

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

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

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

Выпуск 28

**I СЕССИЯ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ
«Задачи механики и проблемы точности
в приборостроении»**



**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2006**

Выпуск содержит материалы **I сессии научной школы «Задачи механики и проблемы точности в приборостроении»**, проведенной в рамках **III межвузовской конференции молодых ученых**.

Конференция была организована 10–13 апреля 2006 года Санкт-Петербургским государственным университетом информационных технологий, механики и оптики в сотрудничестве с

- Санкт-Петербургским государственным университетом
- Санкт-Петербургским государственным инженерно-экономическим университетом
- Казанским государственным университетом
- Санкт-Петербургским государственным технологическим институтом (техническим университетом)
- Санкт-Петербургским государственным политехническим университетом
- Санкт-Петербургским государственным университетом кино и телевидения
- Санкт-Петербургским государственным морским техническим университетом
- Самарским государственным архитектурно-строительным университетом
- Российским государственным гуманитарным университетом
- Мурманским государственным техническим университетом
- Ленинградским государственным университетом им. Пушкина
- ФГУП «НИТИОМ ВНИЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова»
- ОАО «Российским институтом радионавигации и времени»
- Российской академией художеств.

В выпуске представлены работы, поддержанные финансированием в рамках:

- Федеральной целевой научно-технической программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники на 2002–2006 гг.» (Федеральное агентство по науке и инновациям);
- аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2006–2008 гг.)» (Федеральное агентство по образованию);
- Федеральной целевой программы развития образования на 2006–2010 гг. (Федеральное агентство по образованию);
- Российского фонда фундаментальных исследований,

а также инициативные разработки.

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель – ректор СПбГУ ИТМО, д.т.н., профессор **В.Н. Васильев**

Сопредседатели – проректор по развитию, д.т.н., профессор **В.О. Никифоров**,
проректор по УО и АР, д.ф.-м.н., профессор **Ю.Л. Колесников**,
проректор по УМР, к.т.н., профессор **А.А. Шехонин**,
декан факультета ППО, д.т.н., профессор **В.Л. Ткалич**

Члены программного комитета – д.т.н., профессор **Ю.А. Гатчин**, д.т.н., профессор **В.М. Мусалимов**, д.т.н., профессор **С.Б. Смирнов**, д.т.н., профессор **В.А. Тарлыков**, д.т.н., профессор **Е.Б. Яковлев**, к.т.н. **Т.В. Точилина**

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель – начальник НИЧ **Л.М. Студеникин**

Зам. председателя – к.т.н. **Т.В. Точилина**

Члены организационного комитета – **П.А. Борисов**, **Н.Н. Валентик**, **И.Н. Жданов**, **С.Ю. Керпелева**, **Н.В. Когай**, **А.В. Козаченко**, **И.М. Кудрявцева**, **Д.В. Лукичѳв**, **А.А. Малинин**, **Л.В. Можжухина**, **Ю.С. Монахов**, **Н.Б. Нечаева**, **М.В. Никитина**, **М.С. Петрищев**, **С.С. Резников**, **В.Н. Фролков**

ISSN 1819-222X

© Санкт-Петербургский государственный университет
информационных технологий, механики и оптики, 2006

ОПТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ВАЛОВ

М.В. Кудрявцев (Мурманский государственный технический университет)
Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Л.В. Ефремов

Статья посвящена совершенствованию комплексной системы контроля крутильных колебаний силовых установок с использованием современной оптической и цифровой технологий. Результаты исследования имеют большое практическое значение для развития средств и методов диагностики при техническом обслуживании машин.

Известен ряд методов и средств измерения знакопеременных тангенциальных напряжений в валах силовых установок, среди которых следует особо выделить приборы с бесконтактным принципом передачи сигнала от инерционного или тензометрического датчика, установленного на вращающемся валу, на внешний регистрирующий блок прибора. Таким путем удастся устранить существенный источник помех, возникающих в цепи передачи сигнала через контакты токосъема при использовании других средств измерений. Например, в торсиографе фирмы «Диза Электроник» для этой цели используется емкостные каналы.

Хорошо себя зарекомендовал радиоторсиограф конструкции ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, признанный морским Регистром судоходства. Он состоит из двух основных элементов – датчика и приемника, связанных между собой по радиоканалу на частоте 660 кГц с помощью передающей и приемной антенн. Оцифрованный сигнал записывается на персональный компьютер для дальнейшего спектрального анализа и оценки степени опасности крутильных колебаний.

Согласно рекламной документации, более простыми и доступными приборами для записи и анализа крутильных колебаний являются оптические торсиографы. Так, известная фирма «Брюль и Кьер» выпускает прибор TVM-2523. Здесь для бесконтактного измерения амплитуды крутильных колебаний применяется лазерный луч, отражаемый от специальной светоотражающей ленты, наклеенной на любой участок вала. Утверждается, что прибор определяет угловую скорость колебаний и снимает все проблемы измерений этого параметра. Однако наш опыт применения подобного оптического прибора показал, что к рекламной информации об их эффективности следует относиться с большой осторожностью из-за различных помех, обнаруживаемых при измерениях, природа которых еще мало изучена.

В настоящей статье приводятся результаты первого этапа исследований относительно нового для наших флотов оптического торсиографа, входящего в состав универсальной переносной измерительного комплекса СКАН производства ЦНИИМФ.

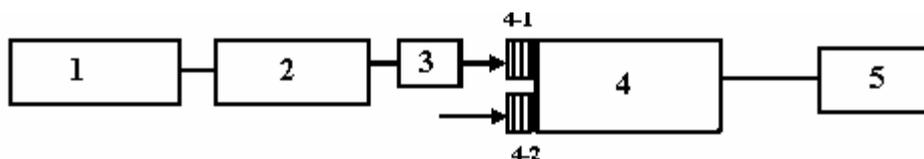


Рис. 1. Структурная схема комплекса СКАН:

- 1 – первичный преобразователь; 2 – предусилитель преобразователя; 3 – блок питания преобразователя; 4 – персональный компьютер; 5 – плата аналого-цифрового преобразователя (АЦП); 4-1 – 25-штырьковый разъем RS-232;
 4-2 – 9-штырьковый разъем RS-232

Как показано на рис.1, комплекс состоит из 5 основных элементов: портативного компьютера, платы АЦП, первичных измерительных преобразователей (в частности, оптического датчика) и программного обеспечения.

Измерительная информация, которую необходимо обработать, поступает в ПЭВМ через вставляемую в слот портативного компьютера плату – аналого-цифровой преобразователь (АЦП).

Ниже приводятся основные характеристики комплекса СКАН.

- Первичный оптический преобразователь QS18VN6LV (фирма Banner Engineering Corp.,США): питание 10–30 В; потребляемый ток <100 мА; рабочая дистанция до 0,3 м; задержка включения/выключения 600 мкс.
- АЦП типа DAQCard (фирма National Instruments): разрядность 16 бит; число аналоговых каналов 16; диапазон входных напряжений ± 10 В; число цифровых входов/выходов 8; динамический диапазон изменения входного сигнала 80 дБ; входной импеданс 1 ГОм в параллели с емкостью 40 пф.
- Партитивный компьютер: Notebook Hewlett Packard Omnibook 6100, микропроцессор типа Pentium III; ОЗУ 256 Мбайт; два слота для карты PCMCIA; HDD 20 Гбайт.
- Системное программное обеспечение – Windows-2000; среда разработки прикладного программного обеспечения – графический пакет LABView фирмы National Instrument (США); прикладное программное обеспечение – СКАН, разработка ЦНИИМФ.

Для измерения крутильных колебаний используется специальная клейкая отражательная лента (см. рис. 2а) с темными и светлыми полосками и оптический датчик (рис. 2б), который способен излучать световой поток и воспринимать отраженный поток от светлой полоски ленты. Отражательная лента наносится на сечение вала или специальное выводное устройство (как на рис.2б), а датчик устанавливается так, чтобы световой поток проходил по отражательной ленте без выхода за ее пределы.

Результаты измерений фиксируются на экране компьютера в виде двух основных картинок – собственно торсиограмма (см. рис. 3а) и спектрограмма (рис. 3б). Как правило, наибольшее практическое значение имеет запись и анализ амплитуд спектральный гармоник на спектрограмме. В частности, это имеет решающее значение при диагностировании демпферов крутильных колебаний, когда в качестве диагностического параметра используется частота и амплитуда наиболее сильного резонанса моторной формы крутильных колебаний.

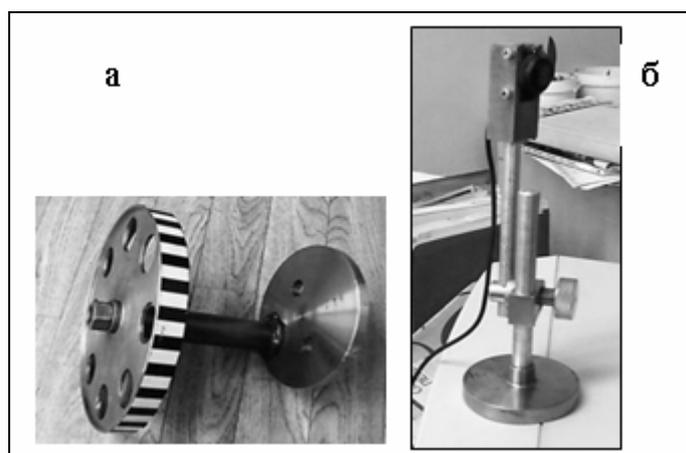


Рис. 2. Оптический торсиограф, входящий в диагностический комплекс СКАН:
а) – датчик с отражательной лентой, б) – излучатель светового луча

Указанный комплекс был приобретен нами (АНО «Стандарт-морепродукт», Архангельск) с учетом того, что, согласно рекламе, комплекс СКАН не требует прокладки кабельных трасс, является легкой, портативной, полностью автономной системой. Это позволяет производить сбор, обработку и анализ информации непосредственно на судне. Однако уже на начальном этапе применения этого прибора выяснилось, что этих привлекательных свойств недостаточно для признания прибора морским Регистром судостроительства. Испытания этого прибора на нескольких судах выявили ряд искажений результатов измерений, что обусловило актуальность исследования причин их возникновения с целью последующей разработки мер по их устранению.

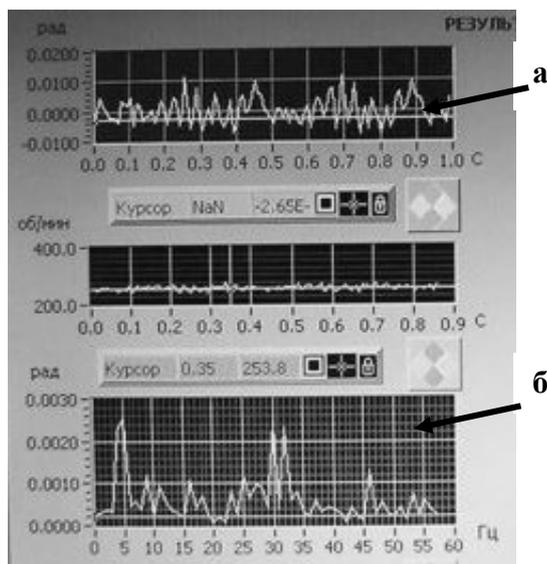


Рис. 3. Пример записи крутильных колебаний (а) и их спектрального анализа (б) оптической аппаратурой СКАН

Первая попытка торсиографирования эти прибором на одном из судов окончилась неудачей в основном из-за неправильного выбора места считывания информации. Отражательная лента была наклеена на вал за маховиком двигателя, где, как показали расчеты, амплитуда исследуемых колебаний моторной формы практически равна нулю. Этот случай подтвердил правило, хорошо известное специалистам по крутильным колебаниям: подобные экспериментальные исследования не могут выполняться без предварительного расчетного моделирования развития крутильных колебаний, которое должно указывать не только место наклейки ленты, но и способ пересчета напряжений с одного сечения вала на другой. Поэтому в состав рабочей группы по проведению этих работ пришлось включить опытного специалиста по расчету крутильных колебаний. При этом было разработано специальное программное обеспечение для оперативных расчетов крутильных колебаний.

Другим следствием этого случая явилась разработка специального диска для записи с торца коленчатого вала (рис. 2б), где ожидалась максимальная амплитуда моторной формы колебаний. Это позволило на следующих судах получать более правдоподобную картину (рис. 3). Вывод о правдоподобности сделан на основании расчетов и анализа результатов торсиографирования на судах того же самого проекта, но с применением альтернативных средств измерений (торсиографами Гейгера и ЦНИИ им. А.И. Крылова).

Следующим дефектом, который был обнаружен при испытаниях одного из судов, явилось искажение записи в результате неудовлетворительного технического состояния силовой установки, а точнее – из-за большой неравномерности распределения дав-

ления газов в цилиндрах дизеля. Это позволило в программе испытаний обратить особой внимание на качество работ подготовительного этапа испытаний.

В дальнейшем эти ошибки были устранены, и более достоверные результаты были получены на трех судах с главными двигателями типа NVD48 (Германия).

На этом, втором этапе экспериментальных исследований были выявлены некоторые проблемы программного обеспечения и самого измерительного комплекса.

Во-первых, на спектрограммах всех судов была обнаружена заметная (0,003–0,005 рад) гармоника первого порядка, хотя по расчету таких колебаний не должно было быть. Стендовые испытания прибора позволили предположить, что его причиной является бой установочного диска, который может происходить в разных плоскостях из-за плохой центровки.

Кроме того, были замечены явно случайные гармоники других порядков, которые могли возникать из-за влияния вибрации оптического излучателя. Поскольку вопрос о наложении записи вертикальных колебаний на запись радиальных колебаний пока не имеет теоретического и практического обоснования, то его решение является одной из проблем наших последующих исследований.

Основной проблемой измерительного комплекса является невозможность измерения при плавном изменении частоты вращения двигателя. Приходится применять ступенчатый способ, т.е. ступенчато менять обороты на 3–5 об/мин и осуществлять запись на фиксированной частоте. Это затрудняет точную оценку частоты вращения двигателя, где ожидается резонанс от крутильных колебаний.

Диаметр = не более (меньше можно)

"об\шаг"	5	10	15	20	25
100	500	$1 \cdot 10^3$	$1.5 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^3$	$2.5 \cdot 10^3$
200	250	500	750	$1 \cdot 10^3$	$1.3 \cdot 10^3$
300	166.7	333.3	500	666.7	833.3
400	125	250	375	500	625
500	100	200	300	400	500
600	83.3	166.7	250	333.3	416.7
700	71.4	142.9	214.3	285.7	357.1
800	62.5	125	187.5	250	312.5
900	55.6	111.1	166.7	222.2	277.8
$1 \cdot 10^3$	50	100	150	200	250
$1.1 \cdot 10^3$	45.5	90.9	136.4	181.8	227.3
$1.2 \cdot 10^3$	41.7	83.3	125	166.7	208.3
$1.3 \cdot 10^3$	38.5	76.9	115.4	153.8	192.3
$1.4 \cdot 10^3$	35.7	71.4	107.1	142.9	178.6
$1.5 \cdot 10^3$	33.3	66.7	100	133.3	166.7
$1.6 \cdot 10^3$	31.3	62.5	93.8	125	156.3
$1.7 \cdot 10^3$	29.4	58.8	88.2	117.6	147.1
$1.8 \cdot 10^3$	27.8	55.6	83.3	111.1	138.9
$1.9 \cdot 10^3$	26.3	52.6	78.9	105.3	131.6
$2 \cdot 10^3$	25	50	75	100	125

Таблица 1. Требуемый диаметр шкива

Важным вопросом для достоверности измерений является выбор диаметра вала (шкива) и шаг ленты, которые выбираются в зависимости от номинальных оборотов двигателя с целью обеспечения требуемого времени цикла прохождения излучаемого и отраженного сигнала (не менее 1,2–2,2 мс). Для определения оптимального диаметра шкива и шага полоски составлена небольшая компьютерная программа, которая позволяет быстро получить оптимальный шаг полоски или, наоборот, при заданном шаге находить требуемый диаметр шкива. По тому же алгоритму и с той же целью составлена табл. 1, которая добавлена в инструкцию эксплуатации прибора.

Дальнейшая работа по повышению достоверности рассматриваемого оптического метода измерений связана с совершенствованием программного обеспечения прибора и разработкой алгоритмов вспомогательных программ. В частности, для повышения точности оценки частоты вращения вала необходимо график угловых перемещений дополнить отметчиком оборотов, а в таблицу спектральных амплитуд добавить значения половинчатых порядков, которые характерны для четырехтактных дизелей

К важнейшим вспомогательным компьютерным программам, которые запланировано разработать для обслуживания оптического метода, можно отнести программы для построения теоретических (эталонных) торсиограмм и спектрограмм и программы для прогнозирования остаточного ресурса объекта исследования.

Конечной целью дальнейшего усовершенствования оптического метода мониторинга крутильных колебаний является составление типовой программы испытаний с учетом специфики судна и измерительного комплекса СКАН и обоснования возможности признания этого метода морским Регистром судоходства.

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И НАНОШЕРОХОВАТОСТЬ ТРУЩИХСЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В.С. Бураков, С.Ю. Керпелева

Научные руководители – доктор технических наук, профессор В.М. Мусалимов,
доктор физико-математических наук, профессор А.О. Голубок

В работе представлена попытка корреляции амплитудно-частотных и фазово-частотных динамических характеристик и нанорельефа поверхности на примере стали 30.

Введение

Цель работы состоит в исследовании динамики фрикционного взаимодействия исследуемых образцов и установлении корреляции между эволюцией динамических характеристик и эволюцией наношероховатости.

За последние годы в исследовательских лабораториях были разработаны высокоточные трибометры, снабженные чувствительной и анализирующей аппаратурой. Одним из таких трибометров является прибор «Трибал 2», снабженный соответствующим программным обеспечением. Он позволяет максимально точно получить данные по динамике фрикционного взаимодействия, а использование пакетов идентификации MATLAB позволяет произвести идентификацию динамики процесса изнашивания [1].

Нанорельеф исследуемых образцов был получен с помощью сканирующего зондового микроскопа «NanoEducator».

Теоретическая часть

Сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ) – это прибор, позволяющий исследовать структуру и физико-химические свойства поверхностей материалов от микронного до атомарного уровней пространственного разрешения [2]. Это стало возможным, с одной стороны, благодаря развитию аппаратных средств и программного обеспечения, а с другой – благодаря созданию прецизионных датчиков локального взаимодействия.

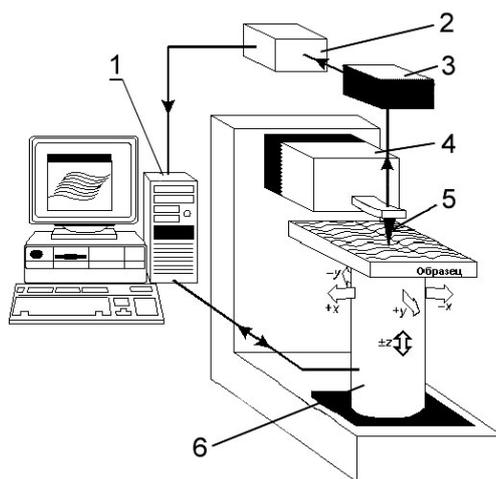


Рис. 1. Типичная схема сканирующего зондового микроскопа:

- 1 – компьютерная система управления движением сканирующего устройства, сбора, визуализации и анализа данных;
- 2 – система обратной связи для контроля за вертикальным движением сканирующего устройства;
- 3 – датчик положения зонда;
- 4 – система грубого подвода и позиционирования зонда;
- 5 – зонд;
- 6 – трехкоординатный пьезосканер, перемещающее образец под иглой (иглу над образцом) по растровой схеме

Типичная схема СЗМ представлена на рис. 1. Конкретная конструкция прибора может существенным образом видоизменяться в зависимости от решаемой задачи и условий эксперимента (сверхвысокий вакуум, газовая среда заданного состава, низкие или высокие температуры). В состав СЗМ-комплекса обычно входит компьютер, который управляет работой электромеханической части микроскопа, принимает и записывает регистрируемые зондом данные, производит на их основе построение СЗМ-изображения и, кроме того, позволяет обрабатывать полученное изображение.

Принцип работы СЗМ заключается в следующем. С помощью системы грубого позиционирования 4 зонд 5 подводится к поверхности исследуемого образца. При приближении образца и зонда на расстояние менее сотен нанометров зонд начинает взаимодействовать с поверхностью анализируемого объекта. Перемещение зонда вдоль неподвижной поверхности образца или образца относительно неподвижного зонда осуществляется с помощью трехкоординатного пьезосканера 3. Обычно оно представляет собой трубку из пьезокерамики, на поверхность которой нанесены три пары разделенных электродов. Под действием приложенных к пьезотрубке напряжений U_x и U_y она изгибается, обеспечивая тем самым перемещение образца относительно зонда по осям X и Y , под действием напряжения U_z – сжимается или растягивается, что позволяет изменять расстояние игла-образец [3].

В полуконтактной моде также применяется модуляционная методика измерения силового взаимодействия. В этом режиме зонд постукивает по поверхности, находясь как в области притяжения, так и в области отталкивания [4].

Так как сканирующий зондовый микроскоп «NanoEducator» рассчитан на измерение шероховатости образца с габаритами: диаметр 10 мм и высота максимум 5 мм, то в целях сопряжения двух установок для прибора «Трибал 2» было изготовлено приспособление. Оно состоит из двух образцов диаметром 8 мм и высотой 5 мм и оправки, в которую закрепляются образцы при помощи винтов. Схема приспособления представлена на рис. 2.

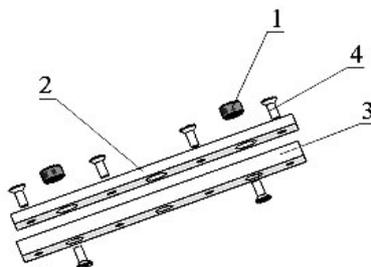


Рис. 2. 1 – образец, 2 – оправка верх, 3 – оправка низ, 4 – винты

Оправка изготовлена из двух частей и скрепляется винтами. Параллельные соприкасающиеся плоскости изготовлены с особой точностью, чтобы избежать перекосов. Шероховатость образцов задается как Ra 2,5. Материал образца – Ст 30. Материал пластины, работающей в трибопаре с исследуемыми образцами – дюралюминий Д16Т.

При работе на установке «Трибал 2» образцы (сталь 30) устанавливались на нижнюю платформу, а брусок (Д16Т) на верхнюю платформу. Исследовались три пары образцов с одинаковой начальной наношероховатостью, промеренной до установки в «Трибал 2». Были сняты характеристики: 45 мин. – первая пара образцов, 90 мин. – вторая пара образцов, 135 мин. – третья пара образцов. Начальная шероховатость всех пар образцов была одинакова.

На рис. 3–5 представлены полученные в пакете *ident* программы MATLAB амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики фрикционного взаимодействия. По этим графикам можно отследить изменения, происходящие во время процесса тре-

ния образцов. Изменение значения амплитуды говорит о том, что меняется коэффициент трения трибопары.

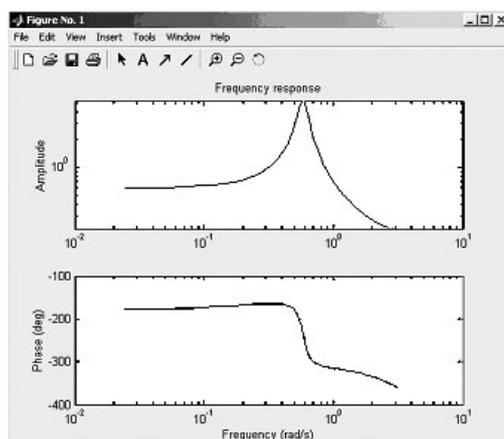


Рис. 3. Амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики в момент времени 45 мин

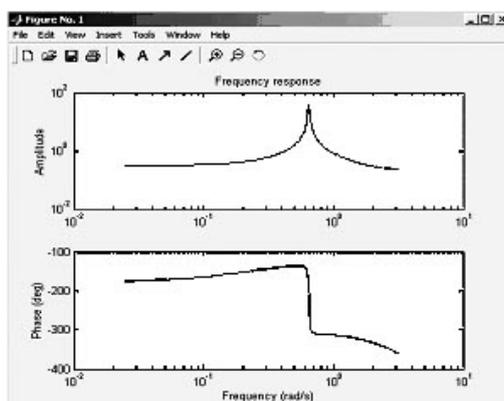


Рис. 4. Амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики в момент времени 90 мин

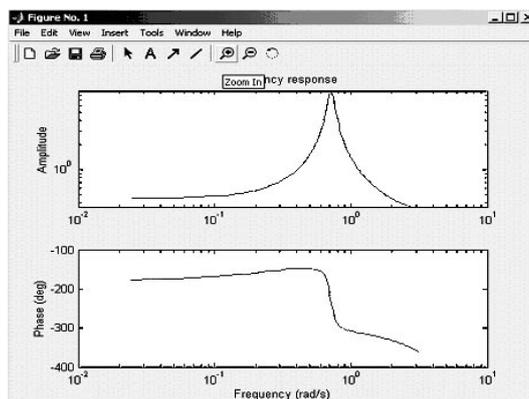


Рис.5. Амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики в момент времени 135 мин

На рис. 6–8 представлены соответственно периодам работы установки «Трибал 2» сечения нанорельфов образцов, снятые с контактируемых участков трущихся поверхностей образцов.

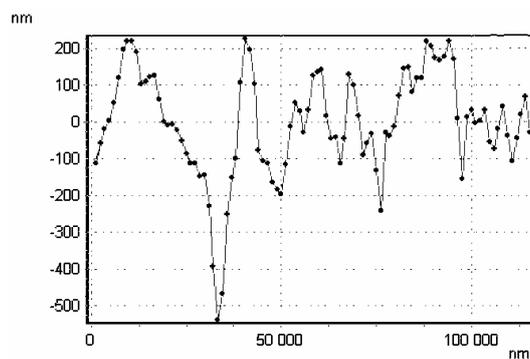


Рис. 6. Сечение рельефа, трение – 45 минут

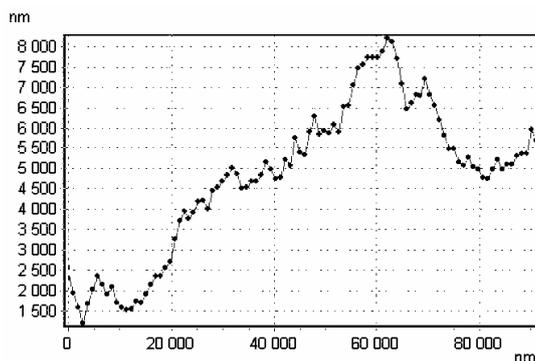


Рис. 7. Сечение рельефа, трение – 90 минут

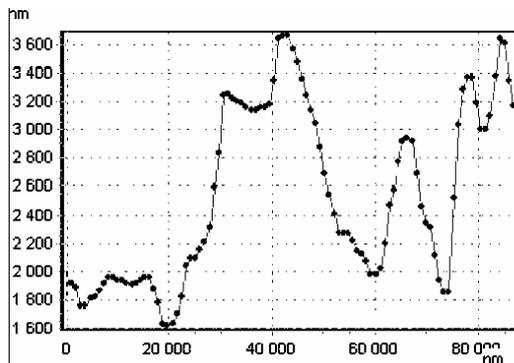


Рис. 8. Сечение рельефа, трение – 135 минут

Из сопоставления рисунков видно, что тенденция изменений динамических характеристик, например, значения амплитуд АЧХ до выхода на резонанс, коррелирует с тенденцией изменения нанорельефа, откуда следует, что данная методика является основой для автоматизации процесса оперативной оценки контроля качества поверхности [5].

Литература

1. Труды Шестой сессий международной научной школы «Фундаментальные и прикладные проблемы теории точности процессов, машин, приборов и систем». Часть 2. / Под редакцией д.т.н., проф. В. М. Мусалимова и к.т.н., проф. Б. П. Падуна. СПб: ИПМаш РАН, 2003. 172с.

2. Быков В.А. Микромеханика для сканирующей зондовой микроскопии и нанотехнологии. // Микросистемная техника. 2000. № 1. С. 21–23.
3. Бухарев А.А., Овчинников Д.В., Бухарева А.А. Диагностика поверхности с помощью сканирующей силовой микроскопии (обзор). // Исследования структуры и свойств. Физические методы исследования и контроля. 1996. С. 10–27.
4. Голубок А.О., Кerpелева С.Ю. Нанотестер для диагностики микро- и наноструктур. // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. Исследования в области физики и оптики. 2005. №18. С. 283–287.
5. Мусалимов В.М., Лисицин Ю.В., Трухин М.М. Пути автоматизации контроля качества поверхностей в реальном режиме. // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. Актуальные проблемы современных оптико-информационных систем и технологий. 2005. № 21. С. 76–79.

АКУСТИЧЕСКИЕ ПОЛЯ ИСТОЧНИКОВ ТИПА ВЕРТИКАЛЬНОЙ ГАРМОНИЧЕСКОЙ СИЛЫ

А.С. Ларин

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор В.М. Мусалимов

В работе была поставлена задача построения диаграмм направленности квадратов амплитуд акустического сигнала. Показано, что касательная составляющая имеет максимумы на порядок больше, чем продольная. Работа представляет интерес для специалистов по динамическим задачам теории упругости.

Исследование акустических полей сосредоточенных (точечных) источников [1] имеет важное значение в теории неразрушающего контроля по ряду причин. Акустические поля преобразователей любых конструкций с той или иной степенью идеализации могут быть представлены как результат суперпозиции полей соответствующих сосредоточенных источников. В математическом отношении задача определения акустических полей преобразователя сводится к интегрированию решений для сосредоточенных источников соответствующего типа и класса по области отличных от нуля сил, создаваемых в объекте контроля (область акустического контакта при возбуждении волн пьезопреобразователями, область отличных от нуля электродинамических или магнитострикционных сил при возбуждении волн электромагнитно-акустическим методом).

В практике ультразвукового контроля, в особенности при контроле изделий из полимерных и композитных материалов, широко используют преобразователи с малой контактной поверхностью. Акустические поля таких преобразователей исчерпывающим образом описываются решениями, полученными для сосредоточенных источников.

На основе этих решений могут быть рассчитаны отношения (а также абсолютные значения) амплитуд смещений в продольных, поперечных и рэлеевских волнах в зависимости от параметров преобразователя и его положения относительно точки наблюдения. Эти расчеты могут быть положены в основу разработки методик контроля различных изделий, поскольку позволяют оценить соотношения амплитуд волн основного (желаемого) типа и побочных (нежелательных). Так, при работе большинства пьезопреобразователей раздельно-совмещенного типа в качестве основных выбираются продольные волны, наличие поперечных и рэлеевских волн крайне нежелательно, поскольку первые приводят к неоднозначности при определении дефектов, а, следовательно, к перебраковке, а вторые ограничивают чувствительность преобразователя к дефектам, расположенным вблизи поверхности ввода колебаний.

Наконец, анализ полей точечных источников в упругом пространстве и полупространстве открывает перспективы существенного совершенствования метода контроля, основанного на эмиссии волн напряжения акустической эмиссии при микроразрушениях в твердых телах.

Опыт показывает, что тело в процессе деформирования (в частности, при распространении механических волн) находится под действием упругих и диссипативных сил. Ими обусловлен переход энергии механических волн в тепловую вследствие вязких и пластических потерь. Учитывая, что ультразвуковой контроль, как правило, осуществляется волнами малой интенсивности (метод неразрушающий), можно заключить, что вязкость и пластичность во многих материалах проявляются слабо на фоне упругих свойств. Поэтому теория неразрушающего контроля может базироваться на изучении процессов возбуждения, распространения, отражения и дифракции механических волн в рамках теории упругости. Большинство конструкционных материалов можно считать линейными и изотропными. При этих условиях распространение упругих колебаний описывается волновыми уравнениями, известными из линейной теории упругости.

Движение безграничной упругой однородной и изотропной среды, характеризуемой постоянными Ламе λ и μ и постоянной плотностью ρ_0 , описывается векторным уравнением движения Даламбера относительно вектора смещений U частиц среды

$$\mu \nabla^2 U + (\lambda + \mu) \text{grad div} U = \rho_0 \frac{d^2 U}{dt^2}, \quad (1)$$

где ∇^2 – оператор Лапласа.

Часто в динамических задачах теории упругости удобно оперировать не смещениями U , а скалярным Φ и векторным Ψ потенциалами, которые связаны со смещениями соотношением Грина-Ламе:

$$U = \text{grad} \Phi + \text{rot} \Psi. \quad (2)$$

Подстановка (2) в (1) позволяет выделить два волновых уравнения относительно потенциалов Φ и Ψ :

$$\nabla^2 \Phi = \frac{1}{C_l^2} \frac{d^2 \Phi}{dt^2}, \quad (3)$$

$$\nabla^2 \Psi = \frac{1}{C_t^2} \frac{d^2 \Psi}{dt^2}, \quad (4)$$

где $C_l = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho_0}}$ – скорость продольных волн; $C_t = \sqrt{\frac{\mu}{\rho_0}}$ – скорость поперечных волн в материале объекта. Уравнения (3) и (4), соответственно, описывают распространение продольных и поперечных волн.

В практике ультразвукового контроля обычно используются импульсы, форма которых может быть достаточно произвольной в зависимости от решаемых задач. Для анализа распространения импульсов произвольной формы возможны два подхода: представление импульсов в виде интеграла Дюамеля и метод интеграла Фурье. В первом случае необходимо иметь решение для воздействия в виде скачка единичной амплитуды (ступеньки), набором которого представляется реальный сигнал. Во втором достаточно иметь решение для гармонической волны, а реальный импульс представляется набором гармонических составляющих. Последний метод получил название спектрального и широко используется благодаря следующим особенностям.

1. Любой волновой процесс может быть разложен на гармонические волны, если соблюдается принцип суперпозиции. Программы быстрого преобразования Фурье позволяют восстанавливать волновые поля произвольной формы, не поддающиеся аналитическому интегрированию.
2. В практике ультразвукового контроля часто используются волны, близкие к гармоническим.
3. Предположение о гармоническом характере процессов во времени упрощает волновые уравнения (3) и (4) и приводит их к уравнениям Гельмгольца для скалярного Φ и Ψ потенциалов:

$$\nabla^2 \Phi + k_l^2 \Phi = 0, \quad (5)$$

$$\nabla^2 \Psi + k_t^2 \Psi = 0, \quad (6)$$

где $k_l = \omega / C_l$, $k_t = \omega / C_t$ – волновые числа продольной и поперечной волн, ω – циклическая частота гармонического колебания.

4. Полученные решения для гармонического режима могут быть использованы и в тех случаях, когда в среде имеет место дисперсия скорости звука, поскольку являются частотно независимыми.

В связи с этим будем рассматривать гармонические волны как основу для решения импульсных задач.

Рассмотрим случай (рис. 1), когда среда в плоскости $z = 0$ граничит с вакуумом и на поверхности $h = 0$ приложена сила:

$$f = F_0 f_1(z) f_2(\rho) \cdot e^{-i\omega t}, \quad (7)$$

тогда распределение амплитуд определенное при фиксированном значении $h = 0$ определяется формулами (8) и (9).

$$U_l = \frac{F_0 \Delta S \gamma^2}{2\pi\mu r} \times \frac{\cos\theta(1 - 2\gamma^2 \sin^2\theta)}{(2\gamma^2 \sin^2\theta - 1)^2 + 4\gamma^3 \sin^2\theta \cos\theta \sqrt{1 - \gamma^2 \sin^2\theta}} e^{-i(\omega t - k_l r)}, \quad (8)$$

$$U_t = \frac{F_0 \Delta S}{\pi\mu r} \times \frac{\sin\theta \cos\theta \sqrt{\gamma^2 - \sin^2\theta}}{(2\sin^2\theta - 1)^2 + 4\sin^2\theta \cos\theta \sqrt{\gamma^2 - \sin^2\theta}} e^{-i(\omega t - k_t r)}. \quad (9)$$

Здесь F_0 – поверхностная плотность сил.

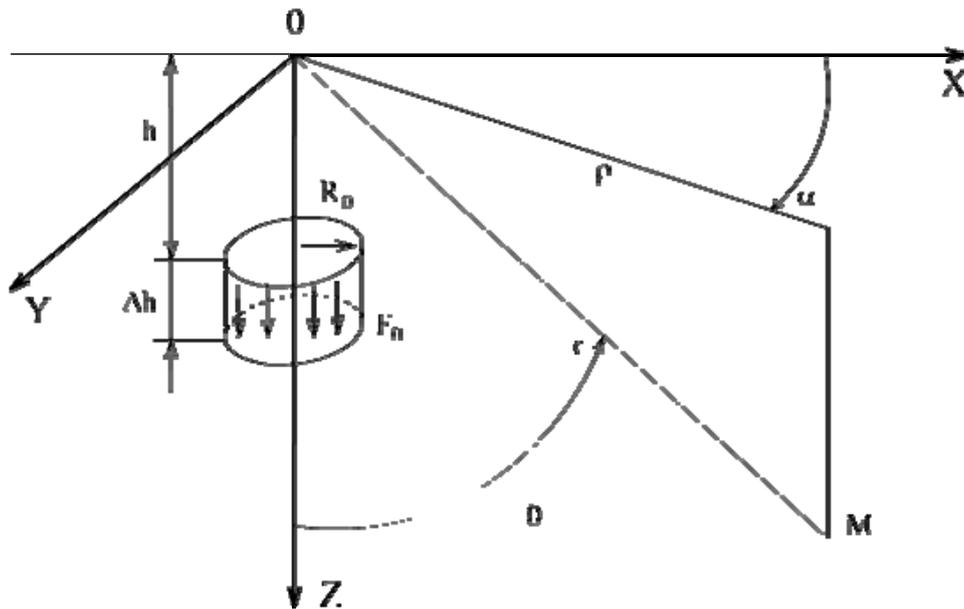


Рис. 1. Схема действия сосредоточенной силы и принятые системы координат (М – точка наблюдения)

На рис. 2 представлены рассчитанные диаграммы направленности квадратов амплитуд (энергий) продольных и поперечных волн в плоскости $\alpha = 0$ и $\gamma = 0,5$. Видно, что наличие свободной границы существенно влияет на диаграмму направленности поперечных волн. При $\theta = \pm \arcsin \gamma$ имеется острый провал, доходящий до нуля, а при $\theta = \pm 36^\circ$ – ярко выраженный максимум. Диаграмма направленности, как и в случае пространства, симметричны относительно оси Z и представляют собой тела вращения. Эти обстоятельства следует учитывать при проектировании преобразователей. Так максимум излучения продольных волн наблюдается в направлении $\theta = 0^\circ$, а ноль излучения – в направлении $\theta = \pm 90^\circ$, то, что какую бы совокупность источников такого типа мы не взяли, наиболее эффективно продольная волна будет возбуждаться в направлении $\theta = 0^\circ$, в то же время невозможно возбудить продольную волну вдоль поверхности. При $\gamma = 0,5$ поперечные волны наиболее эффективно могут возбуждаться наклонным преобразователем при углах $36^\circ - 45^\circ$ и совсем не излучаются при критическом угле $\theta = \pm \arcsin \gamma$ ($\pm 30^\circ$), какую бы совокупность источников такого типа мы не комбинировали.

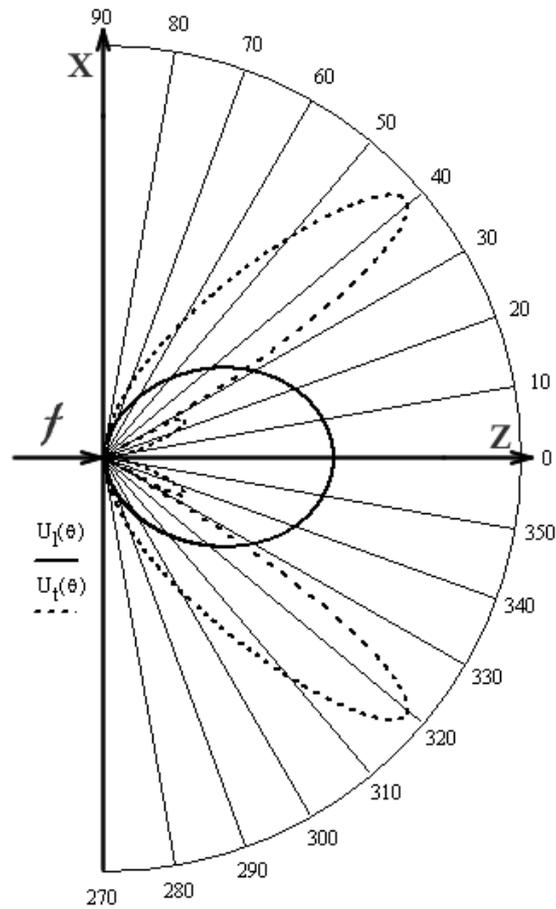


Рис. 2. Диаграммы направленности квадратов амплитуд акустического сигнала

Смещения в продольной волне всегда вещественны и поэтому в любой точке пространства повторяют зависимость от времени возбуждающей силы. Смещения в поперечной волне вещественны только в диапазоне углов $0 < \theta < \pm \arcsin \gamma$. Поэтому при расчетах рекомендуется использовать абсолютные значения величин под радикалом. Кроме того, именно диаграммы направленности квадратов амплитуд (энергий) являются, по нашему мнению, наиболее информативными.

Литература

1. Буденков Г.А., Недзвецкая О.В. Динамические задачи теории упругости в приложении к проблемам акустического контроля и диагностики. М.: Издательство физико-математической литературы, 2004. 136 с.

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ УРАВНЕНИЙ СТАТИКИ СПИРАЛЬНО-АНИЗОТРОПНЫХ СТЕРЖНЕЙ

С.С. Резников

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор В.М. Мусалимов

Рассмотрена задача о растяжении-кручении спирально анизотропного стержня. Решена задача для случая отсутствия трения между волокнами составляющими стержень.

Материальное упругое тело называют спирально-анизотропным, если с ним связана некоторая ось анизотропии z , а кривые с упруго-эквивалентными свойствами представляют собой семейство винтовых линий шага h с осью z . Теория упругости спирально-анизотропного тела находит достаточно широкое применение – от изготовления сопел реактивных установок до формирования тросов и кабелей. К разработке теории упругости анизотропных стержней имеют отношение и специалисты по пряжам, и по канатам и кабелям, и по ракетным двигателям.

Проблемными до сих пор остаются вопросы определения модулей упругости спирально-анизотропных стержней, которые являются модельной базой для анализа, например, деформаций тросиков управления и других элементов приборов. Неучет анизотропии приводит к конструктивным, а, следовательно, и к систематическим ошибкам при анализе деформаций. Так, например, приложение растягивающей силы к тросику вызывает раскручивание его и увеличение базы удлинения. Поэтому организация серьезных экспериментов по определению модулей упругости и далее реализация расчетов является актуальной задачей.

Предполагая линейную связь между напряжениями σ_{ij} и деформациями ε_{kl} , закон Гука можно записать в виде

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}. \quad (1)$$

Рассматриваемый случай спиральной анизотропии позволяет связать с телом криволинейную ортогональную систему координат, обладающую отмеченным выше качеством, а именно – совпадением координатных линий с упруго-эквивалентными направлениями. Компоненты тензора в двух системах координат связаны соотношением:

$$\sigma_{ij} = C_{ip} C_{jp} \sigma_{pq}, \quad (2)$$

что дает следующие зависимости:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \sigma_r, \\ \sigma_\xi &= \sigma_\theta \sin^2 \alpha + 2\tau_{\theta z} \sin \alpha + \sigma_z \cos^2 \alpha, \\ \sigma_\eta &= \sigma_\theta \cos^2 \alpha - 2\tau_{\theta z} \sin \alpha + \sigma_z \sin^2 \alpha, \\ \tau_{r\xi} &= \tau_{\xi z} = \tau_{r\theta} \sin \alpha + \tau_{rz} \cos \alpha, \\ \tau_{r\eta} &= \tau_{\eta r} = -\tau_{r\theta} \cos \alpha + \tau_{rz} \sin \alpha, \\ \tau_{\xi\eta} &= \tau_{\eta\xi} = (\sigma_z - \sigma_\theta) \sin \alpha \cos \alpha + \tau_{\theta z} (\sin^2 \alpha - \cos^2 \alpha). \end{aligned} \quad (3)$$

В правые части равенства представленной системы входят компоненты тензора напряжений в цилиндрической системе координат: $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z, \tau_{\theta z}, \tau_{rz}, \tau_{r\theta}$. В левых частях равенств системы представлены компоненты тензора напряжений в геликоидальной системе координат: $\sigma_r, \sigma_\xi, \sigma_\eta, \tau_{\xi\eta}, \tau_{r\eta}, \tau_{r\xi}$. Аналогичные зависимости существуют между компонентами тензора деформаций в цилиндрической и геликоидальной системах координат.

Известны зависимости компонент тензора деформаций от компонент вектора перемещений в цилиндрической системе координат:

$$\begin{aligned}\varepsilon_r &= \frac{\partial u_r}{\partial r}; \quad \varepsilon_\theta = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_r}{r}; \quad \varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}; \\ \gamma_{r\theta} &= \frac{\partial u_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u_z}{\partial \theta}; \quad \gamma_{rz} = \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial z}; \quad \gamma_{\theta z} = \frac{1}{2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r}.\end{aligned}\quad (4)$$

Запишем известные уравнения равновесия в цилиндрической системе координат:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + X_r &= 0, \\ \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} + X_\theta &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + X_z &= 0.\end{aligned}\quad (5)$$

Здесь X_r, X_θ, X_z – компоненты объемных сил. Дифференцируя выражение (3) и подставляя полученные производные в (5), получим уравнение равновесия в геликоидальных координатах:

Построенная теоретическая модель спирально-анизотропного тела предполагает наличие в каждой точке тела трех упруго-эквивалентных направлений, определяемых векторами $\vec{e}_r, \vec{e}_\xi, \vec{e}_\eta$. Так как упруго-эквивалентные направления совпадают с координатными, физически уравнения (1) в геликоидальной координатах будут содержать лишь двенадцать независимых упругих констант. В технических обозначениях эти уравнения примут вид

$$\begin{aligned}\varepsilon_r &= \frac{1}{E_r} \sigma_r - \frac{\nu_{\xi r}}{E_\xi} \sigma_\xi - \frac{\nu_{\eta r}}{E_\eta} \sigma_\eta; \quad \nu_{\xi \eta} = \frac{1}{G_{\xi \eta}} \tau_{\xi \eta}; \\ \varepsilon_\xi &= \frac{\nu_{r\xi}}{E_r} \sigma_r + \frac{1}{E_\xi} \sigma_\xi - \frac{\nu_{\eta \xi}}{E_\eta} \sigma_\eta; \quad \nu_{r\eta} = \frac{1}{G_{r\eta}} \tau_{r\eta}; \\ \varepsilon_\eta &= \frac{\nu_{r\eta}}{E_r} \sigma_r - \frac{\nu_{\xi \eta}}{E_\xi} \sigma_\xi - \frac{1}{E_\eta} \sigma_\eta; \quad \nu_{r\xi} = \frac{1}{G_{r\xi}} \tau_{r\xi}.\end{aligned}\quad (6)$$

Входящие в (6) упругие константы имеют следующий физический смысл: E_r, E_ξ, E_η – модули упругости материала соответственно в направлении осей r, ξ, η ; $G_{\xi \eta}, G_{r\eta}, G_{r\xi}$ – модули сдвига материала в указанных плоскостях; ν_{ij} , где $i, j = \{r, \xi, \eta\}$ – коэффициенты Пуассона, указывающие на величину относительного сужения материала в направлении оси i под действием растягивающей силы, совпадающей по направлению с осью j .

Во многих реальных конструкциях типа канатов, кабелей, крученых пруж направлений r и η упруго-эквивалентны, все радиальные направления в поперечном сечении тождественны в отношении упругих свойств. Этот факт накладывает на упругие константы следующие ограничения:

$$\begin{aligned}\nu_{r\xi} &= \nu_{\eta\xi} = \nu_1; \quad E_r = E_\eta = E_2; \\ \nu_{\eta r} &= \nu_{r\eta} = \nu_2; \quad E_\xi = E_1; \\ G_{\xi \eta} &= G_{r\xi} = G_1; \quad G_{r\eta} = G_2.\end{aligned}\quad (7)$$

Задача при этом существенно упрощается: в определяющих уравнениях остается лишь шесть упругих констант материала, и теперь уравнения имеют вид

$$\begin{aligned}
E_2 \varepsilon_r &= \sigma_r - \nu_1 \sigma_\xi - \nu_2 \sigma_\eta; \gamma_{\xi\eta} = \frac{1}{G_1} \tau_{\xi\eta}; \\
E_2 \varepsilon_\xi &= -\nu_1 \sigma_r - \frac{E_2}{E_2} \sigma_\xi - \nu_1 \sigma_\eta; \gamma_{r\xi} = \frac{1}{G_1} \tau_{r\xi}; \\
E_2 \varepsilon_\eta &= -\nu_1 \sigma_r - \nu_1 \sigma_\xi + \sigma_\eta; \gamma_{r\eta} = \frac{1}{G_2} \tau_{r\eta}.
\end{aligned} \tag{8}$$

Построим уравнения равновесия при осесимметричным нагружении, когда ось анизотропии Oz является силовой осью симметрии. Осесимметричность напряжения приводит к системе равенств

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial \theta} = \frac{\partial \sigma_\xi}{\partial \theta} = \frac{\partial \sigma_\eta}{\partial \theta} = \frac{\partial \tau_{\xi\eta}}{\partial \theta} = \frac{\partial \tau_{r\xi}}{\partial \theta} = \frac{\partial \tau_{r\eta}}{\partial \theta}. \tag{9}$$

Система уравнений (5) при этом принимает вид

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot (\sigma_r - \sigma_\xi \sin^2 \alpha + 2\tau_{\xi\eta} \sin \alpha \cos \alpha - \sigma_\eta \cos^2 \alpha) + \\
&+ \frac{\partial \tau_{r\xi}}{\partial z} \cos \alpha + \frac{\partial \tau_{r\eta}}{\partial z} \sin \alpha + X_r = 0; \\
&\frac{\partial \tau_{r\xi}}{\partial r} \sin \alpha - \frac{\partial \tau_{r\eta}}{\partial r} \cos \alpha + \frac{\tau_{r\xi}}{r} (2 \sin \alpha + kr \cos^3 \alpha) - \frac{\tau_{r\xi}}{r} (2 \cos \alpha - kr \sin^2 \alpha) + \\
&+ \left(\frac{\partial \sigma_\xi}{\partial z} - \frac{\partial \sigma_\eta}{\partial z} \right) \sin \alpha \cos \alpha + \frac{\partial \tau_{r\eta}}{\partial z} (\sin^2 \alpha - \cos^2 \alpha) + X_\xi \sin \alpha - X_\eta \cos \alpha = 0;
\end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial \sigma_\xi}{\partial z} \cos^2 \alpha + 2 \frac{\partial \tau_{\xi\eta}}{\partial z} \sin \alpha \cos \alpha + \frac{\partial \sigma_\eta}{\partial z} \sin^2 \alpha + \frac{\partial \tau_{r\xi}}{\partial r} \cos \alpha + \frac{\partial \tau_{r\eta}}{\partial r} \sin \alpha + \\
&+ \frac{\tau_{r\xi} \cos \alpha}{r} (1 - kr \sin \alpha \cos \alpha) + \frac{\tau_{r\eta}}{r} (\sin \alpha + kr \cos^3 \alpha) + X_\xi \cos \alpha + X_\eta \sin \alpha.
\end{aligned}$$

Принимая, что напряжения не меняются вдоль оси симметрии, получаем

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial z} = \frac{\partial \sigma_\xi}{\partial z} = \frac{\partial \sigma_\eta}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{\xi\eta}}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{r\xi}}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{r\eta}}{\partial z} = 0. \tag{11}$$

При этом, учитывая доказанную Херлом и Конопасеком пренебрежимую малость по сравнению с остальными компонентами тензора напряжений касательных напряжений $\tau_{r\xi}$ и $\tau_{r\eta}$, можно записать [2]:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} (\sigma_r - \sigma_\xi \sin^2 \alpha + 2\tau_{\xi\eta} \sin \alpha - \sigma_\eta \cos^2 \alpha) = 0. \tag{12}$$

Рассмотрим круговой цилиндр радиуса R из спирально-анизотропного материала с показателем анизотропии k , находящийся в равновесии в условиях осесимметричного нагружения, когда ось цилиндра совпадает с силовой осью симметрии. Будем считать, что длина цилиндра достаточно велика для выполнения принципа Сен-Венана. Запишем граничные условия:

$$\begin{aligned}
u_r |_{r=0} &= 0, \\
\sigma_r |_{r=R} &= 0.
\end{aligned} \tag{13}$$

Эти условия означают, что радиальные перемещения точек, лежащих на оси цилиндра, отсутствуют, и боковая поверхность цилиндра свободна от нагрузок.

Считая $\tau_{r\xi} = \tau_{r\eta} = 0$, из (9) получаем $\gamma_{r\xi} = \gamma_{r\eta} = 0$, а в силу соотношений (4) $\gamma_{rz} = \gamma_{r\theta} = 0$.

