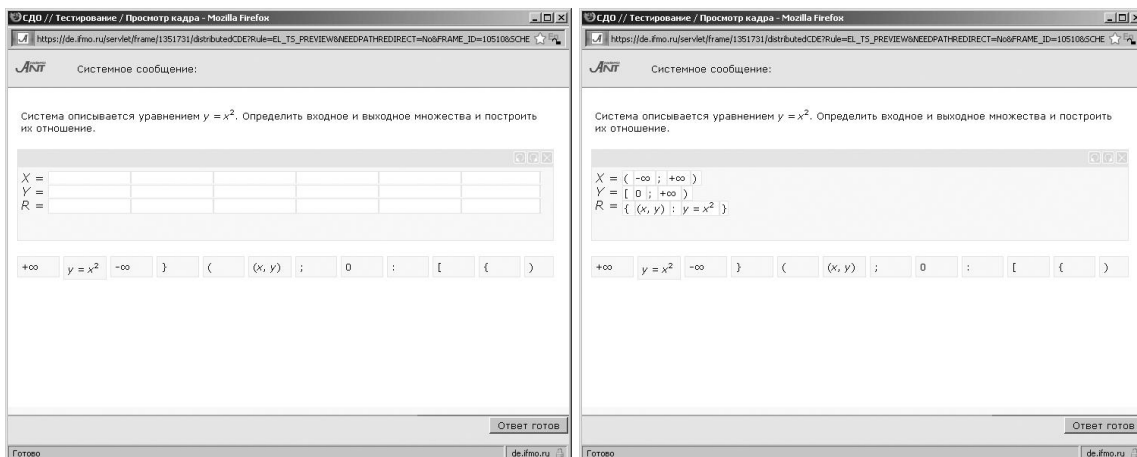


Рис. 2. Задание с копированием и перемещением элементов

Описанную модель проверки знаний можно представить в виде графа, изображенного на рис. 3. Здесь S – задание на понимание понятия «система», S_i – задания на знание и понимание расширенных сведений о системе (свойства системы, способы моделирования и т.т), O – задание на понимание понятия «отношение», O_i – задания на знание и понимание основных свойств и операций над отношениями, M – задание на понимание понятия «множество», M_i – задания на знание и понимание основных свойств и операций над множествами.

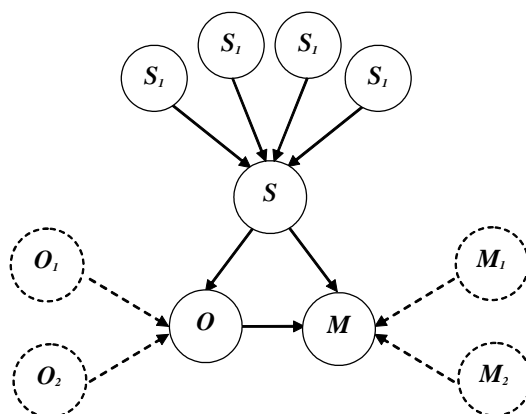


Рис. 3. Граф, описывающий концептуальную модель понятия «система»

Анализируя ответы на предъявленные задания из формализованной предметной области, система автоматически будет выбирать оптимальные траектории для выявления площадей незнания.

Построение адаптивных обучающих диалогов

Основным средством передачи и получения обучающей информации является диалог. Под адаптивным понимается диалог, формируемый при взаимодействии студента с информационной обучающей системой, которая определяет порядок предъявления очередных заданий в зависимости от полученного отклика на выполненные задания, учитывая поставленные педагогические задачи и индивидуальные особенности студента, как показано на рис. 4. На схеме замкнутой системы управления введены следующие обозначения: P – регулятор, A – анализатор, C – студент, u – обучающее воздействие, y – реакция, g – уровень знаний; g^* – желаемый уровень знаний, e – рассогласование между желаемым и текущим уровнями знаний студента.

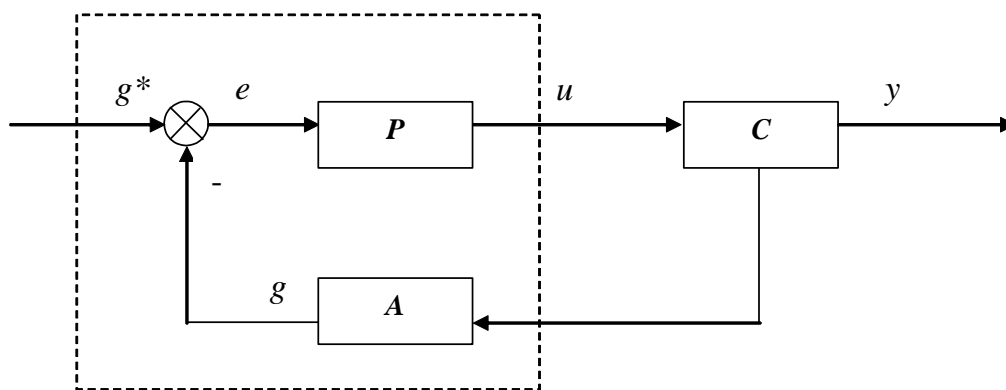


Рис. 4. Формирование канала обратной связи в адаптивном диалоге

Формирование канала обратной связи, приходящей от студента, позволяет анализатору делать выводы о площадях незнания и разрабатывать алгоритмы их устранения. Регулятор как задающее устройство выдает очередное обучающее воздействие на основе сравнения текущего уровня знаний студента, определяемого анализатором, с эталонным, который задан автором. Управление познавательной деятельностью студента осуществляется обучающими воздействиями, каждое из которых ограничено некоторыми предельными значениями в рамках выбранной диалоговой формы.

Тестовое задание состоит из трех основных частей: определение переменных; выбор формы обучающего диалога и указания содержания; описание обработки результатов выполнения задания для организации обратной связи. Рассмотрим инструментарий построения обучающего диалога на уровне тестового задания, когда диалог заключается в последовательном предъявлении студенту обучающих воздействий от системы в виде информации, отображаемой на экране в текстовом и графическом виде, и обработке выходной реакции с целью скорректировать воздействие на следующем шаге диалога. Механизм построения адаптивного обучающего диалога в зависимости от текущего состояния переменных позволяет изменять значения служебных переменных при выполнении определенных действий и соблюдении установленных правил, которые заложил автор диалога. Схема обработки ответа студента на тестовое задание представлена на рис. 5.