Учет осесимметричности дает:

$$\frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} = \frac{\partial u_r}{\partial \theta} = \frac{\partial u_z}{\partial \theta} = \frac{\partial u_z}{\partial r} = \frac{\partial u_r}{\partial z} = 0. \quad (14)$$

Тогда последнее из соотношений (4) сформирует равенство

$$r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - u_\theta = 0, \quad (15)$$

интегрируя которое, получим

$$u_\theta = Cr. \quad (16)$$

Тогда соотношения (4) примут вид

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{\partial u_r}{\partial r}, \quad \varepsilon_\theta = \frac{u_r}{r}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}, \\ \gamma_{r\theta} &= \gamma_{rz} = 0, \quad \gamma_{\theta z} = \frac{\partial(Cr)}{\partial z}. \end{aligned} \quad (17)$$

В зависимости от того, каким принять коэффициент C , будем различать задачи:

- стесненное растяжение при $C = \text{const}$ и, следовательно,

$$\gamma_{\theta z} = 0; \quad (18)$$

- свободное растяжение при $C = \theta z$ и, следовательно,

$$\gamma_{\theta z} = \theta z. \quad (19)$$

Рассмотрим более общий случай свободного растяжения. Соответствующие компоненты (18) в геликоидальной системе координат тогда имеют вид

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{\partial u_r}{\partial r}; \quad \gamma_{r\xi} = 0; \quad \gamma_{r\eta} = 0; \\ \varepsilon_\xi &= e \cos^2 \alpha + \frac{u_r}{r} \sin^2 \alpha + \theta \sin^2 \alpha; \\ \varepsilon_\eta &= e \sin^2 \alpha + \frac{u_r}{r} \cos^2 \alpha - \theta \sin^2 \alpha; \\ \gamma_{\xi\eta} &= 2 \left(e - \frac{u_r}{r} \right) \sin \alpha \cos \alpha + \theta \tan \alpha (\sin^2 \alpha - \cos^2 \alpha). \end{aligned} \quad (20)$$

При малых деформациях реальные конструкции типа кабелей практически не меняют своего объема, т.е. выполняется условие

$$\varepsilon_r + \varepsilon_\xi + \varepsilon_\eta = 0. \quad (21)$$

Физические уравнения, связывающие напряжения с деформациями, при этом условии приобретают вид

$$\begin{aligned} 2E_1 \nu_1 \varepsilon_r &= \sigma_r - \nu_1 \sigma_\xi - (1 - \nu_1) \sigma_\eta, \\ 2E_1 \nu_1 \varepsilon_\xi &= -\sigma_r + 2\sigma_\xi - \sigma_\eta, \\ 2E_1 \nu_1 \varepsilon_\eta &= -(1 - \nu_1) \sigma_r - \nu_1 \sigma_\xi + \sigma_\eta, \\ \gamma_{\xi\eta} &= \frac{1}{G_1} \tau_{\xi\eta}. \end{aligned} \quad (22)$$

Здесь в силу условия (21)

$$\frac{1}{2} \frac{E_2}{E_1} = \nu_1 = 1 - \nu_2. \quad (23)$$

Рассматривая совместно (20) и (22) и исключив из последних деформации, получаем, что

$$\begin{aligned}\sigma_{\xi} - \sigma_r &= E_1 \left[\left(1 - 3 \frac{1 - \nu_1}{2 - \nu_1} \sin^2 \alpha \right) e + 2\theta \frac{1 - \nu_1}{2 - \nu_1} \sin^2 \alpha \right]; \\ \sigma_{\eta} - \sigma_r &= E_1 \frac{\nu_1}{2 - \nu_1} (3e - 2\theta) \sin^2 \alpha; \\ \tau_{\xi\eta} &= -G_1 \sin \alpha \left[-3e + (1 - \tan^2 \alpha) \theta \right]\end{aligned}\tag{24}$$

Подставляя полученные выражения в уравнение равновесия (14), сведем задачу к решению одного обыкновенного дифференциального уравнения относительно α :

$$\begin{aligned}\frac{ctg\alpha}{E_1} \frac{d\sigma_r}{d\alpha} &= \left[\frac{3}{2 - \nu_1} (1 + \cos^2 \alpha) - 2 - \frac{6G_1}{E_1} \cos^2 \alpha \right] e + \\ &+ \left[2 - \frac{2}{2 - \nu_1} (1 + \cos^2 \alpha) + \frac{2G_1}{E_1} (2 \cos^2 \alpha - 1) \right] \theta.\end{aligned}\tag{25}$$

Интегрируя это уравнение с учетом граничного условия, получим

$$\begin{aligned}\frac{\sigma_r}{E_1} &= \left[\left(\frac{3}{2 - \nu_1} - 2 \right) \ln \frac{\sec \alpha}{\sec \alpha_0} - \frac{3}{2} \left(\frac{1}{2 - \nu_1} - m \right) (\cos^2 \alpha - \cos^2 \alpha_0) \right] e + \\ &+ \left[\left(2 \frac{1 - \nu_1}{2 - \nu_1} - m \right) \ln \frac{\sec \alpha}{\sec \alpha_0} + \left(\frac{1}{2 - \nu_1} - m \right) (\cos^2 \alpha - \cos^2 \alpha_0) \right] \theta;\end{aligned}\tag{26}$$

где $m = \frac{2G_1}{E_1}$. Полученное выражение выражает зависимость радиального напряжения

σ_r от относительного удлинения вдоль оси z – e , физических констант материала E_1, ν_1 и G_1 , относительного угла закручивания вокруг оси z – θ и геометрических параметров скрутки, определяемых углом наклона к оси анизотропии упруго-эквивалентных спиралей, образующих поверхностный слой стержня α_0 .

Для получения зависимостей внешних силовых факторов от угла наклона α_0 воспользуемся известными формулами:

$$\begin{aligned}P &= \int_F \sigma_z dF, \\ M_t &= \int_F \tau_{\theta z} r dF.\end{aligned}\tag{27}$$

Переходя под интегралами к переменной α , получим

$$\begin{aligned}P &= \frac{2\pi}{k^2} \int_0^{\alpha_0} \sigma_z \tan^2 \alpha \frac{1}{\cos^2 \alpha} d\alpha, \\ M_t &= \frac{2\pi}{k^3} \int_0^{\alpha_0} \tau_{\theta z} \tan^2 \alpha \frac{1}{\cos^2 \alpha} d\alpha.\end{aligned}\tag{28}$$

Интегрирование этих выражений приводит к следующим зависимостям:

$$\begin{aligned}\frac{P}{\pi R^2 E_1^*} &= A_{11} e + A_{12} \theta, \\ \frac{M_t}{\pi R^3 E_1^*} &= A_{21} e + A_{22} \theta.\end{aligned}\tag{29}$$

где

$$\begin{aligned}
A_{11} &= 1 - 3f_1(\alpha_0) - 9f_2(\alpha_0), \\
A_{12} &= A_{21} = f_1(\alpha_0) + 6f_2(\alpha_0), \\
A_{22} &= \frac{1}{4}m^* \tan^2 \alpha_0 - 4f_2(\alpha_0), \\
f_1(\alpha_0) &= \left(1 - \frac{3}{2}m^*\right) \left(1 - 2ctg^2 \alpha_0 \ln \sec \alpha_0\right), \\
f_2(\alpha_0) &= \left(\frac{1}{2-v_1^*} - m^*\right) \left(\frac{1}{2} \sin^2 \alpha_0 - 1 + 2ctg^2 \alpha_0 \ln \sec \alpha_0\right).
\end{aligned}
\tag{30}$$

Решая полученную систему уравнений, можно получить зависимости деформаций от внешних нагрузок. На рис. 1 представлена зависимость продольного удлинения стержня от приложенной растягивающей силы и от угла скрутки. Полученный график демонстрирует ярко выраженную зависимость деформаций, возникающих в стержне от угла скрутки волокон, составляющих стержней.

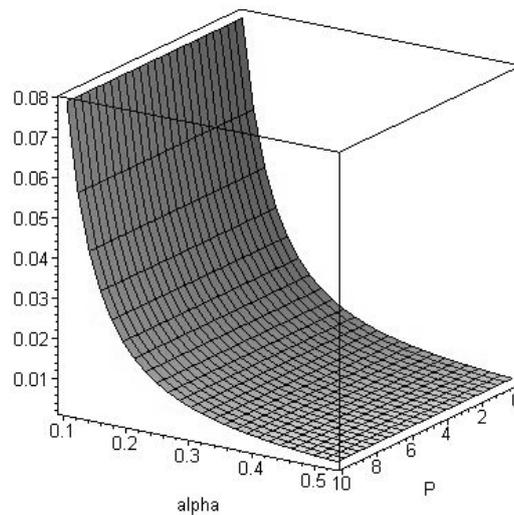


Рис. 1. Зависимость продольного удлинения стержня от приложенной растягивающей силы и от угла скрутки

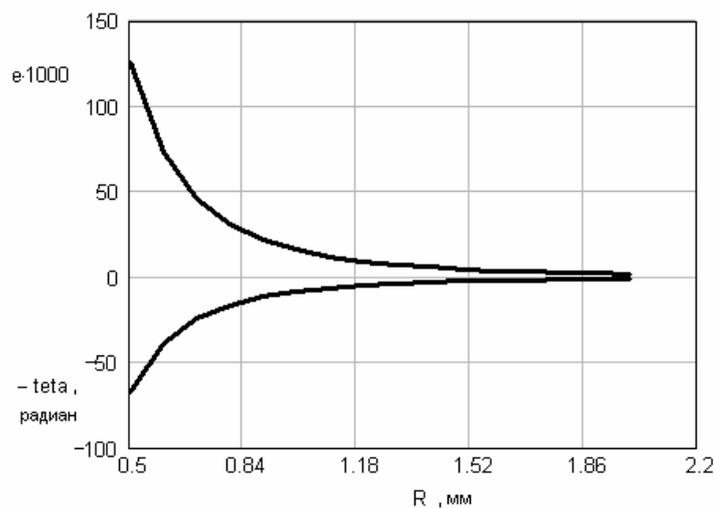


Рис. 2. Зависимость относительных удлинений стержня и углов поворотов сечений от радиуса стержня при нагрузке $P = 10 \text{ Н}$ и $M = 10 \text{ Н} \cdot \text{мм}$ при учете анизотропии материала

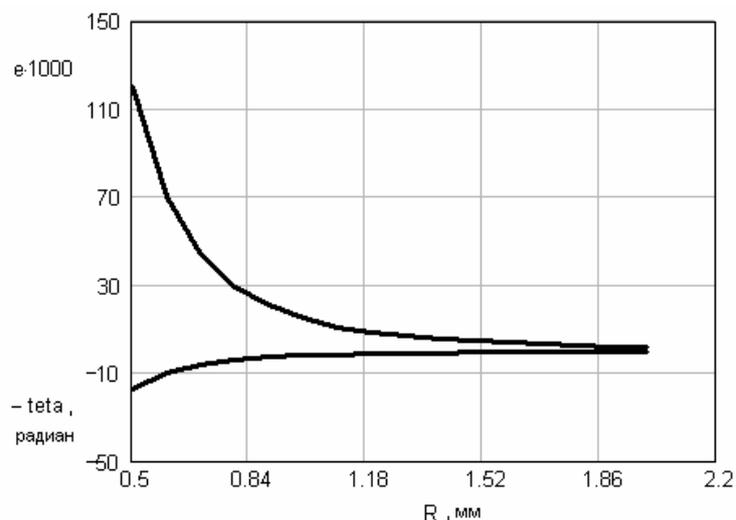


Рис. 3. Зависимость относительных удлинений стержня и углов поворотов сечений от радиуса стержня при нагрузке $P = 10$ Н и $M = 10$ Н·мм без учета анизотропии материала

На рис. 2 и рис. 3 представлены зависимости относительных удлинений стержня и углов поворотов сечений от радиуса стержня при нагрузке $P = 10$ Н и $M = 10$ Н·мм в случае наличия и отсутствия учета анизотропии материала. Легко заметить, что учет имеющейся анизотропии материала приводит к выявлению дополнительных деформаций, которые при анализе вещества как изотропного не могут быть обнаружены.

Также видно, что погрешность, связанная с неправильным выбором модели, уменьшается с увеличением угла закрутки стержня. Из сопоставления рис. 2 и рис. 3 видно, что удлинение при изотропном однородном стержне больше, чем во второй модели, которая не учитывает кручение стержня. Изотропный стержень растягивается больше, чем анизотропный. Современные приборы должны иметь погрешность до 0,5 %, а показанный опыт продемонстрировал, что при неправильном выборе модели ошибки могут достигать 1,8 %, что недопустимо для высокоточных приборов. Поэтому, чтобы обеспечить заданную точность, нужно учитывать как растяжение стержня, так и его кручение.

Литература

1. Мусалимов В.М. Механика деформируемого кабеля. СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. С. 8–64.
2. Hearl J.W.S. and Konopasek M. On unified approaches to twisted yarn mechanics. // Appl. Polym. Symp. 1975. №27. P. 255–273.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРАВЛЯЮЩИХ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ С УПРУГИМ ТРЕНИЕМ НА ПРИМЕРЕ ДВОЙНОГО УПРУГОГО ПАРАЛЛЕЛОГРАММА

А.А. Аветисян, В.Ю. Дайнеко

Научный руководитель – кандидат технических наук, профессор В.В. Биндюк

В работе описывается двойной упругий параллелограмм последовательного действия со следящей кинематической связью. Приводится сравнение данного устройства с другими упругими кинематическими устройствами. Проведен конструктивный анализ устройства.

Введение

В точном приборостроении, измерительной и вычислительной технике особое место занимают разнообразные упругие кинематические устройства (УКУ) [1]: упругие направляющие, упругие передаточные механизмы, гибкие связи. Особо широкое применение УКУ находят в прецизионных средствах линейных измерений: измерительных головках, преобразователях, прецизионных приборах, контрольных автоматах. На основе УКУ построены разнообразные высокоточные измерительные механизмы.

Нужно отметить, что подход к УКУ только как к деталям приборов не позволяет учитывать и эффективно использовать их функциональные особенности, а также не способствует установлению единой терминологии для всех типов кинематических устройств. Такая точка зрения, в частности, приводила к тому, что до последнего времени кинематика УКУ рассматривалась весьма ограниченно и односторонне.

Таким образом, задачи, которые приходится рассматривать при использовании УКУ в точных механизмах, не ограничиваются вопросами упругости и сопротивления материалов, но требуют также кинематического и точностного анализов. Необходимость такого комплексного подхода обусловила целесообразность выделения УКУ в отдельную специализированную группу устройств.

Широкое применение упругих кинематических устройств в машинах и, особенно, в приборах объясняется их существенными достоинствами: надежностью, долговечностью, автономностью в работе, отсутствием внешнего трения, люфтов и износа, технологичностью и т.д. Вместе с тем понятно, что используемая в УКУ часть деформации у реальных материалов весьма ограничена. Поэтому для достижения максимального технико-экономического эффекта необходимы глубокие знания специфики построения УКУ и рациональных условий их применения.

При практической реализации УКУ большое внимание приходится уделять свойствам упругих материалов и технологии их изготовления, так как от этого существенным образом зависит как точность, так и, особенно, надежность их работы. Углублению исследований в этой области способствует развитие физики металлов, создание моделей деформации упруго-вязко-пластического тела.

Основная часть

Упругие кинематические устройства по назначению можно разделить на ряд типов. Упругие направляющие делятся на направляющие поступательного и вращательного движения. Упругие передаточные механизмы можно разделить на плоские и пространственные.

К упругим связям относятся так называемые гибкие связи и упругие муфты. Особую группу составляют компенсаторы – силовые и кинематические.

Упругие направляющие поступательного движения предназначены для обеспечения поступательного движения направляемого подвижного, обычно жесткого, звена (ползуна) относительно стойки.

В качестве упругих направляющих для поступательного движения применяются ленточные устройства, пластины, мембраны и сильфоны. При этом характерными являются устройства типа параллелограмма с упругими лентами и квазипараллелограммы с пластинами, мембранами и сильфонами.

Для сообщения направляемому ползуну движения, близкого к прямолинейному, используются двойные упругие параллелограммы (рис. 1, б).

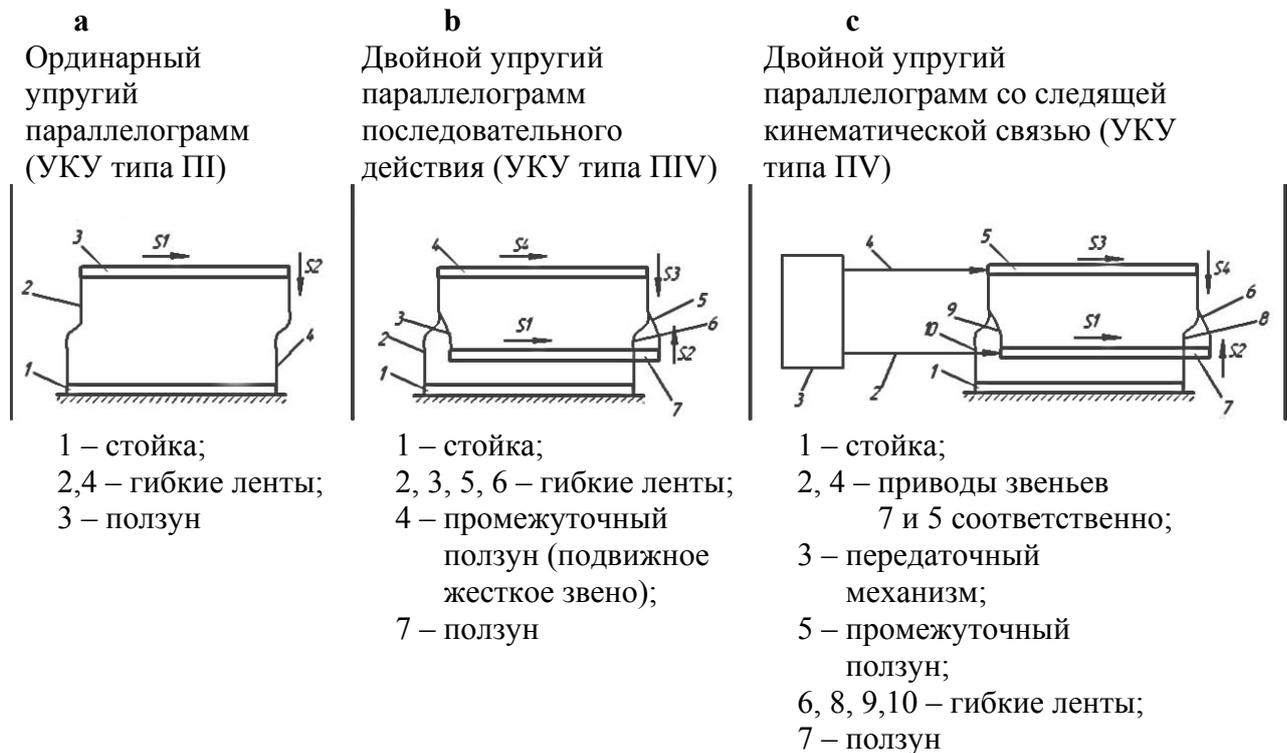


Рис. 1. Упругие направляющие поступательного движения

В этом случае паразитное перемещение подвижного звена (ползуна) 7 в направлении S_2 может быть сделано достаточно малым при значительном рабочем перемещении в направлении S_1 . Направляющая состоит из стойки 1, гибких лент 2, 3, 5, 6; ползуна 7 и промежуточного ползуна – подвижного жесткого звена 4. Таким образом, УКУ типа IIIV состоит из двух последовательно действующих ординарных упругих параллелограммов (рис. 1-а). Двойные упругие параллелограммы практически используются для направления звена 7 при перемещении S_1 до 100 мм [1] по траектории, близкой к прямой, так как его абсолютное перемещение в направлении S_2 складывается из переносного движения S_3 промежуточного звена 4 и противоположного по знаку перемещения S_5 каретки 7 относительно звена 4, т. е.

$$|S_2| = |S_3 + S_5| < |S_3|.$$

Сделать величины S_3 и S_5 равными по модулю обычно не удастся вследствие различных условий продольного нагружения соответствующих упругих элементов. Промежуточное звено 4 также перемещается. Его движение поступательное, но менее близкое к прямолинейному. Двойные упругие параллелограммы применены для направления движения сканирующих зеркал в интерферометрах и спектрометрах.

Предметом нашего исследования является двойной упругий параллелограмм со следящей кинематической связью 3. Она связывает перемещение S_1 подвижной каретки 7 и перемещение S_3 промежуточного подвижного звена 5. Дополнительной следящей кинематической связью принудительно компенсируется разность условий нагружения упругих звеньев, составляющих двойной параллелограмм.

УКУ типа ПУ (рис. 1, с) состоит из стойки 1, гибких лент 6, 8, 9 и 10, привода 2 подвижного звена 7, привода 4 промежуточного подвижного звена 5. Приводы 2 и 4 кинематически связаны между собой при помощи передачи 3 так, чтобы выдерживалось определенное соотношение между перемещениями S_1 и S_3 , обеспечивающее соблюдение условия

$$|S_2| = |S_4 + S_5| \approx 0,$$

Конструктивное оформление следящей передачи 3 и приводов 2 и 4 может быть разнообразным. На рис. 2 представлен общий вид двойного упругого параллелограмма со следящей кинематической связью.

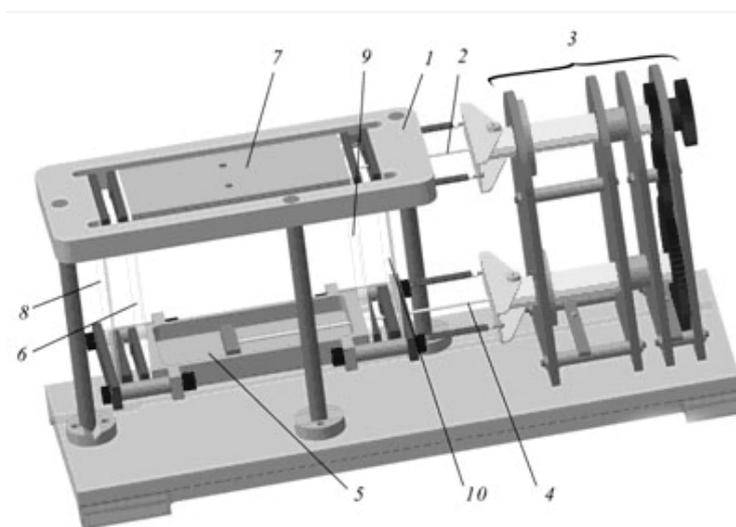


Рис. 2. Общий вид двойного упругого параллелограмма со следящей кинематической связью

В нашем случае используется рядовой зубчатый передаточный механизм с микровинтами [2], основными достоинствами которого являются высокий КПД, надежность работы, а также возможность высокоточного изготовления.

Для работы ленточных направляющих большое значение имеют способы крепления лент, качество присоединительных поверхностей на подвижных звеньях, стойках, накладках. К крепежным элементам лент предъявляются следующие требования: надежность крепления ленты, обеспечивающая длительное постоянство эксплуатационных параметров УКУ, защемление ленты в заделке по всей ее ширине, постоянство положения линий и точек контакта ленты с жесткими звеньями УКУ в процессе деформации, а в ряде случаев удобство замены лент.

В исследуемом нами приборе крепление произведено методом, указанным на рис. 3, а. Также приемлемым является защемление, изображенное на рис. 3, б. Таким образом, обеспечивается постоянство положения линии контакта ленты с жестким звеном при изгибе ленты в любом направлении (по или против часовой стрелки). Однако при таком исполнении линия контакта жестких звеньев 1 и 3 на краю заделки с изгибающейся в направлении стрелок лентой 2 изменяет свое положение в процессе деформации, а следовательно, изменяется и свободная длина упругой линии ленты, что может вызвать искажение кинематического поведения УКУ.

На основании принципа Сен-Венана [3, стр.29] можно сформулировать необходимые качественные требования к заделкам лент в УКУ: допускаемые линейные отклонения Δl , границ жестких элементов заделки (стоек и наладок) по форме (непрямолинейность) и взаимному расположению (непараллельность, неперпендикулярность к оси ленты) должны удовлетворять неравенству $\frac{\Delta l}{L} \ll 1$, где L – высота рабочих участков упругих лент.

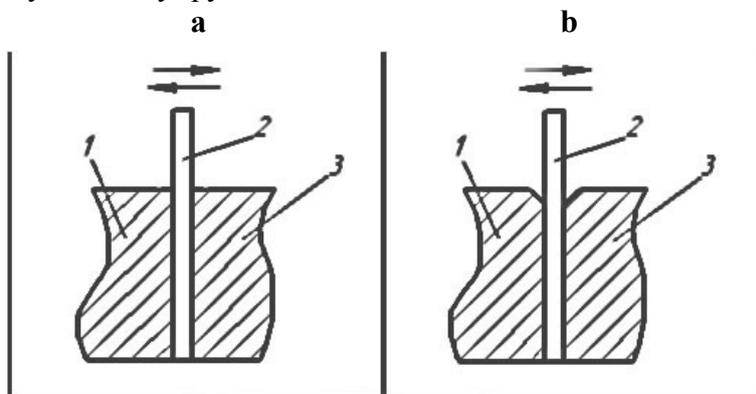


Рис. 3. Способы заземления упругой ленты: 1, 3 – жесткие звенья; 2 – упругая лента

Наиболее широко в приборостроении при невысоких требованиях к заделке ленты применяется крепление плоскими накладками и накладками со штифтами. Иногда ошибочно полагают, что штифты обеспечивают лучшую фиксацию ленты. На самом деле штифтами фиксируют положение накладок относительно базы крепления, в результате чего повышается надежность и точность их крепления, а также облегчаются операции качественной сборки при смене лент. Отверстия же под штифты в лентах вырубаются при ее штамповке и имеют диаметр заведомо больший, чем диаметр штифта. Накладка обычно крепится винтами. В исследуемом нами механизме накладка крепится винтами, для фиксации лент используются штифты.

Экспериментальная проверка жесткостных характеристик в направлении рабочего движения у двойных упругих параллелограммов (УКУ типа ПИУ) [1] обнаружила отклонение от линейности при $\frac{S_1}{L} > 0.25$ вместо ожидаемого теоретического значения этого соотношения 0,4. Даже при тщательной сборке и малой массе каретки только в исключительных случаях можно достичь прямолинейного движения при перемещении, соответствующем $\frac{S_1}{L} = 0.4$. Как правило, на значительно меньших перемещениях появляются существенные отклонения от прямолинейной траектории.

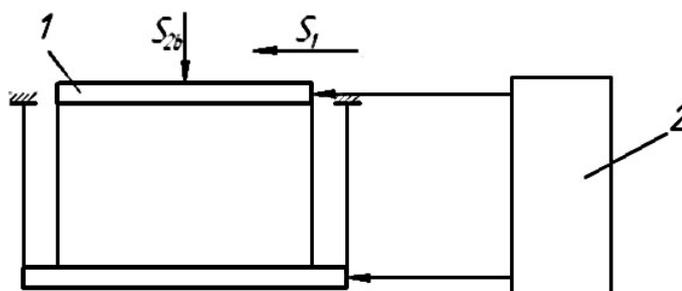


Рис. 4. Двойной упругий параллелограмм с дополнительной связью: 1 – каретка, движущаяся прямолинейно; 2 – передаточный механизм

Существенно ближе к прямолинейной траектория каретки 1 представленного на рис. 4 упругого кинематического устройства.

При равном перемещении S_1 смещение S_{2b} можно сделать значительно меньше соответствующего смещения S_2 каретки в УКУ типа ПIV за счет установки нужного передаточного отношения i дополнительной кинематической связи. В исследуемом нами устройстве $i = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{80}{40} = 2$. Передача является понижающей, так как частота

вращения ведомого вала меньше частоты вращения ведущего вала.

Важной задачей проектирования данного устройства был выбор пластифицированного стекла в качестве исходного материала для упругих элементов. Основными преимуществами пластифицированного стекла [4] являются сочетание легкости (в 2 раза легче силикатных стекол), прочности (по прочности на изгиб превосходит силикатное стекло в 7 раз) и жесткости, а также исключительная стойкость против атмосферного старения.

В любом исполнении характер движения подвижной каретки УКУ типа ПIV все же существенно зависит от условий нагружения, хотя и в меньшей степени, чем у ординарного пружинного параллелограмма. Угол перекоса каретки УКУ типа ПIV близок к нулю, и его значение существенно зависит от качества сборки направляющей.

При сравнении двойного пружинного параллелограмма с дополнительной кинематической связью (УКУ типа ПIV) при ее передаточном отношении $i = 2$ и УКУ типа ПIV можно заметить, что первое устройство лучше обеспечивает прямолинейность траектории направляемого звена. Предел отношения отклонений S_{2b} и S_2 от прямой у этих устройств равен [1]

$$\lim_{b \rightarrow 0} \left(\frac{S_{2b}}{S_2} \right) = 85; \quad (b = \left(\frac{Q_x \cdot L^2}{p^2 \cdot H} \right); H = E \cdot J).$$

Конструктивно УКУ типа ПIV сложнее устройства ПIV. В исследуемом УКУ с указанным отношением дополнительной кинематической связи перемещение основной каретки в 2 раза больше перемещения вспомогательной.

Заключение

Упругие кинематические устройства не являются новинкой для приборостроения и машиностроения. Тем не менее, к настоящему времени далеко не все их возможности эффективно используются. Постоянное повышение требований к точности и надежности элементов механики, взаимодействующих с соответствующими радиоэлектронными, радиоизотопными и другими измерительными преобразователями, приводит к дальнейшему расширению области применения УКУ, выгодно отличающихся от механизмов с жесткими звеньями.

В технике линейных измерений УКУ позволяют построить преобразователи с ценой деления до сотых и даже тысячных долей микрона. Ограничение точности измерения здесь практически связано с отсутствием эффективных методов компенсации дополнительных погрешностей от действия внешних условий на измерительную систему. Такие методы требуют дальнейшей разработки. Для автоматизации средств линейных измерений в определенных случаях возможно использование тензометрического эффекта, сопровождающего деформацию звеньев УКУ.

Зависимости и характеристики движения, полученные для макроперемещения каретки исследуемого нами устройства, можно применить и при исследовании

микродвижений, что, безусловно, является одним из самых актуальных направлений современной прецизионной механики.

Литература

1. Цейтлин Я.М. Упругие кинематические устройства. Л.: Машиностроение, 1972. 295 с.
2. Иосилевич Г.Б. Детали машин. М.: Машиностроение, 1988. 367 с.
3. Биргер И.А., Пановко Я.М. Прочность. Устойчивость. Колебания. Том 1. / Справочник в 3-х томах. М.: Машиностроение, 1968. 831 с.
4. Ржевская С.В. Материаловедение. М.: Логос, 2004. 380 с.
5. Биндюк В.В. Средства измерения жесткости сечений при изгибе упругих микроэлементов прецизионных устройств // Изв. вузов. Приборостроение. 1984. Т. XXVII. №2.

ТРИБОЛОГИЧЕСКАЯ ПАРА КАК ОБЪЕКТ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

М.А. Сапожков

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор В. М. Мусалимов

В статье рассматривается построение управления системы в условиях неполной информации, в связи с чем используется концептуально новый подход к управлению, мониторингу трибологических процессов на установке ТРИБАЛ-2 и обработке полученных данных.

Введение

Студентами и аспирантами УИТМО была собрана установка ТРИБАЛ-2, работа которой основывается на применении компьютерных и мехатронных технологий [1]. Эта установка постоянно совершенствуется, в ходе чего, в последнее время были разработаны средства и методы модельных исследований процессов циклического изнашивания в реальном режиме времени с использованием мехатронных технологий, когда в процессе лабораторных испытаний трибологическая система идентифицируется при заданных сигналах. Принципиальная схема установки ТРИБАЛ-2 представлена на рис. 1. К настоящему времени назрела проблема автоматического управления трибологическим процессом.

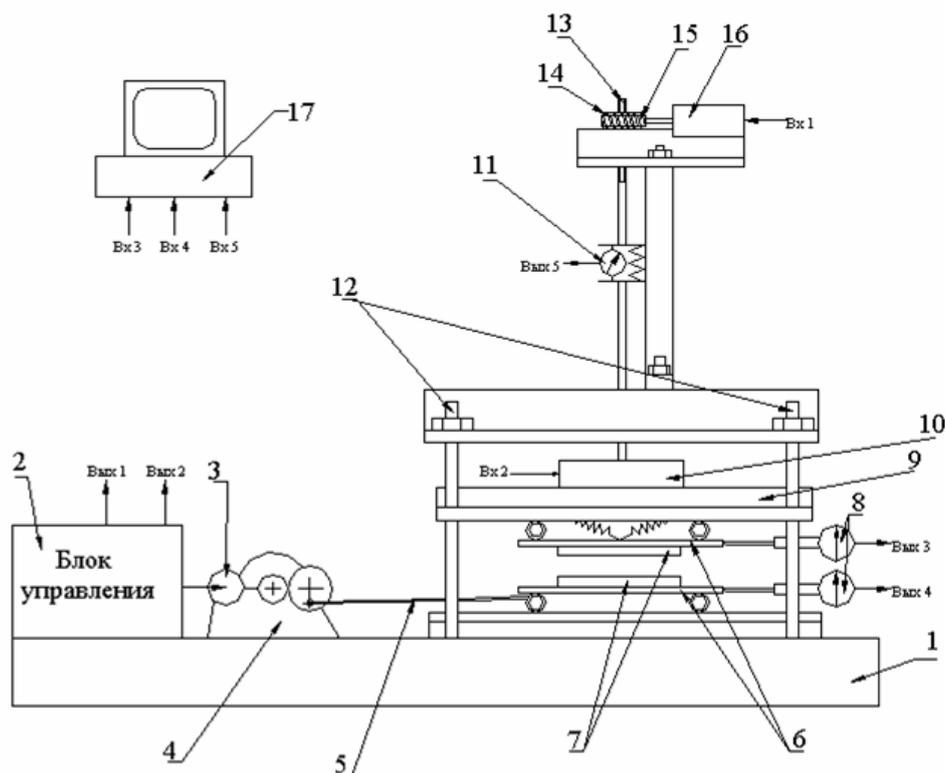


Рис. 1. Установка ТРИБАЛ-2

Узел трения как объект управления

Описываемая трибологическая система имеет следующие технические характеристики:

- в системе привода двигатель с повышающим редуктором может приводить нижнюю платформу в возвратно-поступательное движение с частотой $f = 2,19-4,77$ Гц и амплитудой $l = 0,1-28$ мм;

- система нагружения позволяет перемещать винтовой домкрат на расстояние до 33 мм со скоростью 2,5 мм/сек и нагружать трибопару до «жесткого нагружения»;
- сигналы с опто-механических датчиков, присоединенных к верхней и нижней платформам, поступают в ЭВМ со специальным программным обеспечением, где можно как наблюдать в реальном времени за сигналами, так и записывать сигналы и обрабатывать их в различных прикладных программах, в том числе MatLab [3].

Три режима работы описываемой установки реализуют оценочную базу для действий автоматической системы управления нагружением.

- **Режим полного отсутствия трения ($F_{тр}=0$).** Образец, лежащий на платформе, движется, не касаясь контробразца (см. рис. 2, а). Графики горизонтальных перемещений во времени этого режима представлены ниже (см. рис. 2, б). Продукты изнашивания здесь отсутствуют.

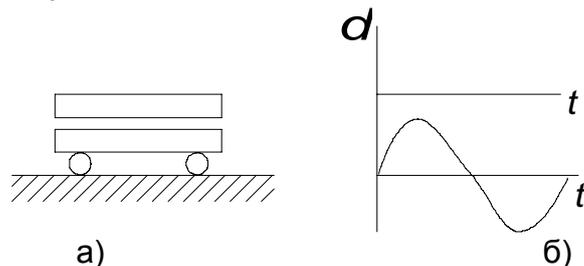


Рис. 2. Режим – отсутствие трения (δ – перемещение, t – время)

- **Режим жесткого тела.** Усилие, действующее на верхнюю платформу, таково, что образец и контробразец движутся как одно целое, без сдвига фаз (см. рис. 3, а). В данном случае график горизонтальных перемещений выглядит иначе (рис. 3, б). Из графика видно, что отсутствует сдвиг фаз, а, следовательно, образцы движутся одновременно.

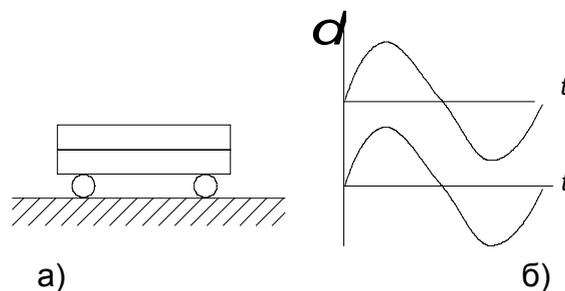


Рис. 3. Режим – жесткое тело (δ – перемещение, t – время)

- **Режим, представленный на рис. 4, а.** При работе установки в этом режиме образцы перемещаются относительно друг друга. При исследовании графиков горизонтального перемещения этого режима наблюдается сдвиг фаз сигналов перемещений (см. рис. 4, б). Сдвиг фаз означает что существует «проскальзывание» одного образца относительно другого при трибологическом взаимодействии.

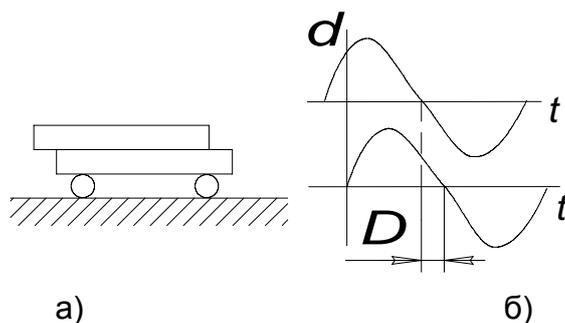


Рис. 4. Режим – трение (δ – перемещение, t – время, Δ – разность фаз)

Автоматическое управление узлом трения

В дипломной работе Васильевой М. (2003 г.) был рассмотрен метод нагружения установки «Трибал» термоприводом, обеспечивающий движение контробразцов в режиме трения скольжения (сдвиг фаз). Термопривод обеспечивал нагружение трибопар таким образом, чтобы был реализован режим трения скольжения. При этом величина сдвига фаз $\Delta\varphi$ на этом этапе исследования не рассматривалась – лишь бы этот сдвиг был осуществлен. Дополнительные исследования динамики трибометрического взаимодействия [3] показали, что возможно уменьшение или увеличение величины $\Delta\varphi$ за счет увеличения или уменьшения нагрузочного усилия, что должно приводить к разным качественным характеристикам формирования класса шероховатости поверхностей взаимодействующих трибопар и может служить базой автоматизации процесса обработки поверхностей.

В настоящее время общепринятой можно считать концепцию автоматического – «адаптивного» управления как управления в условиях неполной (априорной, текущей) информации о моделях объекта и учитываемых воздействий внешней среды на систему. Рядом специалистов такая ситуация характеризуется термином «немоделируемая динамика». Адаптивность как свойство в этом случае означает способность удерживать поведение реальной системы управления в каком-нибудь смысле близким к желаемому, как бы ни изменялись неконтролируемым образом динамика объекта и воздействие внешней среды.

Использование принципов подобного управления позволило построить систему в соответствии с предъявляемыми требованиями к ее качеству при ограниченной начальной (априорной) информации о свойствах объекта управления и внешних воздействиях. При исследовании динамики узла трения естественно используются понятия передаточной функции и частотной характеристики, которые характеризуют свойства объекта регулирования в области комплексного переменного в частотной области.

Узел трения совместно с системой стабилизации образует замкнутую систему автоматического регулирования. В качестве входного сигнала в блок стабилизации $\beta(t)$ принята разность фаз между сигналом датчика перемещений нижней платформы «Трибала» и сигналом датчика его верхней платформы. Этот сигнал проходит через все звенья блока стабилизации и поступает на вход исполнительного органа системы нагружения (двигатель). Отношение изображений по Лапласу $\delta(s)$ и $\beta(s)$ при нулевых начальных условиях, как известно, принято называть передаточной функцией автомата стабилизации

$$\delta(s) / \beta(s) = W_{AC}(s).$$

Поступающий на вход узла трения сигнал $\delta(s)$, в свою очередь, определяет величину $\beta(s)$, отношение

$$\beta(s) / \delta(s) = W_0(s)$$

при нулевых начальных условиях носит название передаточной функции узла трения, а передаточной функцией объекта регулирования является узел трения.

Общая идея состоит в том, чтобы через определенные промежутки времени определять в трибопаре передаточные функции, сопоставлять их с качеством поверхности в эти же промежутки времени, установить закономерность изменения передаточных функций и тем самым описать особенности эволюции динамической системы. В результате мы получаем последовательность функций W_1, W_2, \dots, W_n , каждая из которых на промежутке Δt соответствует линейному дифференциальному уравнению. В целом эволюция передаточных функций реализуется как нелинейная закономерность. Таким образом, мы осуществляем «кусочно-линейную аппроксимацию» в пространстве функций W_i . Эти функции относятся к классу дробно-рациональных функций в пространстве

отображений и образуют соответствующее функциональное пространство. Блок-схема управления показана на рис. 5.

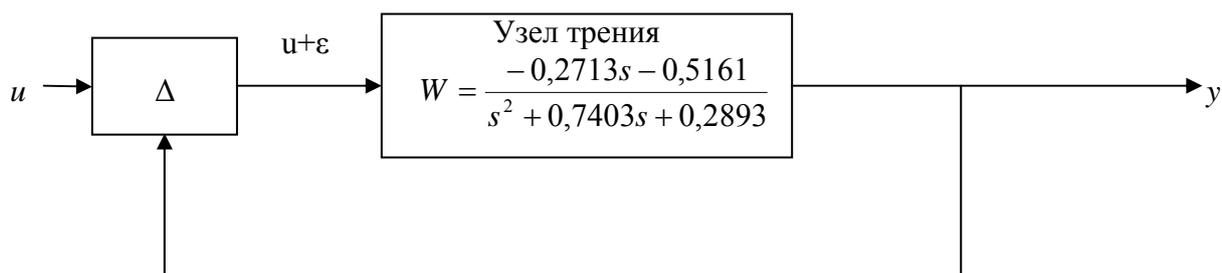


Рис. 5. Блок-схема управления установкой ТРИБАЛ-2

Заключение

К настоящему времени построена автоматическая система управления узлом нагружения установки с использованием эталонной передаточной функции, полученной в результате экспериментальных исследований работы узла трения. Таким образом, используя сдвиг фаз выходных сигналов трибопары как сигнал управления, мы реализовали управление.

Литература

1. Исмаилов Г.М., Соханов Б.В., Мусалимов В.М. Устройство для испытаний материалов на трение. / А.С. №1821689. Оpubл. в Б.И. 1993. Бюл. №22
2. Дьяконов В., Абраменкова И. MATLAB. Обработка сигналов и изображений. / Специальный справочник. СПб: Питер, 2002.
3. Musalimov V.M., Lisitsin Y.V., Orlov S.V. Dynamic Characteristics and Monitoring of Rubbing Surfaces Quality. // Institution of Problems of Mechanical Engineering, Russia 2004.
4. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1972.

ДИНАМИКА ВОЛНОВОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ГИРОСКОПА

Е.В. Логовская, А.В. Носова

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор В.М. Мусалимов

Рассмотрена расчетная схема волнового твердотельного гироскопа, построена визуальная модель динамики в пакете Simulink (MATLAB) и в пакете Mathcad. Расчеты осуществлены для случая отсутствия вращения основания – данный расчет представляет интерес с точки зрения исследования акустических свойств гироскопа.

Введение

Чувствительным элементом волнового твердотельного гироскопа (ВТГ) является тонкостенный полусферический резонатор, выполненный, например, из кварца [1]. С основанием прибора резонатор связан жестко с помощью ножки (рис. 1,а). Выделим из тела полусферического резонатора кольцо с конечной площадью поперечного сечения. Предположим, что при невращающемся основании в кольцевом резонаторе возбуждена упругая стоячая волна с номером формы колебаний k . На рис. 1,б показаны формы стоячих волн для $k=2$ и $k=3$, радиусы максимумов которых в системе координат корпуса прибора XOY расположены под углом φ_0 .

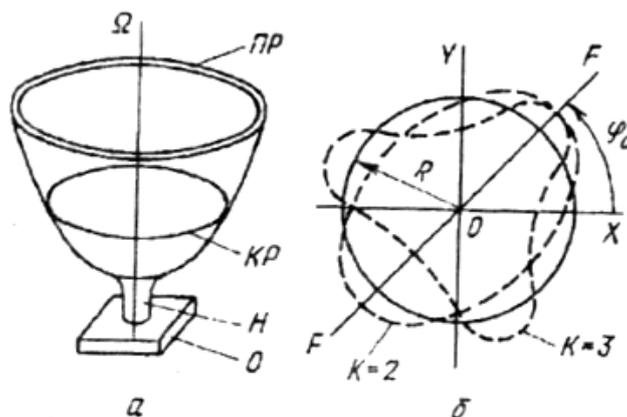


Рис. 1. Возбуждение упругой стоячей волны (а) и формы стоячих волн (б) в кольцевом резонаторе: ПР – тонкостенный полусферический резонатор; КР – кольцевой резонатор; Н – ножка (жестко связывает резонатор и основание); О – основание

Геометрия кольцевого резонатора

Приведем основные геометрические соотношения для элементов кольцевого резонатора на малом угле $\Delta\varphi$ при произвольном начальном угле φ . В недеформированном состоянии элемент резонатора представлен отрезком $\alpha\alpha_1$ (рис. 2). Координаты начала и конца этого отрезка (в системе координат корпуса XOY).

$$\begin{aligned}x &= R \cos \varphi, \\y &= R \sin \varphi, \\x_1 &= R \cos(\varphi + \Delta\varphi), \\y_1 &= R \sin(\varphi + \Delta\varphi).\end{aligned}\tag{1}$$

При наличии деформаций резонатора его элемент примет положение $\alpha'\alpha'_1$. При этом начало отрезка имеет положительные перемещения деформации по касательной и нормали к осевой линии ϑ и ω , а конец – перемещения $\vartheta + \Delta\vartheta$ и $\omega + \Delta\omega$. В этом случае

$$\begin{aligned}
\bar{x} &= R \cos \varphi - \vartheta \sin \varphi - \omega \cos \varphi, \\
\bar{y} &= R \sin \varphi + \vartheta \cos \varphi - \omega \sin \varphi, \\
\bar{x}_1 &= R \cos(\varphi + \Delta \varphi) - (\vartheta + \Delta \vartheta) \sin(\varphi + \Delta \varphi) - (\omega + \Delta \omega) \cos(\varphi + \Delta \varphi), \\
\bar{y}_1 &= R \sin(\varphi + \Delta \varphi) + (\vartheta + \Delta \vartheta) \cos(\varphi + \Delta \varphi) - (\omega + \Delta \omega) \sin(\varphi + \Delta \varphi).
\end{aligned}
\tag{2}$$

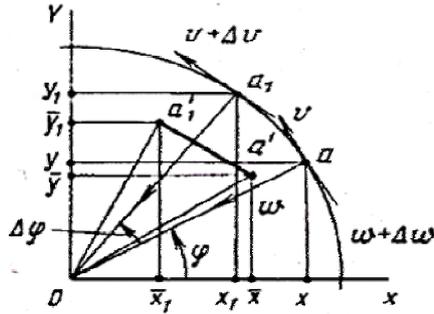


Рис. 2. Геометрические соотношения для элементов кольцевого резонатора

При деформации резонатора, происходящей в плоскости окружности его средней линии, в каждой его точке происходит поворот касательной на угол

$$Q = Q_1 + Q_2$$

или

$$Q = \frac{1}{2} \left(\vartheta + \frac{\partial \omega}{\partial \varphi} \right), \tag{3}$$

где Q_1 – поворот касательной из-за тангенциальной деформации, Q_2 – поворот касательной из-за радиальной деформации. Именно угол поворота касательной является источником образования упругого момента в поперечном сечении кольца при его деформации стоячими волнами.

Внутренняя динамика кольцевого резонатора

Внутренняя динамика кольцевого резонатора, как известно [1], описывается уравнением

$$(k^2 + 1)\ddot{\alpha} + [k^2(k^2 - 1)^2]\alpha = 0. \tag{5}$$

Рассмотрим ряд частных случаев решения уравнения (5). Это уравнение с постоянными коэффициентами, которое для начальных условий $\tau = 0, \alpha(0) = \alpha_0, \dot{\alpha}(0) = 0$ имеет решение

$$\alpha(\tau, k) = \alpha_0 \cos(v_0 \tau), \tag{6}$$

где $v_0 = \frac{k(k^2 - 1)}{\sqrt{k^2 + 1}}$ – безразмерная частота собственных упругих колебаний невращающегося резонатора. В размерном виде частота колебаний стоячей волны с номером формы k определяется как

$$\omega_{c0} = kv_0 = \frac{k(k^2 - 1) \sqrt{EI}}{\sqrt{k^2 + 1} \rho s R^4}. \tag{7}$$

В реальных конструкциях собственные частоты колебаний имеют порядок сотен герц. Так, для кольца радиусом $R=5 \cdot 10^{-2}$ м, толщиной $h=10^{-3}$ м, высотой $l=10^{-3}$ м,

$E = \frac{1}{12} l h^3$, $\rho = 2.5 \cdot 10^3 \text{ Нс}^2 / \text{м}$, $E = 7 \cdot 10^{10} \text{ Н} / \text{м}^2$, $k = 2$ получаем $\omega_{c0} = 1.64 \cdot 10^3 \frac{1}{\text{с}}$ или $\omega_{c0} = 261 \text{ Гц}$. Тогда из (6) получаем:

$$\omega(\tau, \varphi, k) = \alpha_0 \cos v_0 \tau \cos[k(\varphi - \varphi_0)]. \quad (8)$$

Из решения (8) видно, что пучности стоячих волн имеют место при углах

$$\varphi_n = \varphi_0 + \frac{2(n-1)}{k} \pi, \quad (n = 1, 2, \dots, k-1),$$

где φ_0 – начальный угол, соответствующий направлению возбуждения исходных колебаний.

Моделирование и анализ решений уравнений (6) и (8)

Ниже представлено моделирование решений уравнений (6) и (8) в приложении Simulink пакета MATLAB (рис. 3–5), а также в прикладном пакете Mathcad (рис. 6, 7).

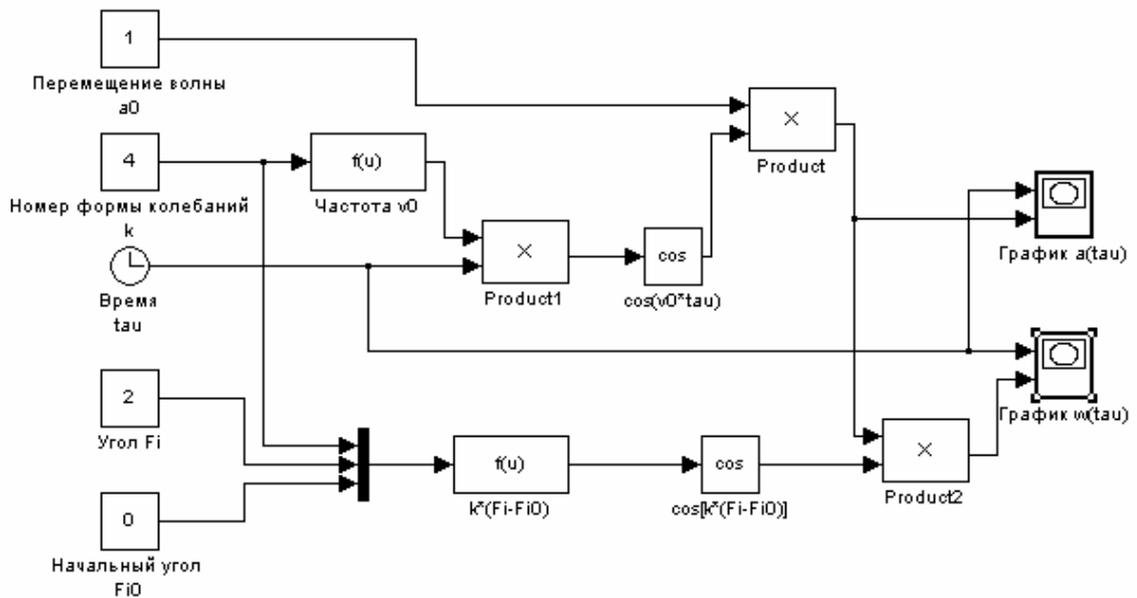


Рис. 3. Схема решения

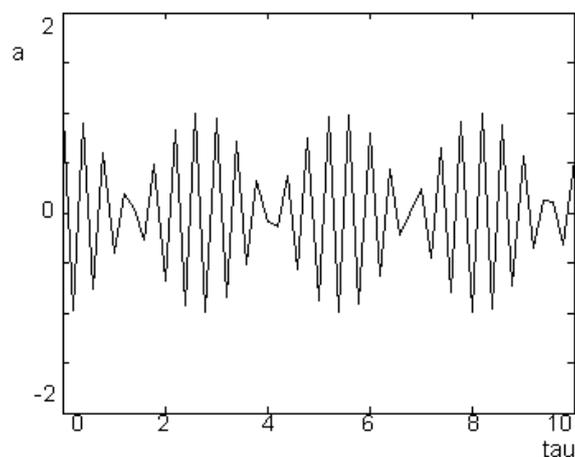


Рис. 4. Амплитуда стоячей волны в радиальном направлении в функции от времени $a(\tau)$ при $k=4$

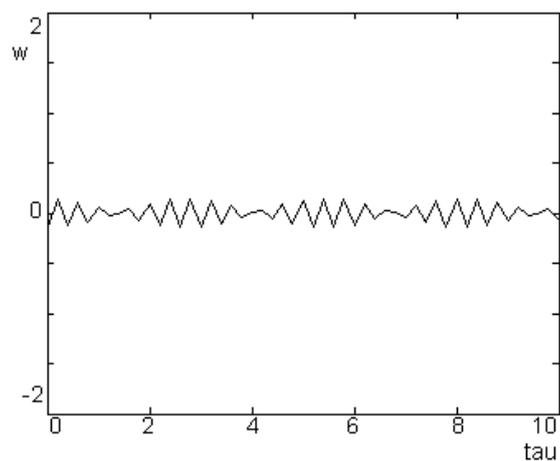


Рис. 5. Деформация упругого кольца резонатора в функции от времени $w(\tau)$ при $k=4$

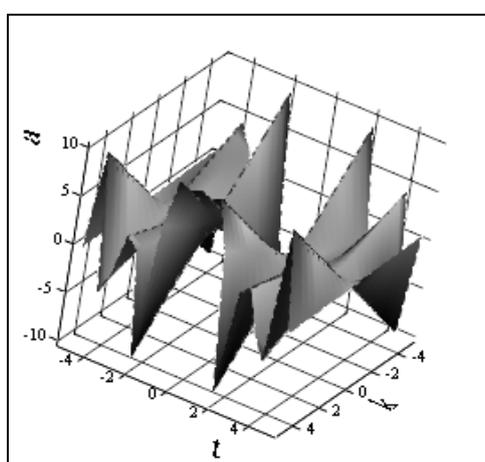


Рис. 6. Трехмерная модель $a(t,k)$ стоячей волны в радиальном направлении в функции от времени и номера гармоники волны

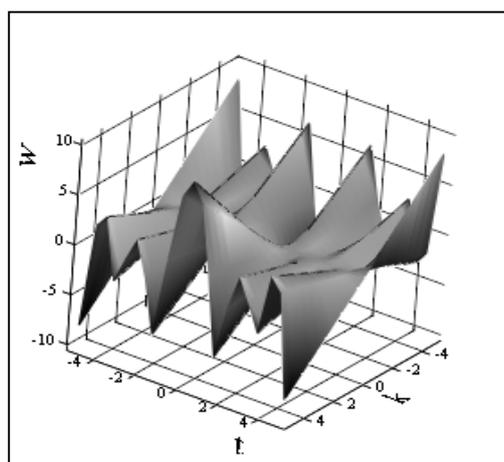


Рис. 7. Трехмерная модель деформации упругого кольца резонатора в функции от времени и номера гармоники волны $w(t,k)$

Моделирование показало, что перемещение стоячей волны, возбуждаемой резонатором, напрямую зависит от деформации его упругого кольца, что доказывает воз-

возможность использования волнового твердотельного гироскопа в качестве акустического излучателя. Графики на рис. 4 и 5 имеют подобный вид, который представляет собой прямую при $k=1$, синусоиду при $k=2$ и некоторую ломаную при $k=3$ и $k=4$, причем, как мы видим, при $k=4$ она имеет ярко выраженные высокочастотную и низкочастотную составляющие, наложенные друг на друга. Между деформацией упругого кольца и стоячей волной существует смещение по фазе. В трехмерном виде все изложенное отображено на трехмерных моделях тех же зависимостей.