В общем случае объект `TestFrame`, характеризующий тестовое задание, имеет вложенные объекты `TestFrameVariables`, содержащие переменные, и `TestResponseProcessing`, предназначенные для обработки событий и действий. Объект `TestResponseProcessing` анализирует полученные результаты по тестовому заданию. Он содержит вложенные объекты: `TestResponseInit`, отвечающий за инициализацию переменной перед началом проверки кадра; `TestResponseCondition`, включающий в себя список условий, которые выполняется только тогда, когда успешно проходят все сравнения, описанные в `TestResponseMatch`; `TestResponseOutcome`, отвечающий за установление значения переменной после завершения работы с заданием. Объект `TestResponseOutcome` содержит ряд атрибутов, в том числе: `Output`, содержащий результат за выполнение задания, если условие работает; `NextTestFrame`, указывающий номер задания, на который будет осуществлен переход, если условие работает; `Message`, содержащий сообщение, которое увидит студент, если условие работает.

Представленный механизм анализа ответа на тестовое задание позволяет настраивать обучающие воздействия системы в зависимости от преследуемых учебных задач. Имеющийся в системе набор форм обучающих диалогов призван сузить различия между естественным и формальным языками построения диалога. Для классификации форм диалога были введены следующие основания: на основе формулировки задания, по использованию элементов интерфейса, по виду действий с элементом, по характери-

стике связи, по способу задания множества правильных ответов. Таким образом, разработанные формы обучающих диалогов позволяют системе оказывать гибкое воздействие на студента в рамках формального языка описания предметной области.

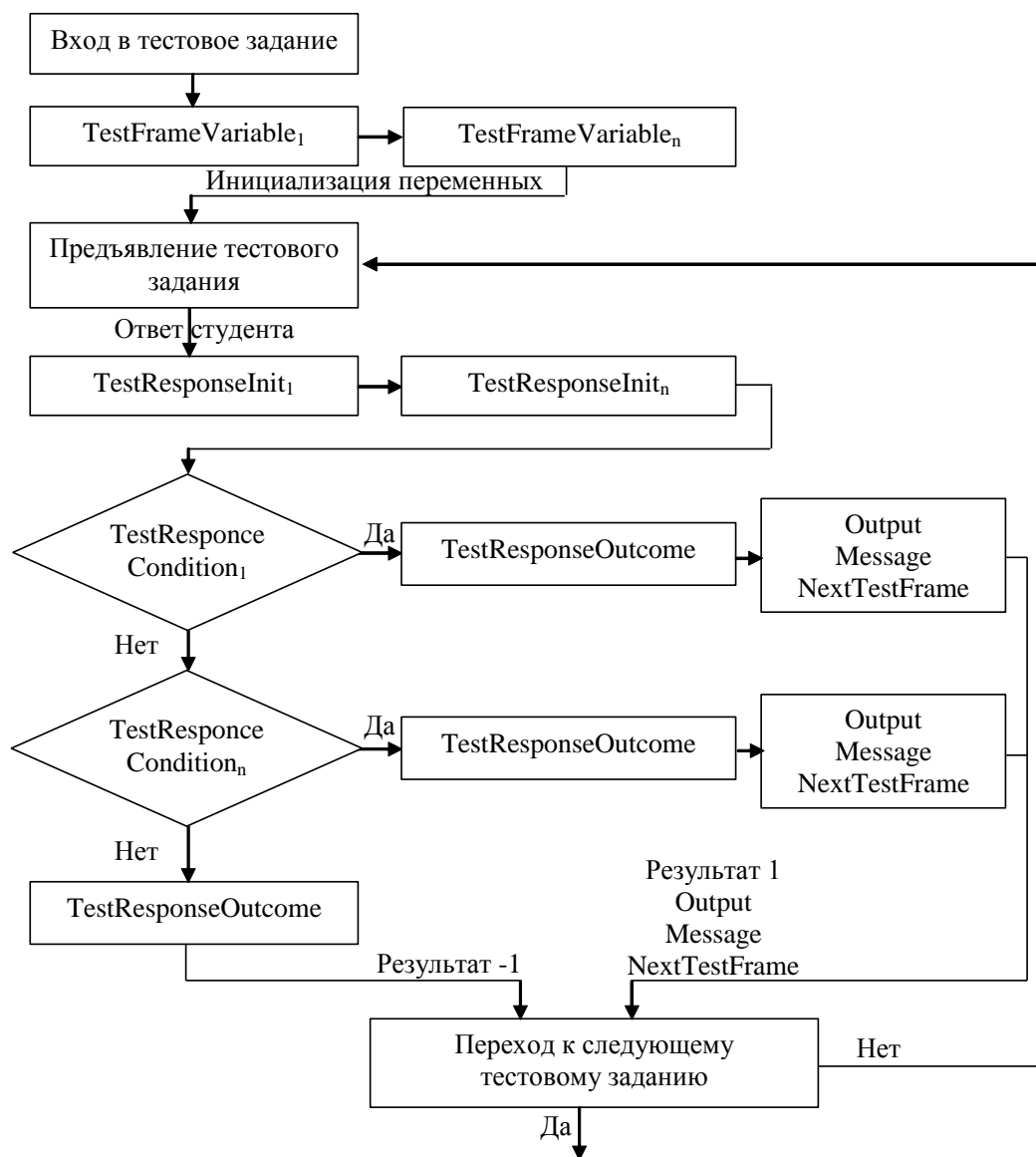


Рис. 5. Схема анализа ответа и построения воздействий

Заключение

Построение концептуальной модели предметной области знаний на основе логико-лингвистического подхода, введение инструмента для создания и последующей разметки «бланка» предметной области позволят в дальнейшем разработать алгоритмы обработки и автоматизированной генерации отдельных форм адаптивных обучающих диалогов, закладывая базовые узлы траектории их прохождения в системе дистанционного обучения AcademicNT. Посредством организации адаптивного диалога между студентом и информационной обучающей системой возможно повышение эффективности и качества обучения.