Заключение

В работе была исследована динамика волнового твердотельного гироскопа, построены визуальные модели и изучены особенности его конструкции и геометрии. Моделирование имело своей целью изучение акустических свойств объекта.

Литература

1. Северов Л.А. Механика гироскопических систем. М.: Изд. МАИ, 1996.

КОЛЕБАНИЯ СТЕРЖНЕЙ ПРИ КИНЕМАТИЧЕСКОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

А.М. Лобачева

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор В.М. Мусалимов

В статье на примере упругого элемента микромеханического гироскопа разработан алгоритм расчета долговечности упругого элемента, проанализирован подход к решению дифференциального уравнения изгибных колебаний стержней, произведен сравнительный анализ динамики упругого элемента при силовом и кинематическом возбуждении.

Введение

Тенденция к миниатюризации и снижению стоимости систем навигации и управления движением привела к необходимости разработки малогабаритных и дешевых датчиков параметров движения. Бурное развитие микроэлектронной индустрии в последние десятилетия вызвало появление нового класса микромеханических устройств выполненных из кремния – гироскопов и акселерометров [1]. В настоящее время решение вопросов проектирования микромеханических гироскопов (ММГ) представляется весьма актуальным.

Принцип построения ММГ аналогичен вибрационным гироскопам и состоит в следующем. Имеется пробное тело, которое совершает вынужденные угловые или линейные колебания. При установке прибора на вращающееся основание возникают кориолисовы силы, приводящие к колебаниям тела по ортогональной оси. Для повышения чувствительности прибора и переменного кинетического момента требуется максимально увеличить амплитуду и частоту вынужденных колебаний. Колебания пробного тела возбуждаются, как правило, электростатическим двигателем. Вследствие малых габаритов прибора и ограниченности мощности двигателя возбуждение вынужденных колебаний производят на резонансной частоте. Это приводит к резкому возрастанию амплитуды и напряжений в конструкции. Определение технического ресурса (долговечности) упругого подвеса пробного тела, колеблющегося с большими амплитудами и напряжениями, является одной из задач проектирования.

Представляемая работа носит характер научно-методических рекомендаций. Это связано с тем, что расчетно-механические схемы нагружения упругого подвеса относятся к одномерным моделям, и, вообще говоря, решение подобных задач не вызывает затруднений. С другой стороны, кажущаяся простота подхода к решению таких задач при переходе к анализу напряженно-деформированного состояния подвеса может привести к ошибочным результатам по ряду существенных причин. Во-первых, известно, что технология изготовления ММГ не реализует идеальной геометрии, включая область сопряжений; имеется существенный разброс физико-механических характеристик кремния. Во-вторых, следует при постановке задачи помнить о различии мягкого (силового) и жесткого (кинематического) нагружений. Все перечисленное порождает некорректности при выборе граничных условий и самой постановке задач. К этому следует добавить, что рассматриваемые деформации относятся к классу нелинейных, а информация о статистике отказов ММГ недоступна.

Рассматриваемый в работе чувствительный элемент микромеханического гироскопа имеет следующие параметры: $h = 0.03 \cdot 10^{-3}$ м – высота поперечного сечения, $b = 0.014 \cdot 10^{-3}$ м – ширина поперечного сечения, $l = 0.54 \cdot 10^{-3}$ м – длина стержня; $E = 1.35 \cdot 10^5$ МПа – модуль упругости.

Напряжения, переменные во времени. Циклическая долговечность

Существуют определенные соотношения между пределами выносливости при циклическом изгибе и предельными напряжениями, которые были предложены в предыдущей работе [2]. Так, для симметричных циклов имеем [3]:

$$[\sigma_{-1}^{usz}] = 0.375\sigma_B, [\tau_{-1}^{kp}] = 0.22\sigma_B, [\sigma]_{ст} = 0.7\sigma_B,$$

где σ_B – временное сопротивление (предел прочности); σ_{-1} – предел усталости (выносливости) при симметричном цикле. Из 1-го и 3-го соотношений имеем:

$$\frac{[\sigma_{-1}^{usz}]}{[\sigma]} = \frac{0.375}{0.7} \Rightarrow [\sigma_{-1}^{usz}] = 0.535[\sigma].$$

Расчетные значения напряжений: $2.96 \text{ МПа} < 700 \cdot 0.535 \text{ МПа}$; $2.96 \text{ МПа} < 375 \text{ МПа}$ (напряжения меньше предела усталости).

Упругие элементы находятся в условиях жесткого нагружения – при постоянных амплитудах деформации. При фиксированной циклической деформации напряжения от цикла к циклу снижаются; затем размах напряжений стабилизируется, и он определяет долговечность элемента. Долговечность, в свою очередь, определяется числом циклов до разрушения. Примем для расчета циклической долговечности зависимость Коффина-Мэнсона [3]:

$$\varepsilon = \frac{L}{E} N^{-\chi}, \varepsilon = \frac{\sigma_{\max}}{E}, \chi = 0.12, L = 3.5\sigma_B; \sigma_B = 1000 \text{ МПа};$$

$$N^\chi = \frac{L}{\varepsilon \cdot E} = \frac{L}{\sigma_{\max}} = \frac{3.5 \cdot 10^3}{2.96} = 1.18 \cdot 10^3;$$

$$0.12 \ln N = \ln 1.18 + 3 \ln 10 = 7.06;$$

$$\ln N = \frac{7.06}{0.12} = 58.8, N = e^{58.8}.$$

Для расчета N -циклической долговечности были приняты ориентировочные значения χ и L . Эти характеристики требуют уточнения, и только эксперименты с образцами дадут возможность установить их истинное значение. Точно с таким же успехом для описания усталостных отказов можно использовать распределение Вейбулла [4, 5]:

$$\lambda(t) = \frac{C}{t_0} t^{c-1},$$

где t_0 – номинальная долговечность, C – постоянная. Это распределение, как и критерий Коффина-Мэнсона [3], содержит два параметра. И здесь, для построения функции распределения вероятности времени до отказа $F(t)$ требуется проведение серии испытаний. Йошикава составил таблицу [4], в которой с точки зрения системного анализа перечислены различные явления ухудшения состояния системы и виды отказов совместно с физическими процессами, их вызывающими.

Решение дифференциального уравнения изгибных колебаний стержней

При действии гармонической силы (или момента) на упругий элемент в нем возникают установившиеся вынужденные поперечные колебания. Частота вынужденных колебаний упругого элемента всегда равна частоте возмущающей силы (или момента).

Выберем систему координат в соответствии с расчетными схемами [6–8].

Возмущающую силу представим в форме гармонического воздействия $P = P_0 \cos \omega t$. Смещение любой упругой точки может быть представлено в виде [6–8]

$$x(z, t) = \sum q_k(t) U_k(z),$$

где $U_k(z)$ – прогиб при k -ом нормальном колебании; $q_k(t)$ – функция времени, определяемая из уравнения

$$\ddot{q}_k + P_k^2 q_k = \frac{Q_k(t)}{m_k}; \quad (1)$$

P_k – k -я собственная частота колебаний; Q_k – обобщенная сила; m_k – обобщенная масса.

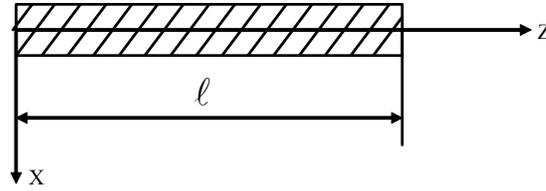


Рис. 1. Упругий элемент

Представим упругую линию в форме

$$U_k = \sin\left(\frac{k\pi z}{\ell}\right),$$

а частоты собственных колебаний как

$$P_k = k^2 P_1, \quad (2)$$

$$P_1 = \pi^2 \sqrt{\frac{EI}{m_0 \ell^4}}, \quad (3)$$

где m_0 – масса единицы длины стержня. Тогда

$$m_k = \int_0^{\ell} U_k^2 m_0 dz = \frac{1}{2m_0 \ell},$$

$$Q_k = P(t) U_k\left(\frac{\ell}{2}\right) = P_0 \cos(\omega t) \sin\left(\frac{k\pi}{2}\right).$$

Преобразуем (1) к виду

$$\ddot{q}_k + P_k^2 q_k = \frac{2P_0 \sin\left(\frac{k\pi}{2}\right)}{m_0 \ell} \cos(\omega t)$$

и запишем его стационарное решение:

$$q_k(t) = \frac{2P_0 \sin\left(\frac{k\pi}{2}\right)}{m_0 \ell (P_k^2 - \omega^2)} \cos(\omega t).$$

Смещение любого сечения упругого элемента при вынужденных колебаниях будет вычисляться следующим образом:

$$x(z, t) = \frac{2P_0}{m_0 \ell} \cos(\omega t) \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin\left(\frac{k\pi}{2}\right)}{P_k^2 - \omega^2} \sin\left(\frac{k\pi z}{\ell}\right). \quad (4)$$

Следует обратить внимание на некоторые обстоятельства, вытекающие из анализа решения (4):

- при точном совпадении частот P_k и ω амплитуда колебаний бесконечна, как всегда при резонансе консервативной системы;
- если точка приложения силы такова, что (см. рис. 2)

$$\sin\left(\frac{k\pi z}{\ell}\right) = 0, \quad (5)$$

то уравнение для u_k определяет положение узлов k -ой собственной формы:

$$z = \frac{n \cdot \ell}{k} \quad (n = 1, 2, \dots, k-1);$$

таким образом, если сила приложена в нуле некоторых собственных функций, то в разложении формы вынужденных колебаний эти функции отсутствуют;

- если при условии (5) P_k и ω равны, то резонанса нет, так как работа силы на перемещении равна нулю и энергия в системе не возрастает бесконечно.

Задача, рассмотренная выше (упругий стержень, лежащий на двух опорах), редуцируется к задаче о действии гармонической силы на одном из концов стержня по схеме рис. 2.

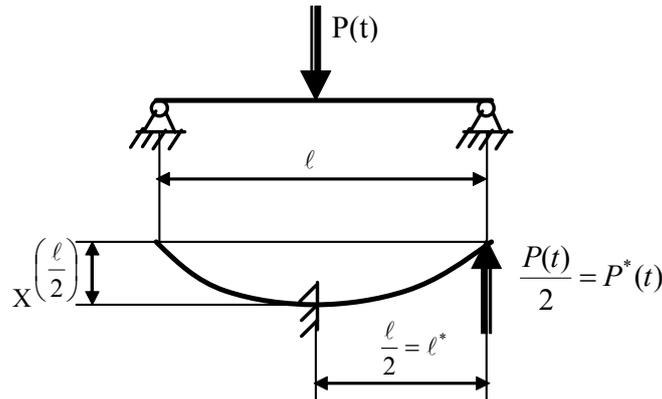


Рис. 2. Действие гармонической силы: ℓ^* – длина упругого элемента ММГ; $P^*(t)$ – сила, приложенная к упругому элементу со стороны подвижной части ММГ

Согласно (4), максимальный прогиб равен

$$x\left(\frac{\ell}{2}\right) = \frac{2P_0}{m_0 \ell} \cos(\omega t) \sum_{k=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{k^4 P_1^2 - \omega^2}. \quad (6)$$

В выражении (6) присутствуют только слагаемые, соответствующие симметричным формам колебаний. Примем $\omega = \frac{P_1}{2}$, тогда

$$x\left(\frac{\ell}{2}\right) = \frac{8}{\pi^4} \cdot \frac{P_0 \ell^3}{EI} \cos(\omega t) \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{323} + \dots \right),$$

где использовано равенство (2). Максимальный изгибающий момент определяется из формулы

$$M = EI \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} = -\frac{2\pi^2 EIP_0}{m_0 \ell^3} \cos(\omega t) \sum \frac{k^2 \sin\left(\frac{k\pi}{2}\right)}{P_k^2 - \omega^2} \sin\left(\frac{k\pi z}{\ell}\right). \quad (7)$$

При $\omega = \frac{P_1}{2}$ для вычисления M_{\max} с достаточной точностью можно учесть 3–5

членов ряда. После этого определяется $\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W}$. Для редуцированной задачи $P_0 = 2P_0^*$, $\ell = 2\ell^*$. С целью оценки влияния 2-ой частоты собственных колебаний положим

$$\omega = \frac{P_3}{2} = \frac{9P_1}{2}.$$

При $\omega = 0$ соотношения (2) и (6) определяют статические значения $x\left(\frac{\ell}{2}\right)$ и M .

Методика расчета максимальных напряжений и амплитуд упругих элементов на частотах, близких к резонансным

Определим амплитудное значение силы P_0 при известной амплитуде $x\left(\frac{\ell}{2}\right)$ при частотах, близких к резонансным, для изгибных форм 1, 3, 5. Запишем три члена ряда под знаком суммы формулы (6):

$$f(\omega) = \frac{1}{P_1^2 - \omega^2} - \frac{1}{81P_1^2 - \omega^2} + \frac{1}{625P_1^2 - \omega^2} = \frac{1}{P_1^2} \left[\frac{1}{1 - \frac{\omega^2}{P_1^2}} - \frac{1}{81 - \frac{\omega^2}{P_1^2}} + \frac{1}{625 - \frac{\omega^2}{P_1^2}} \right].$$

Выражение в квадратных скобках назовем функцией влияния. Очевидно, что резонансные частоты представляются следующим образом:

$$1 \text{ форма} - \frac{\omega^2}{P_1^2} = 1 \Rightarrow \omega_1 = P_1 = \pi^2 \sqrt{\frac{EI}{m_0 \ell^4}};$$

$$3 \text{ форма} - \frac{\omega^2}{P_1^2} = 81 \Rightarrow \omega_3 = 9\pi^2 \sqrt{\frac{EI}{m_0 \ell^4}};$$

$$5 \text{ форма} - \frac{\omega^2}{P_1^2} = 625 \Rightarrow \omega_5 = 25\pi^2 \sqrt{\frac{EI}{m_0 \ell^4}}.$$

Близость к резонансу характеризуется определенным малым значением знаменателя одного из трех слагаемых функции влияния, которые называют расстройкой [9].

Например, если для 1-ой формы колебаний расстройка равна $\xi_1 = 0.01$, то $1 - \frac{\omega^2}{P_1^2} = 0.01 = \xi_1$. Для этой величины, согласно (4), получаем:

$$X_{\max} = \ell^* \cdot \gamma_1, \left(\vartheta_1 = \frac{1.7^\circ}{2} \right),$$

где ϑ_1 – угол наклона касательной в точке приложения силы P^* в редуцированной задаче (рис. 2). Из этих равенств для P^* получим:

$$P^* = \frac{2\vartheta_1 m_0 (\ell^*)^2 P_1^2}{100};$$

Соответственно момент будет равен:

$$M = \left| \frac{2\pi^2 EIP^*}{m_0 \ell_*^3 P_1^2} \right| \cdot 100 = 4\pi^2 \vartheta_1 E \cdot I \cdot \frac{1}{\ell_*}.$$

Так как $W = \frac{2I}{b}$, то $\sigma_{\max} = \frac{M}{W} = \frac{4\pi^2 \vartheta_1 E I b}{\ell_* 2I} = \frac{2\pi^2 \vartheta_1 E b}{\ell_*}$.

Оценим максимальные напряжения:

$$\frac{b}{\ell^*} = \frac{0.014}{0.54} = 2.59 \cdot 10^{-2}, \quad \vartheta_1 = 1.45 \cdot 10^{-2}, \quad \sigma_{\max} = 2\pi^2 \cdot \vartheta_1 \cdot E \cdot \frac{b}{\ell^*} = 10.139 \cdot 10^2 \approx 1000 \text{ Мпа.}$$

Итак, $\sigma_{\max} = 1000$ Мпа. Этот результат был получен при мягком нагружении, когда задан закон изменения силы $P = P_0 \cos(\omega t)$.

На самом деле колебания системы вызываются не заданными силами, а возникают благодаря приведению в движение по заданному закону концевых точек стержня – это возбуждение называется кинематическим (жестким) [7]. Развивая приведенное решение, по существу физического смысла отметим ряд фактов. Переход к задаче кинематического возбуждения осуществляется установлением дополнительного закрепления в

концевой точке. Тогда резонанс наступает при частоте возбуждения, равной собственной частоте системы с дополнительными связями, а соответствующая собственная частота определяется по формуле [4– 6]:

$$P_k = \lambda_k^2 \sqrt{\frac{EI}{m_0 \ell^4}},$$

где $\lambda_1 = 4.730$; $\lambda_2 = 7.853$; $\lambda_k = \frac{2l+1}{2} \pi$ ($k > 2$). По приведенной формуле рассчитываются частоты собственных колебаний стержня с двумя закрепленными концами – это отражает факт установления дополнительной связи в точке кинематического возбуждения. Данный прием перехода к задаче кинематического возбуждения используется при расчетах вибраторов [7].

При вычислении максимального изгибающего момента учитывается, что в опасном сечении моменты являются комбинациями моментов с разными знаками – моменты в движении 1 (это найденные нами моменты – они отрицательны) и моменты в движении 2 (это положительные моменты). Согласно приближенным оценкам $|M_2| = 0.5|M_1|$. Тогда M_{\max} уменьшится вдвое, что приведет к изменению σ_{\max} , таким образом $\sigma_{\max} \approx 500$ МПа.

Обратим внимание на аналогию формул, представляемых нелинейной теорией статического изгиба, и формул, получаемых на основании теории упругих колебаний (табл. 1).

Нелинейный статический изгиб	Теория колебаний
$\sigma_{\max,c} = \omega_0 \beta \frac{Eb}{2\ell}$	$\sigma_{\max,k} = \frac{2\pi^2 \vartheta_1 Eb}{\ell}$

Таблица 1. Аналогия формул статики и динамики

Отношение $\frac{\sigma_{\max,k}}{\sigma_{\max,c}} = K_d$ целесообразно называть коэффициентом динамичности,

здесь $K_d = \frac{4\pi^2 \vartheta_1}{\omega_0 \beta}$. При этом следует иметь в виду, что термин «коэффициент динамичности» используется как в теории удара, так и в теории колебаний [5]. Поэтому в каждом случае его определяют в соответствии с физическим смыслом.

Рассмотрим сравнительную картину изменений амплитуды и момента [формулы (6) и (7)] в точках их максимальных значений в функции ω . На графиках рис. 3 показан характер зависимости функций влияния от частот возбуждения. Как видно из формул, функции имеют разрывы при определенных значениях $\frac{\omega^2}{P_1^2}$. Для демонстрации (и анализа) были выбраны только симметричные формы колебаний (1, 3, 5); так как ряды достаточно быстро сходятся, достаточно было взять три члена ряда. На рис. 3а представлена общая картинка резонанса, а на рис. 3б, в – фрагменты общей картины. Из расчетов следует, что для форм 3, 5 функции влияния для моментов растут быстрее функции влияния для смещений. Поэтому нецелесообразно возбуждать систему на частотах выше 1 формы.

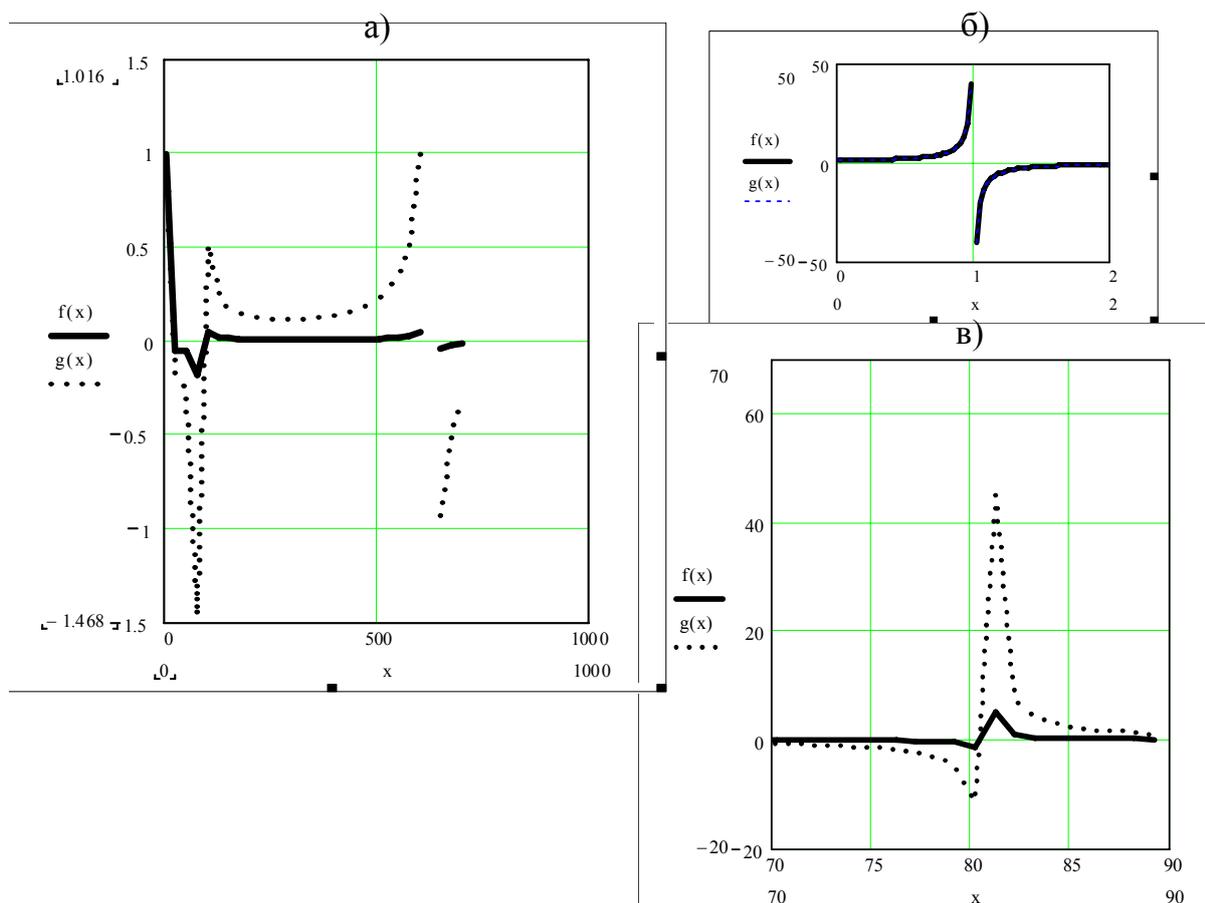


Рис. 3. Функции влияния амплитуды $f(x)$ и момента $g(x)$

Литература

1. Пешехонов В.Г.. Проблемы и перспективы современной гироскопии. // Изв. Высших учебных заведений. Приборостроение. 2000. Т.43. №1–2. С.48-56.
2. Лобачева А.М. Нелинейный анализ упругих чувствительных элементов приборов. / Механика и процессы управления. Труды XXXIII Уральского семинара. Миасс, 2003. С.215–220.
3. Писаренко Г.С. Сопротивление материалов. Киев: Вища школа, 1986. 638 с.
4. Yoshikawa H., Fundamentals of mechanical reliability and its application to computer aided machine design. // CIRP 'Annals. 1975. 24. 297.
5. Булатов В.П., Фридлиндер И.Г., Мусалимов В.М. Фундаментальные проблемы точности машин, систем, приборов. СПб: Наука, 2001. 390 с.
6. Давыдов В.В., Маттес Н.В. Динамические расчеты прочности судовых конструкций. Л.: Судостроение, 1974. 336 с.
7. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. Л.: Машиностроение, 1976. 320 с.
8. Ивович В.А. Переходные матрицы в динамике упругих систем. М.: Машиностроение, 1981. 183 с.
9. Блехман Н.Н. Синхронизация динамических систем. М.: Наука, 1971. 896 с.
10. Громова С.В., Ефстифеев М.И., Унтилов А.А. Определение ресурса упругого подвеса. / Труды 5 сессии Международной научной школы «Фундаментальные и прикладные проблемы теории точности процессов, машин, приборов и систем». / Под ред. д.т.н., проф. В.П. Булатова и д.т.н., проф. Л.В. Ефремова. СПб: ИПМаш РАН, 2002. С.110–117.

КОРРЕКЦИЯ НЕОДНОРОДНОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

А.О. Казначеева

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент М.Я. Марусина

Рассматривается метод повышения однородности магнитно-резонансных (МР) изображений, полученных с использованием поверхностных катушек. Разработан алгоритм, позволяющий устранить искажения интенсивности исходного изображения. Алгоритм использует известный профиль чувствительности катушки и не требует дополнительной анатомической информации.

Во многих областях науки и техники большое значение имеет анализ тонких особенностей сигналов и изображений, их сжатия и очистки от шума. Благодаря хорошему представлению локальных особенностей сигналов, отсутствующему у рядов Фурье, и множеству видов широкое распространение получили вейвлеты, дающие новые эффективные способы обработки изображений [1].

Одна из областей применения вейвлетов – это обработка медицинских изображений, где вейвлет-преобразование стало альтернативой преобразованию Фурье [2].

В магнитно-резонансной (МР) томографии увеличение пространственного разрешения изображения часто приводит к снижению интенсивности регистрируемого сигнала и появлению артефактов и пространственных искажений, зависящих от размера воксела. Для получения МР-изображений используют объемные или поверхностные катушки. Объемные катушки (катушка типа «птичья клетка») дают однородную пространственную регистрацию сигнала, и подобные недостатки им не свойственны. Поверхностные катушки дают в 5 раз большую интенсивность сигнала от тканей, расположенных вблизи их поверхности. Такая катушка имеет неоднородный профиль регистрируемого сигнала, интенсивность которого является функцией положения, которую можно теоретически спрогнозировать или измерить. Подобный профиль чувствительности значительно снижает качество изображения за счет потерь информации об удаленных от катушки областях.

Регистрируемое с помощью поверхностной катушки неоднородное изображение $Y[\vec{n}]$ является произведением истинного однородного изображения $C[\vec{n}]$ и профиля чувствительности катушки $S[\vec{n}]$, где \vec{n} – вектор положения в 3D пространстве. Профиль чувствительности поверхностной катушки можно описать с помощью выражения:

$$SNR \sim \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{x}{a}\right)^2\right)^{3/2}}, \quad (1)$$

где x – расстояние от катушки; a – радиус катушки.

Устранить шум на полученных таким образом изображениях можно с помощью вейвлетов различных типов, например, вейвлетов Хаара, Добеши, Симлета и др. В качестве характеристик точности полученного изображения будем использовать среднеквадратическое отклонение (СКО) полученного изображения от исходного [3]:

$$\sigma \approx \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (x_{i,j} - \bar{x}_{i,j})^2}{N \cdot M}}, \quad (2)$$

где N – количество строк матрицы изображения; M – количество столбцов матрицы изображения; $x_{i,j}$ – интенсивность пиксела откорректированного изображения, $\bar{x}_{i,j}$ – интенсивность пиксела эталонного изображения.

Обрабатываемые изображения были получены на МР-томографе Signa Infinity (General Electric) с полем 1,5 Тл с помощью фазированной поверхностной катушки CTL-Spine coil (USA Instruments). Для получения изображения использовалась спин-эхо ИП (TR=2000 мс, TE=100 мс), толщина среза 5 мм, матрица 128×128, FOV 200 мм, NEX=1. Принимающая катушка помещалась под исследуемый объект, и регистрация данных проводилась для срезов, перпендикулярных принимающей поверхности и основной оси томографа (этап 1). Затем исследования тех же плоскостей проводились на встроенной объемной катушке, имеющей однородную чувствительность, но низкое соотношение сигнал/шум; при этом положение в пространстве отображаемого объекта не менялось (этап 2). В результате эксперимента были получены МР-изображения фантома (пластиковый куб, заполненный водой) и головного мозга человека (рис.1), поскольку биологические объекты имеют более сложный химический состав и дают более сложную зависимость МР-сигнала от внешних факторов.

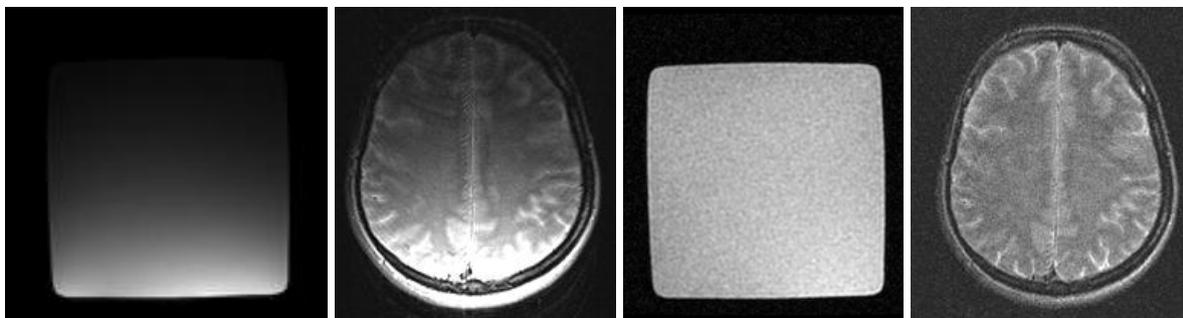


Рис. 1. Обрабатываемые изображения фантома и головного мозга

Первый этап коррекции интенсивности изображений состоял в коррекции профиля принимающей катушки в соответствии с соотношением (1), результаты которой представлены на рис. 2.

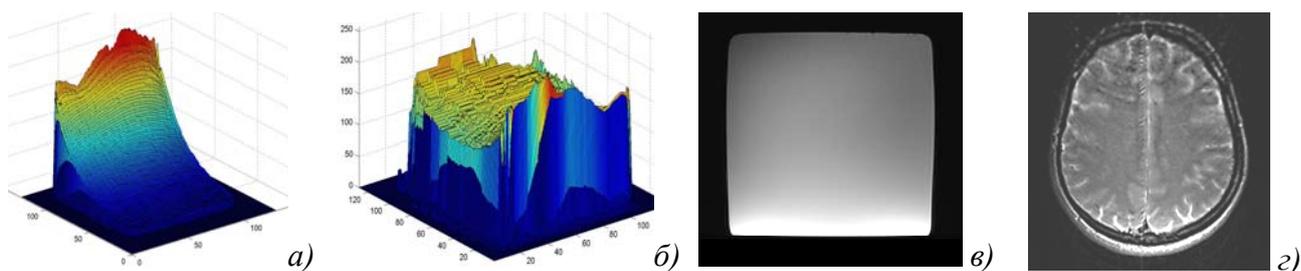


Рис. 2. Коррекция профиля чувствительности: (а) исходная и (б) откорректированная интенсивность сигнала однородного фантома, (в) и (г) – изображения после коррекции

Устранение шума на изображениях проводилась с помощью пакета MATLAB. Для обработки изображений использовались ортогональные вейвлеты Хаара, Добеши и Симлета второго уровня. Оценка качества первого этапа исследования проводилась с помощью сравнения изображения объекта, полученного на поверхностной катушке, с изображением, полученным на встроенной катушке. Оценка качества коррекции для второго этапа проводилась с помощью сравнения изображения объекта, полученного на встроенной объемной катушке, и изображения, полученного на специализированной

катушке диаметром 24 см, имеющей высокое соотношение сигнал/шум. Результаты оценки качества коррекции изображений приведены в таблице.

Наилучший результат получен при коррекции изображений с помощью вейвлетов Добеши, поскольку именно этот тип вейвлетов дал лучшее снижение шума при сохранении резкости изображения (рис. 3). Коррекция с помощью вейвлетов Хаара дала общее снижение интенсивности сигнала по всему изображению, а вейвлеты Симлета вызвали размывание и потерю информации о мелких деталях изображения.

Вейвлет	Этап 1		Этап 2
	фантом	человек	человек
Хаара	56,8	10,8	14,3
Добеши	58,2	10,6	16,1
Симлета	60,3	8,1	16,1
до коррекции	66,7	34,4	34,2

Таблица. Оценка качества коррекции с помощью СКО

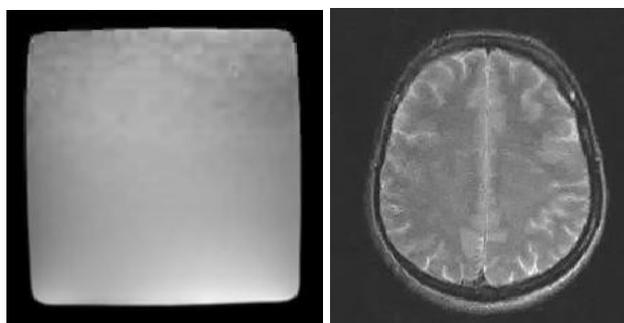


Рис. 3. Изображения после коррекции профиля чувствительности и вейвлет-коррекции

Литература

1. Lin F., Chen Y. et al. A wavelet-based approximation of surface coil sensitivity profiles. // Human brain mapping. 2003. Vol. 19. P.96–111.
2. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. М.: ДМК Пресс, 2005.
3. Колкер А.Б. Повышение точности решения задач вычислительной томографии путем нелинейной фильтрации восстановленного изображения.

НОВЫЕ АЛГОРИТМЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИСКАЖЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Н.Н. Зажигин, М.В. Римских, В.В. Шемплинер, Я.В. Юзликеев

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор В.С. Сизиков

Разработано несколько новых способов подавления случайных и детерминированных помех на изображениях. В 1-м способе мощная детерминированная деталь подавляется путем усечения ее интенсивности. Во 2-м способе для очищения изображения от мощной квазислучайной помехи используются: адаптивная фильтрация Винера, разбиение интенсивностей на три уровня, медианная и ранговая фильтрация и наложение очерненного и обеленного изображений. В 3-м способе для фильтрации умеренной случайной импульсной помехи достаточно использовать медианную фильтрацию. 4-й способ предназначен для обработки подавленного текста.

Введение

Задача очищения изображений от артефактов (различного рода помех) является одной из актуальных задач обработки изображений [1, 2]. Существует ряд методов (способов, алгоритмов) подавления или компенсации случайных и детерминированных помех на изображениях, в частности, на РКТ- и ЯМР-томограммах. Это – использование преобразований Фурье, Радона, косинус-преобразования, вейвлет-преобразования с усечением высокочастотных частей спектров, бинаризация изображений с отсечением по порогу, выравнивание гистограмм, винеровская, медианная и ранговая фильтрации, создание маски специального фильтра (Гаусса, Лапласа, Собеля и др.), морфологические операции над бинарными изображениями и т.д. [1–4]. Многие из этих методов нашли отражение, в частности, в пакетах Image Processing Toolbox и Wavelet Toolbox расширения системы MatLab [3, 4]. Однако одиночное применение таких прикладных программ (функций), как `fft2`, `ifft2`, `dct2`, `idct2`, `wpdencmp`, `im2bw`, `histeq`, `wiener2`, `medfilt2`, `ordfilt2`, `fspecial` [4, с. 519, 517, 437, 527, 545, 553, 550, 531], `bwmorph` [3, с. 365] и др., часто не дает удовлетворительного результата при обработке изображений типа приведенных ниже, и требуется или разработка новых методов и программ, или применение нескольких известных программ. В данной работе предлагается ряд новых способов очищения изображений, в частности, томограмм, от помех.

Первый способ

Этот способ ориентирован на случай, когда томограмма содержит мощную детерминированную (систематическую) деталь, например, отблеск от металлической коронки зуба, которая заглушает слабые детали на томограмме. На рис. 1, а приведена серая томограмма (из работы [5]) размера $n \times n$ пикселей с интенсивностями в диапазоне $[0, I_{\max}]$, где $n = 500$, $I_{\max} = 255$, а именно, изображение в виде двумерного массива целых чисел типа `uint8` [4]. Эта томограмма имеет мощную деталь (в левом верхнем углу на рис. 1, а) с интенсивностью $I = I_{\max}$. Предлагается подавлять частично или полностью такую деталь способом усечения максимума интенсивности [5, 6].

Согласно этому способу, сначала вводится условие усечения интенсивностей $I_{i,j}$ в районе мощной детали:

$$\text{if } I_{i,j} \geq I_{t1} \ \& \ i, j \in D, \text{ then } I_{i,j} = I_{t2}, \quad i, j = 1, \dots, n,$$

где $I_{t1}, I_{t2} \in [0, I_{\max}]$ – два пороговых (threshold) значения, D – область, содержащая мощную деталь. Затем все интенсивности $I_{i,j}$ умножаются на

$$r = \frac{I_{\max}}{\max(I_{t2}, I_{\text{next}})},$$

где I_{next} – интенсивность следующей по мощности детали.

Дадим краткое пояснение способа. Если $I_{t2} = 0$, то мощная деталь станет черной. Если $I_{t2} = I_b$, где $I_b \in (0, I_{next})$ – интенсивность фона (background), то мощная деталь сравняется с фоном. Если $I_{t2} = I_{max}$, то мощная деталь останется неизменной.

Данный способ реализован в программе (m-файле) way1.m на MatLab 6.5.

Томограмме на рис. 1, а соответствуют $D = \{i > 90 \& i < 150 \& j > 140 \& j < 190\}$, $I_b = 80$, $I_{next} = 142$. На рис. 1, б дан результат обработки при $I_{t1} = I_{t2} = 0.55 \cdot I_{max} = 140.25$. Видим, что слабые детали, почти невидимые на исходной томограмме (рис. 1, а), в результате применения данного способа выявились на рис. 1, б. При этом мощная деталь не подавлена. На рис. 1, в приведен результат обработки при $I_{t1} = 0.75 \cdot I_b = 60$, $I_{t2} = I_b = 80$. Рис. 1, в показывает также хорошее восстановление слабых деталей, причем при практически полном подавлении мощной детали (точнее, при усечении ее интенсивности до уровня фона).

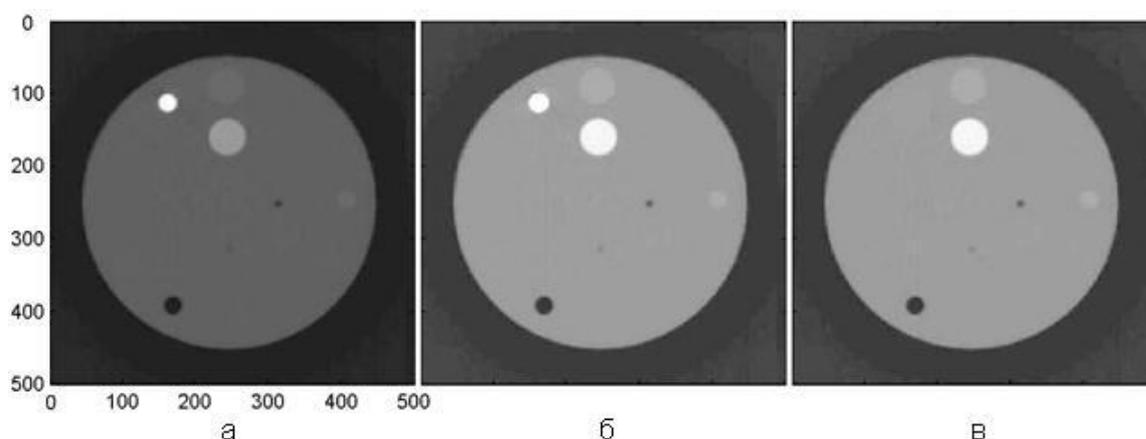


Рис. 1. Томограмма с мощной деталью (а) и томограммы с усечением (б, в)

Второй способ

Данный способ разработан применительно к случаю, когда требуется очистить изображение от мощной квазислучайной помехи (см. рис. 2.1 из работы [7]). Применение лишь одного какого-то способа, например, адаптивной фильтрации Винера или ранговой фильтрации, не дает удовлетворительного результата. Поэтому предлагается использовать последовательно ряд методов и соответствующих программ из пакета Image Processing Toolbox системы MatLab [3, 4]. 2-й способ реализован в программе way2.m на MatLab 6.5.

На рис. 2.1 дано исходное сильно зашумленное серое РКТ-изображение I_1 размера 500×500 пикселей типа uint8. Далее на рис. 2.2–2.8 представлены результаты обработки этого изображения с последовательным использованием следующих методов и программ [3, 4].

- Фильтрация Винера: $I_2 = \text{wiener}(I_1, [14 \ 14])$ с окном 14×14 пикселей (рис. 2.2).

Данная функция формирует полутоновое изображение I_2 , которое является результатом адаптивной фильтрации Винера исходного полутонового изображения I_1 . Параметры 14 и 14 задают размеры скользящего окна, в пределах которого оцениваются среднее и среднеквадратичное отклонение значений яркости.

- Разбиение интенсивностей изображения I_2 на три уровня: 0, 125 и 255 (изображение I_3 на рис. 2.3).
- Медианная фильтрация: $I_4 = \text{medfilt2}(I_3, [12 \ 12])$ с маской 12×12 пикселей (рис. 2.4).

При использовании медианной фильтрации, как следует из названия, происходит замена значения пикселя на значение медианы распределения яркостей всех пикселей в окрестности (включая и исходный). Такая фильтрация достаточно популярна, потому что для определенных типов случайных шумов она демонстрирует отличные возможности подавления шума при значительно меньшем эффекте расфокусировки, чем у линейных сглаживающих фильтров с аналогичными размерами. В частности, медианная фильтрация эффективна при фильтрации импульсных шумов, так называемых «соль и перец», которые выглядят как наложение на изображение случайных черных и белых точек.

- Ранговая фильтрация: $I_5 = \text{ordfilt2}(I_4, 80, \text{ones}(10, 10))$ с маской в виде матрицы 10×10 из единиц и с центральным элементом маски под номером 80 – обеливание I_4 (рис. 2.5).
- Ранговая фильтрация: $I_6 = \text{ordfilt2}(I_5, 4, \text{ones}(22, 22))$ с маской в виде матрицы 22×22 из единиц и с центральным элементом маски под номером 4 – очернение I_5 (рис. 2.6).
- Ранговая фильтрация: $I_7 = \text{ordfilt2}(I_5, 160, \text{ones}(13, 13))$ с маской в виде матрицы 13×13 из единиц и с центральным элементом маски под номером 160 – обеливание I_5 (рис. 2.7).
- Наложение (суммирование) очерненного и обеленного изображений I_6 и I_7 (изображение I_8 на рис. 2.8).

Видим, что в результате последовательного применения ряда методов и программ удалось очистить изображение I_1 от мощного шума, состоящего из случайной и детерминированной компонент, и выделить полезные детали (см. изображение 8 на рис. 2.8).

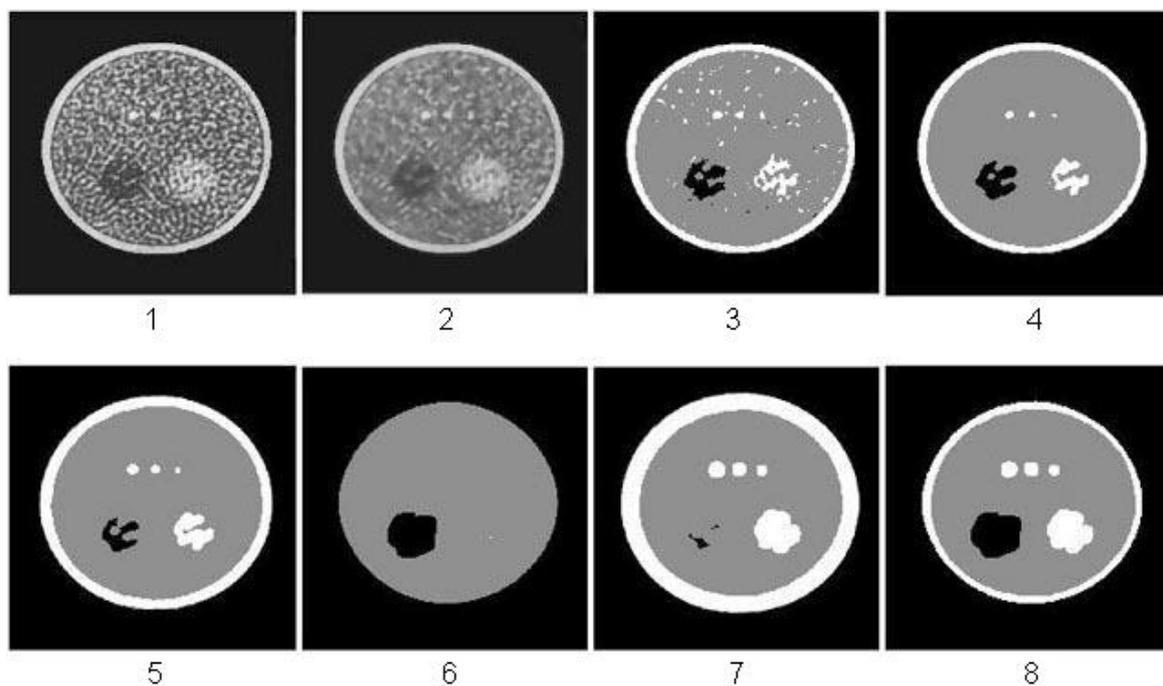


Рис. 2. Обобщенное изображение последовательности применения нескольких нелинейных фильтров

Третий способ

Рассмотрим случай, когда на томограмму наложена случайная импульсная помеха – шум типа «соль и перец» [4, с. 548]. На рис. 3 приведены результаты обработки томограммы – фантома Шеппа-Логана в виде серого изображения из 512×512 пикселей $P = \text{phantom}(512)$ типа double со значениями интенсивности от 0 до 1. Сначала изобра-

жение double P было переведено в $I1 = \text{uint8}(\text{round}(P * 255))$ со значениями интенсивности от 0 до 255. Затем на I1 был наложен импульсный шум: $I2 = \text{imnoise}(I1, 'salt \& pepper', 0.1)$ с плотностью шума $d=0.1$ и получено зашумленное изображение I2 (рис. 3а). Наконец, для очистки изображения I2 от шума была использована медианная фильтрация: $I3 = \text{medfilt2}(I2, [8 \ 8])$ с маской 8×8 пикселей (рис. 3б). Видим, что зашумленная томограмма I2 практически полностью отфильтровалась от шума. Данный способ реализован в программе way3.m на MatLab 6.5.

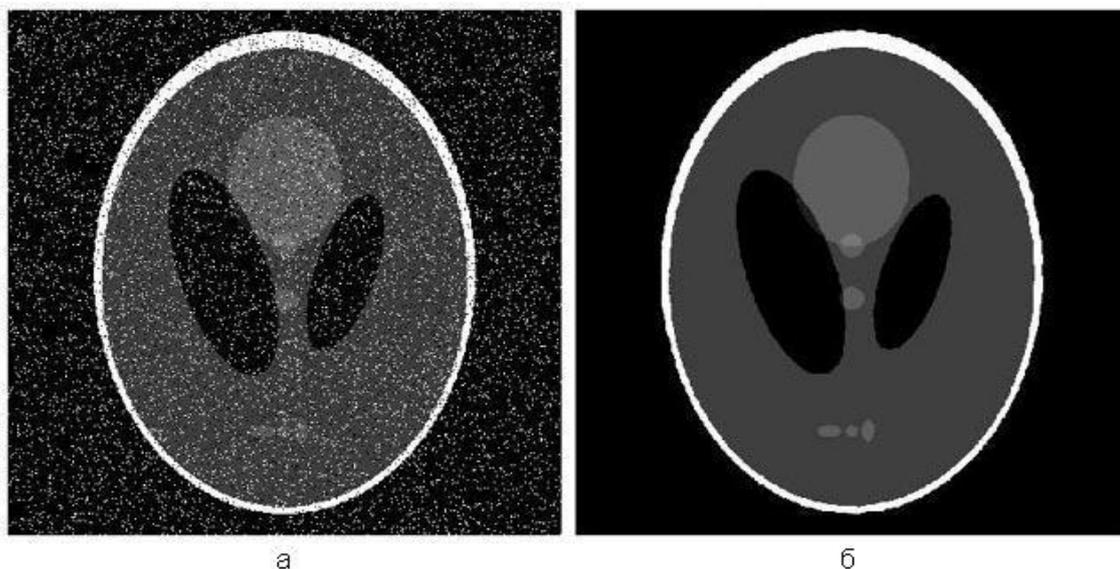


Рис. 3. Изображения: искаженное импульсным шумом (а); отфильтрованное медианным фильтром (б)

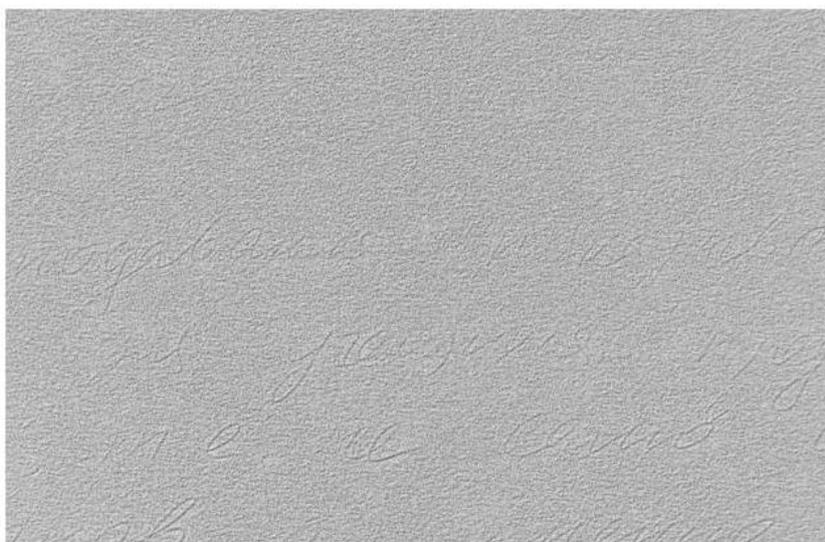
Четвертый способ

Рассмотрим случай, когда на одном листе бумаги был написан или напечатан некоторый (исходный) текст, а на другом, подложенном снизу, листе бумаги остался продавленный слабо видимый текст. Требуется восстановить с некоторой эффективностью исходный текст, располагая продавленным текстом. На рис. 4а приведен исходный продавленный текст в виде полутонового (серого) изображения 750×500 пикселей.

Видим, что текст с трудом просматривается. Попытки выделить текст на фоне помех такими методами, как винеровская, медианная и ранговая фильтрация, прямое и обратное косинус- и Фурье-преобразование, изменение яркости и контрастности и др., к успеху не привели. Это связано с большим отношением шум/сигнал и с тем, что спектр шума мало отличается от спектра самого текста.

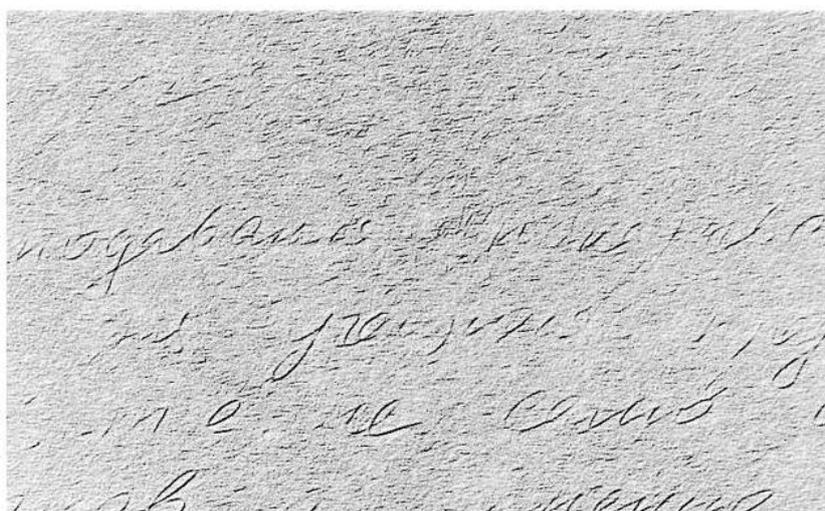
Предлагается способ, в основе которого лежит дефокусировка изображения под различными углами. Используются программы *fspecial* (двухмерный спецфильтр), *imfilter* (дефокусировка под углом), *imadd* (усреднение изображения), *imadjust* (усиление контраста усредненного изображения) [3, 4] и др. Каждое дефокусированное изображение несет определенную информацию о фрагменте текста, и объединение этих фрагментов позволяет выделить отдельные буквы; значительная часть шума при этом сглаживается.

Все применяемые преобразования являются линейными и не приводят к появлению новых артефактов или к потере информации на изображении. Данный способ реализован в программе (m-файле) *motion1.m* на MatLab 6.5. На рис. 4б приведен результат фильтрации продавленного текста. Видим, что отфильтрованный текст смотрится значительно четче, чем исходный продавленный текст.



а

Рис. 4а. Продавленный текст



б

Рис. 4б. Результат фильтрации продавленного текста

Заключение

В работе предложено несколько новых способов устранения артефактов на изображениях. В 1-м способе мощная детерминированная деталь подавляется частично или полностью путем усечения ее интенсивности. Во 2-м способе для очистки изображения от мощной квазислучайной помехи, содержащей случайную и детерминированную компоненты, используются: фильтрация Винера, разбиение интенсивностей на три уровня, медианная и ранговая фильтрация и наложение очерненного и обеленного изображений. В 3-м способе для фильтрации умеренной случайной импульсной помехи достаточно использовать медианную фильтрацию. В 4-м способе для восстановления продавленного текста использована дефокусировка изображения под различными углами. Данные способы продемонстрировали свою эффективность и могут быть рекомендованы для практического использования в РКТ (рентгеновской компьютерной томографии) [8, т. 1], [9], в МРТ (магнитно-резонансной томографии) [8, т. 2], [9], в обработке (восстановлении, реконструкции) искаженных изображений – текстов, старых фотографий, объектов природы, изображений космических объектов и т.д. [1, 9].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 05-08-01304-а).