Литература

1. Аванесов В.С. Форма тестовых заданий. – М.: Центр тестирования, 2005. – 152с.
2. Васильев В.Н., Лямин А.В., Чежин М.С. Система дистанционного обучения второго поколения // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2007. – Выпуск 45. Информационные технологии. – С. 148–157.
3. Васильев В.Н., Лямин А.В., Чежин М.С. Средства организации самостоятельной работы студентов в сетевой информационно-образовательной среде AcademicNT // Проблемы разработки учебно-методического обеспечения перехода на двухуровневую систему в инженерном образовании: Материалы межвузовской научно-методической конференции, 19–21 ноября 2008 г. – Москва: МИСиС, 2008. – С. 224–232.
4. Соколовский В.В. Современные средства формализации данных в системах дистанционного образования // Открытое образование. – 2007. – № 5. – С. 33–35.

- Бердникова Елена Александровна* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, программист ЦДО, helen@cde.ifmo.ru
- Лямин Андрей Владимирович* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, директор ЦДО, lyamin@mail.ifmo.ru
- Русак Алена Викторовна* – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, начальник отдела ЦДО, helen@cde.ifmo.ru

УДК 681.3.07

К ВОПРОСУ ВЫБОРА СТРАТЕГИИ УПРАВЛЕНИЯ КОРПОРАТИВНЫМ ОБУЧЕНИЕМ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО ДОКУМЕНТАЦИОННОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ УПРАВЛЕНИЯ Л.Р. Фионова

Описаны основные характеристики адаптивной образовательной системы для корпоративной подготовки персонала. Предложена модель специалиста и модель обучаемого, построенные на основе компетентного подхода. Описаны стратегия и алгоритм формирования корпоративной и индивидуальной образовательной программы для подготовки персонала в сфере документационного обеспечения управления.

Ключевые слова: особенности обучения ДОО, корпоративная программа, факторы выбора, модель специалиста-документоведа, модель обучаемого, компетентностный подход, алгоритм формирования корпоративной образовательной программы.

Введение

Работа любого предприятия или учреждения происходит в условиях постоянных изменений деловой среды, среди которых можно выделить [1]:

- изменение стилей жизни на всех уровнях – глобальном, социальном, организационном, индивидуальном;
- усиление фактора динамизма и неопределенности;
- внедрение рыночных механизмов в профессиональное образование;
- возрастание роли горизонтальной мобильности в течение трудовой жизни;
- принципиальная трансформация многих профессий, их глобализация;
- усиление роли и усложнение задач личностного развития («умения на всю жизнь»);
- децентрализация ответственности за качество работы.

Все перечисленное приводит к постоянно растущей сложности задач, стоящих перед компаниями, и к возрастанию требований к квалификации персонала. Специалисты должны быстро и часто осваивать новые (в том числе и информационные) технологии для выполнения профессиональной деятельности. А если говорить о специалистах по документационному обеспечению управления (ДОУ), то они должны знать и уметь использовать все изменения в нормативной законодательной базе ДОУ. Отклонение от норм может нарушить юридическую силу документа, помешать или сделать невозможным решение управленческой и производственной задачи. Можно заметить, что в настоящее время квалифицированный персонал все более становится фактором стратегического преимущества компании [2].

В связи с изложенным многие компании начали активно развивать системы корпоративного обучения сотрудников. Однако даже крупнейшие корпорации не всегда разрабатывают политику и формулируют концепцию обучения или повышения квалификации персонала, наталкиваясь на существенные проблемы.

До последнего времени связь запросов компании с тем, что получит специалист, направленный учиться в вуз, а также влияние потребителя на состав предлагаемых программ обучения были весьма условными. Ситуация осложняется тем, что ключевые вопросы работы с персоналом в условиях внедрения корпоративных систем и технологий электронного документооборота, прежде всего, связаны с признанием инновационных изменений в управлении документацией. Последние влияют, в свою очередь, на состав работников, участвующих в организации ДОУ, формирование новых квалификационных требований к работникам, организацию повышения квалификации руководителей и специалистов по вопросам применения корпоративных технологий электронного документооборота.

Применение технологий электронного документооборота следует отнести к радикальным управленческим нововведениям, вызывающим одновременно качественные изменения во всех областях современного управления документацией как сферы профессиональной деятельности (документы и информационные ресурсы, программно-техническое обеспечение, технология работы, нормативная база). К числу важнейших особенностей современного документооборота, которые сохраняются и в обозримой перспективе, следует отнести [3]:

- использование корпоративных информационных систем, в том числе систем автоматизации документооборота, объединяющих информационные ресурсы в рамках всей организации и ее подразделений (в том числе территориально обособленных);
- расширение применения электронных документов в сфере управления;
- изменение акцентов и приоритетов в пользу оптимизации работы с документацией в организации в целом, т.е. на корпоративном уровне, а не на уровне отдельных подразделений;
- необходимость использования современных концептуальных подходов (кроме управления документацией, также и информационного менеджмента, управления проектами, процессного подхода и др.).

Эти особенности все в большей мере проявляются в деятельности предприятий, использующих корпоративные технологии документооборота.

Особенности обучения ДОУ

При организации переподготовки персонала по делопроизводству в конкретной организации необходимо, прежде всего, выявить факторы, влияющие на формирование адаптивной корпоративной программы обучения. Существенными характеристиками

непрерывного образования в сфере ДООУ, позволяющими выделить его среди других образовательных систем, являются следующие:

- содержание программ непрерывного образования по вопросам ДООУ определяется методами управления, используемыми на предприятии, задачами текущей деятельности предприятия и используемыми для их решения технологиями;
- непрерывное образование по ДООУ должно быть ориентировано на текущие потребности и ближайшую перспективу организации или предприятия, поэтому обучение имеет сугубо практическую направленность – выполнение конкретных операций в деловых процессах с использованием определенной технологии;
- содержание программ и результат непрерывного образования по ДООУ сохраняют актуальность меньший период времени по сравнению со временем активной профессиональной деятельности специалиста и временем существования организации или предприятия (кроме прочих причин этого явления, можно назвать регулярное обновление или изменение нормативных актов по ДООУ);
- изменение содержания деятельности предприятия или учреждения, а также применяемых методов управления влечет изменения в системе ДООУ и приводит к необходимости многократного обучения специалиста;
- разнообразие программ непрерывного образования по ДООУ соответствует разнообразию деятельности специалистов на рабочих местах;
- программы непрерывного образования в сфере ДООУ имеют небольшую продолжительность.

Еще одно осложняющее обстоятельство заключается в том, что обучение ДООУ по ряду позиций принципиально отличается от других видов профессионального обучения. В отличие от обычного образовательного процесса, который направлен на передачу знаний и навыков, полученных в прошлом, ДООУ – это технология менеджмента, а менеджмент – это умение создавать будущее. Поэтому подготовка и переподготовка по ДООУ не может базироваться на традиционной знаниево-навыковой концепции обучения и требует перехода к формированию у обучаемых стойких творческих и исследовательских навыков, умения решать проблемы. Специалисты по ДООУ – это люди, обладающие бесценным практическим опытом, и процесс их обучения должен быть настроен на соединение этого опыта с новыми теоретическими концепциями, новыми нормативными актами и обогащение опытом других специалистов.

Сложность вовлечения в образовательный процесс опыта специалиста связана также с тем, что это должно сопровождаться критическим переосмыслением устаревших ментальных моделей, стереотипных поведенческих реакций и решений, в частности, тех, которые возникли в период дорыночной экономики.

Грамотно выстроенная система ДООУ призвана создавать фирме конкурентные преимущества, и она принципиально не может опираться только на застывшие теоретические истины. Система ДООУ – это динамичный, постоянно развивающийся организм, отдельные концепции которого довольно быстро устаревают. Поэтому в ДООУ логика науки не доминирует, а является органичной компонентой наравне с конкретным профессиональным знанием и инновационной управленческой деятельностью.

Наконец, службы ДООУ (чаще всего) очень малочисленны, а специалисты по ДООУ – это очень занятые люди. Для них время – более дефицитный ресурс, чем деньги. Поэтому важно использовать для корпоративного обучения такие организационные формы, которые допускают определенную гибкость учебного графика.

Профиль специалиста

Приведенные выше отдельные квалификационные особенности при системном подходе к обучению специалистов по ДООУ должны быть сведены в так называемую

«модель (профиль) специалиста», которая во многом определяет цели образования, а, следовательно, его содержание, методы и средства.

Согласно классическому подходу необходимо сформулировать требования к знаниям, умениям, навыкам и личным качествам специалиста. Одна из наиболее широко известных классификационных шкал (таксономия) в этой области была предложена Б. Блумом [4], принята в США в национальном масштабе и содержит следующие уровни владения знаниями: знание, понимание, применение, анализ, синтез, оценка. Данная таксономия хорошо подходит для использования в учебной, познавательной деятельности и менее приспособлена для профессиональной или учебно-профессиональной. В частности, сложные познавательные и эмоциональные процессы, скажем, творческие или коммуникативные, выпадают при таком рассмотрении. Вместе с тем широкое распространение данного подхода свидетельствует о наличии у него значительных достоинств. Среди них следует отметить его технологичность и деятельный характер.

Другой, так называемый «компетентностный», или «функционально-аналитический», подход базируется на конкретных функциях, которые должен уметь выполнять специалист по ДОУ соответствующего уровня или специализации. Если таксономия дает вертикальный профиль специалиста (развитие), то стандарты компетентности – в основном горизонтальный (репертуар).

Следует отметить, что в идеале каждая организация должна составить свой профиль компетентности специалиста по ДОУ, ориентированный на ее стратегические задачи. При этом в первую очередь дифференциация будет проходить по ориентации компании на проведение изменений, стабильное развитие или свое будущее.

Модель специалиста-документоведа можно представить в следующем виде [5]:

$$M_s = F(O, N, I, C, P),$$

где O – множество, содержащее общие сведения о документоведе, N – множество общенаучных компетенций, которыми владеет документовед, I – множество инструментальных компетенций, которыми владеет документовед, C – множество социально-личностных компетенций, которыми владеет документовед, P – множество профессиональных компетенций, которыми владеет документовед.

Множество O может включать следующие элементы: пол, национальность, вероисповедание, место жительства, принадлежность к политической партии (общественной организации); согласие на командировки; наличие домашних вычислительных средств и оргтехники; различные психологические характеристики. Элементами множеств N, I, C, P являются соответствующие компетенции. Каждое множество в зависимости от указанной степени важности компетенций вносит свою долю в параметры модели (участвует в расчетах с указанным относительным весом). Для расчета функции F применяется аддитивная свертка показателей, хотя структура модели позволяет применять и другие (более сложные) методы, исходя из потребностей моделирования.

Модель обучаемого M_o можно представить несколькими множествами, характеризующими ту или иную группу его свойств: $M_o = F(S_n, S_m, S_{\phi})$.

Элементами первого множества S_n являются те свойства обучаемого, которые влияют на выбор формы обучения (платное, бюджетное, очное, заочное, дистанционное, экстернат). К этим свойствам можно отнести желание обучаемого или работодателя-заказчика (перечень предпочтений и цель обучения), пол, место жительства, семейное положение, наличие домашних технических средств, занятость, платежеспособность. Состав элементов множества S_n влияет на скорость (она зависит от выбранной формы обучения), качество (наличие собственных технических коммуникационных средств дает больше возможностей для самостоятельного исследования и закрепления освоенных компетенций) и время обучения (оно зависит, по крайней мере, от выбранной формы обучения).

Элементами второго множества $S_n = \{s_1, \dots, s_i\}$ являются те свойства, которые характеризуют степень подготовленности (исходные компетенции, ИК) обучаемого. Определить ИК позволит тестирование. Именно ИК, в первую очередь, необходимо использовать для выбора маршрута обучения. Состав элементов множества S_n будет меняться после изучения очередного модуля.