Литература

1. Бейтс Р., Мак-Доннелл М. Восстановление и реконструкция изображений. М.: Мир, 1989.
2. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. В 2-х т. М.: Мир, 1982.
3. Рудаков П.И., Сафонов В.И. Обработка сигналов и изображений. MATLAB 5.x / Под общ. ред. В.Г. Потемкина. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2000.
4. Дьяконов В., Абраменкова И. MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник. СПб: Питер, 2002.
5. Щекотин Д.С. Повышение устойчивости методов реконструкции распределений плотности в сечениях объектов в компьютерной томографии. Автореферат дисс. ... канд. техн. наук. СПб: СПбГУ ИТМО, 2005.
6. Shchekotin D., Sizikov V.S. Enhancement of tomographic image quality by means of a regularization method // Proc. Int. Topical Meeting on Optical Sensing and Artificial Vision. SPb. 2004. Vol. 1. P. 369–374.
7. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я., Рубашов И.Б., Тимонов А.А. Первый советский компьютерный томограф. // Природа. 1984. № 4. С. 11–21.
8. Физика визуализации изображений в медицине. В 2-х т. / Под ред. С. Уэбба. М.: Мир, 1991.
9. Сизиков В.С. Математические методы обработки результатов измерений. СПб: Политехника, 2001.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИТЕРАЦИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНДИКАТРИСЫ РАССЕЯНИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ

Д.Д. Захаров

Научные руководители – доктор технических наук, профессор В.С. Сизиков, кандидат физико-математических наук, доцент А.В. Смирнов, доктор физико-математических наук, профессор Б.А. Федоров

Сформулирована двухмерная задача о рентгеновском рассеянии на анизотропном объекте при использовании щелевого коллиматора и детектора. Для восстановления истинного углового распределения интенсивности рентгеновского рассеяния J по распределению экспериментальной интенсивности I выведено двухмерное сингулярное интегральное уравнение. Уравнение приведено к нестандартной форме без сингулярностей. Для его решения предложен итерационный метод. Приведен численный пример.

Введение

Учет коллимационных искажений при рентгеновском малоугловом изотропном рассеянии является обычной практикой во многих лабораториях [1–4]. При изотропном рассеянии рентгеновских лучей на объекте относительная простота одномерного интегрального уравнения, связывающего экспериментальную I и искомую J (т.е. свободную от коллимационных эффектов) интенсивности рассеяния, позволила развить ряд методов его решения [1–4]. Эта простота объясняется тем, что интенсивность рассеяния не зависит от ориентации рассеивающего объекта относительно первичного пучка и, следовательно, является функцией лишь одного параметра, пропорционального при малоугловом рассеянии углу рассеяния.

Задача усложняется, когда рассеяние происходит на анизотропном объекте. В этом случае регистрируемая интенсивность I зависит не только от угла рассеяния, но и от взаимной ориентации коллимационной щели и оси анизотропии рассеивающего объекта. При этом и экспериментальная I , и искомая J интенсивности рассеяния становятся двухпараметрическими, что усложняет задачу восстановления J по измеренной I .

В мировой практике коллимационная проблема, связанная с рассеянием на анизотропных объектах, еще не рассматривалась. Частично это связано с тем, что многие современные лаборатории оборудованы двухкоординатными детекторами, практически снимающими проблему учета коллимационных искажений, а частично – с трудностью ее математической формулировки и решения.

В настоящей работе впервые дана формулировка указанной двухпараметрической задачи, выведено интегральное уравнение, описывающее задачу, и предложен итерационный метод его решения. Эффективность метода проиллюстрирована численным примером.

Постановка задачи

Для повышения светосилы установки для изучения рассеяния рентгеновских лучей на образце часто используют щелевые коллиматоры и детекторы (рис. 1), что, в отличие от точечных источников и приемников, приводит к искажению («размытию») кривой рассеяния [1–5]. Чтобы восстановить истинное угловое распределение интенсивности рентгеновского рассеяния J , которое было бы при точечном источнике и приемнике, нужно произвести коллимационный пересчет экспериментальной («размытой») интенсивности I [1, 3, 5–7].

Данная задача может быть одномерной, когда образец обладает изотропными свойствами. В этом случае обозначим через $J(q)$ (или $J(\theta)$) «истинную», неискаженную ин-

тенсивность (индикатрису) рассеяния рентгеновских лучей. Здесь $q = (4\pi/\lambda)\sin(\theta/2)$, где θ – угол рассеяния, а λ – длина волны рентгеновских лучей.

Задача может быть и двухмерной, когда свойства образца зависят от угла φ – угла поворота оси симметрии образца относительно коллимационной щели (см. рис. 1). В этом случае искомая индикатрису рассеяния будет функцией двух переменных: $J = J(q, \varphi)$ (или $J = J(\theta, \varphi)$).

Принципиальная схема хода лучей в рентгеновской камере представлена на рис. 1. Полагаем, что $\theta \ll 1$ (рассматривается только малоугловое рентгеновское рассеяние). Параллельные рентгеновские лучи, формируемые коллимационной щелью длиной $2\Delta_1$, падают на образец, и прошедшие через образец рассеянные лучи регистрируются щелью детектора длиной $2\Delta_2$, расположенной под углом θ . Использование щелей повышает светосилу установки, но регистрируемая щелью детектора интенсивность $I = I(q, \varphi)$ будет отличаться от $J = J(q, \varphi)$, причем тем сильнее, чем больше длины щелей $2\Delta_1$ и $2\Delta_2$.

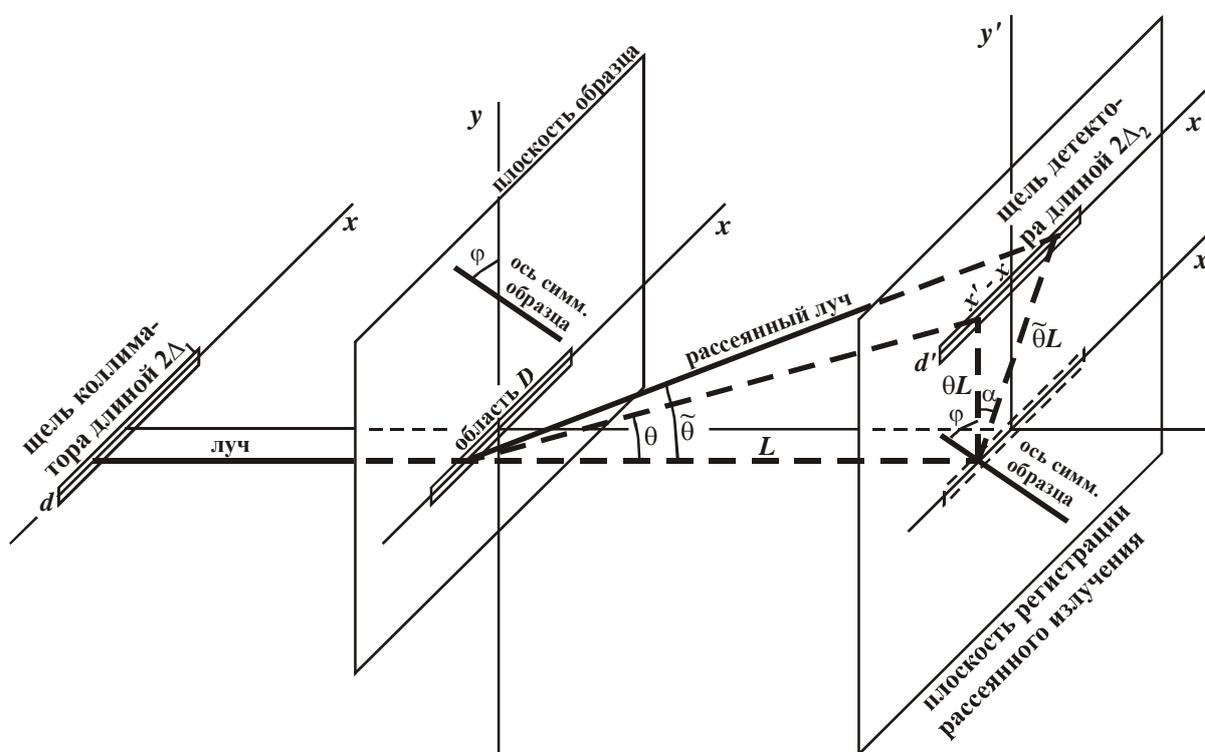


Рис. 1. Схема хода лучей в рентгеновской камере

Ставится задача: определить математическим путем истинную индикатрису рассеяния J по измеренной функции рассеяния I . В одномерном случае такая задача уже рассматривалась в работах [1, 3, 5–7] и др., и в данной работе она рассматривается кратко. Что же касается двухмерной задачи, то в данной работе предлагается одно из первых ее рассмотрений.

Одномерная задача

Пусть D – область (прямоугольник) рассеяния на образце, равная щели коллиматора, L – расстояние от образца до плоскости регистрации, d – ширина щели коллиматора, d' – ширина щели детектора, $g(x)$ – распределение интенсивности вдоль щели коллиматора, $u(x')$ – распределение чувствительности вдоль щели детектора. Тогда суммарная интен-

сивность, регистрируемая всей щелью детектора при некотором угле θ и при $d = d'$, равна двойному интегралу по области D и по щели детектора (ср. [5]):

$$I(\theta) = \left(\frac{d}{L}\right)^2 \int_{-\Delta_1}^{\Delta_1} \left[\int_{-\Delta_2}^{\Delta_2} J(\tilde{\theta}) u(x') dx' \right] g(x) dx, \quad (1)$$

где $\tilde{\theta}$ – угол рассеяния от элемента dx области D в элемент dx' щели детектора.

Если распределения $g(x)$ и $u(x')$ равномерные, т.е. $g(x) = \text{const}$ и $u(x') = \text{const}$, то соотношение (1) может быть преобразовано в выражение (ср. [5], формула (21)):

$$I(q) = 2 \int_0^{\sqrt{b^2 - q^2}} J(\sqrt{q^2 + x^2}) dx, \quad a \leq q \leq b, \quad (2)$$

где $a = q_{\min} \geq 0$, $b = q_{\max} > 0$, или

$$2 \int_0^{\sqrt{b^2 - q^2}} J(\sqrt{q^2 + x^2}) dx = I(q), \quad a \leq q \leq b. \quad (3)$$

Соотношение (3) является интегральным уравнением I рода типа Вольтерра, записанным в нестандартной форме, поскольку в нем нет ядра в явном виде, искомая функция J зависит не от одного внутреннего аргумента x , а от комбинации аргументов $\sqrt{q^2 + x^2}$ и верхний предел интегрирования является некоторой функцией q . Теория и методы решения подобных уравнений разработаны недостаточно подробно. Можно лишь отметить работы физического характера [1, 3] и работы [5–7] с математическим уклоном.

Если ввести новую переменную $s = \sqrt{q^2 + x^2}$, то уравнение (3) примет вид:

$$2 \int_q^b \frac{s}{\sqrt{s^2 - q^2}} J(s) ds = I(q), \quad a \leq q \leq b. \quad (4)$$

Уравнение (4) является хорошо известным интегральным уравнением Абеля, принадлежащим к уравнениям типа Вольтерра I рода [8, с. 107], [9, с. 97]. Специфика уравнения (4) состоит в том, что оно является сингулярным: ядро $s/\sqrt{s^2 - q^2}$ обращается в бесконечность при $s = q$, и это создает определенные трудности при его численном решении [10].

Уравнение (4) имеет аналитическое решение [5], [9, с. 98], [10]

$$J(s) = -\frac{1}{\pi} \int_s^b \frac{I'(q)}{\sqrt{q^2 - s^2}} dq, \quad a \leq s \leq b. \quad (5)$$

Однако вычисления по формуле (5) вызывают следующие осложнения. Во-первых, в (5) входит производная $I'(q)$ от экспериментальной, а значит, зашумленной функции $I(q)$. Дифференцирование же зашумленной функции является некорректной (сильно неустойчивой) задачей и требует применения специальных устойчивых методов (регуляризации, фильтрации, сплайн-аппроксимации и т.д.) [8, 9]. Во-вторых, интеграл в (5) является сингулярным и для своего численного вычисления требует, например, использования обобщенных квадратурных формул [10]. От сингулярности в (5) можно избавиться, если выполнить интегрирование по частям. В этом случае [5], [9, с. 99]

$$J(s) = \frac{1}{\pi} \int_s^b \sqrt{q^2 - s^2} \frac{d}{dq} \left[\frac{1}{q} \frac{dI(q)}{dq} \right] dq, \quad a \leq s \leq b. \quad (6)$$

Однако решение (6) требует двукратного численного дифференцирования функции $I(q)$. Чтобы преодолеть отмеченные трудности, в работе [10] предложен метод численно-

го решения уравнения (4) на основе обобщенной квадратурной формулы (левых прямоугольников), а также метод численного вычисления интеграла в выражении (5) по обобщенной квадратурной формуле, учитывающей его сингулярность. А в работе [5] предложено решать непосредственно нестандартное интегральное уравнение (3), причем решать его методом итераций (последовательных приближений).

В данной работе ниже, при рассмотрении двухмерной задачи, мы будем учитывать вышеизложенные особенности, характерные для одномерной задачи, и воспользуемся методом итераций для решения двухмерной задачи.

Двухмерная задача

Пусть рассеивающие свойства образца зависят от φ – угла поворота оси симметрии образца, т.е. искомая индикатриса рассеяния является функцией двух переменных: $J = J(\theta, \varphi)$ или $J = J(q, \varphi)$. В этом случае суммарная интенсивность, регистрируемая щелью детектора, равна (ср. (1))

$$I(\theta, \varphi) = \left(\frac{d}{L}\right)^2 \int_{-\Delta_1}^{\Delta_1} \left[\int_{-\Delta_2}^{\Delta_2} J(\tilde{\theta}, \tilde{\varphi}) u(x') dx' \right] g(x) dx, \quad (7)$$

где $\tilde{\varphi} = \varphi + \alpha$ (см. рис. 1). При $u(x') = \text{const}$ и $g(x) = \text{const}$ выражение (7) может быть приведено к виду (ср. (2)):

$$I(q, \varphi) = \int_{-\sqrt{b^2-q^2}}^{\sqrt{b^2-q^2}} J\left(\sqrt{q^2+x^2}, |\arctg(x/q) + \varphi|\right) dx, \quad a \leq q \leq b, \quad \varphi_{\min} \leq \varphi \leq \varphi_{\max}. \quad (8)$$

Выражение (8) является интегральным уравнением I рода относительно J при известной (измеренной) I , записанным в нестандартной форме. При этом выражение (8) неудобно для численной реализации, так как в нем аргумент $\sqrt{q^2+x^2}$ изменяется от b через q до b , т.е. немонотонно. Чтобы устранить этот недостаток, запишем (8) в виде:

$$\begin{aligned} I(q, \varphi) &= \\ &= \int_{-\sqrt{b^2-q^2}}^0 J\left(\sqrt{q^2+x^2}, |\arctg(x/q) + \varphi|\right) dx + \int_0^{\sqrt{b^2-q^2}} J\left(\sqrt{q^2+x^2}, |\arctg(x/q) + \varphi|\right) dx = \\ &= \int_0^{\sqrt{b^2-q^2}} J\left(\sqrt{q^2+x^2}, |\arctg(x/q) - \varphi|\right) dx + \int_0^{\sqrt{b^2-q^2}} J\left(\sqrt{q^2+x^2}, |\arctg(x/q) + \varphi|\right) dx, \\ & \quad a \leq q \leq b, \quad \varphi_{\min} \leq \varphi \leq \varphi_{\max}. \end{aligned} \quad (9)$$

Метод итераций решения уравнения (9)

Для решения уравнения (9) предлагается, как и для решения уравнения (3) в работе [5], использовать метод итераций Фрийдмана [8]:

$$\begin{aligned} J_l(q, \varphi) &= J_{l-1}(q, \varphi) + v \left[I(q, \varphi) - \int_0^{\sqrt{b^2-q^2}} J_{l-1}\left(\sqrt{q^2+x^2}, |\arctg(x/q) - \varphi|\right) dx - \right. \\ & \quad \left. - \int_0^{\sqrt{b^2-q^2}} J_{l-1}\left(\sqrt{q^2+x^2}, |\arctg(x/q) + \varphi|\right) dx \right], \quad l = 1, 2, 3, \dots, \end{aligned} \quad (10)$$

где $0 < v < 2 / \|A\|$. Норму оператора можно оценить как (ср. [5])

$$\|A\| \approx 2\sqrt{b^2 - q^2} \leq 2b ,$$

откуда

$$0 < v < 1/b . \quad (11)$$

Доказано [8, с. 272], что процесс итераций (10) сходится к точному решению в случае точной $I(q, \varphi)$ при любом начальном приближении $J_0(q, \varphi)$ и при соблюдении (11). Если же $I(q, \varphi)$ имеет погрешности, то процесс (10) расходится из-за (слабой) некорректности задачи решения уравнения (9). В этом случае для выбора числа итераций можно воспользоваться, например, известным правилом останова по невязке [8, с. 273–274], в которых число итераций согласуется с погрешностью измерений δ . Однако в данной работе мы касаться этого правила пока не будем.

Численный алгоритм

Численный алгоритм реализации схемы (10) является двухмерным обобщением итерационной схемы решения одномерного уравнения (2) или (3) согласно [5].

Введем равномерные совпадающие сетки узлов дискретизации по q и x : $a, a + h1, \dots, b$, где $h1 = \Delta q = \Delta x = \text{const}$ – шаг дискретизации, или $q_i = a + h1 \cdot i$, $i = 0, 1, \dots, M$, $x_k = a + h1 \cdot k$, $k = 0, 1, \dots, M$. Введем также равномерную сетку узлов по φ : $\varphi_j = \varphi_0 + h2 \cdot j$, где $h2 = \Delta \varphi = \text{const}$ – шаг дискретизации по φ , $j = 0, 1, \dots, N$.

Каждый из интегралов в (10) заменим конечной суммой по формуле левых прямоугольников. При этом значения $J_{l-1}(\sqrt{q^2 + x^2}, |\arctg(x/q) \mp \varphi|)$, не попадающие в узлы дискретизации, заменим на $J_{l-1}(\text{nnd}[\sqrt{q^2 + x^2}], \text{nnd}[|\arctg(x/q) \mp \varphi|])$, где через $\text{nnd}[\cdot]$ обозначим значение ближайшего узла дискретизации (nearest node of discretization). В результате схема (10) в дискретном виде (при $J_0(q, \varphi) = 0$) запишется как

$$J_0(q_i, \varphi_j) = 0,$$

$$J_l(q_i, \varphi_j) = J_{l-1}(q_i, \varphi_j) + v \left\{ I(q_i, \varphi_j) - h1 \sum_{k=0}^M J_{l-1}(\text{nnd}[\sqrt{q_i^2 + x_k^2}], \text{nnd}[|\arctg(x_k/q_i) - \varphi_j|]) - \right. \\ \left. - h1 \sum_{k=0}^M J_{l-1}(\text{nnd}[\sqrt{q_i^2 + x_k^2}], \text{nnd}[|\arctg(x_k/q_i) + \varphi_j|]) \right\}, \quad i = \overline{0, M}, \quad j = \overline{0, N}, \quad l = 1, 2, 3, \dots \quad (12)$$

Разработана программа ITER2 на языке TurboC3 для решения уравнения (9) методом итераций согласно (12). С помощью программы ITER2 решен

Пример

Для иллюстрации изложенной методики был решен численный пример. В нем точное решение задавалось в виде:

$$\bar{J}(q, \varphi) = \left(\frac{a}{q}\right)^2 \exp\left[-\frac{(\varphi - \pi/2)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (13)$$

где $\sigma = \pi/5$; параметры сетки узлов по q : $a = q_{\min} = 5.5 \cdot 10^{-3}$, $b = q_{\max} = 16.5 \cdot 10^{-3}$, шаг $h1 = \Delta q = 0.25 \cdot 10^{-3}$, число шагов по q равно $M = 44$; параметры сетки узлов по φ :

$\varphi_{\min} = 0$, $\varphi_{\max} = \pi/2$, шаг $h_2 = \Delta\varphi = \pi/90$, число шагов по φ равно $N = 45$; $1/b = 60.6$ (см. (11)); множитель $\nu = 30$. На рис. 2 представлено точное решение $\bar{J}(q, \varphi)$.

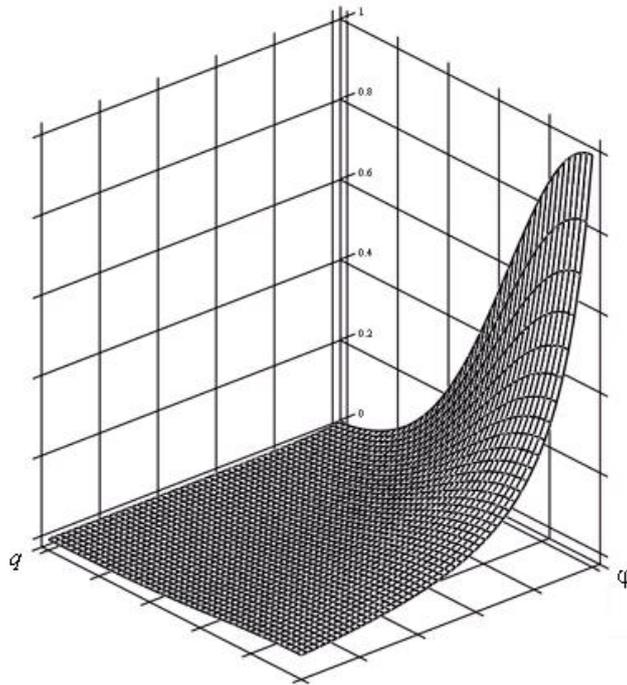


Рис. 2. Точное решение $\bar{J}(q, \varphi)$

На рис. 3 приведена измеренная функция $I(q, \varphi)$.

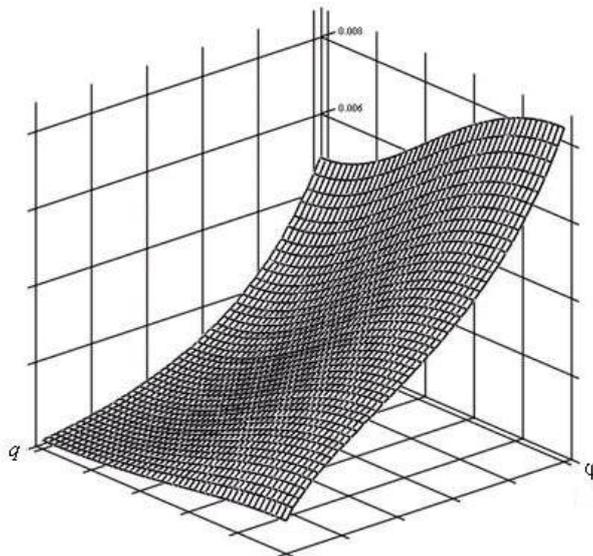


Рис. 3. Измеренная функция $I(q, \varphi)$

На рис. 4 приведены следующие функции: относительная погрешность l -й итерации решения $J_l(q, \varphi)$ по отношению к точному решению $\bar{J}(q, \varphi)$ (непрерывная кривая)

$$\varepsilon \equiv \varepsilon_{\text{отн } l} = \frac{\|J_l(q, \varphi) - \bar{J}(q, \varphi)\|_{L_2}}{\|\bar{J}(q, \varphi)\|_{L_2}}$$

и относительная разность между l -й и $(l-1)$ -й итерациями (пунктирная кривая)

$$\sigma \equiv \sigma_{\text{отн } l} = \frac{\|J_l(q, \varphi) - J_{l-1}(q, \varphi)\|_{L_2}}{\|J_l(q, \varphi)\|_{L_2}}.$$

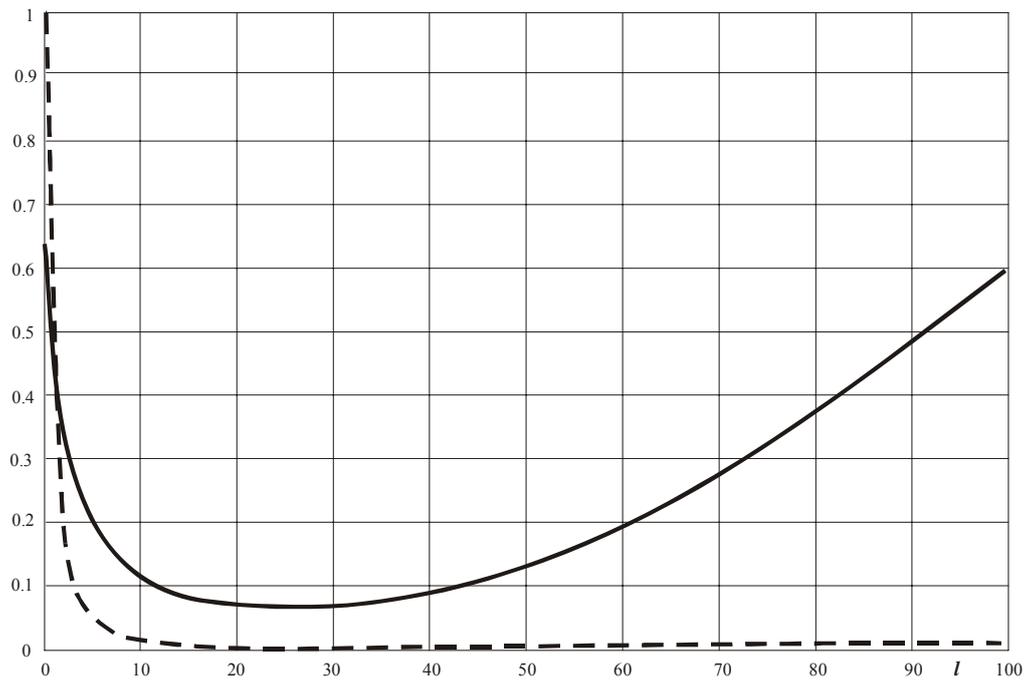


Рис. 4. Функции $\varepsilon \equiv \varepsilon_{\text{отн } l}$ (непрерывная кривая) и $\sigma \equiv \sigma_{\text{отн } l}$ (пунктирная кривая)

В данном примере получен следующий результат: $\varepsilon = \min = 0.0673$ при $l = 29$, $\sigma = \min = 2.761 \cdot 10^{-3}$ при $l = 25$.

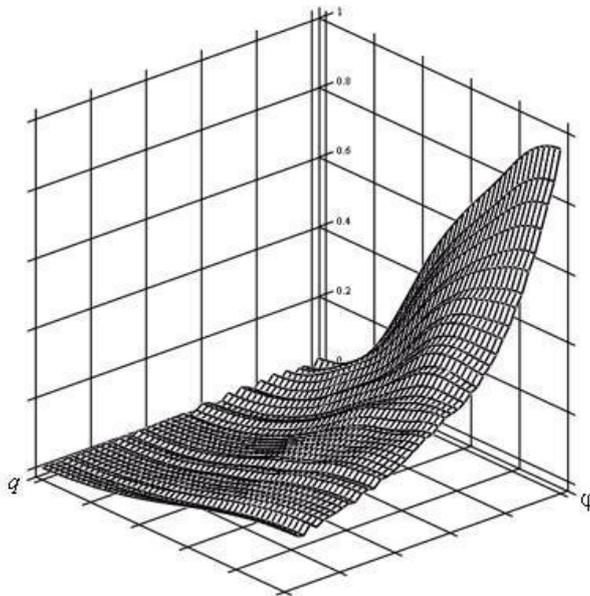


Рис. 5. Решение $J_{29}(q, \varphi)$

На рис. 5 приведено решение $J_{29}(q, \varphi)$. Сравнение рис. 2 и 3 говорит о том, что численное решение $J_{29}(q, \varphi)$ дает удовлетворительное приближение к точному решению $\bar{J}(q, \varphi)$.

Результаты решения данного примера, а также ряда других показывают следующее. Применение итерационной схемы Фрийдмана (10), (12) для решения неклассического двумерного интегрального уравнения (9) является весьма эффективным. Выбор оптимального числа итераций $n_{\varepsilon \text{opt}}$, соответствующего минимуму функции $\varepsilon \equiv \varepsilon_{\text{отн}l}$, на практике невозможен, так как эта функция включает в себя точное (неизвестное) решение $\bar{J}(q, \varphi)$. На практике можно использовать лишь функцию $\sigma \equiv \sigma_{\text{отн}l}$. Как показывает рис. 4 и решение других примеров, число итераций $n_{\sigma \text{opt}}$ в среднем несколько больше $n_{\varepsilon \text{opt}}$, тем не менее, $n_{\sigma \text{opt}}$ можно использовать для оценки $n_{\varepsilon \text{opt}}$.

Заключение

Сформулирована двумерная задача о анизотропном рентгеновском рассеянии на объекте, когда измеренная интенсивность I и искомая индикатриса рассеяния J зависят от угла рассеяния θ и от угла поворота оси симметрии образца φ . Для восстановления J по экспериментальной I выведено двумерное сингулярное интегральное уравнение. Уравнение приведено к нестандартной форме без сингулярностей. Для численного решения нестандартного двумерного уравнения предложен итерационный метод. Приведен численный пример, показавший эффективность итерационного метода. Математическое описание двумерной задачи в виде нестандартного интегрального уравнения, а также итерационный метод его решения являются пионерскими разработками.

Литература

1. Guinier A., Fournet G. Small-angle scattering of X-rays. NY: Wiley, 1955.
2. Федоров Б.А. Учет коллимационных искажений при малоугловом рассеянии рентгеновых лучей. Поправка на высоту щелей. // Кристаллография. 1968. Т. 13, № 5. С. 763–769.
3. Schelten J., Hossfeld F. Application of spline functions to the correction of resolution errors in small-angle scattering. // J. Appl. Cryst. 1971. Vol. 4. P. 210–223.
4. Мельничук А.П., Прищепенко О.Б., Смирнов А.В., Федоров Б.А. Прецизионная юстировка камеры Краткого и программа первичной обработки данных рентгеновского малоуглового рассеяния. // Изв. вузов. Приборостроение. 2002. Т. 45, № 7. С. 48–54.
5. Сизиков В.С., Смирнов А.В., Федоров Б.А. Решение одномерной коллимационной задачи оценки рентгеновского изотропного рассеяния излучения методом итераций // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48, № 10. С. 44–52.
6. Добровольский В.А., Горилловский Д.А., Сизиков В.С., Смирнов А.В., Федоров Б.А. Модификация метода квадратур численного решения интегрального уравнения Абеля с учетом его сингулярности. / В сб. научн. статей «Современные технологии» под ред. С. А. Козлова. СПб: СПбГИТМО(ТУ), 2001. С. 121–126.
7. Горилловский Д. А., Добровольский В. А., Сизиков В. С., Смирнов А. В., Федоров Б. А. Решение интегрального уравнения Абеля в нестандартной форме методом итераций. / В сб. научн. статей «Современные технологии» под ред. С. А. Козлова. СПб: СПбГИТМО(ТУ), 2001. С. 127–134.
8. Верлань А.Ф., Сизиков В.С. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы. Киев: Наук. думка, 1986.
9. Сизиков В.С. Математические методы обработки результатов измерений. СПб: Политехника, 2001.
10. Сизиков В.С., Смирнов А.В., Федоров Б.А. Численное решение сингулярного интегрального уравнения Абеля обобщенным методом квадратур. // Изв. вузов. Математика. 2004. № 8(507). С. 62–70.

МАГИЧЕСКИЙ ШЕСТИУГОЛЬНИК КРАТНОМАСШТАБНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Е.А. Воронцов, Д.А. Демин, П.П. Коваленко, П.А. Липатов

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор В.М. Мусалимов

В работе продемонстрирована методика кратномасштабного преобразования с использованием в качестве элементов маски чисел магического шестиугольника.

Кривые играют основополагающую роль во многих приложениях графики. В автоматизированном проектировании кривые, являющиеся контурами поперечного сечения, часто используются для описания поверхностей. Для трехмерного моделирования и анимации используются базовые кривые, которые описывают деформацию объектов. При работе с графикой кривые используются для описания областей с постоянной текстурой или цветом, при разработке шрифтов кривые представляют собой контуры букв, и т.д. В частности, представление кривых должно поддерживать:

- непрерывное сглаживание, благодаря которому устраняются нежелательные детали кривой;
- возможность изменения общего контура кривой с сохранением мелких деталей или ее специфики;
- возможность редактирования кривой для любой непрерывно меняющейся степени детализации;
- возможность изменения специфики кривой с сохранением ее общего вида;
- аппроксимацию кривой в пределах гарантированного допуска погрешности для преобразования развертки и других приложений;

Известно немало приемов для аппроксимации и трансформации кривых и поверхностей, их обзор имеется у Хошека и Лассера [1]. В данной работе преобразование кривых основано на вейвлет-анализе [2], в частности, на кратномасштабном преобразовании [3].

Простой способ реализации преобразования состоит в представлении каждой функции $f^j(x)$ через набор значений $(\dots, c_{-1}^j, c_0^j, c_1^j, \dots)$, которые функция принимает в своих вершинах. Чтобы упростить выполнение преобразования, удобно разделить вычисление на два этапа – этап разбивки и этап усреднения.

На этапе разбивки вычисляются вспомогательные последовательности $(\dots, c_{-1}^{0j}, c_0^{0j}, c_1^{0j}, \dots)$, для чего вводятся средние точки. Для неравномерной схемы этап усреднения имеет вид:

$$c_i^j = \sum_k r_{i,k}^j c_{i+k}^{0j}. \quad (1)$$

Можно записать уравнение (1) в другом представлении:

$$c^j = R^j c^{0j}. \quad (2)$$

Здесь R^j представляет собой матрицу преобразования или маску. Маски бывают симметричные (когда строки матрицы являются сдвинутыми версиями друг друга) и несимметричные (когда строки не являются версиями друг друга). Известны маски Чайкина (3)

$$R^j = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 & & & & \\ & 1 & 2 & 1 & & & \\ & & 1 & 2 & 1 & & \\ & & & \cdot & \cdot & \cdot & \\ & & & & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & & & & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix}, \quad (3)$$

На рис. 3, 4 представлены итерации аппроксимации функции.

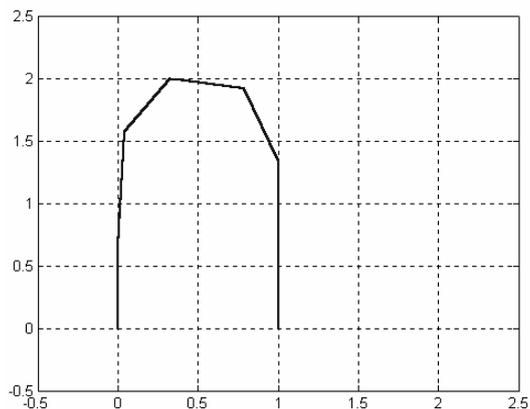
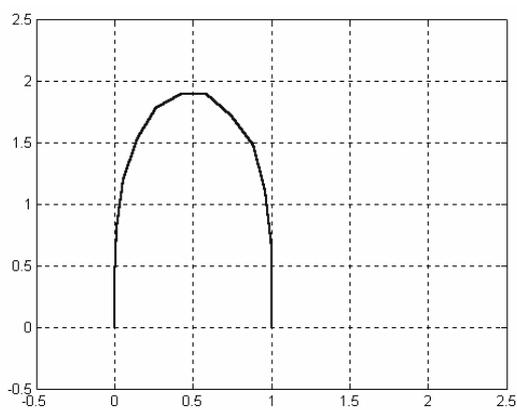
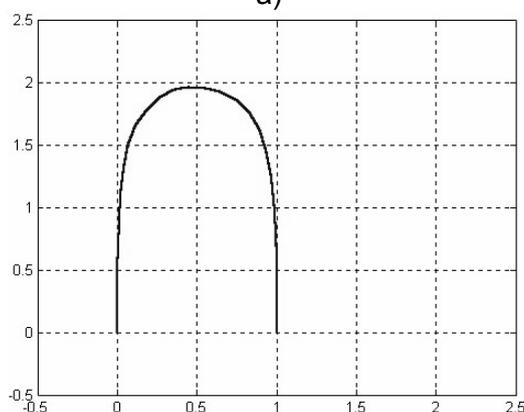


Рис. 3. Первая итерация аппроксимации функции



а)

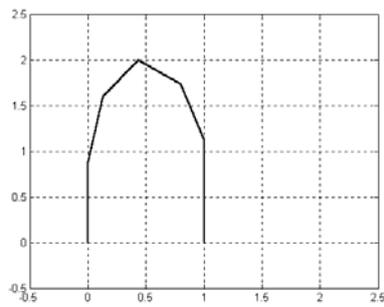


б)

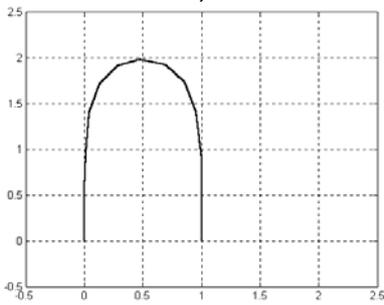
Рис. 4. Вторая (а) и третья (б) итерация

Подобная маска была получена для строки магического шестиугольника с числами «15-13-10». На рис. 5 представлены результаты преобразования (первая и вторая итерации) исходной кривой посредством такой маски.

Можно получить маску с числами строки, состоящей из четырех элементов. Результаты продемонстрированы на рис. 6.

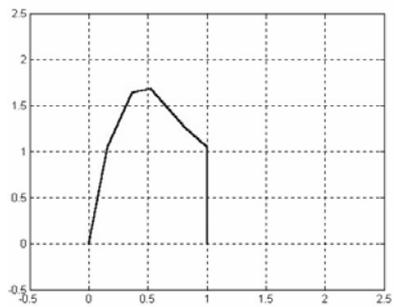


а)

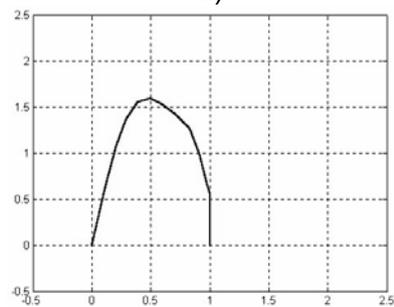


б)

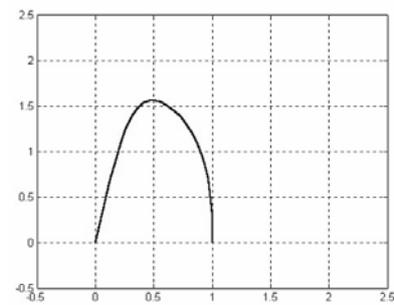
Рис. 5. Первая (а) и вторая (б) итерации (маска «15-13-10»)



а)



б)



в)

Рис. 6. Первая (а), вторая (б) и третья итерация (маска «14-4-8-12»)

Очевидно, что можно составлять маски с необходимым видом преобразования. Например, маска (6) трансформирует исходную кривую (рис. 2) в соответствии с заданным законом (рис. 7).

$$A1 := \frac{1}{38} \cdot \begin{pmatrix} 38 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 9 & 14 & 15 & 0 & 0 & -4 & 0 \\ 0 & 9 & 14 & 15 & 0 & 0 & -3 \\ 0 & 0 & 9 & 14 & 15 & 0 & -2 \\ 0 & 5 & 0 & 9 & 14 & 15 & 0 \\ 0 & 0 & -2 & 5 & 9 & 14 & 15 \\ 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 38 \end{pmatrix} \quad (6)$$

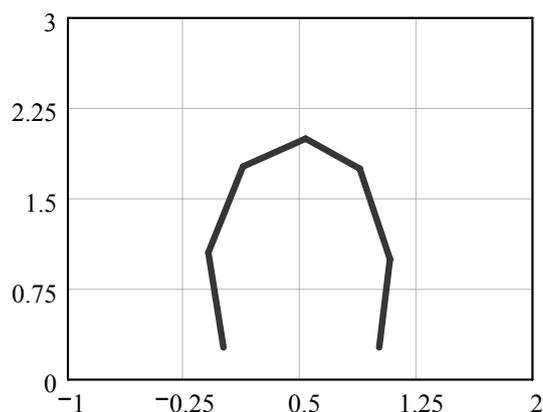


Рис. 7. Заданный закон преобразования

Маску можно либо получить экспериментально, либо, зная закон преобразования кривой (или иного объекта) и свойства маски, синтезировать оператор для конкретного вида трансформации исходного объекта.

Таким образом, из результатов, приведенных в работе видно, что выполняются требования, предъявляемые к представлению кривых и изложенные в начале работы. При использовании в качестве маски элементов магического шестиугольника достигается возможность преобразования исходного прообраза в необходимый образ, т.е. в образ с требуемым законом трансформации. Исходя из этого, планируется использовать этот подход (кратномасштабное преобразования на основе вейвлет-анализа) в рамках теории Раушенбаха [4] для построения отображения пространства на плоскость в соответствии с естественным зрительным восприятием человека.

Литература

1. Josef Hoschek and Dieter Lasser. Fundamentals of Computer Aided Geometric Design. A.K. Peters, Wellesley, MA, third edition, 1993.
2. Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике. М.: СОЛОН-Пресс, 2004. 400 с.
3. Столниц Э., ДеРоуз Т., Салезин Д. Вейвлеты в компьютерной графике. Теория и приложения. Ижевск, 2002. 272 с.
4. Раушенбах Б.В. Системы перспективы в изобразительном искусстве. Общая теория перспективы. М.: Наука, 1986. 256 с.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ДЕФЛЕКТОРОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЛАЗЕРНЫМ ЛУЧОМ

А.В. Ефименко, Ю.С. Монахов, А.А. Петров

Научные руководители – кандидат технических наук, доцент Е.В. Шалобаев,
доктор технических наук, профессор В.Д. Вавилов

Рассмотрены наиболее перспективные, по мнению авторов, конструкции оптико-механических дефлекторов (ОМД), осуществляющих пространственную развертку лазерного излучения. Указаны основные достоинства и недостатки таких конструкций. Предлагаемые конструкции ОМД могут найти применение в различных технических системах, в том числе в лазерных медицинских установках сканирующего типа.

Оптико-механические дефлекторы (ОМД) применяются в различных отраслях промышленности, техники и медицины: в системах записи и отображения информации; в устройствах оптической памяти; в оптических вычислительных приборах; в системах телевидения, получения микроизображений, лазерной локации, обзора, слежения и наведения, распознавания образов; в системах считывания штрихового кода; для контроля и измерения геометрических параметров деталей при их изготовлений, а также в медицинских лазерных сканирующих терапевтических установках. Предлагаемые конструкции оптико-механических дефлекторов могут найти свое применение во многих из перечисленных областей, однако разрабатываются для действующих медицинских терапевтических установок, изготавливаемых ЗАО «НПО Скала» (г. Санкт-Петербург – Ломоносов). Применение в указанных установках дефлекторов нового типа позволит снизить массогабаритные показатели, увеличить диапазон изменения угловых координат, увеличить частоту сканирования и упростить процесс управления разверткой лазерного луча.

Рассматриваемые в рамках данной работы конструкции ОМД можно разделить на два класса по массогабаритным показателям: это «обычные» дефлекторы для так называемого макромира и микро-дефлекторы, изготавливаемые на основе МЭМС-технологий для микросистемной техники (хотя имеется возможность применения указанных микроконструкций и в макромире с небольшими изменениями).

Начнем рассмотрение конструкций ОМД для макромира с используемой на сегодняшний день в установках «НПО Скала» схемы торсионного дефлектора [1–4].

Предлагаемый резонансный двухкоординатный дефлектор построен на основе двух совместно работающих модуляторов, ориентированных в пространстве так, что оси поворота их отражающих поверхностей перпендикулярны друг другу. Каждый отдельно взятый модулятор включает в себя статор с двумя обмотками управления и постоянными магнитами и полый ротор с закрепленным на его конце зеркалом (рис. 1). Ротор выполнен в виде цилиндра с центральным продольным отверстием. Концы ротора заключены в подшипники. Внутри полого ротора вставлен упругий элемент – торсион. Одним концом закрепленный в начале ротора, торсион проходит по всей длине внутри ротора и крепится другим своим концом к неподвижному наконечнику, зафиксированному, как и подшипники ротора, по одной оси в корпусе модулятора.

Отсутствие в предлагаемой конструкции дефлектора каких-либо элементов с ступенчатым движением и размещением торсиона внутри полого ротора позволяет максимально уменьшить габариты, делает модуль удобным в эксплуатации и обеспечивает высокий ресурс работы при неизменном значении номинальных параметров. При работе ОМД угол пространственной развертки луча составляет 20° , а частота колебаний зеркала – до 650 Гц.

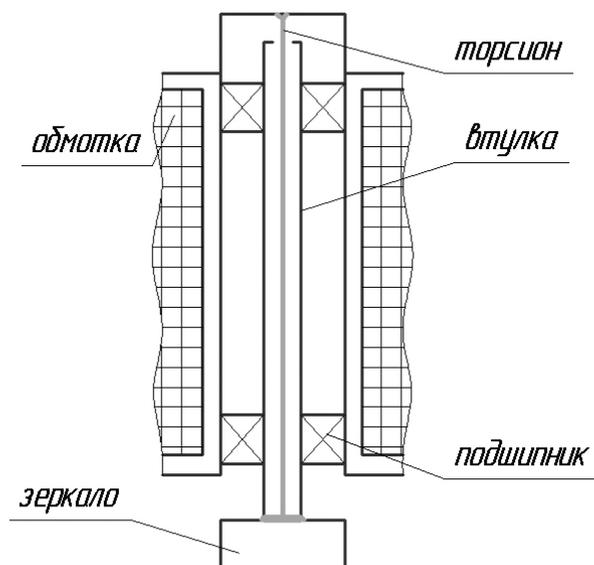


Рис. 1. Схема торсионного ОМД

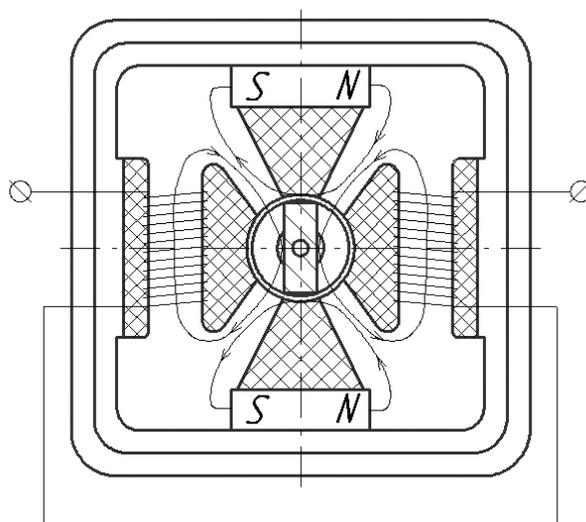


Рис. 2. Направление магнитной индукции в торсионном ОМД

Источником движения в предлагаемой конструкции служит моментный двигатель (МД) – электромеханический преобразователь, у которого на вход подается электрический сигнал, а выходом является электромагнитный момент. Момент, развиваемый двигателем, уравнивается механической пружиной (торсионом), а выходом прибора является угол поворота, зависящий от сигнала, подаваемого в обмотку управления (ОУ). Данный двигатель относится к классу поляризованных МД, в которых поток в зонах взаимодействия статора и ротора создается совместно с постоянным магнитом (ПМ) к ОУ. Двигатель – двухполюсный. В одних воздушных зазорах моментного двигателя магнитодвижущая сила ПМ и ОУ, а, следовательно, и соответствующие индукции направлены согласно, а в других – встречно. В результате возникает реактивный вращающий момент, направленный в сторону уменьшения магнитного сопротивления тех воздушных зазоров, в которых индукции складываются (рис. 2). Рассмотренная конструкция обладает рядом преимуществ: приемлемые параметры сканирования (частота и рабочий угол поворота); достаточно высокая надежность (как показал опыт применения в реальных установках указанной конструкции в течение 3 лет); относительная

простота управления. Основным недостатком такой конструкции является необходимость применения двух модулей ОМД для реализации управления лучом по двум угловым координатам (пространственная развертка излучения). Эта особенность ведет к определенным трудностям при монтаже дефлекторов и проблемам в калибровке их относительной ориентации.

Следующей конструкцией оптико-механического дефлектора для макромира является, так называемая растяжка на карданном подвесе. Указанная конструкция обладает тем отличительным свойством, что осуществляет развертку луча сразу по двум угловым координатам. Конструктивно предлагаемый ОМД реализован в виде статора с обмотками управления и ротора, выполненного в виде карданного подвеса на упругих направляющих – торсионах. На внутренней (рабочей) поверхности статора имеются электромагниты (катушки), расположенные по сферической поверхности (рис. 3). Подвижный ротор представляет из себя металлическое зеркало из полированного алюминия, располагающееся в подвижной рамке на торсионах (рис. 4). К нижней (нерабочей) поверхности зеркала жестко прикрепляется стержень с магнитным наконечником, который может осуществлять движение (вместе с зеркалом) при закрутке торсионов по сферической поверхности (над электромагнитами статора). Для приведения ротора в движение необходимо создание электромагнитного поля катушками, за счет чего магнитный наконечник ротора будет двигаться в соответствующем направлении поля. Таким образом, осуществляя в каждый момент времени питание определенных катушек, можно получить требуемые параметры магнитного поля, и, следовательно, требуемые законы движения ротора (зеркала). Преимуществом такой конструкции ОМД является возможность пространственной развертки излучения сразу по двум угловым координатам, приемлемые величины рабочих углов поворота и частоты колебаний. Недостатками такой конструкции является относительно большая сложность изготовления такой конструкции.

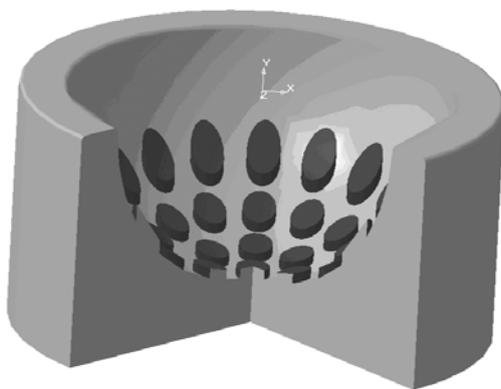


Рис. 3. Статор двухкоординатного ОМД на электромагнитах

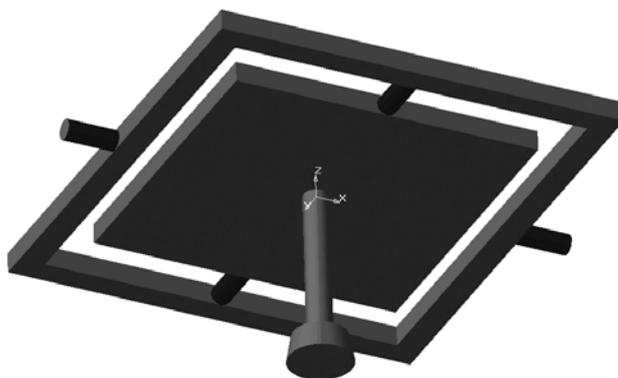


Рис. 4. Ротор двухкоординатного ОМД на электромагнитах

Теперь рассмотрим конструкции ОМД для микросистемной техники. Одним из подобных конструктивных решений является использование микромеханического зеркала, помещенного на упругих перемычках-растяжках в плоский карданный подвес (рис. 5) [5, 6]. Однако на этом пути есть проблема – углы по разным координатам неодинаковы, что вызвано разной жесткостью по осям. Правда, указанная проблема вполне разрешима путем изменения геометрических параметров конструкции (опор).

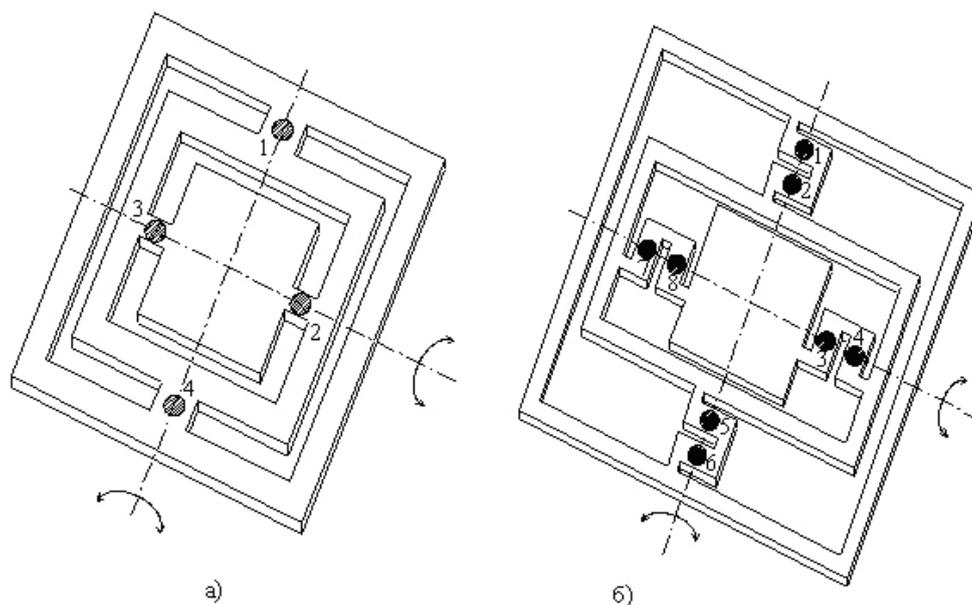


Рис. 5. ОМД с бесконтактным приводом

Наибольших показателей углов поворота зеркала можно добиться, применив несколько видоизмененную конструкцию карданного подвеса (рис. 5, б). Отличие состоит в конструкции перемычек-растяжек – они выполнены не цельными, а с параллельными разрезами. Предложенные конструкции приводятся в движение за счет энергии лазерного излучения. В зависимости от зоны облучения перемычки зеркала поворачиваются в ту или другую сторону.

Механизм возникновения деформаций под действием температурных напряжений – следующий. При локальном нагревании некоторой области лучом лазера снижается предел текучести (в результате чего пластические деформации возникают при существенно меньших напряжениях). Под действием возникших в результате неравномерного нагрева напряжений сжатия среда деформируется, напряжения частично релаксируют. После окончания импульса, в процессе остывания, деформированная область не принимает исходных размеров и остается в напряженном состоянии. Окружающие участки во время теплового сокращения растягивают эту область, и в ней возникают остаточные напряжения растяжения. Если остаточные напряжения превышают предел текучести, возникают остаточные деформации. Указанная конструкция несколько сложнее в том плане, что приходится облучать не 4, а 8 точек (они показаны на рисунке заштрихованными областями 1–8). Достоинством таких конструкций является возможность бесконтактного приведения ОМД в движение. Очевидны недостатки предложенной конструкции – относительно небольшие величины углов поворота и частоты колебаний рабочей поверхности, обусловленные инерционностью появления температурных деформаций.

Одной из разновидностей рассмотренной конструкции оптико-механического дефлектора является аналогичная схема карданного подвеса, но с тем отличием, что упругие перемычки работают не на скручивание (торсионы), а на изгиб (аналог плоской

пружины) (рис. 6). В результате такой замены появляется возможность увеличения рабочего угла поворота, однако несколько снижается долговечность конструкции.

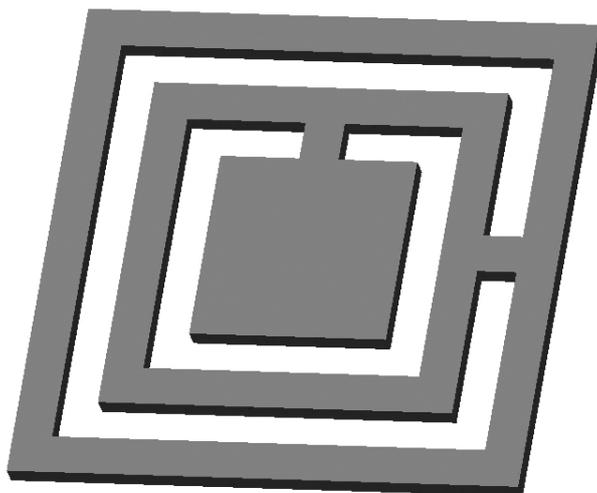


Рис. 6. Конструкция ОМД на карданном подвесе

Еще одна конструкция ОМД представлена на рис. 7 [7–10]. Он состоит из двух полых металлических цилиндров, соединенных тремя узкими перемычками (1–3). Нагревая лазером эти перемычки, мы получаем поворот верхней, незакрепленной части на некоторый угол α . Комбинируя прогреваемые участки и изменяя степень их нагрева, можно получить сложное пространственное движение рабочей части. Если к верхней рабочей части присоединить отражательную поверхность, то получившаяся конструкция будет осуществлять развертку лазерного излучения по двум угловым координатам.

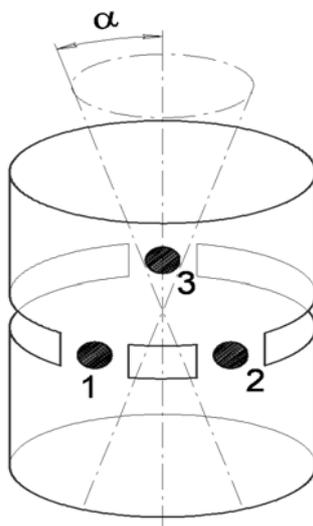


Рис. 7. Конструкция ОМД с бесконтактным управлением по 3 точкам

Последняя из рассматриваемых конструкций двухкоординатного ОМД, приводимого в движение бесконтактным способом за счет лазерного излучения, представлена на рис. 8 [1]. Данный дефлектор представляет собой плоское зеркало, установленное на трех сферических опорах, изготовленных из специального материала – ситалла, который имеет свойство изменения своих геометрических параметров при облучении лазером. При облучении лазером (и нагревании) шариков из ситалла наблюдается увеличение их объема примерно в 1,5 раза, при прекращении облучения объект уменьшается до

первоначальных размеров. Следовательно, подвергая облучению шарообразную опору, мы изменяем ее радиус, и зеркало поднимается или опускается в определенную сторону. Варьируя облучаемые опоры и дозу облучения, можно добиться сканирования дефлектором по двум координатам. Однако очевидным недостатком такой конструкции является низкая частота сканирования, вызванная инерционными процессами нагревания и остывания материала.

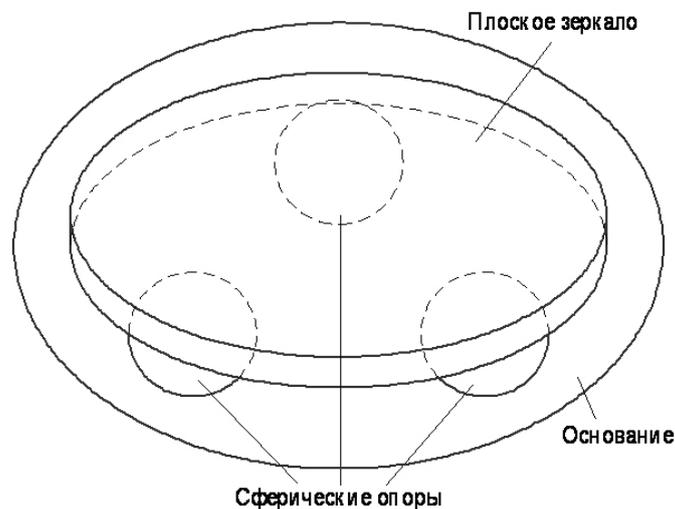


Рис. 8. ОМД на сферических опорах

В заключение следует отметить, что представленные конструкции оптико-механических дефлекторов существенно отличаются друг от друга как по типу механизма приведения зеркала в движение (электромагнитное поле либо энергия лазерного излучения), так и по массогабаритным показателям (ОМД на плоских карданных подвесах с бесконтактным приводом могут быть реализованы на уровне микросистемной техники и использоваться в МЭМС-технологиях). Выбор типа ОМД определяется конкретными задачами и требованиями разработчиков технических систем на основе указанных особенностей каждой из конструкций.

Литература

1. Шалобаев Е.В., Монахов Ю.С., Ефименко А.В. Оптимизация параметров оптико-механического дефлектора сканирующего лазерного стимулятора. // Современные направления приборостроения, информационных и гуманитарных наук. Сборник научных трудов / Под ред. В.Л. Ткалич. Том 2. СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. С. 27–30.
2. Шалобаев Е.В., Монахов Ю.С., Леонтьева Н.В., Ефименко А.В. Некоторые аспекты разработки медицинского сканирующего лазерного стимулятора для проведения физиотерапевтических процедур. // Труды Четвертой Международной конференции «Приборостроение в экологии и безопасности человека». СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. С. 111–115.
3. Шалобаев Е.В., Монахов Ю.С., Ефименко В.Т., Ефименко А.В. Разработка и изготовление оптико-механического дефлектора на основе моментных двигателей и торсионов. // Известия ОрелГТУ. Машиностроение, приборостроение, 2003. Выпуск 3. С.84–88.
4. Дунаев А.В., Евстигнеев А.Р., Шалобаев Е.В. Лазерные терапевтические устройства / Под ред. К.В. Подмастерьева: Учебное пособие. Орел: ОрелГТУ, 2005. 143 с.

5. Шалобаев Е.В., Монахов Ю.С. Обзор разработок микроактюаторов на основе лазерных технологий и предложения по перспективам их развития. // Микросистемная техника. 2004. №1. С. 12–17.
6. Шалобаев Е.В., Монахов Ю.С. Применение лазерных технологий в микроактюаторах. // Датчики и системы. 2004. №10. С. 41–42.
7. Muller B. Virtual Engineering helps to get laser adjustment industrially accepted. First international Symposium on Laser Precision Microfabrication. // Proc. SPIE. Vol. 4088. 2000. P. 164–167.
8. Vollertsen F., Geiger M. Laserstrahljustieren mechatronischer Komponenten. Laser – von der Wissenschaft zur Anwendung. Strahltechnik Bd. 10. BIAS Verlag, Bremen. 1997. P. 309–320.
9. Вейко В.П., Петров А.А. Лазерная юстировка положения микродеталей в пространстве. // Научно-технический вестник СПбГИТМО(ТУ). Вып. 4. 2001. С. 113–118.
10. Вейко В.П., Петров А.А. Пространственное позиционирование микродеталей с помощью лазерного излучения. // Микросистемная техника. 2002. №5. С. 23–27.

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТРОТЫ ЗРЕНИЯ

Е.А. Воронцов, А.С. Черноусов

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор В.М. Мусалимов

В работе приводятся краткие сведения из теории визометрии, методах контроля остроты зрения, а также классификация средств определения остроты зрения.

Введение

Зрительная система новорожденного не похожа на зрительную систему взрослого человека. Первые недели своей жизни дети практически не реагируют на зрительные раздражители. Под влиянием яркого света у них лишь сужаются зрачки, закрываются веки, глаза при этом блуждают независимо друг от друга. В этот период зрение еще слабо связано с сознанием. У новорожденного острота зрения намного слабее, чем у взрослого человека, и достигает 0,015 (у взрослого), затем, постепенно возрастает до 0,01–0,03. Такое слабое зрение объясняется тем, что сетчатка еще не сформировалась, а желтое пятно (тот участок сетчатки, благодаря которому зрение становится 100%-м) еще вообще отсутствует [1]. Кроме того, ребенок часто ошибается и в определении объема предметов. Он пытается схватить движущиеся тени, солнечного зайчика. Восприятие объема у детей развивается только тогда, когда они начинают передвигаться в пространстве. Ребенок рассматривает и активно обследует свое ближайшее окружение. На основе этого у ребенка формируются зрительные представления о расстоянии, что, в свою очередь, развивает трехмерное восприятие окружающего мира. К этому времени заканчивается один из периодов развития бинокулярного восприятия мира. Однако стереоскопическое зрение еще не отлажено полностью. По данным исследований, лишь к 10–12 годам это восприятие приближается к уровню взрослого. Разрешающая способность (острота) зрения и становление цветоощущения непосредственно связаны с выполнением зрительно-пространственных функций, а поданным становления цветоощущения можно судить и о психофизическом развитии человека.

Под остротой зрения понимают способность глаза различать две светящиеся точки раздельно. У здорового человека острота зрения условно равна единице, т.е. глаз способен различить две светящиеся точки раздельно под углом $1'$. Это связано с тем, что для раздельного видения двух точек необходимо, чтобы между возбужденными колбочками находилась минимум одна невозбужденная колбочка (рис. 1).

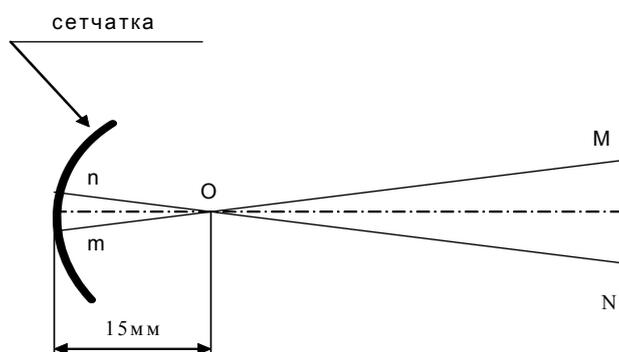


Рис. 1. Разрешающая способность глаза

Необходимо учитывать, что расстояние от хрусталика до сетчатки в среднем составляет 15 мм [2]. Вследствие того, что диаметр колбочек равен 3 мк, для раздельного видения двух точек необходимо, чтобы расстояние между изображениями этих точек

на сетчатке составляло не менее 4 мк (рис. 2), а такая величина изображения получается именно при угле зрения $1'$.

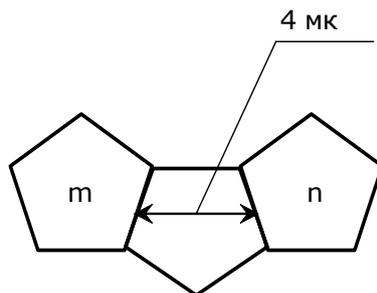


Рис. 2. Фрагмент сетчатки

Острота зрения вычисляется по формуле Снеллена:

$$V = d/D,$$

где V (Visus) – острота зрения, d – расстояние, с которого видит пациент, D – расстояние, с которого должен видеть глаз с нормальной остротой зрения знаки данного ряда таблицы. Существуют несколько вариантов строения (свойств) оптической системы глаза: близорукий, нормально видящий (эмметропия), дальнозоркий. На рис. 3 представлено три варианта оптической системы глаза.

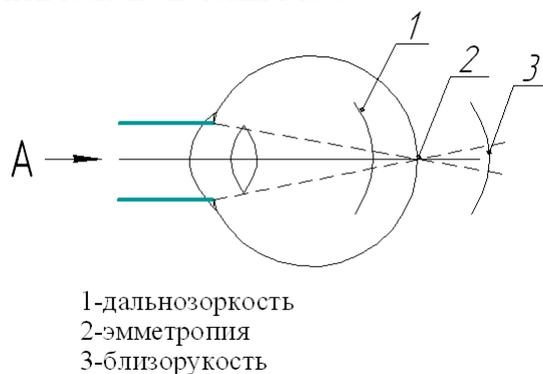


Рис. 3. Три варианта оптической системы глаза

Исследованием остроты зрения занимается визометрия. На рис. 4 представлены основные методы визометрии.

К стандартным средствам определения остроты зрения относятся таблицы оптотипов. История появления таблиц оптотипов уходит своими корнями во вторую половину 19 века, когда голландский офтальмолог, профессор Герман Снеллен (1835–1908) впервые предложил специальные таблицы для исследования остроты зрения [3] (рис. 5).

Наибольшее распространение получили десятичные таблицы, предложенные в 1875 г. Монуайе [5]. Его таблица состоит из 10 рядов букв, впоследствии были добавлены еще 2 строки – для остроты зрения 1,5 и 2,0. Десятичный способ для определения остроты зрения, предложенный более 100 лет назад, применяется и в настоящее время. В России буквы (русского алфавита) используются в таблицах Головина-Сивцева, которые впервые появились в 1928 г., вторая половина этих таблиц образована рядами оптотипов – колец Ландольта [5], предложенных в начале XX века немецким офтальмологом и названные его именем. Кольцо Ландольта (рис. 5) является стандартным оптотипом.

В стандарте ISO 8596 [4] приведена следующая формулировка общих требований к оптотипам: «Остроту зрения, равную 1, представляет кольцо Ландольта, наружный диаметр d которого охватывает угол $5'$, а ширина и разрыв кольца – угол $1'$ при соот-

ветствующем расстоянии наблюдения». Подробное описание кольца Ландольта приведено в табл. 1.

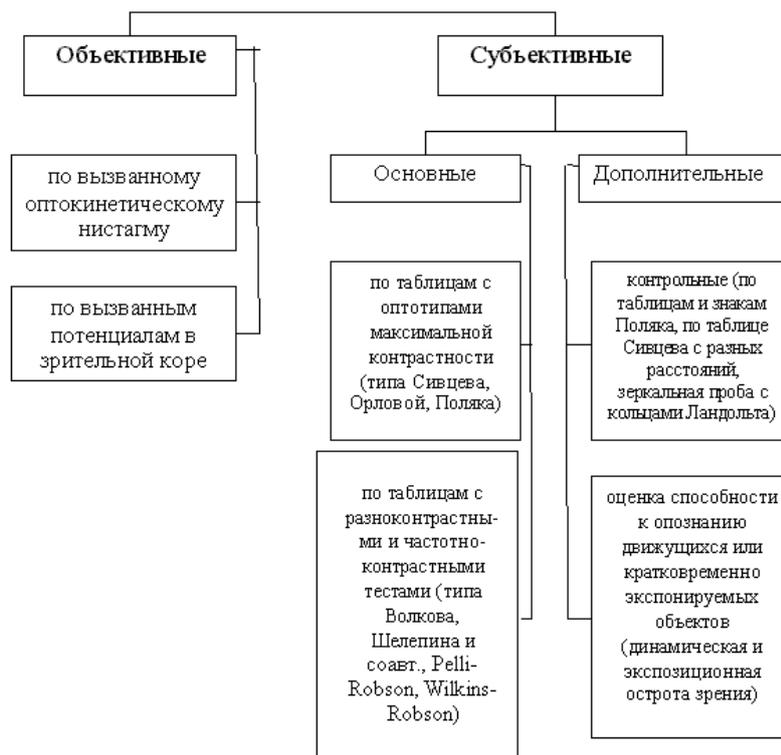


Рис. 4. Методы визометрии



Рис. 5. Пример таблицы оптотипов (таблица Сивцева)

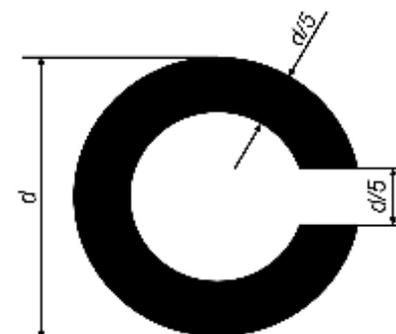


Рис. 6. Кольцо Ландольта

Острота зрения	Размер опто типа			Минимальное число предъявлений
	Логарифм величины разрыва	Угол наблюдения разрыва и ширины кольца		
		Минуты дуги	Допустимое отклонение, %	
0,05	+1,3	20	± 5	2
0,063 (0,06)	+1,2	16		
0,08	+1,1	12,5		
0,1	+1	10		
0,125	+0,9	8	± 5	3
0,16	+0,8	6,3		
0,2	+0,7	5		
0,25	+0,6	4	± 5	5
0,32 (0,3)	+0,5	3,2		
0,4	+0,4	2,5		
0,5	+0,3	2		
0,63 (0,6)	+0,2	1,6		
0,8	+0,1	1,25		
1,0	0	1		
1,25	-0,1	0,8		
1,6	-0,2	0,63		
,02	-0,3	0,5		

Таблица 1. Степени остроты зрения

При размещении более одного опто типа на общем поле (при формировании таблиц) следует выдерживать интервалы между опто типами (горизонтальные и вертикальные).

Острота зрения	Минимальный промежуток между стандартными опто типами
Менее 0,06	2-х кратная ширина разрыва кольца Ландольта
0,06 – 0,125	диаметр кольца Ландольта
0,16 – 0,32	1,5-кратный диаметр кольца Ландольта
0,4 – 1,0	2- кратный диаметр кольца Ландольта
Свыше 1,0	3- кратный диаметр кольца Ландольта

Таблица 2. Интервалы между стандартными опто типами (от края до края)

Требованиям стандартов ISO отвечают таблицы, выполненные типографским способом, в частности, таблицы Головина-Сивцева. Кроме этого, в соответствии с международными стандартами ISO 8596 и ISO 8597 были разработаны таблицы РОРБА, названные так по первым буквам имен авторов – Ю.З. Розенблюма, И.Г. Овечкина, В.А. Рослякова, М.И. Бершанского, Л.И. Айзенштата. Особенности этих таблиц по сравнению с таблицами Головина-Сивцева состоят в следующем:

- имеется оптотип для определения остроты зрения 0,05, являющейся границей форменного зрения;
- изменение размеров оптотипов происходит равномерно от строки к строке с коэффициентом 1,26 (кроме первых трех для слабовидящих);
- использованные буквы можно интерпретировать как в русском, так и в латинском алфавитах;
- использовано одиннадцать букв вместо семи, что затрудняет их запоминание
- мала дискретность при переходе от одной к другой строке в оптотипах для низкой и высокой остроты зрения.

Таблица Сивцева-Головина	Таблицы Снеллена	
	20 футов	6 метров
0,1	20/200	6/60
-	20/160	6/48
-	20/125	6/38
0,3	20/100	6/30
-	20/80	6/24
0,3	20/63	6/20
0,4	20/50	6/15
0,5	20/40	6/12
0,6	20/32	6/10
0,7	-	-
0,8	20/25	6/7.5
0,9	-	-
1,0	20/20	6/6
-	20/16	6/5
1,5	20/12.5	6/3.75
2,0	20/10	6/3

Таблица 3. Соответствие показателей остроты зрения при использовании различных таблиц

В настоящее время выпускаются таблицы РОРБА с буквами и кольцами Ландольта. Следует отметить, что стандарты также определяют соответствие различных таблиц для проверки остроты зрения.

На сегодняшний день существуют средства автоматизации проверки остроты зрения [3], в частности, проекторы оптотипов (табл. 4).

Современные проекторы знаков характеризуются большим разнообразием тест-объектов. Для исследования остроты зрения каждый прибор имеет три-четыре вида тест-объектов. Например, в модель АСР-7 (разные модификации АСР-7Е, АСР-7М, АСР-7ЕМ, АСР-7R) включены: кольца Ландольта, цифры, буквы, знаки Снеллена, детские картинки. Диапазон измерения остроты зрения в зависимости от предлагаемого тест-объекта представлен в табл. 5. Кроме этого, используется большое количество специальных тестов для проведения исследования астигматизма, а также различных нарушений бинокулярного зрения и стереозрения: лучистая фигура, четырехточечный тест, красно-зеленый, поляризационный стереотест и др.

Для удобства работы проекторы часто снабжены горизонтальными и вертикальными масками для быстрого предъявления нужной строки, столбца или даже отдельно-

го знака. Таблица 6 представлена для оценки скорости смены масок и скорости выбора теста в различных моделях проекторов.

Мод.	Фирма, страна	Расст. проекции, м	Кол-во проецир. кадров	Увеличение на расстоянии 5 м, крат	Способ управления	Габариты, мм	Масса кг
АСР-7М	Торсон Япония	3 – 6,1	30	30	Дистанционный (без прогр)	196×292 ×237	6
АСР-7Е	Торсон Япония	3 – 6,1	30	30	Дистанционный (с прогр)	196×292 ×237	6
АСР-4	Торсон Япония	3 – 6	-	24	Дистанционный	176×353 ×249	6
СР-4	Торсон Япония	3 – 6	-	24	Ручной	176×353 ×249	5,5
SCP-660	Nidek Япония	2,9 – 6,1	26	-	Дистанционный		
Selectra P-O-C	Leica/Reichert, Германия	2,4 – 6,1	25	-	Дистанционный (програм.)	197×219 ×173	6,1
L-4800	Inami, Япония	3 – 6	24	35	Дистанционный	200×325 ×195	4,5
Robochar t HCP 710	Ноуа, Япония	2,9 – 6,1	16		Дистанционный (непрограм. Без масок и фильтров)	340×220 ×280	6,5
HCP 720		2,9 – 6,1	16		Дистанционный (непрограм. с масками и фильтрами)	340×220 ×280	6,5
HCP 721		2,9 – 6,1	16		Дистанционный (програм. с масками и фильтрами)	340×220 ×280	6,5
SZP-250	Carl Zeiss, Германия				Дистанционный		

Таблица 4. Проекторы оптоотипов

Обозначение типа диска с тестами	Диапазон определения остроты зрения для тест-объектов				
	Кольцо Ландольта	Детские картинки	Цифры	Знаки Снеллена	Буквы
F	0,05, 2,0	0,1, 1,0	0,1, 1,5	0,1, 1,5	-
A	-	0,1, 1,0	0,1, 1,5	0,1, 1,5	0,05, 2,0

С	0,2 , 1,25	0,1 , 1,0	-	-	0,05 , 2,0
---	------------	-----------	---	---	------------

Таблица 5. Диапазон остроты зрения для различных видов опто типов группы знаков АСР-7

Фирма, страна	Модель	Скорость смены кад-ра, кадр/сек	Скорость смены масок, кадр/сек
Торсон, Япония	СР-4	1	1
	АСР-4	1	1
	АСР-6Е	0,2	0,3
	АСР-7	0,2	0,2
	АСР-7М	0,2	0,2
	АСР-7Е	0,2	0,2
	АСР-7ЕМ	0,2	0,2
Нидек, Япония	SCP-660	0,3	-
Инами, Япония	L-4800	0,2	0,3
Ноуа, Япония	Robochart		
	НСР-710	0,5	-
	НСР-711	0,5	-
	НСР-720	0,5	-
	НСР-721	0,5	-

Таблица 6. Скорости смены масок и скорости выбора теста

Имеется большое разнообразие функционального исполнения проекторов знаков «Robochart» фирмы «Ноуа», Япония. В настоящее время изготавливаются 4 модели этой группы приборов:

- НСР-710 - непрограммируемая модель без масок и фильтра,
- НСР-711 - программируемая модель без масок и фильтра,
- НСР-720 - непрограммируемая модель с масками и фильтрами,
- НСР-721 - программируемая модель с масками и фильтрами.

При этом поставляются испытательные таблицы 6 типов:

- Тип А – японские символы, кольца Ландольта, циферблаты часов;
- Тип В – буквы алфавита, картинки, фиксированные точки поля;
- Тип С – цифры, картинки, фиксированные точки поля;
- Тип D – буквы алфавита, кольца Ландольта, циферблаты часов;
- Тип Е – таблицы Снеллена, картинки, фиксированные точки поля;
- Тип F - цифры, кольца Ландольта, фиксированные точки поля.

В настоящее время проекторы зрительных знаков выпускаются многими зарубежными фирмами: «Торсон», «Takagi», «Tomey» (Япония); «Carl Zeiss» (Германия), «Essilor» (Франция), «Mentor» (США) и другими. В России оптические компоненты к проекторам выпускаются, например, фирмой «Олис» [7]. В лаборатории офтальмоэргонномики и оптометрии при Московского научно-исследовательского института глазных болезней им. Гельмгольца созданы проекторы знаков для исследования остроты зрения и подбора очков.

Метод определения остроты зрения, в котором в качестве тестов используются одиночные знаки (кольца Ландольта, знаки Снеллина. Головина-Сивцева и др.), контрасты которых с фоном близки к единице, дает неполную информацию о состоянии

зрения. Более качественную оценку можно получить с помощью тестов, контраст которых с фоном является переменным. Это позволит с большей достоверностью проводить профессиональный отбор, особенно там, где требуется высокая острота зрения при наблюдении объектов малых контрастов, на ранних этапах проводить диагностику нарушения функций зрения при некоторых заболеваниях. Кроме того, поскольку частотно-контрастная характеристика (ЧКХ), или функция передачи модуляции (ФПМ), является одной из основных характеристик оценки качества многих оптических приборов, то значение ЧКХ глаза является необходимым для интегральной оценки качества оптического прибора, работающего совместно с глазом наблюдателя.

Получить сведения о ЧКХ глаза можно косвенным путем – по субъективной оценке, определяемой либо по пороговому контрасту периодических решеток известной пространственной частоты, необходимой для ее обнаружения на пределе разрешения, либо по пороговой частоте решетки при заданном контрасте тестовых полос.

На основании изложенного можно дать следующие рекомендации. Если требуется провести экспресс-диагностику («быструю» диагностику), то целесообразно использовать портативные таблицы опто типов, предназначенные для наблюдения с расстояния до 1 м. Такие таблицы выполняются в виде альбомов или небольших плакатов (до 300×300 мм.) Но такая диагностика подразумевает значительную погрешность в определении остроты зрения. Для более качественной оценки необходимо помещение, позволяющее наблюдать таблицы с расстояния до 6 м., стандартные таблицы опто типов, специальное устройство подсветки и определенная освещенность в помещении. Стандартные таблицы могут быть реализованы с помощью проекторов опто типов (табл. 4). В зависимости от требований к процессу диагностики (скорость, объем, точность) можно выбрать необходимое устройство проекции опто типов. Среди быстродействующих проекторов с наименьшими габаритами следует отметить модель АСР-7Е («Торсон», Япония).

Для определения ЧКХ зрения требуется комплекс мероприятий и средств. Материальная база включает в себя проектор опто типов с масками и фильтрами (желательно программируемый), персональный компьютер, специальное помещение. Поэтому такое обследование возможно проводить только в стационаре. Поскольку габариты в данном случае не играют существенной роли, то внимание следует обратить на быстродействие, увеличение и способ управления. В связи с этим для научных исследований можно порекомендовать наиболее приемлемое оборудование таких фирм, как «Торсон» (Япония) – модель АСР-4, «Nidek» (Япония) – модель SCP-660, «Carl Zeiss» (Германия) – SZP-250, «Essilor» (Франция).

Существующие на сегодняшний день средства и большая часть методов не позволяют провести комплексную оценку свойств зрения.

Работа проведена в рамках исследования по созданию принципиально новой методики и средств комплексного исследования характеристик зрения.

Литература

1. Волков В.В., Луизов В.А., Овчинников Б.В., Травникова Н.М. Эргономика зрительной деятельности человека. Л.: Машиностроение, 1980. 112 с.
2. Кравков С.В. Глаз и его работа. М.: Изд-во АН СССР, 1950. 532 с.
3. Тамарова Р.Н. Оптические приборы для исследования глаза. М.: Медицина, 1982.
4. Стандарт ISO 8596.
5. Исследование остроты зрения по таблицам опто типов в соответствии с международными стандартами ISO. / <http://www.olis.ws/clauses/iso/iso.htm>
6. Диагностика внимания, Кольца Ландольта. / http://www.adalin.mospsy.ru/r_02_00/r_02_05e.shtml

7. Оптическое оборудование фирмы «Олис»./ <http://www.8a.ru/firms/g1190.html>

ФОРМИРОВАНИЕ ПОРЯДКОВЫХ ШКАЛ В СЛАБОФОРМАЛИЗОВАННЫХ ЗАДАЧАХ

М.Н. Елунин

(Самарский государственный архитектурно-строительный университет)
Научный руководитель – доктор технических наук, профессор С.А. Пиявский
(Самарский государственный архитектурно-строительный университет)

Рост и развитие информационных технологий позволяет нам увидеть уже знакомые стороны жизни человека с другого ракурса, с другой, непривычной точки зрения. Эти процессы проникают в нашу жизнь и спустя некоторое время становятся неотъемлемой частью нашего существования. Данная работа представляет интерес в решении задач, связанных с слабоформализованными областями, которой, к примеру, является музыка, ее философия и восприятие. В работе была поставлена задача – предложить такой подход и разработать такое программное обеспечение, которое помогло бы представить музыкальные произведения в удобном для визуального представления человеком трехмерном пространстве.

Введение

Развитие информационных технологий создает новые средства для исследования и анализа таких областей науки, экономики, техники и вообще жизни человека, которые раньше не поддавались количественному изучению. Недаром в известной классификации, предложенной в 1985 г. в статье Г. Саймона и А. Ньюэлла [1], выделяются так называемые хорошо формализованные и слабоформализованные проблемы. Хорошо формализованные или количественно сформулированные проблемы – это те, в которых существенные зависимости выяснены настолько хорошо, что могут быть выражены в числах или символах, получающих, в конце концов, численные оценки. Слабоформализованные или смешанные проблемы – это те, которые содержат как количественные, так и качественные элементы, причем качественные, малоизвестные и неопределенные стороны проблем имеют тенденцию доминировать. В работе была поставлена задача – предложить такой подход и разработать такое программное обеспечение, которое могло бы продвинуться чуть дальше в мир слабоформализованных проблем. Музыка как никакая другая область человеческой жизни очень популярна среди людей. Многие ее законы и аксиомы можно описать математически, но все же есть такие проблемы и задачи, которые до сих пор не подвергались такому анализу.

Постановка задачи и план исследования

Дано некоторое множество хаотически расположенных объектов в частично упорядоченном пространстве. Между этими объектами определено понятие расстояния, не обязательно геометрическое. Требуется разработать математический аппарат и программное обеспечение, позволяющие достаточно точно, естественным образом установить строгий порядок (ранжирование) между этими объектами, чтобы получить возможность использовать при их анализе строгий математический аппарат. В результате этого появится возможность решения ряда задач, например:

- визуальное представление объектов, описываемых точками многомерного пространства (размерности больше 3);
 - восстановление функции предпочтения покупателей в Интернет-магазине;
 - математический анализ музыкальных произведений,
- и др.

Чтобы достаточно естественным образом установить строгий порядок (ранжирование) объектов в каком-то слабо упорядоченном пространстве, нужно, чтобы рядом стояли такие объекты, которые наиболее близки друг к другу, т.е., с математической точки зрения, чтобы максимальное из расстояний между соседними объектами было минимальным.

Математические модели

Постановка задачи оптимального ранжирования объектов на основе парных оценок

Пусть n – количество объектов, i, j – номера объектов, $i, j = 1, \dots, n$, a_{ij} – расстояние между i -м и j -м объектами, $R(i)$ – функция ранжирования, $I(k) = R^{-1}$ – обратная функция к функции ранжирования, d_k^R – расстояние между k и следующим за ним в ранжирующем множестве объектов,

$$d_k^R = a_{I(k), I(k+1)}, k=1, \dots, n;$$

$d^R = \max_{k \in [1, n-1]} d_k^R$ – качество ранжирования. Требуется: найти такую функцию ранжирования \tilde{R} , при которой качество ранжирования d^R является наилучшим, т.е. стремится к минимальному значению

$$d^{\tilde{R}} = \min_R d^R.$$

Модель оптимального ранжирования на основе целочисленного линейного программирования

Пусть n – количество объектов; a_{ij} – расстояние между i -ым и j -ым объектами; U_{ij} – признак следования i -го объекта за j -м,

$$U_{ij} = \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ если } i\text{-й объект стоит сразу после } j\text{-ого} \\ 0 \text{ в противном случае} \end{array} \right\};$$

V_i – признак первого объекта в ряду,

$$V_i = \left\{ \begin{array}{l} 0 \text{ если первый в ряду} \\ 1 \text{ иначе} \end{array} \right\};$$

причем, так как первым может быть только один объект, то $\sum_{i=1}^n V_i = n-1$; Z_i – признак последнего объекта,

$$Z_i = \left\{ \begin{array}{l} 0 \text{ если последний в ряду} \\ 1 \text{ иначе} \end{array} \right\},$$

и, аналогично, $\sum_{j=1}^n Z_j = n-1$. Кроме того, так как первый объект не может стоять последним, то $V_k + Z_k \geq 1, k = 1, \dots, n$. Введем критерий оптимальной ранжирующей функции – максимальное расстояние между объектами стремится к Y_{\min} – и запишем выражения для расстояния между i и j объектами:

$$a_{ij} \cdot U_{ij} \leq Y_{\min}, \quad \forall i = 1 \dots, n, \quad j = 1 \dots, n.$$

Математическая модель кластеризации множества объектов в многомерном пространстве

Обозначим $A_{ij} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}$ – расстояние между i и j музыкальными произведениями, U_j – вектор, характеризующий наличие кластера, f – максимальный радиус кластера, причем

$$F_{ij} = \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ иначе} \\ 0 \text{ если } A_{ij} < f \end{array} \right\}.$$

Программная реализация

Обоснование выбора языков и сред программирования

Решение задачи происходит в три этапа – постановка задачи, оптимальное ранжирование и кластеризация. Соответственно, были разработаны и различные программы. Первая программа написана на языке C#. Язык C# [3] – это очередная ступень бесконечной эволюции языков программирования. C# был создан в конце 1990-х гг. и стал частью общей .NET-стратегии Microsoft. C# был создан компанией Microsoft для поддержки среды .NET Framework. Оболочка .NET Framework определяет среду для разработки и выполнения сильно распределенных приложений, основанных на использовании компонентных объектов. Важно, что .NET Framework по своему существу не ограничена применением в Windows, т.е. программы, написанные для нее, можно затем переносить в среды, отличные от Windows. Для других, менее сложных программ используются Borland Pascal, Delphi, Microsoft Excel.

Программа стохастического оптимального ранжирования (C# в среде Microsoft Visual Studio 2005 и Microsoft Access)

Как известно, сущность метода Монте-Карло состоит в следующем: требуется найти значение a некоторой изучаемой величины. Для этого выбирают такую случайную величину X , среднее значение которой равно a :

$$M(X) = a.$$

Практически же поступают так: производят n испытаний, в результате которых получают n возможных значений X , вычисляют их среднее арифметическое

$$\bar{x} = \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) / n$$

и принимают \bar{x} в качестве оценки (приближенного значения) a^* искомого числа a :

$$a \cong a^* = \bar{x}.$$

Поскольку метод Монте-Карло требует проведения большого числа испытаний, его часто называют методом статистических испытаний. Теория этого метода указывает, как наиболее целесообразно выбрать случайную величину X и как найти ее возможные значения. В частности, разрабатываются способы уменьшения дисперсии используемых случайных величин, в результате чего уменьшается ошибка, допускаемая при замене искомого математического ожидания a его оценкой a^* .

В данной работе на основе стохастического оптимального ранжирования и с помощью метода Монте-Карло была разработана программная система. В ней можно выделить основные режимы:

- ввод объектов и парных оценок (Result);
- формирование матрицы расстояний (Result2);
- генерирование вариантов ранжирующей функции методом Монте-Карло (Rang);
- оценка качества текущей ранжирующей функции (с);
- формирование и представление результатов оптимизации (COpt, RangOpt).

Программа оптимального ранжирования на основе целочисленного линейного программирования (среда Solver Microsoft Excel)

Эта программа была реализована в среде Solver Microsoft Excel. Основные окна программы приведены на рис. 1–3.

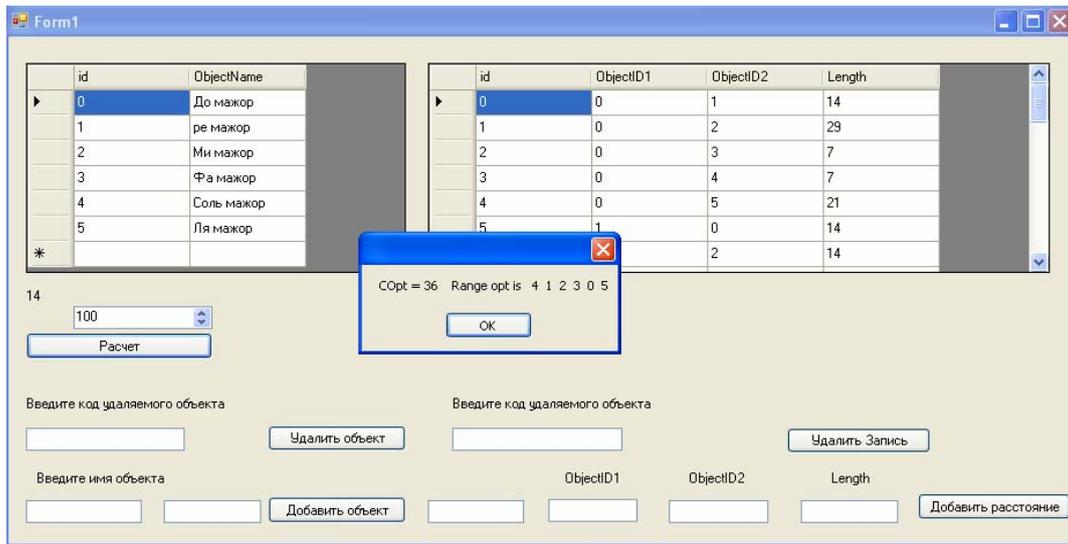


Рис. 1. Основная форма программы стохастического оптимального ранжирования

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1		1	2	3	4	5	6			у=	1			
2	Команды	Локомотив	ЦСКА	Спартак(М)	Зенит	Москва	Рубин						2	
3	Локомотив	0	0	0	0	-1	1				1			
4	ЦСКА	0	0	-1	1	3	1							
5	Спартак(М)	0	1	0	0	1	0							
6	Зенит	0	-1	0	0	0	1							
7	Москва	1	-3	-1	0	0	1							
8	Рубин	-1	-1	0	-1	-1	0							
9	1	2	3	4	5	6								
10	Команды	Томь	Динамо(М)	Амкар	Алания	Ростов	Терек	summa	Zj	Vi трасп	V+Z>=1			
11	Томь	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1			
12	Динамо(М)	1	0	0	0	0	0	1,87645E-11	1	1	1			
13	Амкар	0	1	0	0	0	0	-6,66178E-12	1	1	2			
14	Алания	0	0	0	0	1	0	-6,66112E-12	1	0	1			
15	Ростов	0	0	0	0	0	0	-1,44328E-11	0	1	1			
16	Терек	0	0	1	0	0	0	3,44236E-12	1	1	2			
17	summa	0	0	0	0	0	0	summa	S					
18	Vi	1	1	1	0	1	1							
19		Спартак												
20	Команды	Спартак	Локо	Цска	Зенит	Кр Совет	Москва	Команды	Спартак	Локо	Цска	Зенит	Кр Совет	Москва
21	Спартак	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0
22	Локо	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0
23	Цска	-1	0	-1	-1	-1	-1	0	0	1	0	0	0	4,42643E-11
24	Зенит	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	1,10134E-13	0	0	0	0	4,45E-11
25	Кр Совет	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	6,44E-11
26	Москва	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	-1,61559E-27	0	0	0	0
27		Локо												
28	Команды	Спартак	Локо	Цска	Зенит	Кр Совет	Москва	Команды	Спартак	Локо	Цска	Зенит	Кр Совет	Москва
29	Спартак	3,33E-12	1	0	0	1,52E-27	-1	0	6,66E-12	1	0	1,11466E-13	1,52282E-27	0
30	Локо	2,22E-16	1,88E-11	1	-1,1E-13	0	1,62E-27	0	3,75292E-11	1	-1,10134E-13	0	1,62E-27	0
31	Цска	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	4,42643E-11	0
32	Зенит	1,115E-13	0	0	0	0	0	0	1,11E-13	-1,10134E-13	0	0	0	1,445E-11
33	Кр Совет	0	0	4,43E-11	1	0	0	0	0	0	4,43E-11	1	0	6,44E-11
34	Москва	1	0	5,48E-12	4,45E-11	6,44E-12	0	0	1,61559E-27	1	4,44851E-11	1	6,44063E-12	0

Рис. 2. Размещение информации в модели оптимального ранжирования в среде Excel

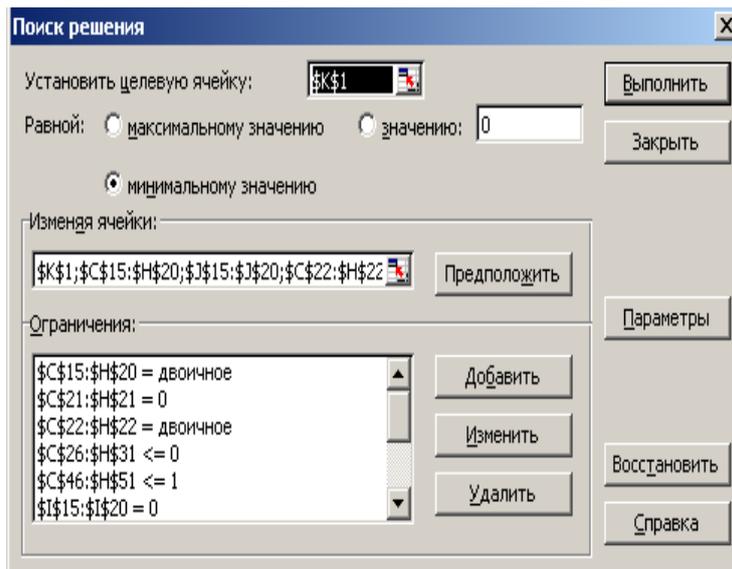


Рис. 3. Текст модели оптимального ранжирования в окне «поиск решения» Excel

Использование разработанного программного обеспечения для исследования музыкальных произведений

Постановка задачи математического анализа музыкальных произведений

Следует заметить, что применение математических методов в музыке имеет многовековую историю [5–6]. Замысел настоящей работы заключается в том, чтобы представить музыкальные тексты как элементы некоторого пространства конечного числа измерений, в котором достаточно естественным образом определено понятие «расстояния» между мелодиями. Для этого необходимо упорядочить тональности музыкальных произведений, что, наряду с использованием естественной упорядоченности размерностей и темпов, позволит описать различные мелодии в 3-х мерном евклидовом пространстве. На этой основе может быть сделана попытка применения математических методов и компьютерного моделирования в музыковедческом сопоставительном анализе разных музыкальных тестов.

При таком подходе необходимо:

- выделить ряд ключевых характеристик музыкального текста, которые могут использоваться как критерии при оценке их сходства и различий;
- ввести порядковые шкалы для измерения этих характеристик;
- использовать один из существующих методов многокритериальной оптимизации, чтобы сопоставить вектору указанных характеристик некоторое число, соответствующее числовому отношению между мелодиями;
- произвести экспериментальную настройку этого метода таким образом, чтобы полученные на его основе результаты в максимальной степени соответствовали имеющимся теоретическим данным. Этот этап позволит судить об эффективности подхода в целом.

Далее рассматривается сугубо упрощенная модель, предназначенная лишь для демонстрации основной сути предлагаемого подхода.

В музыкальном произведении можно выделить атрибуты, характеризующие его структуру в целом:

- музыкальный инструмент, на котором исполняется произведение,
- музыкальный код,
- динамическое развитие,
- количество и соотношение различных частей музыкальной формы, соответствующие определенным количественным единицам (тактам),
- частотные характеристики,
- гармоническая структура,
- темп,
- метроритм,
- тональность.

В настоящей работе были выбраны три последних атрибута, наиболее полно характеризующие музыкальное произведение.

Формирование порядковых шкал темпа и размера

Перейдем к определению порядковых шкал выбранных атрибутов. В табл. 1 представлены темпы и дополнительные слова к обозначениям темпов. Они расположены в порядке возрастания скорости игры. В третьем столбце приведены термины, которые несколько увеличивают уровень выразительности терминов, указанных слева от них. Значения уровней, приведенные в табл. 1, образуют порядковые шкалы двух критериев – темпы и дополнительные слова. Заметим, что в целях упрощения можно ограничиться лишь первыми из них. В табл. 2 приведена естественная порядковая шкала для описания метроритмической структуры музыкального теста (мелодии). Обе эти порядко-

вые шкалы соответствуют естественной упорядоченности темпов и размеров. А вот в отношении тональностей такой естественной упорядоченности нет. Так как этот атрибут музыкального произведения очень важен и сложен, его описанием занимались лучшие композиторы и ученые-музыковеды. Для решения этой задачи и потребовалось разработанное программное обеспечение.

Темпы			Дополнительные слова	
Уровень	Название		Уровень	название
1	Largo		1	Pui mosso
2	Lento	Pui Lento	2	Meno mosso
3	Adagio		3	Accelerando
4	Grave		4	Non troppo
5	Larghetto		5	Molto
6	Andante	Andante espressivo	6	Assai
7	Sostenuto	Maestos	7	Con moto
8	Moderato		8	A tempo
9	Andantino		9	Poco rit
10	Allegretto		10	Un poco rit
11	Allegro	Allegro Vivace a Brillante	11	Un poco largamento
12	Vivo		12	Rit
13	Vivace	Molto Vivace	13	Ritard
14	Presto	Veloce	14	Rubato
15	Prestissimo		15	Allargando

Таблица 1. Порядковая шкала для описания музыкальных темпов

Уровень	метроритм	Уровень	метроритм	Уровень	метроритм
1	2/1	11	4/2	21	9/4
2	2/2	12	4/4	22	9/8
3	2/4	13	4/8	23	9/16
4	2/8	14	5/2	24	12/4
5	2/16	15	5/8	25	12/8
6	3/1	16	6/4	26	12/16
7	3/2	17	6/8		
8	3/4	18	6/16		
9	3/8	19	7/4		
10	3/16	20	7/8		

Таблица 2. Порядковая шкала для описания размерности

Формирование порядковой шкалы тональности

Для обоснования понятия расстояния между различными тональностями необходимо определить единицу расстояния между двумя тональностями. За расстояние между двумя тональностями в работе принято отношение суммы разностей соответствующих нот двух тональностей (совпадают – 0, различаются на полтона – 0.5, различаются на один тон – 1.0) и количества нот в тональности (7). Для примера на рис. 4 показаны тональности трех музыкальных произведений. Они же изображены в сжатом виде на рис. 5. При этом знак диэз показан стрелкой, направленной вправо, а знак бемоль – стрелкой, направленной влево. На рис. 5 видно, что расстояние между прелюдом и вальсом равно $4.5/7 = 0.64$, между вальсом и фугой – $4/7 = 0.57$, между прелюдом и фугой – $0.5/7 = 0,07$.



Рис. 4. Тональности трех музыкальных произведений

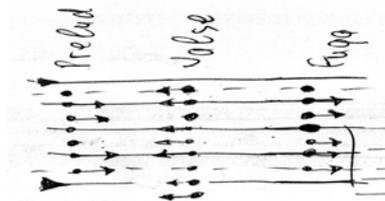


Рис. 5. К определению расстояния между тональностями музыкальных произведений

На основании описанного алгоритма расчета была создана достаточно простая программа на языке Borland Pascal, которая перебрала всевозможные варианты тональностей и рассчитала расстояния между ними. Таким образом, с помощью математической модели оптимального ранжирования на основе целочисленного линейного программирования было получено решение поставленной задачи в виде порядковой шкалы, представленной в табл. 3.

Уровень	Тональность	
1	Ces dur	As moll
2	Ges dur	Es moll
3	Des dur	bes moll
4	As dur	f moll
5	Es dur	c moll
6	Bes dur	g moll
7	F dur	d moll
8	C dur	a moll
9	G dur	e moll
10	D dur	b moll
11	A dur	fis moll
12	E dur	cis moll
13	B dur	gis moll
14	Fis dur	dis moll
15	Cis dur	ais moll

Таблица 3. Порядковая шкала тональностей

Индексирование произведений различных композиторов с использованием трех разработанных порядковых шкал

В результате проведенного анализа музыкальных произведений и решения поставленных задач получены три порядковые шкалы, характеризующие музыкальные произведения, которые можно представить трехмерным евклидовым пространством. Были выбраны около тридцати произведений различных авторов (Бах, Шопен и т.д.), каждому из которых, с помощью трех разработанных шкал, были заданы координаты трехмерного евклидова пространства.

Анализ полученного результата производился с помощью кластеризации, т.е. разделение множества объектов в музыкальном пространстве на отдельные группы наиболее близких между собой объектов. В результате кластеризации музыкальных произведений были получены три кластера. На их основе можно попытаться провести небольшой музыковедческий анализ. Кластер №1 можно назвать «кластером Бетховена», потому что почти все музыкальные произведения этого композитора вошли в этот кластер. Кластер №2 можно назвать «кластером Шопена». Но есть и такие музыкальные произведения как Шопена, так и Бетховена, которые входят не в одноименный кластер. Из этого можно сделать вывод, что эти музыкальные произведения разных авторов, в данном случае Шопена и Бетховена, как-то переплетаются по своей структуре между собой. В первый и второй кластер вошли музыкальные произведения и других авторов эпохи, совсем не похожей на эпоху Бетховена и Шопена.

В целом полученные данные позволяют проанализировать, почему те или иные музыкальные произведения вошли в тот или иной кластер. Первый и второй кластер можно разделить по жанрам музыкальных произведений. Как видно из табл. 6, все музыкальные произведения с названием музыкального жанра «Этюд» вошли в первый кластер. Это говорит о схожей структуре данного жанра и близости этих музыкальных произведений. Многие танцевальные музыкальные произведения, такие как мазурка, вальс, полонез, итальянский танец, вошли в кластер №2, что говорит о их сходстве по музыкальному построению. Почти все произведения таких классиков, как Бах, Шопен, Чайковский, Шостакович, Моцарт, вошли в один и тот же кластер. Это показывает, что классическая музыка имеет некоторую близость. Единственное музыкальное произведение, не вошедшее ни в один кластер – Маленькая двухголосная fuga И.С. Баха.

Выводы и направления дальнейших исследований

- Задача ранжирования объектов на основе парных оценок представляет большой теоретический и практический интерес.
- Разработанные математические модели и реализующие их программы позволяют решать реальные задачи. При этом определены области наиболее эффективного применения каждого метода. Методы прямого и стохастического перебора вариантов решения эффективно работают на современных персональных ЭВМ, если число объектов в среднем не превосходит восьми. Метод, основанный на примере модели целочисленного линейного программирования, по быстрдействию допускает решение задач с несколькими десятками объектов. Однако ограничением является использование стандартный оптимизатор Microsoft Excel, который допускает решение задач с числом переменных не более двухсот.

Полезность и эффективность разработанного подхода продемонстрирована при решении задачи математического сопоставительного анализа музыкальных произведений. Здесь удалось:

- разработать математически обоснованную порядковую шкалу тональностей, характеризующую коммуникацию различных музыкальных текстов. До этого существовали естественные порядковые шкалы размера и темпа;
- впервые изобразить в трехмерном пространстве, удобном для анализа, расположенные естественным образом различные музыкальные произведения;
- разработать модель и программу кластеризации, позволившие выделить и сопоставить между собой область творчества различных композиторов, сочинявших в различные исторические периоды.

Направления дальнейшей работы:

- разработать оптимизатор, позволяющий решать задачи с количеством объектов, превышающих несколько десятков;
- провести музыковедческий анализ, попытавшись связать дату написания произведения и обстоятельства его жизни с попаданием произведения в тот или иной кластер;
- провести музыкальный эксперимент, доказывающий проведенные исследования;
- ввести новые атрибуты, наиболее полно характеризующие музыкальное произведение, и, с помощью кластеризации, попытаться проанализировать произведения в N -мерном пространстве.

Литература

1. Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений. М.: Логос, 2000.
2. Карпелевич Ф.И., Садовский Л.Е. Элементы линейной алгебры и линейного программирования. / Изд. 2. М.: Наука, 1965.
3. Шилдт Г. Полный справочник по С#. М.: Вильямс, 2004. 707 с.
4. <http://lib.vvsu.ru/books/Bakalavr01/page0223.asp>
5. Григорьев С. Теоретический курс гармонии. М.: Высшая школа, 1981. 306 с.
6. Должанский А.Н. Краткий Музыкальный словарь. СПб, 2000. 443 с.
7. Хендерсон К. Профессиональное руководство по SQL Server: хранимые процедуры, XML, HTML. СПб: Питер, 2005. С. 107–122.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕНТГЕНООПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ПОРТАТИВНОГО РЕНТГЕНОФЛЮОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛИЗАТОРА

В.А. Лукина

Научный руководитель – кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник Л.П. Коробейникова

Представлен вариант расчета геометрии портативного рентгенофлюоресцентного анализатора на основе понятия инверсионного зонда. Приведены основные зависимости параметров зонда и сделано заключение об оптимальном взаимном положении источника излучения и детектора. Предложен вариант геометрии зонда, используемый для проектирования рентгенооптической схемы анализатора.

Введение

Современный уровень рентгеноспектрального флюоресцентного оборудования позволяет производить качественно новый вид аналитических приборов – портативные рентгенофлюоресцентные (РФ) анализаторы – и решать с их помощью широкий круг задач. Основное преимущество таких приборов – возможность производить неразрушающий экспресс-анализ элементного состава практически любого объекта.

Однако применение портативных РФ-анализаторов ограничивается существенно более низкой точностью измерений по сравнению со стационарным оборудованием. Поэтому при разработке нового прибора встает проблема устранения возможных источников погрешности анализа и оптимизация параметров анализа. При этом необходимо учитывать различные факторы взаимодействия рентгеновского излучения с материалом образца и конструктивными элементами прибора [1].

Инверсионный зонд

Одним из источников погрешности рентгенофлюоресцентного анализа является непостоянство расстояния от источника (детектора) излучения до пробы, связанное с неровностями поверхности образца, погрешностью установки проб в кювету, отсутствием жесткой фиксации анализатора относительно пробы (в случае портативного прибора) и другими факторами. Однако влияние непостоянства расстояния на результаты измерения можно значительно уменьшить и даже устранить применением так называемых инверсионных зондов.

Принцип действия инверсионного зонда основан на том, что убывание интенсивностей первичного и вторичного излучения с увеличением расстояний может быть скомпенсировано увеличением площади S , с которой приходит к детектору вторичное излучение. Экстремум характеристики зонда, в области которого показания слабо меняются с расстоянием, наблюдается в условиях, когда источник и детектор находятся в геометрии прямой видимости.

Положение инверсионной области можно установить экспериментально путем измерений интенсивности вторичного излучения при различном расстоянии датчик-среда или найти на основе приблизительных расчетов. Необходимо заметить, что характеристика зонда зависит от многих факторов: взаимного положения и углов наклона источника и детектора, формы коллиматоров, спектрального состава первичного и вторичного излучения. В связи с этим целесообразно вначале провести приблизительные расчеты, чтобы выявить общие закономерности взаимного влияния параметров зонда, а затем уточнить геометрию экспериментальным путем.

Расчет инверсионного зонда

Общие принципы расчета инверсионного зонда были заложены в 80-х гг. 20 столетия применительно к приборам радиометрического контроля [2]. На основе этих принципов был разработан способ расчета геометрии портативного РФ-спектрометра с коллиматорами различной формы.