Элементами третьего множества S_ϕ являются свойства обучаемого, которые он хочет приобрести (в том числе и целевые компетенции, ЦК). Эти свойства связаны с определенными знаниями и умениями в сфере ДООУ. Эти элементы входят во множества N, I, C, P . Можно привести пример ЦК, приобретаемых в процессе подготовки или переподготовки по ДООУ. Например, после освоения образовательной программы обучаемый (в связи с тем, что это будет нужно работодателю) сможет (это ЦК, которыми он овладеет):

- провести анализ состояния ДООУ в организации,
- выполнить организационное проектирование системы ДООУ для конкретной организации,
- разработать инструкцию по делопроизводству,
- рассчитать и обосновать оптимальный состав службы ДООУ,
- разработать положение о службе ДООУ,
- оценить эффективность внедрения электронного документооборота на предприятии, и т.д.

В зависимости от того, на какой стадии подготовки находится обучаемый, модель обучаемого меняет свое наполнение и приближается к модели специалиста.

Предложенные модели являются тем важным инструментом, который можно использовать при выборе индивидуальной траектории обучения и для разработки алгоритма управления образовательным процессом [6].

Организация корпоративного обучения

В любой компании должна существовать четко выраженная политика совершенствования и обучения, направленная на то, чтобы работники знали, какого рода обучение поощряется и в связи с чем, как это связано с целями и стратегией фирмы.

Как уже отмечалось, каждая компания при организации корпоративного обучения должна составить свой профиль компетентности специалиста по ДООУ, ориентированный на ее стратегические задачи. Стратегия управления корпоративным обучением в сфере ДООУ должна учитывать:

- корпоративные методы управления;
- текущие потребности предприятия;
- ближайшие перспективы предприятия;
- корпоративные технологии в ДООУ;
- особенности корпоративного документооборота.

Чтобы выявить особенности организации ДООУ и применяемые технологии документооборота, важно предварительно провести анализ состояния ДООУ в организации [7]. Важной задачей при формировании стратегии обучения персонала по вопросам ДООУ является определение категорий обучаемых. Ими могут быть:

- системные технологи – сотрудники служб ДООУ или подразделений информатизации, выполняющие функции пользовательского и технологического администрирования (если в компании используется автоматизированная система ДООУ (АС ДООУ));
- руководители служб ДООУ;
- сотрудники служб ДООУ или пользователи АС ДООУ;

- специалисты подразделений, выполняющие функции ДОУ в подразделениях;
- руководители и специалисты подразделений, использующие систему ДОУ в информационно-аналитических целях, а также при работе с проектами документов;
- системные администраторы и специалисты службы технической поддержки.

Для каждой категории (группы) обучаемых должна быть построена своя модель специалиста $M_s = F(O, N, I, C, P)$ и определены требуемые ЦК.

При организации корпоративного обучения необходимо придерживаться следующего алгоритма действий.

- 1 Выявить и структурировать запросы компании-заказчика и специалистов по ДОУ, т.е. определить:
 - корпоративные технологии в ДОУ,
 - особенности корпоративного документооборота,
 - особенности организации рабочих мест специалистов, занимающихся ДОУ.
- 2 Выбрать и подготовить к использованию наиболее востребованные программы обучения, ориентированные на:
 - корпоративные методы управления,
 - текущие потребности предприятия,
 - ближайшие перспективы предприятия.
- 3 Подобрать и обучить преподавателей.
- 4 Сформировать учебные группы, обязательно по категориям слушателей.
- 5 Для каждой группы (категории) слушателей построить модель специалиста.
- 6 Провести предварительное тестирование и определить исходные компетенции для группы или для отдельного слушателя при формировании индивидуальной программы переподготовки.
- 7 Построить модель обучаемого $M_o = F(S_n, S_n, S_\phi)$ или группы обучаемых (его или их ИК и ЦК определяют модули для включения в программу обучения [8]).
- 8 Обеспечить учебный процесс аудиториями и другим оснащением.
- 9 Администрировать учебные мероприятия в соответствии с технологией, учебным планом и т.п.
- 10 Осуществить учебный процесс.
- 11 Провести итоговое тестирование.
- 12 Проанализировать результаты обучения и сформулировать рекомендации по устранению проблемных мест в системе ДОУ предприятия.

Для эффективного управления процессом обучения в образовательной системе на основе модели специалиста M_s и множеств S_n, S_ϕ , входящих в модель M_o , можно построить модель компетентности слушателя (группы слушателей) в виде модели предметной области (сфера ДОУ), представляющей собой сеть (направленный граф). Узлы сети отображают ЦК, осваиваемые в ходе программы обучения, а дуги различного типа выражают отношения между соединяемыми компетенциями [9].

При разработке конкретного модуля образовательной программы определяются его цели, описываются планируемые результаты обучения и готовятся описания на все ЦК, освоение которых предполагается после изучения данного модуля.

Для построения модели компетентности конкретного слушателя каждому узлу-компетенции сети в каждый момент обучения ставится в соответствие число из заданного диапазона – мера освоения компетенции обучаемым. Получившаяся взвешенная сеть компетенций динамически отображает текущий уровень профессиональной компетентности слушателя. В частности, нулевые веса всех компетенций сети соответствуют полному отсутствию компетенций и практических навыков в области ДОУ, а максимальные – полному освоению.

При таком подходе управление процессом обучения со стороны образовательной системы заключается в цикличности выбора очередной «неосвоенной» компетенции сети и представления материала по ее освоению (в соответствии с описанием этой компетенции) обучаемому. При этом выбор очередной компетенции для освоения осуществляется на основе анализа текущего состояния модели компетентности (весов компетенций и связей). Этот выбор может быть сделан с учетом пожеланий слушателя, а также стратегии, которую может дополнительно задавать компания. Представление компетенции включает выдачу некоторой информации в соответствии с ее описанием, примеров и задач из базы данных обучающей системы. В зависимости от продемонстрированного качества знаний и проявленных способностей обучаемого в решении предложенных задач система меняет веса осваиваемой и связанных с ней компетенций. Цикл обучения продолжается до тех пор, пока веса компетенций сети не достигнут заданного целевого значения.