Интегральное уравнение для флюоресцентного излучения в геометрии прямой видимости записываются следующим образом:

$$I_i = \frac{Q_0}{(4\pi)^2} k_i \tau_j^a \int_S \frac{1}{R_1^2 R_2^2} \cdot \frac{1}{\left(\frac{\mu_j}{\sin \varphi} + \frac{\mu_i}{\sin \psi}\right)} dS, \quad (1)$$

где Q_0 – интенсивность первичного излучения; τ_j^a – линейный коэффициент поглощения первичного излучения атомами определяемого элемента; μ_j и μ_i – соответственно полные линейные коэффициенты ослабления первичного излучения с энергией E_j и характеристического излучения с энергией E_i ; k_i – атомная константа; R_1 и R_2 – расстояния от источника до пробы и от пробы до детектора, соответственно; φ и ψ – углы падения первичного и регистрации вторичного излучения, соответственно.

Из формулы (1) можно выделить множитель, зависящий от геометрии измерений:

$$G_i = \int_S \frac{dS}{R_1^2 R_2^2 \left(\frac{\mu_j}{\sin \varphi} + \frac{\mu_i}{\sin \psi}\right)}. \quad (2)$$

Величину G_i называют геометрическим фактором зонда для характеристического излучения, а зависимость $G_i(x)$ является основной характеристикой зонда.

Если вторичное излучение регистрировать с площадки, линейные размеры которой значительно меньше R_1 и R_2 , то R_1 , R_2 , φ и ψ можно принять равными их значениям для центра области S и вынести за знак интеграла (2):

$$G_i = \frac{S}{R_1^2 R_2^2 \left(\frac{\mu_j}{\sin \varphi} + \frac{\mu_i}{\sin \psi}\right)}. \quad (3)$$

Формула (3) может быть использована для приближенного вычисления геометрического фактора зонда в пределах достаточно широкого телесного угла.

Для получения инверсионных зондов площадку S можно выделить на исследуемой поверхности с помощью коллиматоров различной формы. Рассмотрим случай, когда первичное излучение частично коллимируется конусом с углом при вершине α , а угол приема детектора больше угла α . Угол падения φ принимаем равным углу между плоскостью облучаемой поверхности и осью конуса и задаем в исходных данных. Остальные параметры зависят от расстояния. Схема зонда приведена на рис. 1.

Площадь овальной площадки можно определить из соотношения

$$S = \frac{\pi \cdot h^2 \operatorname{tg}(\alpha/2)}{\sin^2 \varphi \cos \varphi (\operatorname{tg}(\alpha/2) + \operatorname{tg} \varphi)}. \quad (4)$$

Расстояния R_1 , R_2 , и угол ψ находятся из соотношений:

$$R_1 = \frac{h}{\sin \varphi}, \quad (5)$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{h + H}{L - h/\operatorname{tg} \varphi}, \quad (6)$$

$$R_2 = \frac{h + H}{\sin \psi}. \quad (7)$$

Для расчета геометрического фактора G_i нужно подставить значения R_1 , R_2 , ψ и S , найденные из соотношений (4)–(7), в формулу (3).

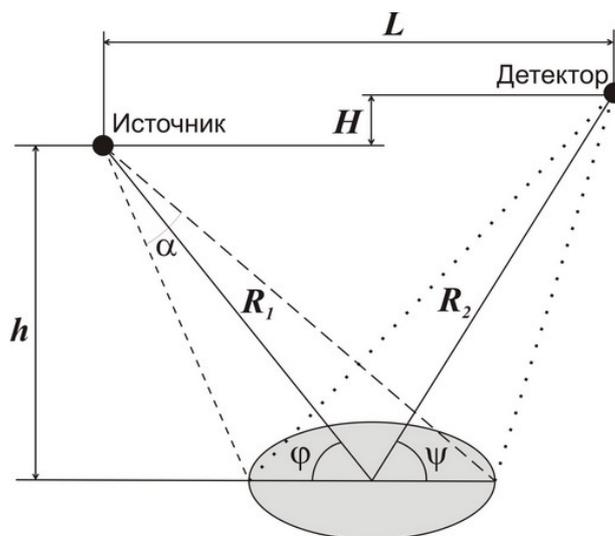


Рис. 1. Схема зонда с конусными коллиматорами (обозначения см. в тексте)

Параметры инверсионного зонда

При проектировании геометрии портативного анализатора необходимо обеспечить максимальную длину области инверсии (порядка 10–15 мм) при минимальных габаритах зонда (минимально возможное расстояние L , высота зонда 15–20 мм). Кроме того, для проведения расчетов были заданы следующие исходные данные: материал анода рентгеновской трубки – серебро, атмосфера в аналитической камере – воздух.

Длиной области инверсии Δh будем называть диапазон расстояний, в котором величина интенсивности излучения изменяется в пределах 5%. Высотой зонда (положением области инверсии) будем называть координату h' максимума зависимости $G_i(h)$. Пример графика зависимости $G_i(h)$ приведен на рис. 2.

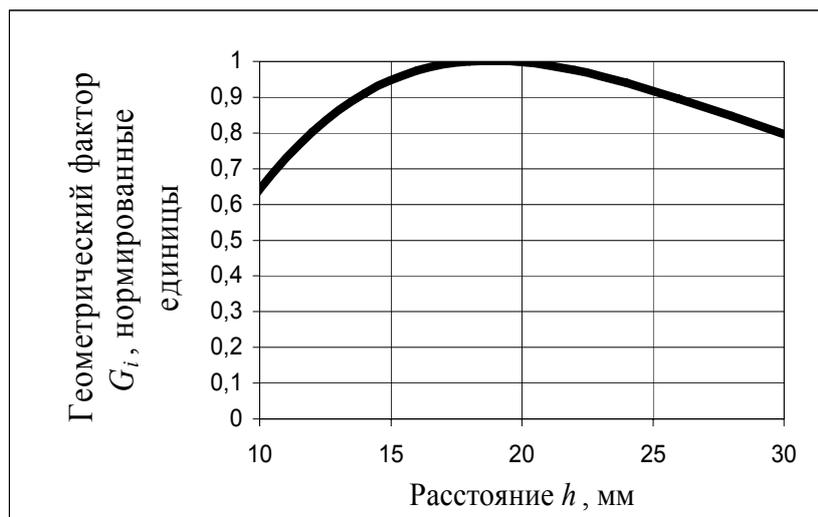


Рис. 2. Зависимость интенсивности излучения G_i от расстояния h

На основании проведенных теоретических расчетов были выявлены общие закономерности влияния геометрических параметров зонда на вид его основной характеристики $G_i(h)$.

(а) Чем меньше длина зонда L (расстояние между источником и детектором), тем выше интенсивность G_i и ближе к зонду находится область инверсии (координата h'). Однако при этом уменьшается ее длина Δh . Характер зависимости можно проследить на рис. 3.

(б) Важную роль также играет угол падения первичного излучения φ . Расчетным путем было выявлено, что оптимальное значение угла φ составляет 90° , поскольку при этом длина области инверсии максимальна.

(в) Желаемая высота зонда достигается изменением вертикальной координаты H детектора по отношению к источнику: чем она меньше (возможны и отрицательные значения), тем ближе к источнику область инверсии.

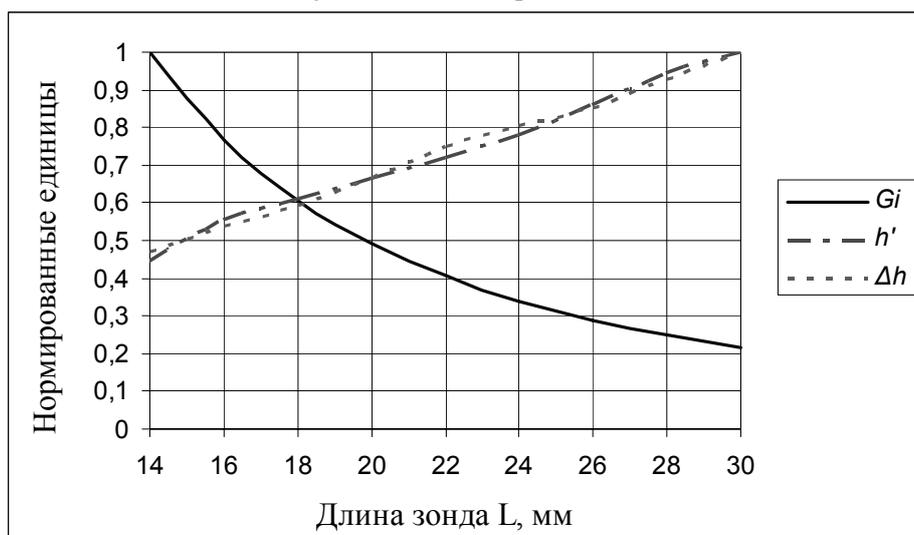


Рис. 3. Зависимость интенсивности излучения G_i , положения h' и длины области инверсии Δh от длины зонда L

На основании теоретических расчетов можно предложить следующие значения параметров зонда:

- угол падения первичного излучения φ : 90° ;
- угол при вершине конуса коллиматора: 30° ;
- длина зонда L : 25 мм;
- расстояние H : -6 мм;
- минимальная высота зонда h' : 16 мм;
- длина области инверсии Δh : 10 мм;
- диаметр облучаемой области: $4 \div 6,5$ мм.

Знак «минус» в значении расстояния H означает, что окно детектора находится ниже окна рентгеновской трубки.

Заключение

В работе был рассмотрен вариант расчета геометрических параметров рентгено-оптической схемы портативного РФ-анализатора на основе понятия инверсионного зонда. Рассмотрен пример расчета в условиях частичного коллимирования излучения конусным коллиматором. Выявлены основные зависимости между различными параметрами инверсионного зонда и предложены их оптимальные значения. Следует ожи-

дать небольшого отклонения этих значений при экспериментальной проверке, поскольку расчеты являются лишь приблизительными, основанными на ряде упрощений. После экспериментальной проверки и соответствующей корректировки данные параметры рекомендуются к применению при проектировании рентгенооптической схемы портативного рентгенофлуоресцентного анализатора, поскольку позволяют снизить погрешность измерений, связанную с изменением расстояния до образца.

Литература

1. Грязнов А.Ю. Разработка аппаратных и методических способов повышения аналитических характеристик энергодисперсионного флуоресцентного анализатора / Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.27.02. СПб, 2004.
2. Мейер В.А., Иванюкович Г.А. Рентгенорадиометрические методы управления качеством руд. Л.: Издательство ЛГУ, 1989. 292 с.

РАЗРАБОТКА РАНЖИРУЮЩИХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ СЛАБОФОРМАЛИЗУЕМЫХ ЗАДАЧ

В.В. Ворошилов

(Самарский государственный архитектурно-строительный университет)

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор С.А. Пиявский

(Самарский государственный архитектурно-строительный университет)

Предлагаются новые алгоритмы и методы для восстановления слабоформализуемых моделей в различных областях экономики и культурно-социальной сферы. Эти алгоритмы использовались для решения двух задач в достаточно слабо формализованных областях: ранжирование ведущих футболистов, ранжирование стран по степени готовности к внедрению электронного обучения.

Введение

Математические методы и моделирование сложных явлений на ЭВМ все более проникают в такие слабо формализованные области, как педагогика, психология, спорт, политика. Одним из важных направлений при этом является алгоритмизация знаний высококвалифицированных экспертов, необходимая для создания систем поддержки принятия решений и экспертных систем. В настоящей статье разрабатывается метод, позволяющий формализовать логику ранжирования некоторых объектов на основе анализа набора их количественных характеристик (критериев).

Пусть дана упорядоченная группа из n объектов, каждый из которых имеет количественные оценки по p критериям. Требуется на основании этих данных восстановить потенциально существующий, но неизвестный, алгоритм, с помощью которого упорядочены объекты.

Предлагаются два метода идентификации ранжирующих алгоритмов:

- интерактивный поиск ранжирующего алгоритма;
- оптимальный поиск ранжирующего алгоритма.

При этом структура ранжирующего алгоритма выбирается в одном из двух видов: линейной свертки или метода ПРИНН [1].

Основная часть

Интерактивный поиск ранжирующего алгоритма

В основе интерактивного метода ограниченного перебора используется метод ПРИНН-У. Соответственно структура ранжирующего алгоритма представляется в виде следующей функции, предложенной в [1]:

$$F = \frac{\sum_{j=1}^p 3^{\alpha_j-1} \cdot f_{i,j}}{\sum_{j=1}^p 3^{\alpha_j-1}},$$

где α_j – заранее неизвестный индекс, показывающий отношение к той или иной группе важности критерия j ($j=1, \dots, p$), $\alpha_j \in [1, k]$. Здесь k – коэффициент, указывающий высшую группу важности критерия; $f_{i,j}$ – оценка i -й альтернативы по j -му критерию ($i=1, \dots, n$). При заданных значениях коэффициентов можно вычислить значения ран-

жирующей функции для всех объектов, ранжировать объекты в соответствии с ними и рассчитать критерий качества формализации J по формуле

$$J = \sum_{i=1}^n abs(N_u(j) - N_p(j)).$$

Методом перебора целочисленных коэффициентов α_j при заданном значении k минимизируют этот критерий, получая наиболее близкое решение к исходному ранжированию. При этом количество переборов, конечно, при большом количестве критериев может оказаться весьма значительным. В данном случае специально разработанная программа предоставляет эксперту (ЛПР) возможность интуитивно указать для каждого критерия более узкие границы варьирования индекса α_j , получая созданный на основе его предпочтений ранжирующий алгоритм с определенной погрешностью.

Оптимальный поиск ранжирующего алгоритма

Несмотря на предоставленную возможность ограничивать перебор, может оказаться, что получить достаточно качественную формализацию интуитивным путем не удастся, а полный перебор невозможен. В этом случае необходимо использовать такой, более мощный метод оптимизации, как линейное программирование, для чего требуется разработать специальную математическую модель.

Пусть структура ранжирующего алгоритма, как и выше, представлена функцией

$$F = \frac{\sum_{j=1}^p 3^{\alpha_j-1} f_{i,j}}{\sum_{j=1}^p 3^{\alpha_j-1}}, \quad (1)$$

где α_j – индекс, показывающий отношение к той или иной группе важности критерия j ($j = 1, \dots, p$); $\alpha_j \in [1, k]$, где k – коэффициент, показывающий высшую группу важности критерия; $f_{i,j}$ – оценка i -й альтернативы по j -му критерию ($i = 1, \dots, n$).

Условие задачи можно представить в виде

$$F_{i+1} \leq F_i, \quad i = 1, \dots, n-1; \quad (2)$$

Записав (2) через (1), получим:

$$\frac{\sum_{j=1}^p 3^{\alpha_j-1} f_{i+1,j}}{\sum_{j=1}^p 3^{\alpha_j-1}} \leq \frac{\sum_{j=1}^p 3^{\alpha_j-1} f_{i,j}}{\sum_{j=1}^p 3^{\alpha_j-1}},$$

или

$$\sum_{j=1}^p 3^{\alpha_j-1} f_{i+1,j} \leq \sum_{j=1}^p 3^{\alpha_j-1} f_{i,j}; \quad i = 1, \dots, n-1. \quad (3)$$

Здесь условие становится нелинейным. Преобразуем задачу из нелинейной в линейную. Для этого введем вместо α_j дополнительные целочисленные переменные Z_j^k , $Z_j^k = \{0,1\}$, $j = 1, \dots, p$; вместо 3^{α_j-1} запишем $(1 + 2Z_j^1 + 8Z_j^2 + \dots + (3^{k-1} - 1)Z_j^k)$ и введем еще одно ограничение:

$$Z_j^1 + Z_j^2 + \dots + Z_j^k \leq 1, \quad j = 1, \dots, p. \quad (4)$$

Тогда (3) принимает вид

$$\sum_{j=1}^p (1 + 2Z_j^1 + 8Z_j^2 + \dots + (3^{k-1} - 1)Z_j^k) f_{i+1,j} \leq \sum_{j=1}^p (1 + 2Z_j^1 + 8Z_j^2 + \dots + (3^{k-1} - 1)Z_j^k) f_{i,j},$$

или

$$\sum_{j=1}^p [f_{i+1,j} - f_{i,j}] (1 + 2Z_j^1 + 8Z_j^2 + \dots + (3^{k-1} - 1)Z_j^k) + KU_i \leq 0; \quad i = 1, \dots, n-1. \quad (5)$$

Целевую функцию можно записать так:

$$\Phi = \sum_{i=1}^{n-1} U_i \rightarrow \min,$$

а (4), (5) – условия. Таким образом, задача сводится к задаче целочисленного линейного программирования, которая решается уже известными методами.

Интересно провести сопоставление результатов формализации в случае, когда для структуризации ранжирующей функции используется менее естественный, чем метод ПРИНН, но более традиционный метод линейной свертки критериев.

Зададимся структурой ранжирующего алгоритма в виде функции

$$F = \sum_{j=1}^p \alpha_j f_{i,j}, \quad (6)$$

где α_j – неизвестный весовой коэффициент важности критерия j ($j = 1, \dots, p$); $f_{i,j}$ – оценка i -й альтернативы по j -му критерию ($i = 1, \dots, n$).

$$\alpha_j \leq 0, \quad j = 1, \dots, p; \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^p \alpha_j = 1. \quad (8)$$

Условие задачи можно представить в виде

$$F_{i+1} \leq F_i, \quad i = 1, \dots, n-1. \quad (9)$$

Запишем (9) через (6):

$$\sum_{j=1}^p \alpha_j f_{i+1,j} \leq \sum_{j=1}^p \alpha_j f_{i,j}; \quad i = 1, \dots, n-1. \quad (10)$$

Введем дополнительные целочисленные переменные U_i :

$$U_i = \{0,1\}, \quad i = 1, \dots, n-1. \quad (11)$$

Используя (11), можем записать (10) в виде

$$\sum_{j=1}^p \alpha_j f_{i+1,j} + KU_i \leq \sum_{j=1}^p \alpha_j f_{i,j}; \quad i = 1, \dots, n-1,$$

или

$$\sum_{j=1}^p \alpha_j [f_{i+1,j} - f_{i,j}] + KU_i \leq 0; \quad i = 1, \dots, n-1. \quad (12)$$

где K – очень большое число. Тогда целевую функцию можно записать так:

$$\Phi = \sum_{i=1}^{n-1} U_i \rightarrow \min,$$

а (7), (8), (12) рассматривать как ограничения.

Таким образом, эта задача сводится к решению задачи целочисленного линейного программирования, которая решается уже известными методами.

Примеры применения

Предложенные методы идентификации ранжирующих алгоритмов были реализованы в универсальной информационной системе (ИС), разработанной на языке Borland Delphi 5.5. Информационная система использовалась для решения двух задач в достаточно слабо формализованных областях:

- ранжирование ведущих футболистов,
- ранжирование стран по степени готовности к внедрению электронного обучения.

Ранжирование ведущих футболистов

Рассмотрим задачу восстановления алгоритма комплексной оценки ценности различных футболистов по отдельным характеристикам их футбольной квалификации. Для примера были выбраны 9 лучших футболистов по версии FIFA 2003 года. Их исходное ранжирование по этой версии приведено в табл. 1. В качестве критериев использовались 31 характеристика и оценки футболистов, предоставленные компанией Sports Interactive [4]. На рис. 1–4 показаны некоторые экраны ИС на примере обсуждаемой задачи.

Футболист	Рейтинг
Павел Недвед	1
Тьерри Анри	2
Паоло Мальдини	3
Андрей Шевченко	4
Зинедин Зидан	5
Руд ван Нистелрой	6
Рауль Гонсалес	7
Роберто Карлос	8
Девид Бекхем	9

Таблица 1. Рейтинг лучших футболистов по версии FIFA 2003 года

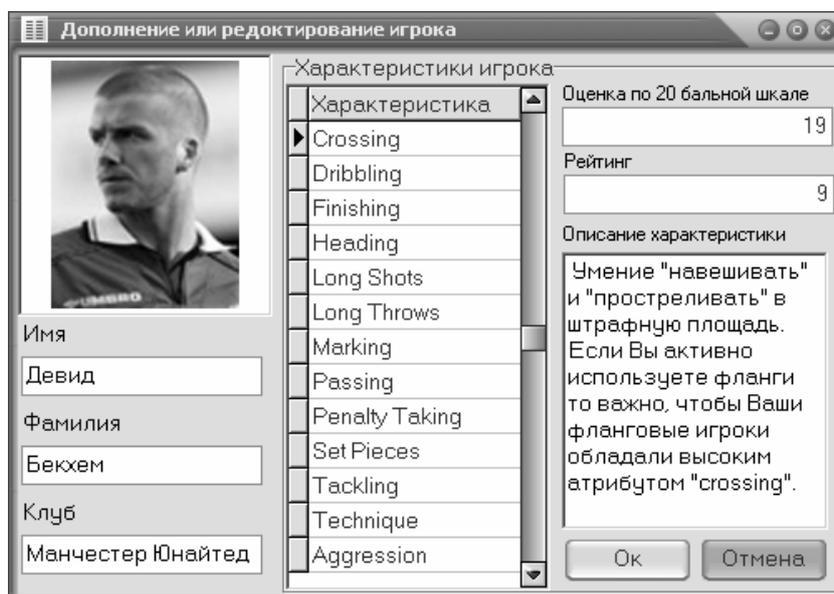


Рис. 1. Окно ввода информации о ранжируемых объектах

Посредством интерактивного поиска ограниченного перебора был определен ранжирующий алгоритм.

1. Для трех групп важности ранжирующий алгоритм был найден с погрешностью, равной 6 (максимальная погрешность 40), и получены следующие результаты:

- к третьей группе важности было отнесено 6 критериев: Marking, Tackling, Technique, Teamwork, Balance, Strength;
- ко второй группе – 13 критериев: Crossing, Dribbling, Finishing, Penalty Taking, Set Pieces, Bravery, Creativity, Decisions, Influence, Acceleration, Jumping, Pace, Stamina;

- к первой – 12: Heading, Long Shots, Long Throws, Passing, Aggression, Anticipation, Determination, Flair, Off the Ball, Positioning, Workrate, Agility.

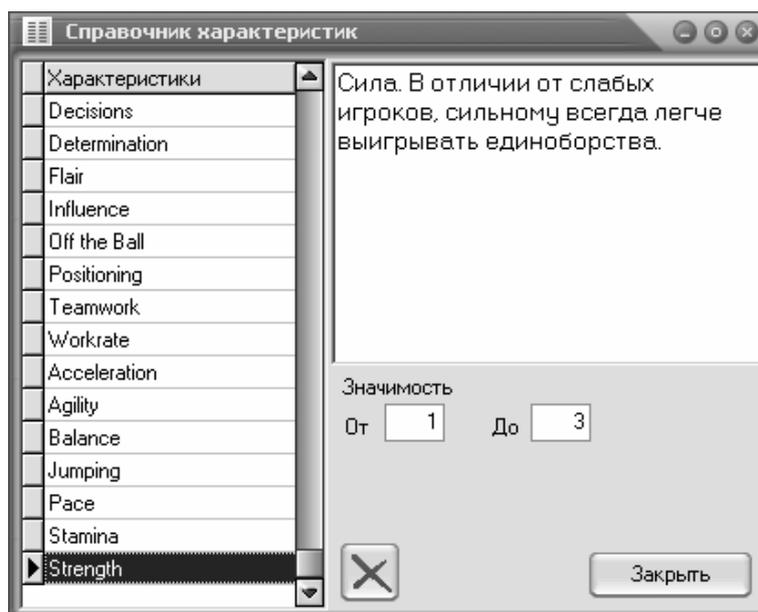


Рис. 2. Окно ввода информации о частных критериев ранжирования



Рис. 3. Окно просмотра базы данных

2. Для двух групп важности ранжирующий алгоритм был найден с погрешностью, равной 16 (максимальная погрешность 40), и получены следующие результаты:

- ко второй группе был отнесен 21 критерий: Crossing, Dribbling, Long Shots, Long Throws, Marking, Passing, Set Pieces, Technique, Aggression, Bravery, Decisions, Influence, Positioning, Teamwork, Workrate, Acceleration, Agility, Balance, Jumping, Pace, Strength;
- к первой группе было отнесено 10 критериев: Finishing, Heading, Penalty Taking, Tackling, Anticipation, Creativity, Determination, Flair, Off the Ball, Stamina.

Отсюда видно, что при увеличении групп важности погрешность определения ранжирующего алгоритма заметно уменьшается.

На основе идентификации ранжирующих алгоритмов в форме метода ПРИНН-У ИС был определен ранжирующий алгоритм с нулевой погрешностью (идеальный ранжирующий алгоритм) и получены следующие результаты:

- к третьей группе важности было отнесено 6 критериев: Heading, Marking, Decisions, Acceleration, Balance, Strength;
- ко второй группе – 8 критериев: Crossing, Dribbling, Long Shots, Long Throws, Tackling, Bravery, Creativity, Pace;
- к первой – 17: Finishing, Passing, Penalty Taking, Set Pieces, Technique, Aggression, Anticipation, Determination, Flair, Influence, Off the Ball, Positioning, Teamwork, Workrate, Agility, Jumping, Stamina.

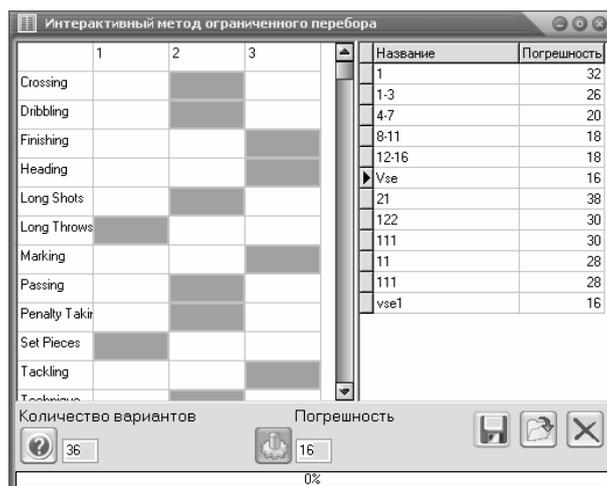


Рис. 4. Окно установки границ перебора и выдачи результатов

Футболист	Суммарный балл
Павел Недвед	1418
Тьерри Анри	1375
Паоло Мальдини	1375
Андрей Шевченко	1371
Зинедин Зидан	1371
Руд ван Нистелрой	1369
Рауль Гонсалес	1367
Роберто Карлос	1361
Девид Бекхем	1290

Таблица 2. Итоговый рейтинг и суммарный балл футболистов

На основе метода идентификации ранжирующих алгоритмов в форме линейной свертки программа определила ранжирующий алгоритм с нулевой погрешностью (был найден идеальный ранжирующий алгоритм). В табл. 3 приведены результаты.

Итак, мы получили два ранжирующих алгоритма:

- методом идентификации ранжирующих алгоритмов в форме линейной свертки;
- методом идентификации ранжирующих алгоритмов в форме метода ПРИНН-У.

Для анализа результатов были выбраны наиболее важные критерии, полученные первым методом (Aggression, Flair, Balance, Jumping), и критерии, отнесенные к последней группе важности (наиболее важной) вторым методом (Decisions, Acceleration, Balance, Strength). На основе этих методов и показателей были найдены ранжирующие алгоритмы для тех же 9 футболистов и получены результаты, приведенные в табл. 6.

Критерий	Коэффициент	Критерий	Коэффициент	Критерий	Коэффициент
----------	-------------	----------	-------------	----------	-------------

	значимости		значимости		значимости
Crossing	0,081	Stamina	0	Flair	0,178
Dribbling	0,005	Strength	0,051	Influence	0,037
Finishing	0	Set Pieces	0	Off the Ball	0
Heading	0	Tackling	0,031	Positioning	0,024
Long Shots	0	Technique	0,008	Teamwork	0,007
Long Throws	0,091	Aggression	0,132	Workrate	0
Marking	0,01	Anticipation	0,003	Acceleration	0
Passing	0,006	Bravery	0	Agility	0
Penalty Taking	0	Creativity	0	Balance	0,207
Jumping	0,103	Decisions	0,019		
Pace	0,002	Determination	0,003		

Таблица 3. Полученные коэффициенты значимости критериев

Футболист	Суммарный балл
Павел Недвед	14,78
Тьерри Анри	14,34
Паоло Мальдини	13,43
Андрей Шевченко	13,35
Зинедин Зидан	13,34
Руд ван Нистелрой	13,27
Рауль Гонсалес	13,27
Роберто Карлос	13,27
Девид Бекхем	13,21

Таблица 4. Итоговый рейтинг и суммарный балл футболистов

Критерий	Коэффициент значимости	Критерий	Коэффициент значимости
Aggression	0,12	Balance	0,16
Decisions	0,2	Jumping	0,17
Flair	0,16	Strength	0,17
Acceleration	0,01		

Таблица 5. Полученные коэффициенты значимости критериев

Футболист	Суммарный балл
Павел Недвед	14,3
Тьерри Анри	16,1
Паоло Мальдини	13,9
Андрей Шевченко	13,9
Зинедин Зидан	13,9
Руд ван Нистелрой	15,4
Рауль Гонсалес	13,9
Роберто Карлос	13,9
Девид Бекхем	12,9

Таблица 6. Итоговый рейтинг и суммарный балл футболистов

Методом идентификации ранжирующих алгоритмов в форме линейной свертки был получен ранжирующий алгоритм с погрешностью 2 (максимальная погрешность – 8).

Методом идентификации ранжирующих алгоритмов в форме метода ПРИНН-У был получен ранжирующий алгоритм с погрешностью 3 (максимальная погрешность – 8).

- к третьей группе важности был отнесен один критерий – Strength;
- ко второй группе – 3 критерия: Acceleration, Balance, Jumping;
- к первой – 3: Aggression, Decisions, Flair.

Футболист	Суммарный балл
Павел Недвед	292
Тьерри Анри	339
Паоло Мальдини	291
Андрей Шевченко	287
Зинедин Зидан	279
Руд ван Нистелрой	342
Рауль Гонсалес	277
Роберто Карлос	312
Девид Бекхем	258

Таблица 7. Итоговый рейтинг и суммарный балл футболистов

Ранжирование стран по степени готовности к внедрению электронного обучения

Другим примером применения предложенного подхода является восстановление алгоритма ранжирования стран по степени готовности к внедрению электронного обучения (e-learning). Для примера было выбрано 15 стран (табл. 8) из рейтинга по оценкам готовности стран к электронному обучению в 2003 году, составленным организацией The Economist Intelligence Unit в сотрудничестве с корпорацией IBM [5]. В качестве критериев были приняты индикаторы, представленные в [6] (табл. 9).

Страна	Рейтинг по [5]
Швеция	1
США	2
Финляндия	3
Дания	4
Великобритания	5
Ирландия	6
Голландия	7
Франция	8
Австрия	9
Германия	10
Бельгия	11
Италия	12
Испания	13
Греция	14
Португалия	15

Таблица 8. Рейтинг по оценкам готовности стран к электронному обучению 2003 года

На основе идентификации ранжирующих алгоритмов в форме метода ПРИНН-У ИС был определен ранжирующий алгоритм с погрешностью 4 (максимальная погрешность – 15) и получены следующие результаты:

- к третьей группе важности было отнесено 5 критериев; DIDIX, государственные расходы на НИР, общие расходы на НИР, дистанционный труд, электронная коммерция;
- ко второй группе – 2 критерия: пользователи Интернета, компьютеры, имеющие доступ в Интернет;
- к первой – 3: DSL выделенные линии, электронное обучение, COQS.

Критерий
Пользователи Интернетом
DSL Выделенные линии
Компьютеры, имеющие доступ в Интернет
Электронное обучение
Индекс цифровой грамотности COQS
Коэффициент неравенства DIDIX
Государственные расходы на НИР
Общие расходы на НИР
Дистанционный труд
Электронная коммерция

Таблица 9. Индикаторы и критерии эффективности образовательных систем

Страны	Суммарный балл
Швеция	1497
США	1480
Финляндия	1416
Дания	1465
Великобритания	1368
Ирландия	1110
Голландия	1281
Франция	842,9
Австрия	1281
Германия	1177
Бельгия	835,6
Италия	755,7
Испания	715,3
Греция	640,2
Португалия	574,9

Таблица 10. Итоговый рейтинг и суммарный балл стран

Критерий	Коэффициент значимости
Пользователи Интернетом	0,114
DSL Выделенные линии	0
Компьютеры имеющие доступ в Интернет	0,005
Электронное обучение	0
Индекс цифровой грамотности COQS	0
Коэффициент неравенства DIDIX	0,016
Государственные расходы на НИР	0,804
Общие расходы на НИР	0,044
Дистанционный труд	0,018
Электронная коммерция	0

Таблица 11. Полученные коэффициенты значимости критериев

Страны	Суммарный балл
Швеция	3,147
США	3,146
Финляндия	2,930
Дания	2,707
Великобритания	2,582
Ирландия	1,963
Голландия	2,144
Франция	1,963
Австрия	2,702
Германия	2,247
Бельгия	1,961
Италия	1,554
Испания	1,552
Греция	1,415
Португалия	1,412

Таблица 12. Итоговый рейтинг и суммарный балл стран

На основе метода идентификации ранжирующих алгоритмов в форме линейной свертки был определен ранжирующий алгоритм с погрешностью, равной 3 (максимальная погрешность – 15). В табл. 11 приведены результаты.

Выделим наиболее важные критерии из решений, полученных обоими методами (табл. 13).

Критерий	Коэффициент значимости методом ЛС	Коэффициент значимости методом ПРИНН-У
Государственные расходы на НИР	0,804	9
Пользователи Интернетом	0,114	3
Общие расходы на НИР	0,044	9
Дистанционный труд	0,018	9
Коэффициент неравенства DIDIX	0,016	9
Компьютеры, имеющие доступ в Интернет	0,005	3
DSL Выделенные линии	0	1
Электронное обучение	0	1
Индекс цифровой грамотности COQS	0	1
Электронная коммерция	0	9

Таблица 13. Наиболее важные критерии из решений, полученных обоими методами

Из табл. 13 видно что коэффициенты значимости, найденные разными методами, практически совпадает, что говорит о правильности и точности найденного решения.

Обоими методами нам не удалось найти решение с нулевой погрешностью, но погрешность определяется только входными данными, поэтому следует провести полный функциональный анализ тех стран, которые не подчинились найденному алгоритму, что приведет к увеличению числа критериев.

Заключение

- Исследованы методы идентификации (восстановления) ранжирующих алгоритмов.
- Показана возможность использования методов.

- Разработана универсальная информационная система.
- На примере определены ранжирующие алгоритмы.
- Проведен сравнительный анализ методов идентификации (восстановление) ранжирующих алгоритмов на примере применения.

Литература

1. Пиявский С.А. Методы оптимизации и оптимального управления: Учебное пособие. СГАСУ. Самара, 2004. 160 с.
2. Ларичев О. И. Теория и методы принятия решений. М.: Логос, 2000.
3. Ларичев О. И. Методы поддержки принятия решений. М.: УРСС, 2001.
4. Sports Interactive «Championship Manager», 2004.
5. Рейтинг готовности стран к электронному обучению. // Learning World. 2004. №5–6. С. 30–32.
6. Advancement of the knowledge society: Comparing Europe, the US and Japan, Wyattville Road, Loughlinstown, Dublin 18, Ireland.
<http://www.eurofound.eu.int/publications/files/EF0403EN.pdf>

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ

А.И. Кальянова

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор А.В. Демин

В статье изложен принцип идентификации линейных динамических объектов, который учитывает априорную информацию об объекте и дает возможность определить оптимальные настраиваемые модели, оптимальные критерии качества идентификации и оптимальные алгоритмы идентификации.

Широкое использование средств вычислительной техники и телекоммуникаций для хранения, обработки и передачи информации делает особенно актуальным контроль доступа к банкам и базам данных современных вычислительных систем. Также актуален контроль доступа в сейфы, помещения, банковские сейфовые хранилища, для опознания при совершении банковских операций. В основе любой системы контроля доступа лежит необходимость идентификации и аутентификации абонента или групп абонентов этой системы.

Идентификация и аутентификация предполагают изучение некоторого неизвестного объекта и создание его математической модели, описывающей вход и выход объекта с заданной погрешностью, т.е. выбор структуры модели, число и вид учитываемых ею параметров, а также многочисленные условия и ограничения в рамках, которых выбранная модель корректно описывает объект [1]. В процессе идентификации полученная модель принимается за эталон. Аутентификация предполагает сравнение полученной модели с эталоном и принятие аутентификационного решения о разрешении или запрете доступа.

Принципиальным отличием идентификации от аутентификации является уровень доверия к пользователю. На предварительном этапе идентификации (обучения системы) уровень доверия к регистрируемому пользователю априорно высок. Режим аутентификации, напротив, предполагает низкий уровень доверия к аутентифицируемой личности [2].

В процессе идентификации по наблюдаемым входным воздействиям и выходным величинам объекта подбираются параметры настраиваемой модели, обеспечивающие экстремум некоторого критерия, характеризующего качество идентификации. Изменения параметров настраиваемой модели осуществляется при помощи адаптивных устройств, реализующих алгоритмы идентификации. Задачи обоснованного, однозначного адаптивного алгоритма сводится, прежде всего, к задачам выбора настраиваемой модели и выбора критерия идентификации. Решение этих задач связано с возможностью учета в настраиваемых моделях, в критериях качества и в алгоритмах идентификации априорной информации об объекте.

Идентификация объектов

Идентификация осуществляется при помощи настраиваемой модели той или иной структуры, параметры которой могут изменяться. Функциональную схему идентификации можно представить в виде, изображенном на рисунке.

В каждый момент времени $n = 1, 2, \dots$ к входам объекта и настраиваемой модели приложено внешнее воздействие $u(n)$. Объект возмущается также некоторой случайно наблюдаемой помехой $\xi(n)$. Выходная величина объекта $y(n)$ зависит как от внешнего воздействия и помехи, так и от неизвестного вектора параметров c^* . Выходная величина настраиваемой модели $\hat{y}(n)$ зависит от вектора настраиваемых параметров c , который пересчитывается в силу алгоритма, обрабатывающего вектор всех наблюдений $z(n)$. Разность выходных величин объекта и настраиваемой модели образует невязку

$$\varepsilon(z(n), c) = y(n) - \hat{y}(n), \quad (1)$$

которая поступает на вход функционального преобразователя, изображенного на рисунке двойным прямоугольником [3].

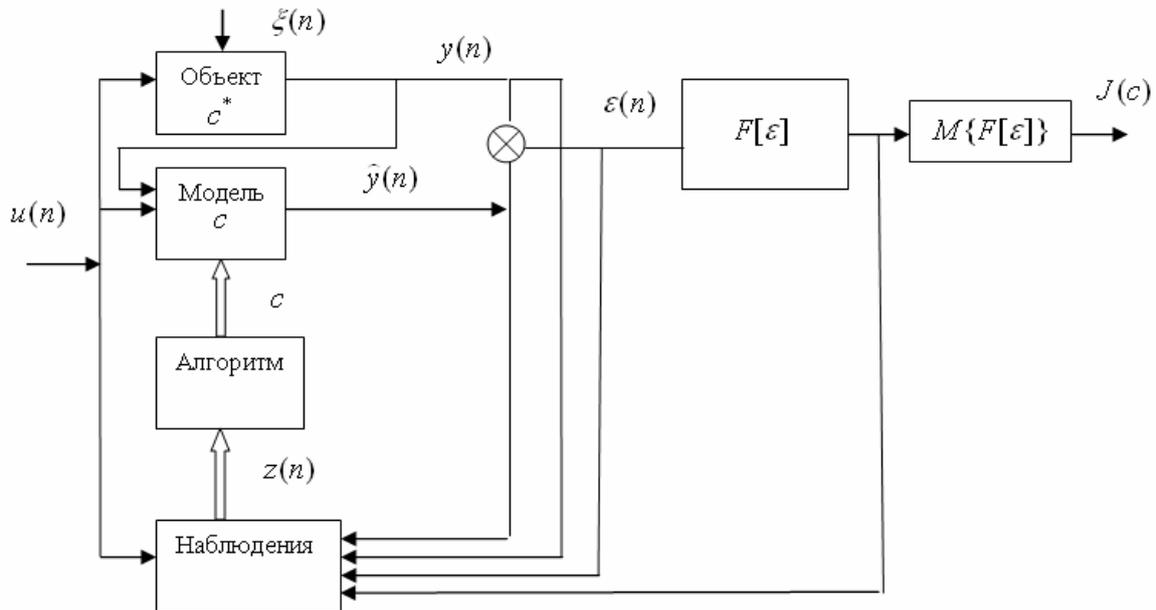


Рис. Схема идентификации

Важнейшим этапом идентификации является оценка достоверности ее результатов, которая, в свою очередь, определяется достоверностью разработанной модели. Под достоверностью следует понимать степень соответствия модели и исходного объекта, для которого создается модель. Говоря о достоверности, необходимо отметить, что получить абсолютно достоверную модель сложной системы практически невозможно. Это вытекает из того, что невозможно создать модель сложной и многообразной системы, идентичную ей, поскольку при создании модели, как правило, отбрасываются второстепенные компоненты и остаются лишь те, поведение которых подлежит исследованию.

Достоверность модели определяется:

- составом компонент модели, возможностью представления каждой компоненты модели единственным физическим законом ее функционирования (погрешность представления законов);
- точностью математической аппроксимации процессов. Если аналитическое описание выполнено с достаточно большой точностью, то погрешность полученной модели определяется только погрешностями ЭВМ и средств моделирования. Разность между точным описанием объекта и моделью при этом будет определяться наличием приближения для формул, заложенных в систему. Достоверность будет складываться из степени полноты описания законов для каждой компоненты, степени приближения самих описывающих законов, а также принятых условностей в описании влияния внешней среды на объект.
- погрешностью вычислений. Достоверность определяется степенью точности имеющихся аппаратно-программных средств ЭВМ. Необходимо учитывать погрешности, вносимые самой ЭВМ, программным комплексом, на базе которого осуществляется идентификация, а также степень соответствия модели и объекта. Следует отметить, что различные компоненты модели имеют различную степень важности и, соответственно, различные требования по точности. Компо-

ненты модели, имеющие первостепенное значение, должны иметь максимальную точность при идентификации, в то время как второстепенные составляющие могут быть описаны с меньшей точностью;

- наличием взаимных влияний компонент модели. Имеются в виду погрешности, возникающие в разрывах связей при разбиении исходного объекта на отдельные составляющие. В этом случае на входном воздействии может сказаться внешнее возмущение, связанное с погрешностью, вызванным разрывом связей между блоками исходного объекта.

Соответствие настраиваемой модели объекту, т.е. качество идентификации, оценивается критерием качества идентификации

$$J(c) = M \{F[\varepsilon(z(n), c)]\}. \quad (2)$$

Здесь $F[\cdot]$ – функция потерь, а M – символ математического ожидания. Критерий качества идентификации представляет собой средние потери. Чем меньше средние потери, тем выше качество идентификации. Улучшение качества идентификации осуществляется надлежащим выбором структуры настраиваемой модели и изменением ее параметров. Это изменение осуществляется алгоритмом идентификации.

Алгоритм идентификации определяется функцией потерь и структурой настраиваемой модели. По наблюдениям входного воздействия и выходных величин объекта и настраиваемой модели алгоритм идентификации изменяет параметры последней так, чтобы средние потери достигали с ростом n минимума.

Для решения задачи идентификации необходимо:

1. очертить класс объектов;
2. выбрать для этого класса объектов настраиваемую модель, т.е. модель, параметры которой можно изменять;
3. выбрать критерий качества идентификации – средние потери, которые бы характеризовали различие между выходными величинами объекта и настраиваемой модели;
4. сформулировать алгоритм идентификации, который, используя доступные для наблюдения значения входных и выходных величин, изменял бы параметры настраиваемой модели так, чтобы средние потери с ростом n достигали минимума.

Объекты

Уравнение линейных динамических объектов в общем случае при наличии входного воздействия $u(n)$ и помехи $\xi(n)$ может быть представлено в виде

$$y(n) + \sum_{m=1}^N a_m^* y(n-m) = \sum_{m=0}^N b_m^* u(n-m) + \sum_{m=0}^N d_m^* \xi(n-m), \quad (3)$$

где $n = 1, 2, \dots$ – дискретное время.

Введем оператор запаздывания q , определяемый как

$$q^m y(n) = y(n-m), \quad m = 1, 2, \dots, N; \quad (4)$$

тогда уравнение линейных динамических объектов можно записать в операторной форме

$$Q(q)y(n) = P_u u(n) + P_\xi \xi(n) \quad (5)$$

или

$$y(n) = K_u(q)u(n) + K_\xi(q)\xi(n), \quad (6)$$

где

$$K_u(q) = \frac{P_u(q)}{Q(q)}, \quad K_\xi(q) = \frac{P_\xi(q)}{Q(q)} \quad (7)$$

– передаточные функции динамического объекта по воздействию и возмущению, соответственно. В уравнении (5) и передаточных функциях (7)

$$Q(q) = 1 + a_1^* q + a_2^* q^2 + \dots + a_N^* q^N \quad (8)$$

– характеристический полином, а

$$P_u(q) = b_0^* + b_1^* q + b_2^* q^2 + \dots + b_N^* q^N, \quad (9)$$

$$P_\xi(q) = d_0^* + d_1^* q + d_2^* q^2 + \dots + d_N^* q^N \quad (10)$$

– полиномы по воздействию и по возмущению, соответственно.

Идентификация линейных объектов состоит в оценке параметров a_m^* , b_m^* , d_m^* , $m = 1, 2, \dots, N$ по наблюдаемым величинам входной $u(n)$ и выходной $y(n)$ величинам.

Настраиваемая модель

Настраиваемая модель должна вырабатывать прогнозирующую величину $\hat{y}(n)$ на основе наблюдаемых входных воздействий и выходных величин объекта. Чем ближе параметры настраиваемой модели к параметрам объекта, тем ближе $\hat{y}(n)$ к выходной величине объекта $y(n)$. Модель формируется на основе априорной информации об объекте. К априорной информации относятся: порядок уравнений объекта, точка приложения помехи, длительность временной характеристики объекта и т.д. Возникает задача синтеза наилучшей настраиваемой модели на основе имеющейся априорной информации об объекте.

Уравнение настраиваемой модели

$$\hat{y}(n) = \hat{K}_1(q)u(n) + [1 - \hat{K}_2(q)]y(n), \quad (11)$$

где

$$\hat{K}_1(q) = d_0 \frac{\hat{P}_u(q)}{\hat{P}_\xi(q)}, \quad \hat{K}_2(q) = d_0 \frac{\hat{Q}(q)}{\hat{P}_\xi(q)} \quad (12)$$

– передаточные функции настраиваемой модели,

$$\hat{Q}(q) = 1 + a_1 q + a_2 q^2 + \dots + a_N q^N, \quad (13)$$

$$\hat{P}_u(q) = b_0 + b_1 q + b_2 q^2 + \dots + b_N q^N, \quad (14)$$

$$\hat{P}_\xi(q) = d_0 + d_1 q + d_2 q^2 + \dots + d_N q^N. \quad (15)$$

Разность между выходными величинами объекта $y(n)$ и настраиваемой модели $\hat{y}(n)$ называется невязкой $\varepsilon(n)$,

$$\varepsilon(n) = y(n) - \hat{y}(n). \quad (16)$$

Близость настраиваемой модели к объекту характеризуется математическим ожиданием квадрата невязки

$$M \{\varepsilon^2(n)\} = M \{[y(n) - \hat{y}(n)]^2\}. \quad (17)$$

Под оптимальной настраиваемой моделью понимаем такую модель, для которой $M \{\varepsilon^2(n)\}$ достигает минимально возможного значения.

Критерий качества идентификации

Качество идентификации определяется средними потерями

$$J(c) = M \{F[\varepsilon(z(n), c)]\}, \quad (18)$$

где функция потерь $F[\varepsilon]$ представляет собой четную функцию невязки

$$F[\varepsilon] = F[-\varepsilon]. \quad (19)$$

Наиболее распространенные функции потерь – квадратичные, $F[\varepsilon] = \varepsilon^2$, и модульные, $F[\varepsilon] = |\varepsilon|$.

Метод минимизации квадратичного критерия

$$J(c) = M\{\varepsilon^2(z(n), c)\} \quad (20)$$

соответствует широко распространенному методу наименьших квадратов. Этот метод приводит к решению системы линейных алгебраических уравнений, оптимальное решение c^* , минимизирующее функционал, может быть выражено в явной аналитической форме через корреляционные функции. Минимизация неквадратичных критериев приводит к необходимости решения нелинейной системы уравнений. В этом случае оптимальное решение c^* может быть найдено лишь приближенно.

Оптимизация алгоритмов идентификации тесно связана с учетом в них априорной информации об объекте и о статических свойствах приложенных к нему помех. При заданном уровне априорной информации можно однозначно определить оптимальную прогнозирующую модель, оптимальную функцию потерь и оптимальные алгоритмы идентификации.

Априорная информация о структуре динамического объекта определяет оптимальную прогнозирующую модель. Априорная информация о помехе однозначно определяет оптимальную функцию потерь, т.е. критерий качества идентификации (средние потери) и оптимальные алгоритмы, обладающие большой асимптотической скоростью сходимости.

Литература

1. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. М.: Наука, 1991. 432 с.
2. Иванов А.И. Биометрическая идентификация личности по динамике подсознательных движений: Монография. Пенза, Изд-во Пенз. гос ун-та, 2000. 188 с.
3. Цыпкин Я.З. Основы информационной теории идентификации. М.: Наука, 1984. 320 с.

СИНТЕЗ НЕЧЕТКИХ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ДВУХПРИВОДНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА

А.В. Аржаник

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент А.В. Лямин

Рассматривается проблема синтеза алгоритмов управления мобильным роботом, функционирующим в условиях неопределенности. Решение задачи основывается на использовании нейронных сетей и аппарата нечеткой логики.

Введение

В последние годы происходит роботизация буквально всех сфер человеческой деятельности. Диапазон применения робототехники, в том числе и мобильных роботов, чрезвычайно широк. При этом мобильные роботы представляют собой весьма интересный объект для исследования, нетривиальный с точки зрения управления им.

Данная статья посвящена описанию алгоритмов управления двухприводным мобильным роботом при движении в динамической среде, оборудованной специальными световыми маяками. Использование активных маяков, включаемых по определенной программе, позволяет ставить перед роботом разнообразные задачи, сложность которых может варьироваться в широких пределах – от простого наведения на маяк до маневрирования между группой активных маяков [1, 2]. Для решения поставленных задач применяются различные методы: рекуррентная фильтрация и слежение за фиктивным маяком, движущимся вдоль предварительно спланированной траектории; создание виртуального полигона, используемого для навигации робота и запоминания координат маяков; построение карт местности и др. [2]. Однако при движении робота в условиях неопределенности, вызванной нечеткостью поставленных перед ним задач, неоднозначностью интерпретирования текущей ситуации, уместно использование методов управления на основе нечеткой логики. Основной идеей данного исследования явилось применение аппарата нечеткой логики как метода синтеза нелинейной статической обратной связи, а для ее реализации, в свою очередь, использовалась искусственная нейронная сеть. Применение данных методов позволяет строить алгоритмы управления, обеспечивающие устойчивое и качественное управление сложными динамическими объектами.

Планирование движения мобильного робота

Мобильный робот представляет собой трехколесную тележку с двумя активными и одним флюгерным колесом, снабженную независимыми электродвигателями правого и левого колеса. На платформе установлены сенсорные системы различного типа. С подробным описанием конструкции и системы технического зрения рассматриваемого мобильного робота можно ознакомиться в [1, 3].

Все задания для мобильного робота связаны с прохождением некоторой трассы, задаваемой маяками. В соответствии с регламентом соревнований среди задач управления движением робота можно выделить несколько основных:

- движение в заданную точку, положение которой определяется установленным на полигоне излучающим маяком (наведение на маяк);
- проезд между двумя маяками;
- движение вокруг маяка.

Выполнение второй задачи аналогично выполнению первой с той лишь разницей, что двигаться роботу необходимо по биссектрисе угла между маяками, образующими

ворота. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать только первую и третью задачи. Любое упражнение можно представить комбинацией из этих двух задач.

В структуру системы управления рассматриваемого робота включен блок принятия решения (задающее устройство), задачей которого является определение текущего типа решаемой задачи и формирование траектории движения, выбор наиболее целесообразного решения в зависимости от конкретной ситуации, сложившейся на полигоне. После установления типа задачи (движение на маяк или вокруг маяка) блок принятия решения определяет и передает регулятору нижнего уровня необходимые значения параметров движения ε (некоторая константа: при прямолинейном движении $\varepsilon = 0$, при вращательном движении $\varepsilon \neq 0$) и δ (угловое отклонение от эталонной (желаемой) траектории). Далее регулятор по направлению, определенному программой верхнего уровня, наводит робота и задает скорость.

В данной статье предложен вариант реализации блока принятия решения с использованием нейронных сетей и аппарата нечеткой логики. Важнейшей особенностью нейронной сети, свидетельствующей о ее широких возможностях и огромном потенциале, является параллельная обработка информации всеми звеньями. Кроме того, при большом числе межнейронных связей такая сеть приобретает устойчивость к ошибкам, возникающих на некоторых линиях. Функции поврежденных связей берут на себя исправные линии, в результате этого в деятельности сети не возникает существенных возмущений. Другое, не менее важное свойство – способность к обучению и обобщению накопленных знаний. Нейронная сеть обладает чертами искусственного интеллекта. Натренированная на ограниченном множестве данных сеть способна обобщать полученную информацию и показывать хорошие результаты на данных, не использовавшихся в процессе обучения. Использование нечеткой логики обусловлено неопределенностями различного рода, возникающими в процессе функционирования робота. Характерной особенностью нечетких нейронных сетей является возможность использования нечетких правил вывода для расчета выходного сигнала. В отличие от классических нейронных сетей, в них вместо непосредственного расчета уровня активации конкретных правил вывода выполняется адаптивный подбор параметров функции фазификации.

Рассмотрим процедуру синтеза нечеткой нейронной сети на примере выполнения роботом упражнения «маяки-ворота».

Задача прохождения роботом «ворот», образованных двумя активными маяками M1 и M2, очевидно, аналогична задаче движения на маяк, но двигаться роботу нужно по биссектрисе угла между маяками (рис. 1).

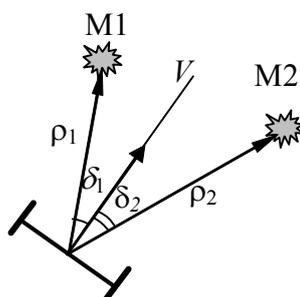


Рис. 1. Прохождение роботом «ворот»

Однако возможны такие начальные положения робота относительно ворот, при которых траектория движения, построенная по указанному алгоритму, пройдет в непосредственной близости от одного из маяков (рис. 2), при этом существует вероятность, что маяк может быть сбит, что при выполнении данного упражнения недопустимо. По-

этому в этом случае робот сначала совершает вращение вокруг ближайшего маяка, затем при достижении «удобной» позиции проходит в «ворота».