Важная ступень в организации корпоративного обучения – поддержание освоенных компетенций. Поэтому необходимо предоставить возможность «переобученным» специалистам сформулировать рекомендации по устранению проблемных мест в системе ДООУ предприятия. Общий климат в организации, существующие в ней ценности и установки могут не только способствовать, но и препятствовать практическому применению результатов обучения, демотивации сотрудников, их нежеланию учиться. Изменение управленческой культуры и структуры ориентации на обучение – процесс длительный и противоречивый, но без долговременной целеустремленной деятельности в этом направлении переподготовка специалистов по ДООУ будет давать совсем не те результаты, которые хотелось бы получить.

Заключение

Сегодня становится ясно, что при организации корпоративного обучения мало просто учить ДООУ, сегодня становится важно, чему учить и как учить. Применение предложенных моделей специалиста, обучаемого и его компетентности, а также алгоритма формирования корпоративной программы обучения при организации переподготовки персонала по вопросам ДООУ на предприятиях Пензенской области позволили повысить качество подготовки (по результатам итогового тестирования в среднем на 8%), сократить время обучения благодаря индивидуальной настройке и индивидуальному графику обучения. Кроме того, были сформулированы и внедрены действительно необходимые рекомендации по устранению проблемных мест в системе ДООУ предприятия (как итог переподготовки).

Литература

1. Гришанова Н.А. Компетентностный подход в обучении взрослых // Материалы к 3-му заседанию методологического семинара 28 сентября 2004 г. – М.: Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов, 2004. – 16 с.
2. Овчинникова Н.Н. Европейская и российская модели социального партнерства в сфере профессионального образования и обучения кадров: сравнительный анализ // Подготовка специалистов в сфере ДООУ и историко-архивоведения: актуальные вопросы: Сборник научных трудов. – Саратов: ПАГС, 2008. – С. 86–91.
3. Бобылева М.П. Кадровое обеспечение корпоративной системы электронного документооборота // Документация в информационном обществе: управление документацией как сфера профессиональной деятельности: Доклады и сообщения на XIV

- Международ. н.-пр. конференции 20–21 ноября 2007 г. – М.: Росархив. ВНИИДАД, 2008. – С. 71–77.
4. Bloom B.S. Taxonomy of educational objectives. The classification of educational Goals. Handbook: Cognitive Domain. – N-Y, 1956.
 5. Фионова Л.Р. К вопросу построения современной модели специалиста-документоведа // Документация в информационном обществе: управление документацией как сфера профессиональной деятельности: Доклады и сообщения на XIV Международ. н.-пр. конф. 20–21 ноября 2007 г. – М.: Росархив. ВНИИДАД, 2008. – С. 54–59.
 6. Фионова Л.Р. Определение оптимального маршрута изучения дисциплин на основе компетентностного подхода // Делопроизводство. – 2007. – № 4. – С. 8–15.
 7. Фионова Л.Р. Разработка методики анализа состояния ДОО в организациях // Современные технологии документооборота в бизнесе, производстве и управлении: Сборник статей III Международ. н.-пр. конф. – Пенза: АНОО ПДЗ, 2003. – С. 3–6.
 8. Фионова Л.Р. Разработка компонентов адаптивной организации образовательной системы // Открытое образование. – 2009. – № 6 (71). – С. 27–33.
 9. Фионова Л.Р. Создаем электронный тест для оценки компетенций документоведов / // Кадровик. Кадровое делопроизводство. – 2009. – № 2. – С. 15–24.

Фионова Людмила Римовна – Пензенский государственный университет, кандидат технических наук, профессор, зав. кафедрой, flr@pnzgu.ru

SUMMARY

OPTICAL AND OPTICAL ELECTRONIC SYSTEMS. OPTICAL TECHNOLOGIES

INERTIAL DEVICE FOR ANGULAR SPEED MEASURING

V. Bogatyreva, A. Dmitriev

A new inertial device for angular speed measuring based on measuring of centrifugal force influence on sensor in optical-mechanical construction was suggested. Excited light beam displacement is registered by sensitive photo detector position. Output signal value is proportional to angle change between mirrors and is formed by angular rotor speed. Algorithm of data processing from photo detector output is described, and test results for laboratory model are given. This device has a simple structure, is efficient and will find practical application for technological processes, machine building and robotics.

Keywords: angular speed measuring device, centrifugal force, mirror multiplier.

Valeria Bogatyreva - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, carlo.01@mail.ru, carlo02@yandex.ru

Alexander Dmitriev - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D Sc., Professor, alex38d@list.ru

OPTICAL GAIN IN A FIBER FABRY-PEROT INTERFEROMETER AT THE PUMPING OF LOW POWER SINGLE-MODE SEMICONDUCTOR LASER

S. Bulgakova, A. Dmitriev

The structure of fiber nonlinear Mach-Zehnder interferometer with optical path difference from 2 m up to 10.3 km is presented in this paper. We present experimental measuring results of the industrial single-mode semiconductor laser modules with a fiber Bragg gratings (1.32 μm – 1.55 μm) with a bandwidth less than 20 kHz. It has been shown that long (several kilometers) fiber interferometer acts as an active fiber non-linear Fabry-Perot interferometer with an essential nonlinear gain effect connected with Brillouin scattering in a fiber and Fresnel reflection at the butt end of the optical fiber. Nonlinear effects were first observed at a very small, less than 300 μW radiation power of the incoming light.

Keywords: Mach-Zehnder interferometer, single-mode semiconductor lasers, Brillouin scattering, nonlinear interferometry, fiber interferometry.

Sofia Bulgakova - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, lja84@mail.ru

Alexander Dmitriev - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D Sc., Professor, alex38d@list.ru

THE OPTICAL SYSTEM OF LIGHT TUBE VARIABLE TRANSFORMATION

V. Zverev, I. Suvorova

Analysis of the overall properties was done in the paper and application possibility of two-component optical system with variable parameters and variable increase with overlapped axial points of a subject and image for light tube forming and variable increase ternary system of “collective” type was shown.

Keywords: laser mounting, optical system, variable increase.