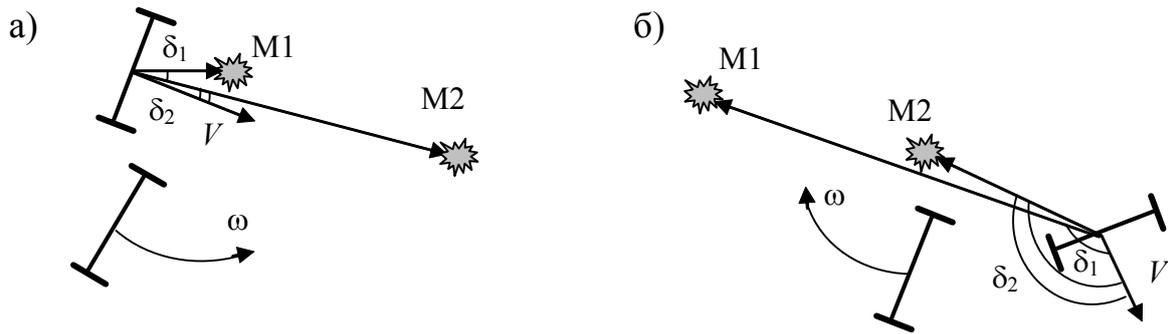


Рис. 2. Варианты движения робота при прохождении «ворот» в зависимости от его начального положения

Существуют две базовые структуры нечетких нейронных сетей: модель Такаги-Сугено-Канга (TSK) и модель Ванга-Менделя.

Структура нечеткой сети TSK

Особенностью нечеткой сети TSK является то, что функция заключения определяется нечетким, но точечным образом, благодаря чему дефаззификатор на выходе системы не требуется, а сама модель вывода значительно упрощается. Обобщенную схему вывода в модели TSK при использовании M правил и N переменных x_j можно представить в виде [4]:

если $(x_1 \text{ это } A_1^{(1)}) \text{ И } (x_2 \text{ это } A_2^{(1)}) \text{ И } \dots \text{ И } (x_N \text{ это } A_N^{(1)})$, то $y_1 = f_1(x_1, x_2, \dots, x_N)$,

...

если $(x_1 \text{ это } A_1^{(M)}) \text{ И } (x_2 \text{ это } A_2^{(M)}) \text{ И } \dots \text{ И } (x_N \text{ это } A_N^{(M)})$, то $y_M = f_M(x_1, x_2, \dots, x_N)$,

где A_i – величины соответствующего коэффициента принадлежности $\mu_{A_i}(x_i)$, $f_i(\mathbf{x}) = f_i(x_1, x_2, \dots, x_N)$ – четкая функция, на практике представляющая собой полином первого порядка

$$y_i = f_i(\mathbf{x}) = p_0 + \sum_{j=1}^N p_j x_j.$$

Здесь коэффициенты p_0, p_1, \dots, p_N – цифровые веса, подбираемые в процессе адаптации (обучения) сети.

При проектировании нечеткой нейронной сети TSK условие «если x_i это A_i » реализуется функцией фаззификации, которая представляется обобщенной функцией Гаусса отдельно для каждой переменной x_i :

$$\mu_{A_i}(x_i) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x_i - c_i}{\sigma_i} \right)^{2b_i}},$$

где $\mu_{A_i}(x_i)$ представляет оператор A_i . Обобщенная функция Гаусса при соответствующем подборе показателя степени b может определять как стандартную функцию Гаусса ($b = 1$), так и треугольную ($b = 0.6$) или трапецеидальную функцию.

В нечетких сетях данное условие целесообразно задавать в форме алгебраического произведения (или сложения), следовательно, для k -го правила вывода

$$\mu_A^{(k)}(x) = \prod_{j=1}^N \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{x_j - c_j^{(k)}}{\sigma_j^{(k)}} \right)^{2b_j^{(k)}}} \right].$$

Если в модели вывода TSK используется M правил, то выход системы определяется как их средневзвешенное и представим в виде

$$y(x) = \frac{1}{\sum_{k=1}^M w_k} \sum_{k=1}^M w_k y_k(x) = \frac{1}{\sum_{k=1}^M w_k} \sum_{k=1}^M w_k \left(p_{k0} + \sum_{j=1}^N p_{kj} x_j \right).$$

Присутствующие в этом выражении веса w_k интерпретируются как значимость компонентов $\mu_A^{(k)}(x)$, определенных выше.

Согласно процедуре синтеза нейронной сети, в первую очередь необходимо определить входной вектор X и выходной вектор Y , задав их размерности и содержимое каждого компонента. В качестве входных данных принята информация, поступающая с датчиков системы технического зрения, т.е. множество пар сигналов (ρ_i, γ_i) о положении маяков: ρ_i – расстояние до маяка, γ_i – угол, под которым виден маяк (угол между продольной осью робота и направлением на маяк).

При выполнении роботом упражнения «маяки-ворота» правила вывода формулируются следующим образом [5]:

$$\text{если } \rho_1 = -1 \text{ или } \rho_2 = -1, \text{ то } \delta = \begin{cases} \rho_1 & \text{при } \rho_2 = -1, \\ \rho_2 & \text{при } \rho_1 = -1, \end{cases} \text{ и } \varepsilon = 0.$$

$$\text{если } \rho_1 > 0 \text{ и } \rho_2 > 0, \text{ то } \delta = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} \text{ и } \varepsilon = 0.$$

$$\text{если } \rho_1 \approx 0 \text{ или } \rho_2 \approx 0, \text{ то } \delta = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} \text{ и } \varepsilon = r^* - r = r^* - (\rho_1 \text{ или } \rho_2).$$

$$\text{если } \gamma_1 \approx 0 \text{ и } \gamma_2 \approx 0, \text{ то } \delta = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} \text{ и } \varepsilon = r^* - r = r^* - (\rho_1 \text{ или } \rho_2).$$

$$\text{если } \gamma_1 \geq 90^\circ \text{ и } \gamma_2 \geq 90^\circ, \text{ то } \delta = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} \text{ и } \varepsilon = r^* - r = r^* - (\rho_1 \text{ или } \rho_2).$$

Здесь r^* – эталонное значение ε , выбираемое исходя из конструкторских требований.

Запись $\rho_i = -1$ условно обозначает, что соответствующий маяк не активен, т.е. первое правило соответствует ситуации, когда горит один маяк, остальные – ситуации, когда горят два маяка. Первые два правила определяют прямолинейное движение, остальные три – вращательное движение.

Структура нечеткой сети TSK, соответствующая описанным правилам представлена на рис. 3.

Сеть имеет $2N$ входов, где N – общее количество маяков, в данном случае сеть имеет четыре входа:

$x_i^1, i = 1, 2$ – расстояние до соответствующего маяка;

$x_i^2, i = 1, 2$ – угол на соответствующий маяк.

Представленная на рисунке сеть имеет один выходной нейрон, поэтому полная структура нечеткой нейронной сети в рассматриваемом случае состоит из двух независимых сетей, идентичных по структуре, но в первой сети выход определяет желаемое значение параметра δ , во второй сети – желаемое значение параметра ϵ .

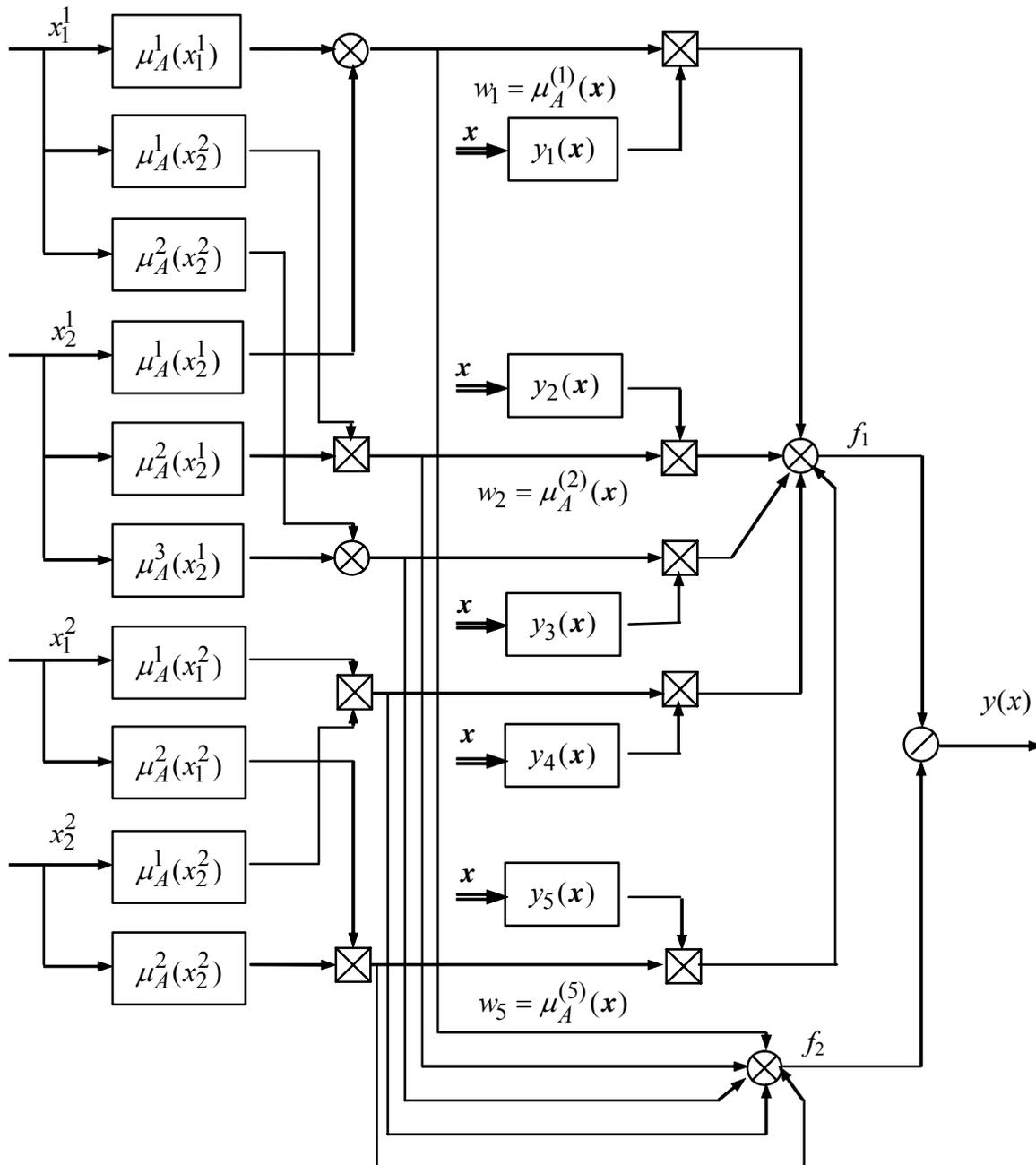


Рис. 3. Структура нечеткой нейронной сети TSK

В представленной сети можно выделить пять слоев.

- Первый слой выполняет раздельную фаззификацию каждой переменной x_i ($i = 1, 2, \dots, 2N$), определяя для каждого k -го правила вывода значение коэффициента при-

надлежности $\mu_A^{(k)}(x_i)$ в соответствии с применяемой функцией фаззификации. Это параметрический слой с параметрами $c_i^{(k)}, \sigma_i^{(k)}, b_i^{(k)}$, подлежащими адаптации в процессе обучения.

- Второй слой выполняет агрегирование отдельных переменных x_i , определяя результирующее значение коэффициента принадлежности $w_k = \mu_A^{(k)}(\mathbf{x})$ для вектора \mathbf{x} (уровень активации правила вывода). Это непараметрический слой.
- Третий слой представляет собой генератор функции TSK, рассчитывающий значения $y_k(\mathbf{x}) = p_{k0} + \sum_{j=1}^{2N} p_{kj}x_j$. В этом слое также производится умножение сигналов $y_k(\mathbf{x})$ на значения w_k , сформированные в предыдущем слое. Это параметрический слой, в котором адаптации подлежат линейные веса p_{kj} для $k = 1, 2, \dots, M$ и $j = 1, 2, \dots, 2N$, определяющие функцию следствия модели TSK.
- Четвертый слой составляют два нейрона-сумматора, один из которых рассчитывает взвешенную сумму сигналов $y_k(x)$, а второй определяет сумму весов $\sum_{k=1}^M w_k$. Это непараметрический слой.
- Пятый слой, состоящий из одного выходного нейрона, – это нормализующий слой для весов w_k . Выходной сигнал $y(\mathbf{x})$ определяется выражением

$$y(\mathbf{x}) = f(x) = \frac{f_1}{f_2}.$$

Это также непараметрический слой.

Из приведенного описания следует, что нечеткая сеть TSK содержит только два параметрических слоя (первый и третий), параметры которых уточняются в процессе обучения. Параметры первого слоя называют нелинейными параметрами, а параметры третьего слоя – линейными весами. Для приведенного примера, использующего пять нечетких правил, при наличии четырех входных переменных общее количество параметров сети равно 85, из которых 25 – это линейные веса, остальные 60 – параметры нелинейной части условий. Для уменьшения количества адаптируемых параметров возможно уменьшение количества независимых функций принадлежности для отдельных переменных, посредством их комбинирования.

Структура нечеткой сети Ванга-Менделя

Если в качестве модели вывода нечеткой нейронной сети использовать модель Мамдани-Заде, то получим структуру нечеткой сети, определенную Л. Вангом и Дж. Менделем [4]. В модели используется дефаззификация относительно среднего центра

$$y(\mathbf{x}) = \frac{1}{\sum_{k=1}^M \left[\prod_{j=1}^{2N} \mu_A^{(k)}(x_j) \right]} \sum_{k=1}^M \psi_k \left[\prod_{j=1}^{2N} \mu_A^{(k)}(x_j) \right],$$

где параметры ψ_k интерпретируются как центр c_k функции принадлежности следствия k -го нечеткого правила вывода, а $\mu_A^{(k)}(x)$ – значение функции принадлежности, соответствующей данному правилу.

Структура нечеткой сети Ванга-Менделя, соответствующая описанным правилам прохождения роботом «ворот», представлена на рис. 4.

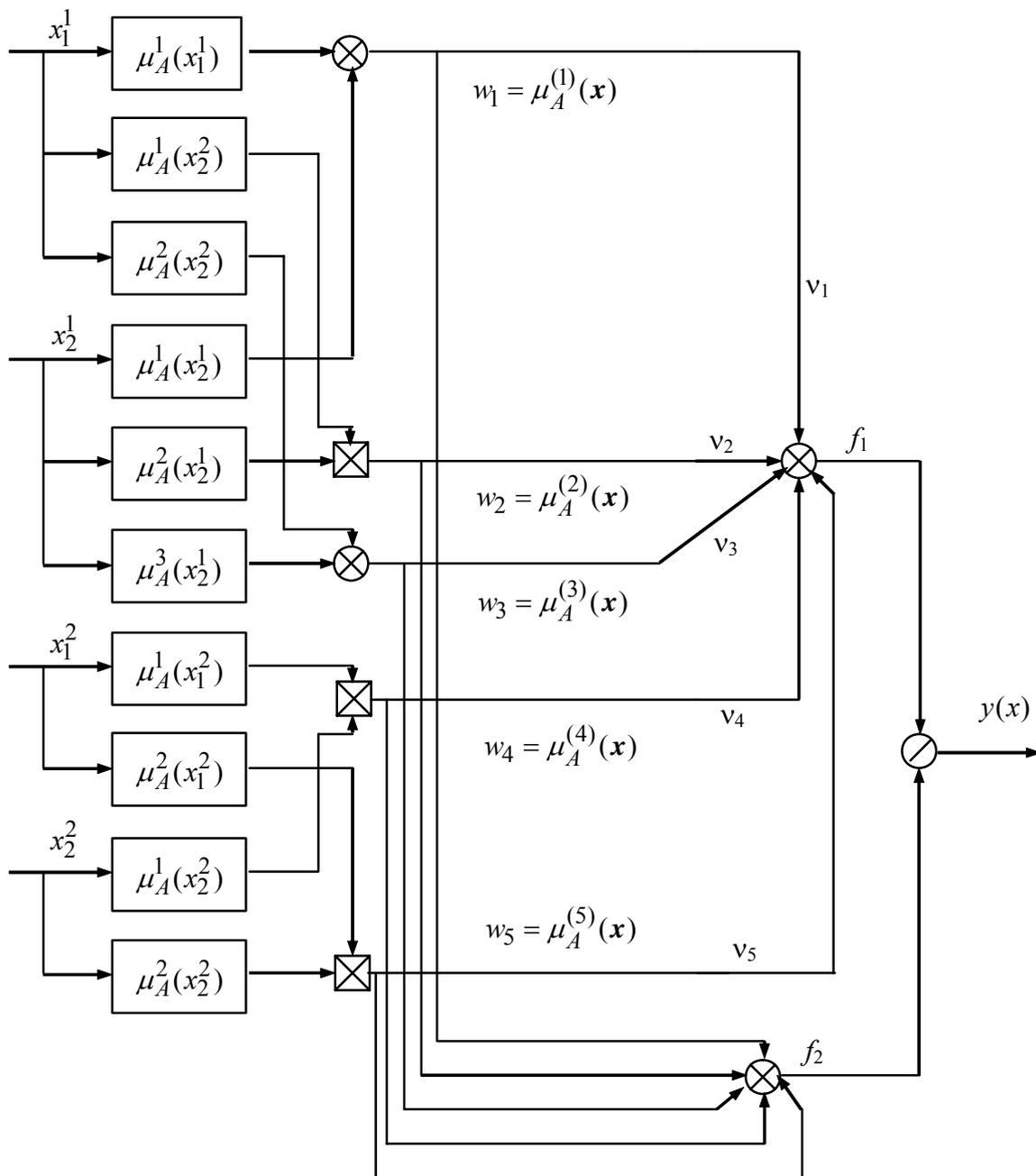


Рис. 4. Структура нечеткой нейронной сети Ванга-Менделя

Данная сеть имеет четырехслойную структуру, в которой первый слой выполняет фаззификацию входных переменных, второй – агрегирование значений активации условия (определение единственного значения), третий (линейный) – агрегирование M правил вывода (первый нейрон) и генерацию нормализующего слоя (второй нейрон), выходной слой осуществляет нормализацию, формируя выходной сигнал $y(x)$. Первый и третий слой являются параметрическими. В первом слое это параметры функции фаззификации $(c_j^{(k)}, \sigma_j^{(k)}, b_j^{(k)})$, в третьем слое – веса v_1, v_2, \dots, v_M .

Нетрудно заметить большое сходство структур обеих нечетких сетей. Части, определяющие условие – первый и второй слой – у них идентичны. Различия наблюдаются

ся в представлении компонентов «то ...». В сети TSK результат представляется полиномом первого порядка. В сети Ванга-Менделя результат представляется константой ($\psi_k = c_k$), которую можно рассматривать как полином нулевого порядка, определяющий центр функции принадлежности следствия. Таким образом, с функциональной точки зрения сеть Ванга-Менделя является частным случаем сети TSK.

Гибридный алгоритм обучения нечетких сетей

Задача обеих сетей состоит в таком отображении пар данных (x, d) , чтобы ожидаемое значение, соответствующее входному вектору x , формировалось выходной функцией сети $y(x)$. При движении мобильного робота в среде, оборудованной специальными маяками, ожидаемые выходные сигналы нейрона d_i , составляющие вектор d , известны, поэтому возможно использование алгоритмов обучения с учителем. Рассмотрим подробнее гибридный метод обучения нечетких нейронных сетей [4]. Данный метод применяется к обеим описанным выше сетевым структурам. Сеть Ванга-Менделя можно при этом рассматривать как сеть TSK, в которой все параметры (кроме подлежащего определению $\psi_k = p_{k0}$) p_{kj} ($k = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, 2N$) тождественно равны нулю.

Согласно данному методу, подлежащие адаптации параметры разделяются на две группы. Первая состоит из линейных параметров p_{kj} третьего слоя, вторая – из параметров нелинейной функции принадлежности первого слоя. Уточнение параметров проводится в два этапа.

На первом этапе при фиксации определенных значений параметров функции принадлежности (в первом цикле – это значения, полученные в результате инициализации) путем решения системы линейных уравнений рассчитываются линейные параметры p_{kj} полинома TSK. При известных значениях функции принадлежности

$$y(x) = \sum_{k=1}^M w'_k \left(p_{k0} + \sum_{j=1}^N p_{kj} x_j \right),$$

где

$$w'_k = \frac{\prod_{j=1}^N \mu_A^{(k)}(x_j)}{\sum_{r=1}^M \left[\prod_{j=1}^N \mu_A^{(r)}(x_j) \right]} = const$$

для $k = 1, 2, \dots, M$. При p обучающих выборках $(x^{(l)}, d^{(l)})$ ($l = 1, 2, \dots, p$) и замене выходного сигнала сети ожидаемым значением $d^{(l)}$ получаем систему из p линейных уравнений

$$\begin{bmatrix} w'_{11} & w'_{11}x_1^{(1)} & \dots & w'_{11}x_N^{(1)} & \dots & w'_{1M} & w'_{1M}x_1^{(1)} & \dots & w'_{1M}x_N^{(1)} \\ w'_{21} & w'_{21}x_1^{(2)} & \dots & w'_{21}x_N^{(2)} & \dots & w'_{2M} & w'_{2M}x_1^{(2)} & \dots & w'_{2M}x_N^{(2)} \\ \dots & \dots \\ w'_{p1} & w'_{p1}x_1^{(p)} & \dots & w'_{p1}x_N^{(p)} & \dots & w'_{pM} & w'_{pM}x_1^{(p)} & \dots & w'_{pM}x_N^{(p)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{10} \\ \dots \\ p_{1N} \\ \dots \\ p_{M0} \\ \dots \\ p_{MN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d^{(1)} \\ d^{(2)} \\ \dots \\ d^{(p)} \end{bmatrix}.$$

Это выражение можно записать в матричной форме:

$$Ap = d.$$

Так как матрица \mathbf{A} является прямоугольной, решение этой системы уравнений можно получить при помощи псевдоинверсии матрицы \mathbf{A}

$$\mathbf{p} = \mathbf{A}^+ \mathbf{d},$$

где $\mathbf{A}^+ = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T$.

На втором этапе после фиксации значений линейных параметров p_{kj} рассчитываются фактические выходные сигналы $y(i)$ сети для $i = 1, 2, \dots, p$, для чего используется линейная зависимость

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y^{(1)} \\ y^{(2)} \\ \dots \\ y^{(p)} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \mathbf{p},$$

а затем – вектор ошибки $\varepsilon = \mathbf{y} - \mathbf{d}$. Сигналы ошибки направляются ко входу сети (обратное распространение) вплоть до первого слоя. Далее рассчитываются компоненты градиента целевой функции относительно конкретных параметров $c_j^{(k)}, \sigma_j^{(k)}, b_j^{(k)}$. После формирования вектора градиента для уточнения параметров можно использовать один из градиентных методов обучения. Наиболее простым в реализации является метод наискорейшего спуска. В этом случае соответствующие формулы адаптации принимают форму:

$$c_j^{(k)}(n+1) = c_j^{(k)}(n) - \eta_c \frac{\partial E(n)}{\partial c_j^{(k)}},$$

$$\sigma_j^{(k)}(n+1) = \sigma_j^{(k)}(n) - \eta_\sigma \frac{\partial E(n)}{\partial \sigma_j^{(k)}},$$

$$b_j^{(k)}(n+1) = b_j^{(k)}(n) - \eta_b \frac{\partial E(n)}{\partial b_j^{(k)}},$$

где n – номер итерации, $\eta \in (0, 1)$ – коэффициент обучения.

После уточнения нелинейных параметров вновь запускается процесс адаптации линейных параметров функции TSK (первый этап), а затем и нелинейных параметров (второй этап). Цикл повторяется вплоть до стабилизации всех параметров процесса.

Достоинством представленного гибридного алгоритма является разделение процесса обучения на два обособленных во времени этапа. На каждом этапе уточняется только часть параметров сети, за счет чего существенным образом сокращается количество математических операций и увеличивается скорость выполнения алгоритма.

Заключение

Особенностью представленной методики синтеза алгоритмов планирования движения мобильного робота, функционирующего в среде, оборудованной инфракрасными маяками, является использование нейронных сетей и аппарата нечеткой логики. Представлены процедуры построения структуры нечетких нейронных сетей на основе моделей вывода Такаги-Сугено-Канга и Ванга-Менделя, а также гибридный алгоритм обучения представленных сетевых структур. Применение данных методов современной теории управления позволяет строить алгоритмы, обеспечивающие устойчивое и качественное управление сложными динамическими объектами.

Литература

1. Аржаник А.В., Вашенков О.Е., Лямин А.В., Штефан В.И. Мобильный робот «Невская стрела». // Мехатроника, автоматизация, управление. М.: Новые технологии. 2004. №2. С. 23–26.
2. Мобильные роботы и мехатронные системы. / Материалы научной школы-конференции (Москва, 5–6 декабря 2000 г.). М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. 288 с.
3. Аржаник А.В. Система технического зрения мобильного робота. // Вестник конференции молодых ученых СПбГУ ИТМО. Сборник научных трудов. / Под ред. В.Л. Ткалич. Том 2. СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. С. 97–102.
4. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. М.: Финансы и статистика, 2004. 344 с.
5. Аржаник А.В. Синтез алгоритмов управления движением двухприводного мобильного робота на основе нечеткой логики для задачи прохождения «ворот». // Вестник II межвузовской конференции молодых ученых СПбГУ ИТМО. Сборник научных трудов. / Под ред. В.Л. Ткалич. Том 2. СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. С.112–120.
6. Ясницкий Л.Н. Введение в искусственный интеллект. / Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2005. 176 с.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ХОДЬБЫ ДВУНОГОГО РОБОТА

Р.А. Алексеев

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор **И.В. Мирошник**

Рассматривается разработка алгоритмов и последующее моделирование ходьбы двуногого робота с использованием методов траекторного планирования и согласованного управления. Формулируются локальные задачи управления, которые сводятся к простым задачам стабилизации задачно-ориентированных координат.

Введение

Антропоморфные шагающие механизмы являются в настоящее время одним из ведущих направлений научно-технических разработок. Сейчас известно не менее 160 реализаций шагающих аппаратов [6, 8–11, 13–28]. Любое устройство такого типа состоит из цельной или составной верхней части – корпуса, платформы с оборудованием, торса с механическими руками (манипуляторами) и некоторого количества механических ног (педипуляторов). Существуют механизмы на шести, четырех, двух и даже на трех ногах, а также конструкции смешанного типа, например, имеющие две ноги и два колеса.

Большое число проектов и исследований в данной области демонстрируют необходимость привлечения современных фундаментальных концепций [7–14]. Программное управление имеет целый ряд недостатков, связанных с необходимостью постоянной отработки множества командных сигналов, ограниченной точностью и накоплением ошибок, ограниченными возможностями текущей коррекции движения и использования дополнительной информации.

Наиболее перспективные направления развития управления двуногими роботами связаны с геометрическими стратегиями и методами согласованного управления.

Методика согласованного управления с использованием траекторного планирования

Применение метода траекторного планирования предполагает вначале задание эталонных точек циклов (точек сопряжения). Далее следует построение кривых требуемых траекторий, соединяющих эти точки, а затем получение условий согласования, определяющих некие соотношения в движениях отдельных звеньев [2–4,7].

Пусть x – вектор переменных состояния объекта. Каналы управления независимы и нормированы:

$$\dot{x} = u. \quad (1)$$

Задача управления должна быть поставлена введением вектора условий, который может содержать отклонения e и скорости s , определяемые через x :

$$\begin{bmatrix} e \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi(x) \\ \psi(x) \end{bmatrix} = \Phi(x). \quad (2)$$

Замечание: Условия вида $\varphi(x)=0$ называются условиями согласования.

Теперь требуется найти закон управления вида $\dot{e} = -Ke$, обеспечивающий минимизацию отклонений e , и $\dot{s} = V^*$, обеспечивающий требуемую скорость движения s . Дифференцируя (2), имеем:

$$\begin{bmatrix} \dot{e} \\ \dot{s} \end{bmatrix} = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \dot{x}. \quad (3)$$

Из (3), учитывая (1), можно получить выражение для управления (см. рис. 1):

$$u = G^{-1} \begin{bmatrix} \dot{e} \\ \dot{s} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $G = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)$.

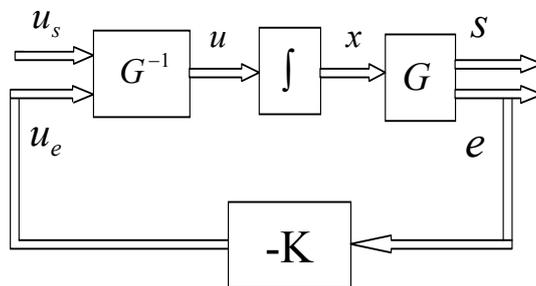


Рис. 1. Общая структура системы траекторного управления

Плоскость основного движения

Движения робота принято разделять на движения в продольной (сагиттальной) плоскости и движения в поперечной (латеральной) плоскости. Движения в поперечной плоскости служат лишь для поддержания устойчивости. Основные же движения производятся в продольной плоскости, поэтому многие разработчики на первых порах рассматривают лишь продольное движение, на макете блокируя боковое движение неким устройством поддержки, которое жестко удерживает робота от падений в стороны, но при этом совершенно не мешает ему падать по курсу (вперед или назад) [8–10]. Таким образом, мы можем перейти к рассмотрению плоского продольного движения.

Модель шагающего механизма

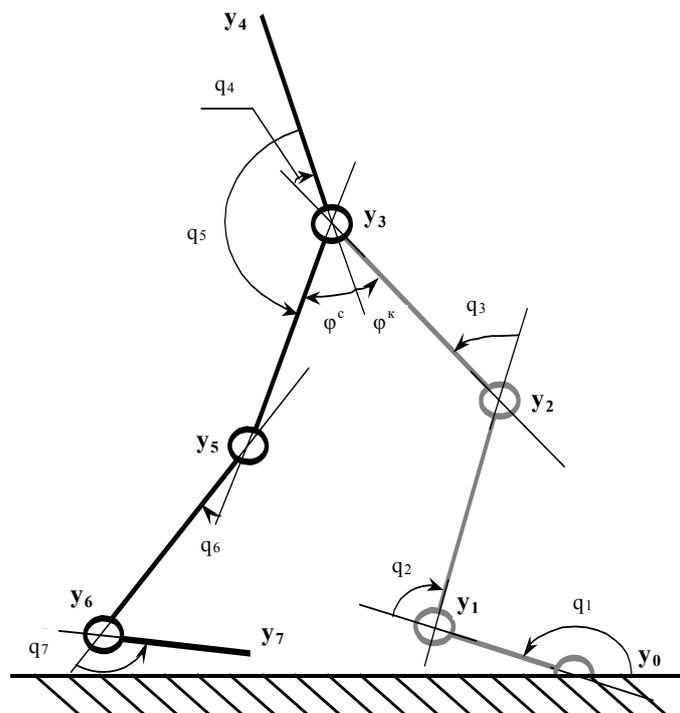


Рис. 2. Кинематическая схема робота

Кинематическая схема двуногого робота может быть представлена семизвенной цепью (см. рис. 2), если допустить, что торс не содержит сочлененных частей (туловища, рук, головы) или эти подвижность этих сочленений можно исключить, так как они слабо влияют на ходьбу. В качестве начальной точки кинематической цепочки берется носок опорной, т.е. передней в данной фазе, ноги. Каждое последующее звено развернуто относительно предыдущего на угол q_i и имеет протяженность l_i [6]. При этом носок другой (задней) ноги считается свободным (это конец последнего звена всей цепи). Система координат такой модели жестко связана с поверхностью опоры и является неподвижной. Угол абсолютной ориентации звена α_i определяется суммой относительных углов от q_1 до q_i .

Замечание: На рис. 2 свободная ступня умышленно оторвана от поверхности, чтобы показать возможность движения. Точка y_7 в модели не привязана к опоре.

Здесь обозначены также два угла поворота главных (тазобедренных) приводов φ^c и φ^k . Индексы «с» и «к» обозначают, соответственно, синюю и красную ногу, как принято на робототехнических схемах и циклограммах.

Объект управления

Механику робота опишем системой векторно-матричных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{q} = Bu, & (5a) \\ \alpha = Rq, & (5б) \\ y = h(\alpha). & (5в) \end{cases}$$

Здесь u [$n \times 1$] – вектор управлений, q [$n \times 1$] – вектор углов поворота приводов, α [$n \times 1$] – вектор абсолютных углов поворота звеньев, y [$n \times 2$] – вектор линейных координат конечных точек звеньев, B [$n \times n$] – матрица входов системы, R [$n \times n$] – матрица перехода от относительных углов к абсолютным, h [$n \times 2$] – матрица пересчета угловых координат в линейные.

В случае полного разделения (независимости) каналов приводов матрица B является диагональной $B = \text{diag}\{b_i\}$, состоящей из коэффициентов передачи b_i , $i = \overline{1, n}$. Матрица R для случая одной кинематической цепочки является нижней диагональной матрицей, все элементы которой – единицы. Матрица пересчета координат h определяется выражением $h(\alpha) = y' + T^T z$, а в подробном виде рекуррентная процедура вычисления элементов матрицы h выглядит таким образом:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \dots \\ h_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_0^T \\ y_1^T \\ \dots \\ y_{n-1}^T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T^T(\alpha_1)z_1 \\ T^T(\alpha_2)z_2 \\ \dots \\ T^T(\alpha_n)z_n \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где $T(\alpha_i)$ – матрица вращения, определяемая как $T(\alpha_i) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_i) & \sin(\alpha_i) \\ -\sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) \end{bmatrix}$, а $z_i = \begin{bmatrix} z_{i1} \\ z_{i2} \end{bmatrix}$ –

вектор протяженности i -го звена в координатах этого звена. Выражения (5) для переменных i -го звена имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{q}_i = B_i u_i & (7a) \\ \alpha_i = \sum_{j=1}^i q_j, \text{ где } i = \overline{1, n}. & (7б) \\ y_i^T = y_{i-1}^T + z_i^T \cdot T^T(\alpha_i) & (7в) \end{cases}$$

Схема объекта управления представлена на рис. 3.

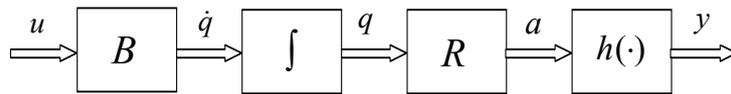


Рис. 3. Структурная схема объекта

Концепция ходьбы

Сравнительный анализ различных алгоритмов ходьбы [1, 7–13, 16–19, 22–26] позволяет сделать следующие выводы.

1. Перемещение приставным шаганием (шаг одной ногой, затем приставление другой ноги) снижает скорость общего перемещения механизма.
2. Использование безопорной фазы («фазы полета») в цикле шага связано со сложностью определения координат всего робота в этой фазе.
3. Двухфазный алгоритм проще трехфазного по реализации, и в нем меньше сопряжений (переключений режимов).
4. Фазы с отсутствием горизонтального движения торса относительно земли существенно снижают общую скорость робота.
5. Остановки движения торса в какой-либо фазе ходьбы приводят к рывкам при движении массивной верхней части, что существенно снижает устойчивость походки.
6. Полное распрямление маховой ноги перед отрывом и при касании поверхности существенно усложняет процесс управления ходьбой из-за возможного заклинивания приводов в распрямленном положении.
7. Циклическое вертикальное перемещение торса в цикле ходьбы тоже ослабляет устойчивость походки и расходует лишнюю энергию.

Проанализировав известные варианты походки, можно сформулировать основные положения желаемого алгоритма ходьбы (см. рис. 4).

1. Для сохранения роботом статического равновесия горизонтальная проекция его центра масс должна проходить через поверхность опоры.
2. Цикл одиночного шага должен состоять из двух фаз – переноса тяжести с задней ноги на переднюю (двухопорная стадия) и перемещения маховой ноги вперед на шаг (одноопорная стадия).
3. Для избежания рывков в обеих фазах массивный торс должен сохранять свою горизонтальную скорость постоянной.
4. Не допускаются распрямления маховой ноги перед отрывом и при касании поверхности, во избежание неоднозначности обработки траекторий.
5. Торс не должен иметь вертикального движения, так как оно ослабляет устойчивость походки и расходует лишнюю энергию.

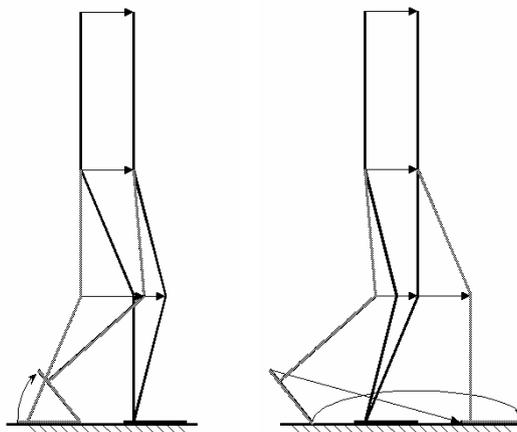


Рис. 4. Две фазы движения (перенос опорной нагрузки и переставление ноги)

Планирование траекторий (движения)

Вводим в систему управления задачно-ориентированные координаты, т.е. задаем условия движения в отклонениях e и скоростях s . При этом число уравнений в каждой фазе движения должно равняться числу звеньев в кинематической цепи, т.е. в данном случае – семи. Эти уравнения могут быть записаны в компактной форме

$$\begin{bmatrix} e \\ s \end{bmatrix} = \Phi(y, \alpha, q), \quad (8)$$

где $e = \{e_{ij}\}$, $s = \{s_{ij}\}$, $i = 1 \dots k$, $j = 1 \dots l$, $k+l=n$, n – число звеньев механизма (степеней свободы). Задача управления состоит в минимизации вектора отклонений e (задача (а)) и стабилизации вектора проходимого пути s за единицу времени, т.е. удержания вектора требуемых скоростей V^* (задача (б)).

В соответствии с выработанным алгоритмом можно выделить три группы условий.

1. Опорная нога и корпус в обеих фазах:

- | | | |
|-------|---------------------------------|--|
| а) | $e_1 = y_{11} - c_1$ | Стопа горизонтальна, |
| б) | $e_2 = y_{32} - c_2$ | Высота таза постоянна, |
| в) | $s_1 = \dot{y}_{31} = V_k$ | Таз движется равномерно, |
| г) | $s_3 = \dot{y}_{41} = -V_k$ | Корпус держится вертикально, |
| здесь | $c_1 = 15$ | (длина ступни), |
| | $c_2 = h = 30 * (2 + \sqrt{3})$ | (высота таза над поверхностью), |
| | $V_k = 1$ | (горизонтальная скорость корпуса); |
| | $Q_1 = \pi/2$ | (угол корпуса относительно горизонтали). |

2. Маховая нога в фазе переноса:

- | | | |
|-------|-------------------------|---|
| а) | $e_3 = y_{71} - c_3$ | Носок стопы не перемещается, |
| б) | $e_4 = y_{72} - c_4$ | Носок стопы – точка опоры, |
| в) | $e_5 = q^c + q^k - Q_2$ | Ноги движутся в противоходе, |
| здесь | $c_3 = -30$ | (длина полушага), |
| | $c_4 = 0$ | (носок опирается на поверхность), |
| | $Q_2 = \pi/6$ | (суммарный угол положений обоих бедер); |

3. Маховая нога в фазе шага:

- | | | |
|-------|--|---------------------------------------|
| а) | $e_6 = ky_{61} + y_{62} - b$ | Пятка движется по прямой линии |
| б) | $s_2 = \dot{y}_{71} = 4V_k$ | Носок перемещается на шаг |
| в) | $e_7 = -A \cos(\omega t)$ | Носок описывает дугу косинуса |
| здесь | $k = 0,25$ и $b = 3,75$; | (угол наклона и высота траектории) |
| | $A = 6$ | (высота подъема носка – варьируется); |
| | $\omega = \frac{2\pi}{T_u} = \frac{2\pi V_k}{L_u} = 2\pi/30$ | (частота одиночного шага), |

где $L_u = 30$ (длина шага).

Синтез управления

Процедура синтеза предусматривает получение модели движения в декартовых координатах, преобразование к задачно-ориентированным координатам, а затем синтез управлений, обеспечивающих решение задач (а) и (б).

Дифференцируя уравнения прямой кинематики (7б)–(7в) и подставляя (7а), получаем:

$$\dot{y}_i^T = \dot{y}_{i-1}^T + \dot{\alpha}_i z_i^T T(\alpha_i) E = \dot{y}_{i-1}^T + r_i^T \dot{q} \cdot z_i^T T(\alpha_i) E = \dot{y}_{i-1}^T + r_i^T B u \cdot z_i^T T(\alpha_i) E$$

т.е.

$$\dot{y}_i^T = \dot{y}_{i-1}^T + z_i^T T(\alpha_i) E r_i^T B u, \quad (9)$$

где $E = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$, или в компактной форме

$$\dot{y} = G_y(\alpha) B u, \quad (10)$$

где $G_y(\alpha) = \frac{\partial y}{\partial \alpha} \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial q} \cdot \dot{q}$.

Дифференцируя уравнение (8), получаем задачно-ориентированную модель робота

$$\begin{bmatrix} \dot{e} \\ \dot{s} \end{bmatrix} = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} G_y(\alpha) R + \frac{\partial \Phi}{\partial q} \right) B u \quad (11)$$

или

$$\begin{bmatrix} \dot{e} \\ \dot{s} \end{bmatrix} = G(q, \alpha, y) \tilde{u}, \quad (12)$$

где введены обозначения

$$G = \frac{\partial \Phi}{\partial y} G_y(\alpha) R + \frac{\partial \Phi}{\partial q}, \quad \tilde{u} = B u.$$

Следуя стандартной методике согласованного управления [2–5, 7], осуществим преобразование управления по формуле

$$G(q, \alpha, y) \tilde{u} = \begin{bmatrix} u_e \\ u_s \end{bmatrix} \quad (13)$$

и перепишем модель (12) в виде

$$\begin{bmatrix} \dot{e} \\ \dot{s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_e \\ u_s \end{bmatrix}, \quad (14)$$

где u_e – вектор управлений по отклонениям e , u_s – вектор управлений по перемещениям s . Выбирая

$$u_e = -K e, \quad (15a)$$

$$u_s = V^*, \quad (15b)$$

где $K = \text{diag}\{k_{ij}\}$, $k_i > 0$ – коэффициенты обратной связи, получаем

$$\dot{e} = -K e, \quad (16a)$$

$$\dot{s} = V^*, \quad (16b)$$

что обеспечивает минимизацию отклонений e и поддержание требуемых скоростей продольного движения V^* , т.е. решение задач (а) и (б).

Для нахождения вектора управляющих воздействий системы u воспользуемся выражениями (13) и (14) и получим:

$$\tilde{u} = G^{-1}(q, \alpha, y) \begin{bmatrix} u_e \\ u_s \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$u = B^{-1} \tilde{u}. \quad (18)$$

Структурная схема системы управления (см. рис. 5) состоит из объекта управления (уравнения (5)), блока получения (расчета или измерения) отклонений e_i (уравнение (8)), обратного преобразования управлений (выражения (17)–(18)), задатчика продольной скорости (16б) и регулятора отклонений (16а), образующего основные обратные связи системы.

Заметим, что содержание общей части системы остается неизменным для любых условий. Содержание же задачной части системы зависит от конкретных условий согласования Φ .

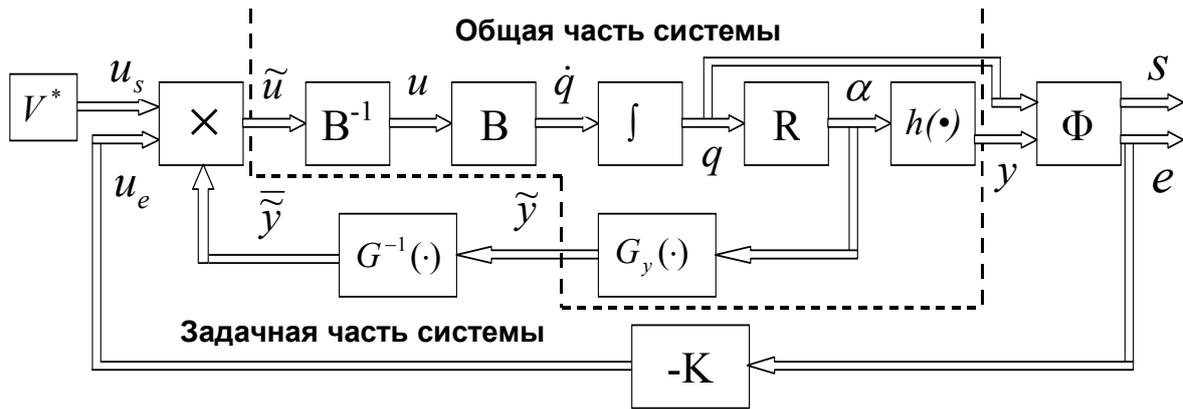


Рис. 5. Структурная схема системы управления двуногим роботом

Схема моделирования

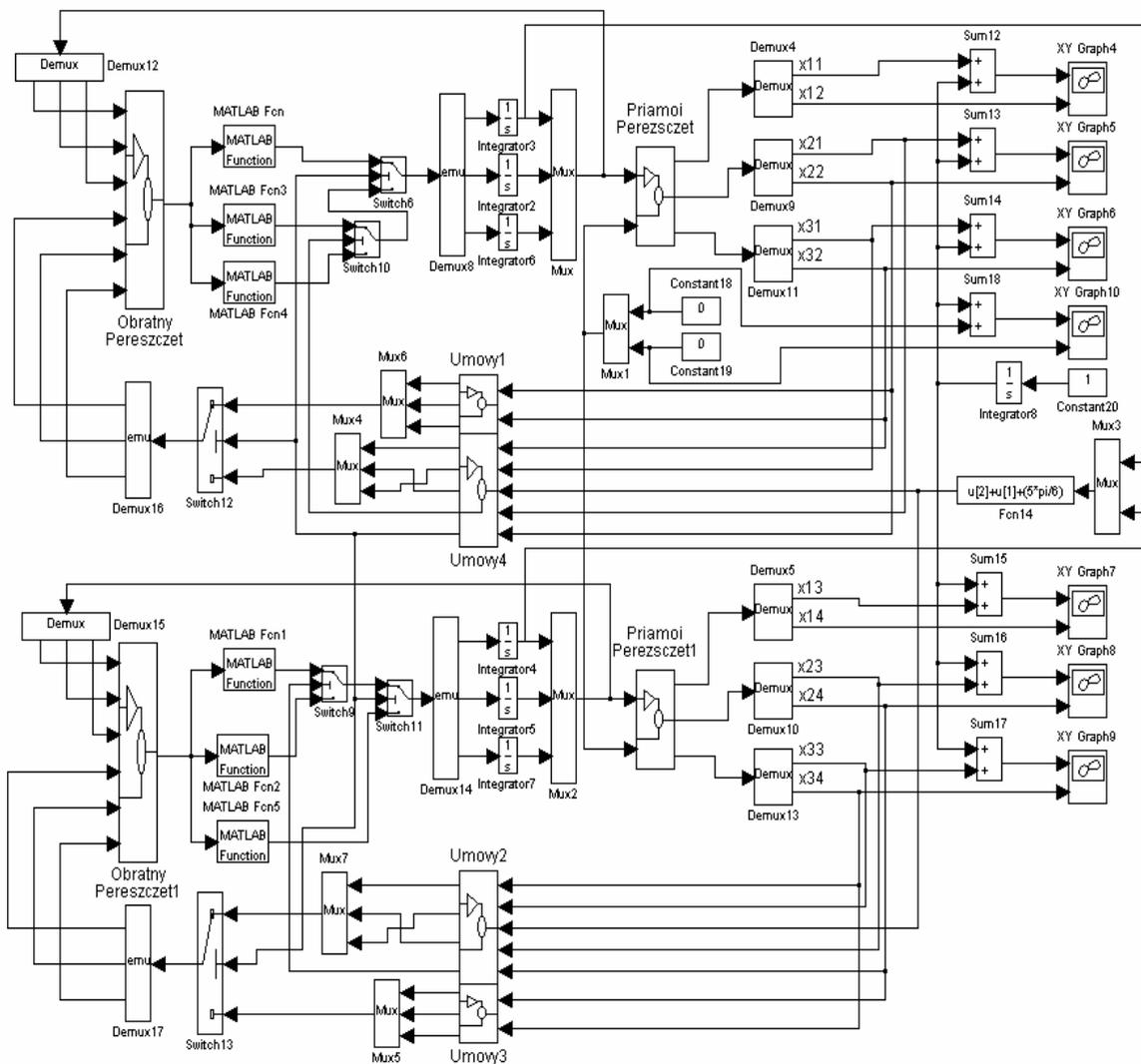


Рис. 6. Полная схема моделирования двуножного робота

Для проверки разработанного алгоритма было проведено моделирование на программном продукте MatLab 4.0 Simulink 1.2. Для удобства использования и перена-

стройки на различные алгоритмы модель построена с использованием блочного принципа (см. рис. 6). Кроме того, в ней четко прослеживается симметрия, обусловленная одинаковостью блоков, относящихся к правой и левой конечностям.

Циклограмма

Поведение точек сочленений механизма, полученное в результате моделирования в виде циклограммы сдвоенного шага (полный цикл ходьбы), представлено на рис. 7.

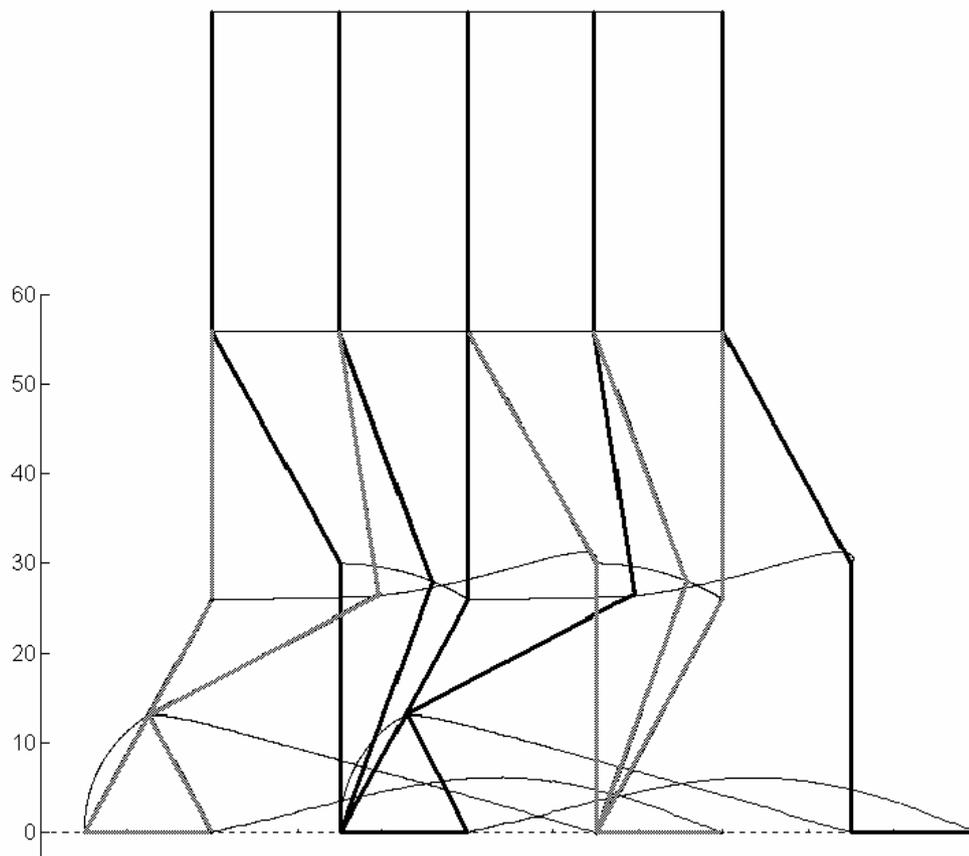


Рис. 7. Циклограмма движения робота (моделирование) построенная относительно неподвижной системы координат, связанной с опорной поверхностью

Полученная циклограмма полностью соответствует заданному алгоритму ходьбы. Шаги правой и левой ногами полностью идентичны. Соблюдается длина шага. Постоянна высота корпуса над поверхностью ходьбы (отсутствует вертикальное движение корпуса).

Траектории в разных координатах

При построении траекторий в собственной системе координат робота (см. рис. 8) основной задачей является обеспечение цикличности движения педипуляторов. Поскольку траектория получилась замкнутой и не имеющей отклонений даже в крупном масштабе (см. рис. 8б) в течение достаточно большого числа циклов с участием обеих конечностей, можно заключить, что цикличность алгоритма обеспечена.

Из рассмотрения траекторий узловых точек в неподвижной системе координат (см. рис. 9) можно получить длину шага, которая совпадает с требуемой на всем участке движения. Скорость горизонтального перемещения торса относительно земли постоянна, отсутствуют рывки и замедления.