Victor Zverev - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D Sc., Professor, post_vaz@rambler.ru

Irina Suvorova - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, d22022007@yandex.ru

FABRICATION OF PLANAR GRADIENT WAVEGUIDES IN PHOTO-THERMO-REFRACTIVE GLASSES

S. Kiselev, N. Nikonorov, A. Ignatiev

Gradient-index optical waveguides have been made in photo-thermo-refractive glasses by effusion and ion-exchange within different thermal and time conditions. Refractive-index profiles have been calculated. Previous radiation and thermal treatment effect on waveguide characteristics has been investigated.

Keywords: photo-thermo-refractive glass, planar waveguide, ion-exchange, effusion.

Stanislav Kiselyov - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, kisel.stas@rambler.ru

Nikolai Nikonorov - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department Head, D. Sc., Professor, nikonorov@oi.ifmo.ru

Alexander Ignatiev - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Laboratory Manager, ignatiev@oi.ifmo.ru

PHOTONICS AND OPTICAL INFORMATICS

COMPLEX ENVELOPE OF ARBITRARILY-SHAPED OPTICAL FIELD FOR THE DESCRIPTION OF INTERACTION OF PULSES WITH CONTINUUM SPECTRA AND DIFFERENT CENTRAL FREQUENCIES IN TRANSPARENT NONLINEAR MEDIA

Yu. Shpolyanskiy

The analytical signal formalism is used to derive expression for the optical field complex envelope of continuum spectrum pulses with different central frequencies. It is shown that self- and interaction of such pulses in nonlinear media can be described by the single equation for the envelope of total field provided that the frequency dependence of propagation constant is introduced in the Fourier domain directly instead of the conventional Taylor expansion.

Keywords: continuum, ultra broad spectrum, femtosecond, ultra fast, ultra short, extremely short, envelope, analytical signal, interaction, cross-modulation.

Yuri Shpolyanskiy - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, Ph.D., shpolyan@mail.ru

ANALYSIS AND SYNTHESIS OF COMPLEX SYSTEMS

MATHEMATICAL MODELING OF THE DIRECT CURRENT ELECTRIC DRIVE WITH THE ACTIVE RECTIFIER

P. Borisov, A. Sednev

The structure of a power subsystem with the network lowering transformer and the active rectifier, providing a bilateral exchange of energy between a power line and electric machine for low-voltage direct current electric drive is considered. In MATLAB/Simulink package with application of SimPowerSystems appendix, the model of the closed-loop system of the direct current electric drive with the active rectifier on the basis of low-voltage machine PBV-100M is developed. Modeling is executed and its results are analyzed.

Keywords: active rectifier, closed-loop system of the subordinated regulation, pulse-width converter, direct current electric drive, recuperation energy.

Pavel Borisov - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, Ph. D., borisov@ets.ifmo.ru

Alexey Sednev - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, sednev-aleksey@yandex.ru

DYNAMICS OF THE SHIP COURSE AUTOMATIC MAINTENANCE SYSTEM BASED ON STEERING LINKAGE WITH AC ELECTRONIC MOTOR

N. Vatunskaya, I. Ovchinnikov

Non-linear task of the ship course control dynamics with ac electronic motor in drive of a steering engine is considered. Control law is synthesized and amplification coefficients and reducer gear-ratio are selected.

Keywords: ac electronic motor, drive of a steering engine, control law, amplification coefficients, reducer gear-ratio.

Nataliya Vatunskaya - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Student, Tawechka@yandex.ru

Igor Ovchinnikov - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D, Sc., Professor, ludimit@yandex.ru

THERMAL PHYSICS AND THEORETICAL HEAT ENGINEERING

THE DEVICE FOR MEASUREMENTS OF HEAT FLUX FROM THE HEATING ELEMENT SURFACE

V. Korablev, D. Minkin, A. Sokolov, A. Sharkov

The device construction for measurements of heat flux from the heating element surface is described. This device allows to measure heat fluxes from 5 W up to 100 W with uncertainty of 10 %.

Keywords: heat flux, measuring system, calorimeter.

Vladimir Korablev – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, Ph. D, ktf@grv.ifmo.ru

Dmitry Minkin - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, mindim-spb@mail.ru

Anton Sokolov - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, dioux@rambler.ru

Alexander Sharkov – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department Head, D. Sc., Professor, sharkov@grv.ifmo.ru

DYNAMIC CHARACTERISTICS FOR DIFFERENT TYPES OF HEAT FLOW RECEIVERS BASED ON DIFFERENTIAL-DIFFERENCE MODELS OF HEAT TRANSFER

N. Pilipenko

The numeric-algorithmic method for obtaining the dynamic characteristics of different types of heat flow receivers based on differential-difference models of heat transfer is considered. A method for reducing the transfer function order of the known impact channels on the receiver is given.

Keywords: nonstationary heat flow measurements, dynamic characteristics, differential-difference models of heat transfer.

Nikolai Pilipenko - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, Ph. D, pilipenko@grv.ifmo.ru

MATERIALS TECHNOLOGY AND NANOTECHNOLOGIES

RESEARCH OF A PIEZOELECTRIC SENSOR OF LOCAL INTERACTION OF SCANNING PROBE MICROSCOPE WITH THE PROBE IN THE FORM OF THE MICROPIPETTE

A. Golubok, V. Levichev, A. Pinaev, A. Stovpyaga

The piezoelectric sensor for scanning probe microscope with a probe in the form of a glass micropipette has been researched. Resonant frequency and Q-quality of the sensor have been measured in air and liquid environments. The spatial resolution has been shown using a test lattice. The conclusion about an opportunity of using of the sensor with a micropipette in the liquid environment with simultaneous activity in semicontact force mode and in a mode of measurement of ionic currents has been made.

Keywords: scanning force microscope, micropipette.

Alexander Golubok – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department Head, D. Sc., senior staff scientist, golubok@ntspb.ru

Vadim Levichev – St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Lecturer, levichev_vadim@mail.ru

Alexander Pinaev - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, pinaev@mail.ru

Alexander Stovpyaga - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, sanja100v@mail.ru

COMPUTER SYSTEMS AND INFORMATION TECHNOLOGIES

AUTOMATED ASSESSMENT MODULE OF OPERATOR ACTIVITY TENSION

A. Balhareth

The article deals with the operator activity assessment model, taking into consideration the influence of activity tension to operator's quick-action. The approach is given based on the use of software module (tool), fixing the operator activities tension.

Keywords: tension of activity, operator, self-estimation, automated questionnaire, requirements, information-program module.

Ahmed Abdullah Saeed Balhareth – St. Petersburg State Electrotechnical University (LETI), Postgraduate, balhareth_ru@hotmail.com

ANALYSIS OF THE COMPUTATION MODEL IMPLIED BY IEC 61499

A. Lukichev

The computation model for distributed control systems implied by IEC 61499 standard is briefly described and analyzed. Several significant issues and their workarounds are presented.

Keywords: distributed control systems, computation models, embedded systems.

Alexander Lukichev - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Assistant, Ph.D., sash1@mail333.com

TOOLS FOR FORMAL GRAMMAR REUSE AND THEIR APPLICATION FOR CREATING DIALECTS

A. Breslav

Modern concrete syntax development tools offer three main reuse mechanisms: modules, templates and aspects. The paper examines these mechanisms and completeness of their implementations in existing tools and proposes their extensions and application of extended versions for creating programming language dialects.

Keywords: syntax, grammar, template, aspect, dialect.

Andrey Breslav– St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, abreslav@gmail.com

ECONOMICS AND FINANCES. MANAGEMENT**THE THEORETICAL BASES OF DEVELOPMENT THE ENTERPRISES SERVICES SPHERE
UNDER CONDITIONS OF GLOBALIZATION****O. Tsoukanova**

The author analyzed special theoretical and conceptual features of international enterprises under globalization conditions and specified them for service industries in this article. Characteristic features of the modern international enterprise were selected, the terms «divergence – convergence» concerning the service sphere were analyzed, the methodological base of the strategic planning at the international enterprise was formed.

Keywords: globalization, divergence, convergence, hybrid strategy.

Olga Tsoukanova - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, Ph. D, zoa1999@mail.ru

REGIONAL CORRUPTION COUNTERACTION STRATEGY IN RUSSIAN BUSINESS**R. Lugovskoy**

Effect of corruption in commerce, creating an obstacle in development of the given line of business in the Russian Federation at different levels is considered. The effective direction of regional strategy formation in the state regulation field is offered.

Keywords: business, corruption counteraction, trade, regional strategy.

Roman Lugovskoy - St. Petersburg Institute of Commerce and Economy, Postgraduate, rlugovskoy@yandex.ru

NEW TECHNOLOGIES IN EDUCATION**LIFE CYCLE OF ELECTRONIC COURSE IN THE UNIVERSITY REMOTE EDUCATION SYSTEM****V. Vasilev, A. Pavlova, M. Chezhin**

This paper describes the stages of electronic training methodical course life cycle in Learning Management System as well as presents the authorized tools and capabilities of system at every stage.

Keywords: life cycle, design stages, Learning Management System, training methodical course.

Vladimir Vasilev - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Rector, D. Sc., Professor, vasilev@mail.ifmo.ru

Anastasiya Pavlova - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Programmer, nastya@cde.ifmo.ru

Michael Chezhin - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Vice-Head of Remote Learning Center, Ph.D., Associate professor, msch@cde.ifmo.ru

**CREATION TECHNIQUE OF REFERENCE ENTRANCE AND TARGET DATA SETS FOR THE
EVALUATION OF TASKS WITH UNSOLVABLE SET OF RIGHT ANSWERS****O. Vashenkov, A. Lyamin**

This article describes the structure of AcademicNT learning management system, the role and functions of virtual laboratories and creation methods of reference sets for better evaluation of virtual experiment results. Research was made for virtual laboratory on informatics, but such approach can be used for any virtual laboratories.

Keywords: virtual laboratory, learning management system, electronic education

Oleg Vashenkov - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Programmer, vashenkov@cde.ifmo.ru

Andrey Lyamin - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Head of Remote Learning Center, Ph.D., Associate professor, lyamin@mail.ifmo.ru

**CONSTRUCTION TOOLS OF ADAPTIVE TRAINING DIALOGUES IN ACADEMICNT SYSTEM
ON THE BASIS OF CONCEPTUAL MODEL OF THE SUBJECT AREA KNOWLEDGE****Y. Derdnikova, A. Lyamin, A. Rusak**

This article describes the design algorithms of adaptive learning dialogues in the distance learning system in order to optimize the process of identifying, specifying and subsequent removal of ignorance areas, as well as considering the possibility of automatic generation of dialogues, based on a conceptual model of subject area knowledge.

Keywords: training, adaptive dialogue, training system, conceptual model, ontology.

Elena Berdnikova - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Programmer, helen@cde.ifmo.ru

Andrey Lyamin - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Head of Remote Learning Center, Ph.D., Associate professor, lyamin@mail.ifmo.ru

Alyona Rusak - St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Head of Organizational and Methodological Department of Remote Learning Center, Ph.D., alena@cde.ifmo.ru

ON MANAGEMENT STRATEGY CHOICE OF SPECIALIST'S TRAINING IN ADMINISTRATION SPHERE DOCUMENTATION**L. Fionova**

This article is about the main properties of adaptive educational system for corporative personnel training. A model of a specialist and that of a student on the basis of the competent approach are offered in the article. The strategy and the algorithm of corporative and individual educational programs forming for personnel training in the sphere of administration documentation are described.

Keywords: training features in administration sphere documentation, corporative program, choice factors, a model of specialist in documentation, a model of student, the competent approach, the algorithm of corporative educational program forming.

Lyudmila Fionova – Penza State University, Department Head, Ph. D., Professor, flr@pnzgu.ru

Подписано к печати 01.06.2009 Тираж 350 экз. Заказ № 9(61)

Отпечатано в учреждении «Университетские телекоммуникации»
Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи
и массовых коммуникаций, свидетельство ПИ № ФС77-33466 от 10.10.2008 г.

Подписной индекс 47 197 по каталогу агентства Роспечать
(Газеты. Журналы)

© Санкт-Петербургский государственный университет
информационных технологий, механики и оптики, 2009