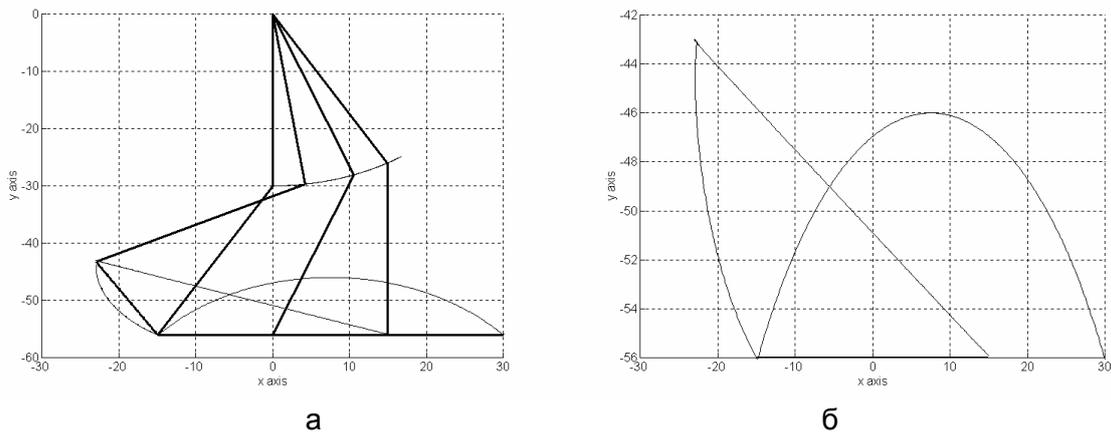


Рис. 8. Траектории движения точек сочленений в мелком (а) и крупном (б) масштабах, построенные относительно торса (подвижная система координат)

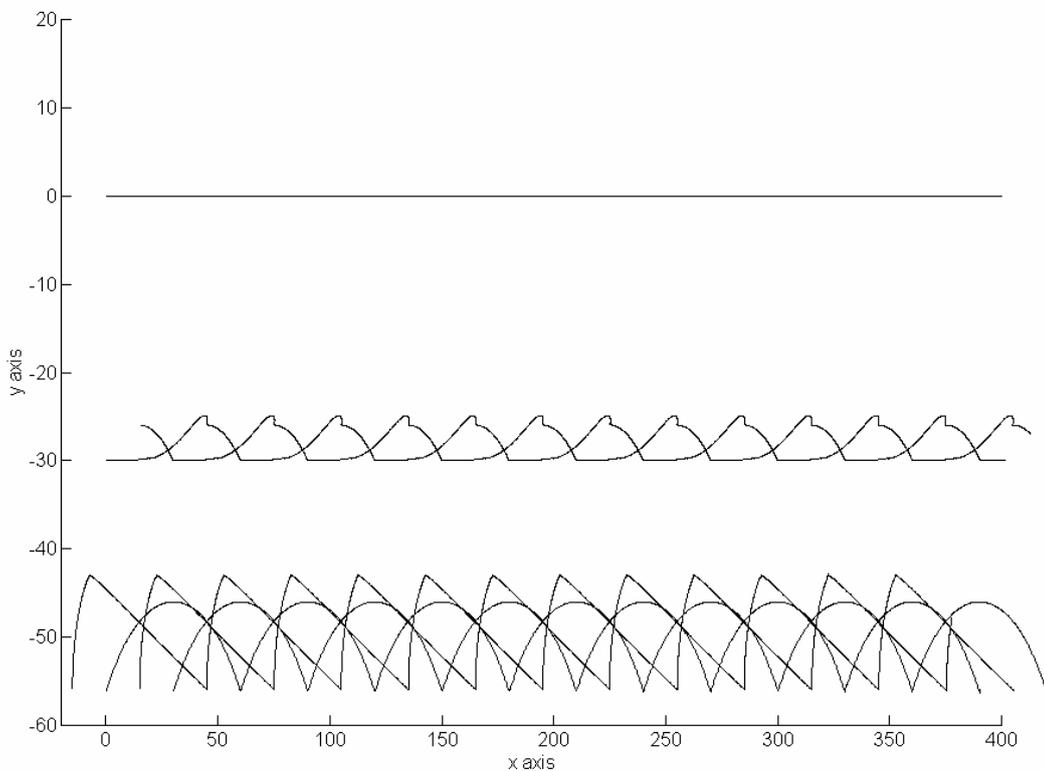


Рис. 9. Траектории точек сочленения звеньев, полученные относительно неподвижной поверхности ходьбы в течение нескольких шагов

Литература

1. Вукобратович М. Шагающие роботы и антропоморфные механизмы. М.: Мир, 1976.
2. Мирошник И.В. Согласованное управление многоканальными системами. Л.: Энергоатомиздат, 1990.
3. Мирошник И.В., Никифоров В.О. Методы координации в задачах планирования и управления пространственным движением манипуляционных роботов. СПб: Наука, 1998.
4. Мирошник И.В., Никифоров В.О. и Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб: Наука, 2000.

5. Мирошник И.В. Нелинейные системы. Анализ и управление. СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2002.
6. Механика промышленных роботов. Кн. 1. Е.И. Воробьев, О.Д. Егоров, С.А. Попов. Расчет и проектирование механизмов. М.: Высшая школа, 1988.
7. A. Albert. Intelligente Bahnplanung und Regelung für einen autonomen, zweibeinigen Roboter. // VDI-Fortschrittberichte, Reihe 8, Nr. 927, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2002.
8. T. Asfour, K. Berns, J. Schelling and R. Dillmann. Programming of manipulation tasks of the humanoid robot ARMAR. / IEEE Int. Conf. Advanced Robotics, Tokyo, Oct. 1999.
9. C. Canudas de Wit, B. Espiau, C. Urrea. Orbital Stabilisation of underactuated mechanical systems. / 15th triennial World Congress of IFAC, Barcelona, 2002.
10. C. Chevallereau, G. Abba, Y. Aoustin, F. Plestan, E. R. Westervelt, C. Canudas-de-Wit and J. W. Grizzle. RABBIT: A Testbed for Advanced Control Theory. // IEEE Control Systems Mag. 2003. V. 23. №5. P. 57–79.
11. Y. Fujimoto, A. Kawamura. Simulation of an Autonomous Biped Walking Robot Including Environmental Force Interaction. // IEEE Robotics & Automation Mag. 1998. V. 5. №2. P. 33–41.
12. A. Ijspeert, J. Nakanishi and S. Schaal. Movement imitation with nonlinear dynamical systems in humanoid robots. / IEEE ICRA, Washington, May 2002, pp. 1398–1403.
13. Kajita, S. and Tani, K., An analysis of experimentation of a biped robot Meltran II. / Proc. of 3rd International Workshop on Advanced Motion Control (UC Berkeley), P. 417–420, 1993.
14. S. Talebi, M. Buehler and E. Papadopoulos. Towards Dynamic Step Climbing For A Quadruped Robot with Compliant Legs.
15. www.ai.mit.edu/projects/cog
16. www.aist.go.jp/MEL/soshiki/robot/undo/kajita-e.html
17. www.chabin.laurent.free.fr
18. www.fzi.de/divisions/ipt/WMC/preface/walking_machines_katalog.html
19. www.havingasoftware.nl/robots/BiPed/BiPed.htm
20. www.honda.co.jp/home/hpr/e_news/robot/index.html
21. www.inrialpes.fr/bipop/principale.html
22. www.irt.uni-hannover.de
23. www.jsk.t.u-tokyo.ac.jp/research/saika/index.html
24. www.polycosmos.org/android/protoand.htm
25. www.scg.dees.unict.it/index.htm
26. www.shadow.org.uk/index.stm
27. www.shirai.info.waseda.ac.jp/humanoid
28. www.world.honda.com

ПРОБЛЕМА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИНВАРИАНТНОСТИ ВЫХОДА ДИСКРЕТНОЙ СИСТЕМЫ ОТНОСИТЕЛЬНО НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ЗАДАНИЯ МАТРИЦ МОДЕЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТА

О.В. Слита

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор А.В. Ушаков

В работе рассматриваются дискретные объекты управления с неопределенностями задания матриц модельного представления. Формулируются алгебраические условия параметрической инвариантности, предлагается алгоритм управления, позволяющий достигнуть инвариантность выхода проектируемой системы относительно модельных неопределенностей исходного объекта.

Введение

Рассматриваемые в работе дискретные объекты управления получены переходом от непрерывного времени к дискретному. Исходный номинальный объект содержит неопределенности задания матрицы состояния, и даже при фиксированном интервале дискретности эти неопределенности вызывают неопределенности в системных матрицах дискретного объекта. Таким образом, для дискретных объектов характерна ситуация, когда неопределенности содержатся и в матрице состояния, и в матрице управления. Предлагается применение буферной системы минимальной размерности, при использовании которой все неопределенности оказываются сконцентрированными в матрице состояния, и к объекту оказывается возможным применить алгоритм обобщенного модального управления, с помощью которого достигается параметрическая инвариантность выхода проектируемой системы относительно модельных неопределенностей.

1. Постановка задачи

Рассмотрим дискретный объект управления (ДОУ), под которым будем понимать функциональное объединение [1, 2] исходного непрерывного объекта управления (НОУ)

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad y(t) = Cx(t) \quad (1)$$

с управляющей ЭВМ (микропроцессором, микроконтроллером), математическое описание которого дается в дискретные моменты времени. Таким образом, ДОУ – это дискретное по времени представление НОУ, полученное переходом от непрерывного времени t к дискретному k , выраженному в числе интервалов дискретности длительности T , так что $t = kT$, при котором переменные $x(k)$ и $y(k)$ представляют собой выборки из непрерывных процессов $x(t)$ и $y(t)$ в моменты $t = kT$, а управление $u(k)$ на интервале дискретности фиксируется на уровне значения $u(kT)$. При такой концепции ДОУ его модельное представление

$$x(k+1) = A_d x(k) + B_d u(k), \quad y(k) = C_d x(k), \quad (2)$$

характеризуется матрицами A_d , B_d , C_d

$$A_d = e^{AT}, \quad B_d = (e^{AT} - I)A^{-1}B, \quad C_d = C, \quad (3)$$

если ввод управления $u(k)$ в объект происходит без задержки [1].

Для решения поставленной задачи формирования условий достижения параметрической инвариантности выхода системы к неопределенности матричных компонентов модельного представления ДОУ (2) сделаем допущение, что интервал дискретности T таков, что при представлении матричной экспоненты бесконечным матричным рядом

$$e^{AT} = \sum_{i=0}^k \frac{A^i T^i}{i!} \quad (4)$$

можно ограничиться первыми тремя членами, представив матричную экспоненту в форме

$$e^{AT} = I + AT + \frac{A^2 T^2}{2!}. \quad (5)$$

С учетом (5) матрицы (3) модели ДООУ (2) принимают вид

$$A_d = I + AT + \frac{A^2 T^2}{2!}, \quad B_d = T \left(I + \frac{AT}{2!} \right) B, \quad C_d = C. \quad (6)$$

Теперь сделаем предположение, что исходный НООУ характеризуется неопределенностью задания матричных компонентов его модели (1).

Вначале положим, что неопределенности сосредоточены только в матрице состояния, так что модель НООУ имеет представление

$$\dot{x}(t) = (A + \Delta A)x(t) + Bu(t), \quad (7)$$

что в силу (6) породит неопределенность матричных компонентов модели ДООУ (2) в форме

$$x(k+1) = (A_d + \Delta A_d)x(k) + (B_d + \Delta B_d)u(k), \quad y(k) = C_d x(k), \quad (8)$$

где

$$A_d + \Delta A_d = \left(I + AT + \frac{A^2 T^2}{2} \right) + \left(\Delta AT + A \Delta AT^2 + \frac{\Delta A^2 T^2}{2} \right), \quad (9)$$

$$B_d + \Delta B_d = T \left(I + \frac{AT}{2} \right) B + \frac{\Delta AT^2 B}{2!} \quad (10)$$

Если ЭВМ в составе устройства управления дискретным объектом осуществляет обмен информацией с объектом и датчиками, размещаемыми на нем, в асинхронном режиме, то интервал дискретности оказывается нефиксированным и равным $T + \Delta T$, в нем содержится неопределенность ΔT , и неопределенности модельного представления ДООУ принимают вид

$$\Delta A_d = A \Delta T + A^2 T \Delta T + \frac{A^2 \Delta T^2}{2} + \left(\Delta A(T + \Delta T) + A \Delta A(T + \Delta T)^2 + \frac{\Delta A^2 (T + \Delta T)^2}{2} \right),$$

$$\Delta B_d = B A T \Delta T + B \Delta T + \frac{B \Delta T^2 A}{2} + \frac{\Delta A(T + \Delta T)^2 B}{2}. \quad (11)$$

Если теперь допустить, что исходный непрерывный объект (1) содержит неопределенности как в матрице состояния, так и в матрице управления, так что он принимает вид

$$\dot{x}(t) = (A + \Delta A)x(t) + (B + \Delta B)u(t); \quad x(0); \quad y(t) = Cx(t), \quad (12)$$

при этом интервал дискретности также является неопределенным, то модельное представление (10) ДООУ характеризуется матричными неопределенностями ΔA_d , ΔB_d , первая из которых имеет вид (11), а вторая определяется соотношением

$$\Delta B_d = (B + \Delta B) A T \Delta T + (B + \Delta B) \Delta T + \frac{(B + \Delta B) \Delta T^2 A}{2} + \frac{\Delta A(T + \Delta T)^2 (B + \Delta B)}{2}. \quad (13)$$

Таким образом, при решении задачи параметрической инвариантности для случая ДООУ наиболее характерной является ситуация общего вида, когда неопределенность

модельного представления содержится как в матрице состояния, так и в матрице управления.

Как и в случае непрерывного объекта с неопределенностями и в матрице состояния, и в матрице управления, конструктивным способом сведения задачи с неопределенностями в двух матрицах к задаче с неопределенностью только в матрице состояния является введение буферной системы на входе дискретного объекта. В качестве буферной может быть принят элемент задержки на один интервал дискретности, характеризующийся нулевой матрицей состояния и единичными матрицами входа и выхода, в результате чего задача сводится к синтезу управления расширенным дискретным объектом с неопределенностью в матричных компонентах модельного представления, задаваемого в виде

$$\tilde{x}(k+1) = (\tilde{A}_D + \Delta\tilde{A}_D)\tilde{x}(k) + \tilde{B}_D\tilde{u}(k), \quad y(k) = \tilde{C}_D\tilde{x}(k), \quad (14)$$

где расширенный вектор $\tilde{x} = [x^T \quad x_b^T]^T$, $\tilde{A}_D + \Delta\tilde{A}_D = \begin{bmatrix} A_d + \Delta A_d & (B_d + \Delta B_d)C_b \\ 0 & A_b \end{bmatrix}$;

$$\tilde{A}_D = \begin{bmatrix} A_d & BC_b \\ 0 & A_b \end{bmatrix}; \quad \Delta\tilde{A}_D = \begin{bmatrix} \Delta A_d & \Delta B_d C_b \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \tilde{B}_D = \begin{bmatrix} 0 \\ B_b \end{bmatrix}; \quad \tilde{C}_D = [C_D \quad 0]; \quad A_b, B_b \text{ и } C_b -$$

матрицы состояния, входа и выхода буферной системы, соответственно.

Задача обеспечения абсолютной параметрической инвариантности выхода проектируемой дискретной системы с одновременным наделением ее желаемыми динамическими показателями в переходном и установившемся режимах решается с помощью закона управления

$$\tilde{u}(k) = \tilde{K}_{dg}g(k) - \tilde{K}_d\tilde{x}(k), \quad (15)$$

объединение которого с объектом (14) формирует дискретную систему

$$\tilde{x}(k+1) = \tilde{F}_d\tilde{x}(k) + \tilde{G}g(k) + \Delta A_d\tilde{x}(k); \quad y(k) = \tilde{C}_d\tilde{x}(k), \quad (16)$$

где матрицы \tilde{F}_d и \tilde{G} имеют вид

$$\tilde{F}_d = \tilde{A}_D - \tilde{B}_D\tilde{K}_d, \quad \tilde{G} = \tilde{B}_D\tilde{K}_{dg}. \quad (17)$$

Проблему параметрической инвариантности выхода системы $y(t)$, а, следовательно, и ошибки $e(t)$, т.е. инвариантности к неопределенности ΔA_d задания матрицы состояния исходного дискретного объекта, можно записать в расширенной форме

$$y(t, g(t), F, \Delta A_d \neq 0) = y(t, g(t), F, \Delta A_d \equiv 0). \quad (18)$$

Условие параметрической инвариантности, записанное в форме (18), будем именовать условием абсолютной параметрической инвариантности (АПИ).

Декомпозируем матрицу ΔA_d на минимальное число матричных компонентов, каждый из которых характеризуется единичным рангом, так что проведенная декомпозиция удовлетворяет соотношению

$$p = \arg \min_p \left\{ \Delta A_d = \sum_{j=1}^p \Delta A_j \ \& \ rank \Delta A_j = 1 \right\}. \quad (19)$$

С использованием выражения (19) член $\Delta A_d x(k)$ в (16) для случая матричной неопределенности общего вида можно представить в форме

$$\begin{aligned}
\Delta A_d x(k) = & \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta A_{11} & \Delta A_{12} & \dots & \Delta A_{1\tilde{n}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1(k) \\ \tilde{x}_2(k) \\ \vdots \\ \tilde{x}_{\tilde{n}}(k) \end{bmatrix} + \\
& + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta A_{21} & \Delta A_{22} & \dots & \Delta A_{2\tilde{n}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_{\tilde{n}}(k) \end{bmatrix} + \\
& + \dots + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta A_{\tilde{n}1} & \Delta A_{\tilde{n}2} & \dots & \Delta A_{\tilde{n}\tilde{n}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_{\tilde{n}}(k) \end{bmatrix}.
\end{aligned} \tag{20}$$

Представления цепочку соотношений (20) в компактной мультипликативной матрично-векторной форме. Для этого на левых сомножителях аддитивных векторно-матричных компонентов (20) построим матрицу D размерности $(\tilde{n} \times p)$ в форме

$$D = \text{row}\{D_j, j = 1, p\}, \tag{21}$$

где $D_j = \text{col}\{D_{ji} = \delta_{ji}, i = \overline{1, \tilde{n}}\}$, в которой δ_{ji} – символ Кронекера; и введем в рассмотрение p -мерный вектор параметрического воздействия $\zeta(k)$

$$\zeta(k) = \text{col}\{\zeta_j(k), j = 1, p\}, \tag{22}$$

где компоненты $\zeta_j(k)$ задаются соотношениями

$$\zeta_j(k) = \begin{bmatrix} \Delta A_{j1} & \Delta A_{j2} & \dots & \Delta A_{j\tilde{n}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_{\tilde{n}}(k) \end{bmatrix} = (\Delta A)^j x(k), \tag{23}$$

здесь $(\Delta A)^j$ – j -я строка матрицы ΔA . Следует заметить, что число p членов разложения в выражении (20) существенным образом зависит от базиса представления матрицы состояния объекта (16), в силу чего оно удовлетворяет неравенству $1 \leq p \leq \tilde{n}$, а если в (19) снять условие минимизации по p , то максимальное значение p может достигать величины \tilde{n}^2 . Объединение (22) и (23) позволяет представить матрично-векторный компонент $\Delta A_D x(k)$ в форме

$$\Delta A_d \tilde{x}(k) = \sum_{j=1}^p D_j \zeta_j(k) = D \zeta(k). \tag{24}$$

Использование (24) позволяет представить описание системы (16) в форме

$$\tilde{x}(k+1) = \tilde{F}_d \tilde{x}(k) + \tilde{G}g(k) + D\zeta(k); y(k) = \tilde{C}_d \tilde{x}(k), \tag{25}$$

не содержащей матричных неопределенностей, но характеризующейся дополнительным внешним «параметрическим» воздействием $\zeta(k)$, которое может осуществлять нежелательное управление выходом $y(k)$, а, следовательно, и ошибкой $e(k)$.

Форма модельного представления (25) системы (16) позволяет поставленную задачу обеспечения параметрической инвариантности сформулировать как задачу обеспечения сигнальной инвариантности, которая принимает вид

$$y(k, \tilde{F}_d, g(k), \zeta(k) \neq 0) = y(k, \tilde{F}_d, g(k), \zeta(k) \equiv 0). \quad (26)$$

В терминах Z -преобразований и передаточных функций (матриц) выражение (26) записывается как

$$Y(z, g(z), \zeta(z) \neq 0) = \Phi_{yg}(z)g(z) + \Phi_{y\zeta}(z)\zeta(z) = \Phi_{yg}(z)g(z), \quad (27)$$

где $g(s)$ – Z -преобразование задающего воздействия $g(t)$, $\zeta(s)$ – Z -преобразование «параметрического» воздействия $\zeta(t)$, $\Phi_{yg}(z)$ – передаточная функция (матрица) отношения «задающее воздействие – выход системы», $\Phi_{y\zeta}(z)$ – передаточная функция (матрица) отношения «параметрическое» воздействие – выход системы.

Очевидно, что равенство (27) при $\zeta(z) \neq 0$ выполняется, когда

$$\Phi_{y\zeta}(z) = 0. \quad (28)$$

Соотношение (28), по существу, представляет собой «сигнальный» аналог абсолютной инвариантности выхода (ошибки) к неопределенностям задания матрицы состояния исходного объекта, которое выполняется при любых реализациях внешнего задающего воздействия $g(k)$.

Выясним, какими алгебраическими свойствами должны обладать матричные компоненты модельного представления системы (25), при наличии которых выполняется соотношение (28). Для этих целей сформулируем следующее утверждение.

Утверждение 1. Чтобы система (21) обладала параметрической инвариантностью в смысле условия (26), достаточно, чтобы

- 1) столбцы D_j матрицы D были бы собственными векторами матрицы \tilde{F}_d ;
- 2) столбцы D_j принадлежали ядру матрицы \tilde{C}_d , т.е. чтобы выполнялось соотношение

$$\tilde{C}_d D_j = 0. \quad \square \quad (29)$$

Доказательство. Если D_j является собственным вектором матрицы \tilde{F}_d , соответствующим ее собственному значению λ_j , то становится [3] справедливой запись

$$\tilde{F}_d D_j = \lambda_j D_j. \quad (30)$$

Использование свойства матричной функции $f((*))$ от матрицы $(*)$ сохранять геометрический спектр собственных векторов исходной матрицы $(*)$ и иметь в качестве элементов алгебраического спектра собственных значений компоненты $f(\lambda_j)$ [3] делает справедливым соотношение

$$f(\tilde{F}_d) D_j = f(\lambda_j) D_j. \quad (31)$$

В решаемой задаче матричной функцией от матрицы \tilde{F}_d является резолвента $f(\tilde{F}_d) = (zI - \tilde{F}_d)^{-1}$, входящая мультипликативным компонентом в выражение для передаточной функции $\Phi_{y\zeta_j}(z)$, так что для нее можно записать

$$\Phi_{y\zeta_j}(z) = \tilde{C}_d (zI - \tilde{F}_d)^{-1} D_j = \tilde{C}_d (z - \lambda_j)^{-1} D_j = (z - \lambda_j)^{-1} \tilde{C}_d D_j. \quad (32)$$

Подстановка в соотношение (32) условия (29) приводит к выполнению соотношений (27), (28). ■

2. Синтез обобщенного модального управления

Рассмотрим вначале случай [4], когда матрица управления \tilde{B}_D является матрицей полного ранга ($rank \tilde{B} = \tilde{n}$, \tilde{n} – размерность вектора состояния $\tilde{x}(k)$ ДОУ). Тогда зада-

ча параметрической инвариантности может быть решена с помощью матрицы обратных связей \tilde{K} в форме $\tilde{K} = \tilde{B}_D^{-1}(\tilde{A}_D \tilde{M} - \tilde{M} \tilde{\Lambda}) \tilde{M}^{-1}$, где $\tilde{M} = \text{row}\{\xi_i, i = \overline{1, \tilde{n}}\}$, $\tilde{\Lambda} = \text{diag}\{\lambda_i, i = \overline{1, \tilde{n}}\}$. В этом случае задавая в качестве столбцов матрицы \tilde{M} столбцы матрицы \tilde{D} , можно обеспечить в системе желаемую структуру собственных векторов. Матрица \tilde{K} является решением системы уравнений Сильвестра

$$\tilde{M} \tilde{\Lambda} - \tilde{A}_d \tilde{M} = -\tilde{B}_d \tilde{H}, \quad (33)$$

$$\tilde{K} = \tilde{H} \tilde{M}^{-1}. \quad (34)$$

В случае, когда $\text{rank } \tilde{B} < \tilde{n}$, уравнение (33) распадается на 2 уравнения:

$$\tilde{D} \Lambda_D - \tilde{A}_d \tilde{D} = -\tilde{B}_d H_D, \quad (35)$$

$$\overline{M} \overline{\Lambda} - \tilde{A}_d \overline{M} = -\tilde{B}_d \overline{H}, \quad (36)$$

причем условием разрешимости уравнения (35) относительно матрицы H_D является выполнение включения [5] столбца \tilde{D}_j $(\lambda_j I - \tilde{A}_d) \tilde{D}_j \in \text{Im } \tilde{B}_d$. Уравнение (36) при заданной наблюдаемой паре $(\overline{\Lambda}, \overline{H})$ решается относительно матрицы \overline{M} . Матрица обратных связей \tilde{K} в этом случае находится как

$$\tilde{K} = [H_D \quad \overline{H}] [D \quad \overline{M}]^{-1}. \quad (37)$$

В соответствии со сказанным предложим алгоритм обобщенного модального управления, обеспечивающий абсолютную параметрическую инвариантность выхода проектируемой дискретной системы с одновременным наделением ее желаемыми динамическими показателями в переходном и установившемся режимах.

Алгоритм решения задачи обобщенного модального управления (ОМУ)

1. Сформировать желаемую структуру $\sigma\{\tilde{F}_d\} = \{\lambda_i; i = \overline{1, \tilde{n}}\}$ собственных значений матрицы F состояния системы (16), сформировать желаемую структуру $\{\xi_i : \tilde{F}_d \xi_i = \lambda_i \xi_i, i = \overline{1, \tilde{n}}\}$ собственных векторов той же матрицы.
2. Сформировать $(\tilde{A}_d, \tilde{B}_d, \tilde{C}_d)$ матричные компоненты объекта управления вида (14) с управляемой парой $(\tilde{A}_d, \tilde{B}_d)$ и наблюдаемой парой $(\tilde{A}_d, \tilde{C}_d)$.
3. Сформировать диагональную матрицу $\tilde{\Lambda} = \text{diag}\{\lambda_i; i = \overline{1, \tilde{n}}\}$ размерности $(\tilde{n} \times \tilde{n})$ состояния модальной модели, являющуюся носителем желаемой структуры мод матрицы состояния синтезируемой системы с тем, чтобы выполнением соотношения $\sigma\{\tilde{\Lambda}\} = \sigma\{\tilde{F}_d\} = \{\lambda_i; i = \overline{1, \tilde{n}}\}$ доставить проектируемой системе желаемые динамические свойства в переходном и установившемся режимах.
4. Сформировать матрицу \tilde{M} подобия матриц $\tilde{\Lambda}$ и \tilde{F}_D на спектре желаемых собственных векторов матрицы \tilde{F}_D в форме

$$\tilde{M} = \text{row}\{\tilde{M}_i = \xi_i, i = \overline{1, \tilde{n}}\}. \quad (38)$$

5. Решить матричное уравнение Сильвестра (33) или систему уравнений Сильвестра (35), (36) (в зависимости от величины ранга матрицы \tilde{B}_d) при заданных матрицах $\tilde{\Lambda}$, \tilde{A}_d , \tilde{B}_d и \tilde{M} относительно матрицы \tilde{H} в классе наблюдаемых пар матриц $(\tilde{\Lambda}, \tilde{H})$.
6. Вычислить матрицу \tilde{K} отрицательной обратной связи по вектору $\tilde{x}(k)$ состояния ОУ (14) с помощью соотношения (34), так чтобы она удовлетворяла требованию

$$\tilde{K}_d = \arg\{\pi R \pi_r \& y(g(k), \tilde{F}_d, \Delta \tilde{A}_d \neq 0) = y(g(k), \tilde{F}_d, \Delta \tilde{A}_d \equiv 0)\}, \quad (39)$$

где π, π_r – соответственно набор достигаемых динамических показателей и требуемых показателей, R – отношение порядка типа «больше-меньше».

7. Сформировать матрицу K_{dg} закона ОМУ в форме (15) с целью обеспечения требуемых свойств отношения вход-выход проектируемой системы, обязательным из которых является свойство равенства выхода $y(k)$ входу $g(k)$ в установившемся режиме при неподвижном состоянии системы с помощью соотношения

$$\tilde{K}_{dg} = \arg \left\{ \tilde{\Phi}(z) = \tilde{C}_d (zI - \tilde{F}_d)^{-1} \tilde{B}_d \tilde{K}_{dg}|_{z=1} = I \right\} = \left[\tilde{C}_d (I - \tilde{F}_d)^{-1} \tilde{B}_d \right]^{-1}. \quad (40)$$

8. Провести исследование динамических свойств системы вида (16), спроектированной методами обобщенного модального управления, средствами программной оболочки Matlab на предмет достижения требуемых динамических и алгебраических свойств.

Заключение

Для случая дискретного описания исходного непрерывного объекта с неопределенностями матричных компонентов модельного управления показано, что дискретное описание всегда содержит неопределенности как в матрице состояния, так и в матрице управления. Как следствие, для решения задачи обеспечения абсолютной параметрической инвариантности применительно к дискретным системам рекомендовано осуществление процедуры их расширения. Сформулированы алгебраические условия абсолютной параметрической инвариантности. Предложен алгоритм синтеза обобщенного модального управления дискретным объектом, доставляющий проектируемой системе желаемые динамические свойства в переходном и установившемся режимах с одновременным обеспечением параметрической инвариантности выхода относительно неопределенностей модельного представления исходного ДООУ.

Литература

1. Синтез дискретных регуляторов при помощи ЭВМ / В.В. Григорьев, В.Н. Дроздов, В.В. Лаврентьев, А.В. Ушаков. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983.
2. Изерман Р. Цифровые системы управления / Пер. с англ. М.: Мир, 1984.
3. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М.: Наука, 1991.
4. Ушаков А.В. Обобщенное модальное управление. // Изв. вузов. Приборостроение. 2000. Т.43. № 3. С. 8–16.
5. Слита О.В., Ушаков А.В. Алгебраические проблемы параметрической инвариантности: контроль принадлежности подпространств характеристической матрицы объекта образу его матрицы управления. // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2004. Выпуск 14. Информационные технологии, вычислительные и управляющие системы / Под ред. проф. В.Н. Васильева. С. 41–45.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СЛОЖНЫХ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ ПРИ СТОХАСТИЧЕСКИХ ЭКЗОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ С ПРИМЕНЕНИЕМ В ЗАДАЧАХ КОНТРОЛЯ ВЫРОЖДЕНИЯ

Н.А. Дударенко

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор А.В. Ушаков

В работе рассматриваются сложные дискретные динамические системы при стохастических экзогенных воздействиях, для которых решается задача контроля вырождения. Поставленная задача решается с помощью аппарата вещественнозначных передаточных матриц, сконструированных на основе решения матричного уравнения Сильвестра-Ляпунова, корреляционных матриц и матриц спектральной плотности. Для количественной оценки вырождения вводятся функционалы вырождения.

Введение

Теория и практика сложных динамических систем типа «многомерный вход – многомерный выход» (ММО-типа) встречается с технологическими трудностями формирования скалярных показателей качества их поведения, подобных тем, которые хорошо наработаны в теории и практике систем типа «одномерный вход – одномерный выход» (SISO-типа) [1]. Тем не менее, в последнее время разработки сложных систем ММО-типа получили конструктивный инструментарий, позволяющий решать эту задачу, но в оценочной форме, когда формируются минорантная и мажорантная скалярные оценки показателя качества, интересующего разработчика. Этот инструментарий строится на использовании сингулярного разложения [2, 3] критериальных матриц, в качестве которых в многомерном случае при стохастическом экзогенном воздействии выступают корреляционные матрицы и матрицы спектральных плотностей [4]. Более того, если дополнить набор этих показателей такой чисто матричной характеристикой, как число обусловленности, то у разработчика появится возможность на классе различных законов управления многомерными объектами, на классе структурных и параметрических реализаций при различных распределениях по входам системы компонентов экзогенного воздействия контролировать такое важное свойство сложных систем, как склонность их к вырождению.

В данной статье решается задача спектрального анализа сложных дискретных динамических систем (СДДС) при стохастических экзогенных воздействиях стационарных в широком смысле типа «белый» и «окрашенный» шумы на основе максимального и минимального компонентов алгебраического спектра сингулярных чисел корреляционной функции и матрицы спектральной плотности выхода СДДС. Предлагается инструментарий, позволяющий контролировать склонность СДДС к вырождению, для количественной оценки которого вводятся функционалы вырождения.

Полученные результаты иллюстрируются примерами.

Постановка задачи. Инструментарий контроля

Конструирование инструментария контроля вырождения матриц операторов «вход-выход» сложных дискретных систем будем осуществлять, опираясь на возможности сингулярного разложения матриц.

Пусть задана сложная многомерная дискретная динамическая система, реализующая некий линейный оператор с матрицей N^* .

Утверждение 1. Произвольная матрица N порождает линейную алгебраическую задачу (ЛАЗ) вида:

$$\eta(w) = N(w, \theta)\chi(w), \quad (1)$$

где $N(w, \theta) - n \times n$ – матрица для любых значений w, θ ; $\eta(w), \chi(w) - n$ -мерные векторы; w имеет смысл дискретного времени k , выраженного в числе интервалов дискретности длительности Δt , когда ЛАЗ (1) параметризована дискретным временем; $\theta - n$ -мерный параметр, изменяющий алгебраические свойства матрицы N . \square

Доказательство утверждения строится на сингулярном (SVD) разложении матрицы N [5]. \blacksquare

Геометрическая интерпретация исходной ЛАЗ (1) состоит в том, что единичная сфера в пространстве, натянутом на векторы χ , отображается в эллипсоид, положение полуосей которого определяется элементами левого сингулярного базиса, а размер полуосей совпадает с сингулярными числами матрицы N .

Будем рассматривать ЛАЗ как инструментальную модель контроля вырождения на спектре сингулярных чисел, порождаемых ими сепаратных чисел обусловленности или сепаратных функционалов вырождения.

Степень близости матрицы N к ее вырождению может быть оценена с помощью глобального числа обусловленности $C\{N\}$ этой матрицы [6], при этом решение задачи заметно обогатится, если помимо глобального числа обусловленности $C\{N\}$ контролируются ее сепаратные числа обусловленности $C_j\{N\}$, определяемые на спектре сингулярных чисел матрицы N с помощью соотношения

$$C\{N\} = \alpha_M\{N\}\alpha_m^{-1}\{N\}, C_j\{N\} = \alpha_M\{N\}\alpha_{j+1}^{-1}\{N\}, \quad (2)$$

где $\alpha_M\{N\} = \alpha_1\{N\}$, $\alpha_m\{N\} = \alpha_p\{N\}$, $\alpha_{j+1}\{N\}, j = \overline{0, p-1}$, – соответственно максимальное, минимальное и j -ое сингулярные числа матрицы N , вычисляемые в силу соотношения

$$\alpha_j = \left| \mu_j^{1/2} \right|; j = \overline{1, p}, \mu_j : \det(\mu I - N^T N) = 0. \quad (3)$$

Числа обусловленности для оценки вырождения позволяют сконструировать функционалы вырождения J_{D_j} , задаваемые соотношением

$$J_{D_j} = C_j^{-1}\{N\}. \quad (4)$$

По свойству чисел обусловленности [2, 3] функционал вырождения удовлетворяет неравенствам

$$0 \leq J_{D_j} = C_j^{-1}\{N\} \leq 1. \quad (5)$$

Таким образом, процесс вырождения ЛАЗ можно отслеживать по последовательному обнулению функционалов вырождения J_{D_j} , контроль граничных значений которых в пределах 0 и 1 заметно проще контроля граничных значений в пределах 1 и ∞ чисел обусловленности.

Поставим задачу конструирования критериальных матриц N операторов вырождения вход-выход сложных дискретных динамических систем при стохастических экзогенных воздействиях с последующим применением к ним разработанной схемы контроля вырождения.

Спектральный анализ сложных дискретных систем при стохастических, стационарных в широком смысле экзогенных воздействиях типа «белый» и «окрашенный» шумы

Предпринятое исследование сложных дискретных динамических систем выполним [4, 7] по схеме: формирование критериальной матрицы N в виде корреляционной

матрицы и матрицы спектральной плотности выхода системы, а затем их скаляризация с помощью аппарата сингулярного разложения с целью формирования минорантных и мажорантных оценок указанных матриц.

Рассмотрим многомерную систему вида

$$x(k+1) = \bar{F}x(k) + \bar{G}g(k), \quad x(0); \quad y(k) = \bar{C}x(k), \quad (6)$$

где x, g, y – векторы состояния, задающего воздействия и выхода, соответственно; $x \in R^n; g, y \in R^m; \bar{F}, \bar{G}, \bar{C}$ – матрицы состояния системы, входа и выхода дискретного объекта управления, согласованные по размерности с размерностью векторов x, g , и y так, что $\bar{F} \in R^{n \times n}; \bar{G}, \bar{C}^T \in R^{n \times m}; k$ – дискретное время, выраженное в числе интервалов дискретности длительностью Δt так, что непрерывное время t и дискретное k связаны соотношением $t = k(\Delta t)$.

Пусть $g(k) = w(k)$ – дискретный «белый» шум с матрицей интенсивности $Q = \text{diag} Q_{jj} : j = \overline{1, m}$ и дисперсией

$$M[w(k)w^T(k)] = V. \quad (7)$$

Дискретный «белый» шум $w(k)$, кроме (7), характеризуется следующими свойствами:

$$M[w(k)] = 0; \quad M[x(k)w^T(k)] = 0; \quad M[w(k)x^T(k)] = 0. \quad (8)$$

Сконструируем выражения для вычисления матриц дисперсии:

$$D_x^\Delta = M[x(k)x^T(k)], \quad D_y^\Delta = M[y(k)y^T(k)] = \bar{C}D_x\bar{C}^T. \quad (9)$$

Для поставленных целей введем в рассмотрение параметризованные дискретным временем матрицы дисперсии

$$D_x^\Delta = M[x(k)x^T(k)], \quad D_x(k+1)^\Delta = M[x(k+1)x^T(k+1)]. \quad (10)$$

С целью формирования $D_x(k+1)$ в форме (10) протранспонируем первое выражение в (6), записав его в форме

$$x^T(k+1) = x^T(k)\bar{F}^T + g^T(k)\bar{G}^T. \quad (11)$$

Подстановка (6) и (11) в (10) с учетом (7) и (8) дает

$$M[x(k+1)x^T(k+1)] = M[\bar{F}x(k)x^T(k)\bar{F}^T] + M[\bar{G}w(k)x^T(k)\bar{F}^T] + \\ + M[\bar{F}x(k)w^T(k)\bar{G}^T] + M[\bar{G}w(k)w^T(k)\bar{G}^T],$$

что можно записать как

$$D_x(k+1) = \bar{F}D_x(k)\bar{F}^T + \bar{G}V\bar{G}^T. \quad (12)$$

Осуществив в (12) предельный переход $k \rightarrow \infty$, для установившегося режима получим

$$D_x = \bar{F}D_x\bar{F}^T + \bar{G}V\bar{G}^T, \quad (13)$$

$$D_y = \bar{C}D_x\bar{C}^T. \quad (14)$$

Рассмотрим теперь случай, когда экзогенное воздействие $g(k)$ является дискретным «окрашенным» шумом $\xi(k)$ с матрицей интенсивности $Q = \text{diag} Q_{jj} : j = \overline{1, m}$ и дисперсией D_ξ , формируемым дискретным формирующим фильтром (ДФФ)

$$z(k+1) = \bar{F}_\phi z(k) + \bar{G}_\phi w(k); \quad \xi(k) = \bar{P}_\phi z(k). \quad (15)$$

Для сведения задачи к виду (13) введем в рассмотрение составной вектор

$$\tilde{x} = [x^T, z_\phi^T], \quad (16)$$

для которого оказывается справедливой запись

$$\tilde{x}(k+1) = \begin{bmatrix} x(k+1) \\ z_\phi(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{F}x(k) + \bar{G}\bar{P}_\phi z(k) \\ 0x(k) + \bar{G}_\phi z(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{G}_\phi \end{bmatrix} w(k) = \tilde{F}\tilde{x}(k) + \tilde{G}w(k), \quad (17)$$

$$x(k) = \tilde{C}_x \tilde{x}(k); \quad y(k) = \tilde{C}_y \tilde{x}(k); \quad \varepsilon(k) = \tilde{C}_\varepsilon \tilde{x}(k), \quad (18)$$

$$\text{где } \tilde{F} = \begin{bmatrix} \bar{F} & \bar{G}\bar{P}_\phi \\ 0 & \bar{G}_\phi \end{bmatrix}; \quad \tilde{G} = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{G}_\phi \end{bmatrix}; \quad \tilde{C}_x = [I_{n \times n} \quad 0_{n \times l}]; \quad \tilde{C}_y = [\bar{C} \quad 0]; \quad \tilde{C}_\varepsilon = [-\bar{C} \quad \bar{P}_\phi]. \quad (19)$$

Тогда для дисперсий

$$\begin{aligned} \tilde{D}_x(k) &= M[\tilde{x}(k)\tilde{x}^T(k)]; \quad D_x(k) = M[x(k)x^T(k)]; \\ D_y(k) &= M[y(k)y^T(k)]; \quad D_\varepsilon(k) = M[\varepsilon(k)\varepsilon^T(k)] \end{aligned} \quad (20)$$

становятся справедливыми матричные соотношения

$$\tilde{D}_x = \tilde{F}\tilde{D}_x\tilde{F}^T + \tilde{G}V\tilde{G}^T, \quad (21)$$

$$D_x = \tilde{C}_x\tilde{D}_x\tilde{C}_x^T; \quad D_y = \tilde{C}_y\tilde{D}_y\tilde{C}_y^T; \quad D_\varepsilon = \tilde{C}_\varepsilon\tilde{D}_\varepsilon\tilde{C}_\varepsilon^T. \quad (22)$$

Теперь сконструируем матрицы спектральных плотностей $S_x(\omega)$, $S_y(\omega)$ и $S_\varepsilon(\omega)$ дискретной системы (6), для чего введем в рассмотрение корреляционные матрицы

$$R_x(v) = M[x(k+v)x^T(k)] = \bar{F}^v D_x : v > 0; \quad (23)$$

$$R_x(v) = M[x(k-v)x^T(k)] = \bar{F}^{-v} D_x : v < 0; \quad (24)$$

$$R_y(v) = \bar{C}R_x\bar{C}^T = \bar{C}\bar{F}^v D_x \bar{C}^T : v > 0; \quad (25)$$

$$R_y(v) = \bar{C}R_x\bar{C}^T = \bar{C}\bar{F}^{-v} D_x \bar{C}^T : v < 0, \quad (26)$$

где v – дискретное время, такое что $v = k\Delta t$. Матрицы спектральных плотностей зададим соотношениями

$$S_x(\omega) = \sum_{v=-\infty}^{\infty} R_x(v)e^{-jv\omega\Delta t}; \quad S_y(\omega) = \sum_{v=-\infty}^{\infty} R_y(v)e^{-jv\omega\Delta t} = \bar{C}S_x(\omega)\bar{C}^T. \quad (27)$$

Тогда с учетом (23) и (24) для матрицы $S_x(\omega)$ спектральной плотности процессов по состоянию можно записать

$$\begin{aligned} S_x(\omega) &= \sum_{v=-\infty}^0 \bar{F}^{-v} D_x e^{-jv\omega\Delta t} + \sum_{v=0}^{\infty} \bar{F}^v D_x e^{-jv\omega\Delta t} = \\ &= \sum_{v=-\infty}^0 (\bar{F}^{-1} e^{-j\omega\Delta t})^v D_x + \sum_{v=0}^{\infty} (\bar{F} e^{-j\omega\Delta t})^v D_x = \sum_{v=-\infty}^0 (\bar{F} e^{j\omega\Delta t})^{-v} D_x + \sum_{v=0}^{\infty} (\bar{F} e^{-j\omega\Delta t})^v D_x. \end{aligned} \quad (28)$$

Для суммы членов геометрической прогрессии получим

$$\sum_{v=-\infty}^0 (\bar{F} e^{j\omega\Delta t})^{-v} = +\dots + (\bar{F} e^{j\omega\Delta t})^3 + (\bar{F} e^{j\omega\Delta t})^2 + \bar{F} e^{j\omega\Delta t} + I = (I - \bar{F} e^{j\omega\Delta t})^{-1}, \quad (29)$$

$$\sum_{v=0}^{\infty} (\bar{F} e^{-j\omega\Delta t})^v = I + \dots + \bar{F} e^{-j\omega\Delta t} + (\bar{F} e^{-j\omega\Delta t})^2 + (\bar{F} e^{-j\omega\Delta t})^3 + \dots = (I - \bar{F} e^{-j\omega\Delta t})^{-1}. \quad (30)$$

Подстановка (29) и (30) в (28) дает

$$\begin{aligned} S_x(\omega) &= \left\{ (I - \bar{F} e^{j\omega\Delta t})^{-1} + (I - \bar{F} e^{-j\omega\Delta t})^{-1} \right\} D_x = \\ &= \left\{ (I - \bar{F} \cos \omega\Delta t) - j\bar{F} \sin \omega\Delta t \right\}^{-1} + \left\{ (I - \bar{F} \cos \omega\Delta t) + j\bar{F} \sin \omega\Delta t \right\}^{-1} \Big\} D_x. \end{aligned} \quad (31)$$

Запишем единичную матрицу в форме

$$I = [(I - \bar{F} \cos \omega\Delta t) - j\bar{F} \sin \omega\Delta t][(I - \bar{F} \cos \omega\Delta t) + j\bar{F} \sin \omega\Delta t] \times$$

$$\begin{aligned} & \times \left\{ [(I - \bar{F} \cos \omega \Delta t) - j\bar{F} \sin \omega \Delta t][(I - \bar{F} \cos \omega \Delta t) + j\bar{F} \sin \omega \Delta t] \right\}^{-1} = \\ & = [(I - \bar{F} \cos \omega \Delta t) - j\bar{F} \sin \omega \Delta t][(I - \bar{F} \cos \omega \Delta t) + j\bar{F} \sin \omega \Delta t] \left\{ I - 2\bar{F} \cos \omega \Delta t + \bar{F}^2 \right\}^{-1}. \end{aligned} \quad (32)$$

Подстановка (32) в (28) дает

$$S_x(\omega) = 2(I - \bar{F} \cos \omega \Delta t)(I - 2\bar{F} \cos \omega \Delta t + \bar{F}^2)^{-1} D_x, \quad (33)$$

$$S_y(\omega) = \bar{C} S_x(\omega) \bar{C}^T = 2\bar{C}(I - \bar{F} \cos \omega \Delta t)(I - 2\bar{F} \cos \omega \Delta t + \bar{F}^2)^{-1} D_x \bar{C}^T. \quad (34)$$

В выражениях для спектральных плотностей S_x и S_y в формах (33) и (34), соответственно, для ω действует неравенство

$$-\frac{\pi}{\Delta t} \leq \omega \leq \frac{\pi}{\Delta t}. \quad (35)$$

Скаляризация векторных процессов с помощью аппарата сингулярного разложения критериальных матриц. Формирование мажорантных и минорантных скалярных оценок

Для скаляризации стохастических векторных процессов на основе критериальных матриц (корреляционной матрицы $R_y(v)$ и матрицы спектральной плотности $S_y(\omega)$) применим к указанным матрицам процедуру сингулярного разложения, тогда максимальные и минимальные сингулярные числа этих матриц и будут определять мажоранту и миноранту требуемого пользовательского показателя.

Так, для случая корреляционной матричной функции $\tilde{R}_y(v)$ вектора выхода, принадлежащего пространству R^m , выполняются оценочные неравенства

$$\alpha_m \{R_y(v)\} \leq \alpha_i \{\tilde{R}_y(v)\} \leq \alpha_M \{R_y(v)\}. \quad (36)$$

Соответственно для случая спектральной плотности $\tilde{S}_y(\omega)$ стохастических процессов, наблюдаемых в произвольном одномерном подпространстве пространства выхода, выполняются оценочные неравенства вида

$$\alpha_m \{S_y(\omega)\} \leq \alpha_i \{\tilde{S}_y(\omega)\} \leq \alpha_M \{S_y(\omega)\}. \quad (37)$$

В связи со сказанным спектральные и корреляционные свойства ММО-системы полностью определяют левые и правые элементы приведенных оценочных неравенств.

Поканально полученные корреляционные матрицы и матрицы спектральных плотностей по схемам (23)–(26) и (33), (34), соответственно, позволяют сформировать каналные скалярные версии корреляционной функции и функции спектральных плотностей, если в (23)–(26) и (33), (34) иметь в виду не полную матрицу выхода, а матрицу-строку, формирующую данную компоненту выхода. Следует также сказать, что решение задачи контроля вырождения с помощью функционалов вырождения $J_{D_j} \{N\}$ осуществляется путем фиксации превышения их значениями некоторого допустимого уровня $J_{D_j_don} \{N\}$. Линейная алгебраическая задача вида (1) становится близкой к вырожденной, если $J_{D_j} \{N\}$ не превышает $J_{D_j_don} \{N\} = 0.001 \div 0.002$.

Контроль вырождения сложных дискретных динамических систем на основе вычисления сепаратных частотных чисел обусловленности $C_j \{N\}$ и функционалов вырождения $J_{D_j} \{N\}$ критериальной матрицы N отношения вход-выход может быть произведен в соответствии со следующим алгоритмом.

1. Задать векторно-матричное описание сложной дискретной динамической системы в форме (6) и зафиксировать ее параметры.
2. Задать допустимый уровень сепаратных частотных функционалов вырождения $J_{D_j_don} \{N\}$ матрицы N отношения вход-выход исследуемой системы.
3. Для случая стохастического воздействия типа «белый» шум установить значения интенсивностей Q_{jj} для каждого входа системы; для стохастического воздействия типа «окрашенный» шум задать эффективные полосы пропускания формирующих фильтров, а, следовательно, вектор распределения γ эффективных полос формирующих фильтров по входам системы.
4. Решить уравнение типа уравнения Ляпунова для стохастического воздействия типа «белый» и «окрашенный» шумы в формах (13) или (21), соответственно.
5. Вычислить значения сепаратных функционалов вырождения $J_{D_j} \{N\}$.
6. Сравнить результат п. 5 со значениями п. 2. В случае его выполнения – переход к п. 7, в противном случае – к п. 3.
7. Зафиксировать результаты в виде вектора γ эффективных полос формирующих фильтров по входам СДДС, при которых возникает опасность в смысле функционала вырождения данного индекса.
8. Полученные результаты передать системному аналитику на предмет интерпретации и принятия системных решений.

Пример

Проиллюстрируем предложенную процедуру построения мажорант и минорант скалярных оценок корреляционной матрицы и матрицы спектральной плотности выхода для случая сложных дискретных динамических систем ММО-типа на примере.

Пусть задана сложная дискретная динамическая система вида

$$x(k+1) = \bar{F}x(k) + \bar{G}g(k), \quad x(0); \quad y(k) = \bar{C}x(k),$$

где

$$\bar{F} = \begin{bmatrix} 0.9988 & 0.0988 & 0.0044 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.0349 & 0.9639 & 0.0813 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.6504 & -0.6853 & 0.6387 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.9736 & 0.0905 & 0.0033 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.7089 & 0.7373 & 0.0511 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -11.0378 & -4.3882 & 0.1241 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.6347 & 0.0480 & 0.0012 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -7.1128 & -0.1556 & 0.0041 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -24.0655 & -9.7868 & -0.3041 \end{bmatrix},$$

$$\bar{G} = \begin{bmatrix} 0.0012 & 0 & 0 \\ 0.0349 & 0 & 0 \\ 0.6504 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0264 & 0 \\ 0 & 0.7089 & 0 \\ 0 & 11.0378 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3653 \\ 0 & 0 & 7.1128 \\ 0 & 0 & 24.0655 \end{bmatrix}, \quad \bar{C}^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Из приведенных матриц видно, что исследуемая дискретная система имеет три входа и три выхода, каждый сепаратный канал имеет третий порядок, межканальные связи отсутствуют. Дискретное время k , выраженное в числе интервалов дискретности длительности Δt , выберем равным 0.1с.

Рассмотрим предложенную технологию для фиксированных параметров системы.

1) На примере внешнего стохастического воздействия $g(k) = w(k)$ типа «белый» шум с канальными интенсивностями $Q_j = \gamma_j Q_0, j = \overline{1,3}$, где $Q_0 = 1$ ($\cdot^2 \cdot c$) и $\gamma^T = [1 \ 1 \ 1]$. Мажоранты и миноранты, а также поканальные характеристики функции корреляции $R_y(v)$ и спектральной плотности $S_y(\omega)$ дискретной системы по выходу приведены на рис. 1 (а–д) и рис. 2 (а–д), соответственно.

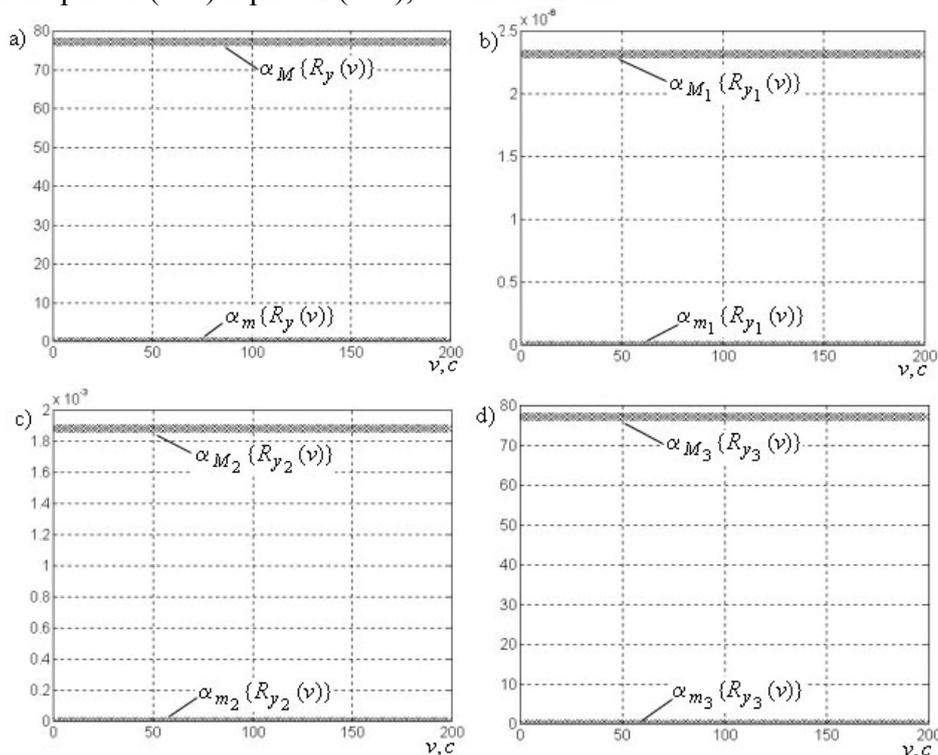


Рис. 1. Мажоранта, миноранта и поканальные характеристики корреляционной функции по выходу для дискретной системы при стохастическом воздействии типа «белый» шум

На рис 1 (а) и рис. 2 (а) $\alpha_m \{R_y(v)\}$, $\alpha_M \{R_y(v)\}$ и $\alpha_m \{S_y(\omega)\}$, $\alpha_M \{S_y(\omega)\}$ – миноранта и мажоранта функций корреляции и спектральной плотности по выходу для исходной системы; на рис. 1 (b, c, d) и рис. 2 (b, c, d) $\alpha_{m_1} \{R_{y_1}(v)\}$, $\alpha_{M_1} \{R_{y_1}(v)\}$ и $\alpha_{m_1} \{S_{y_1}(\omega)\}$, $\alpha_{M_1} \{S_{y_1}(\omega)\}$; $\alpha_{m_2} \{R_{y_2}(v)\}$, $\alpha_{M_2} \{R_{y_2}(v)\}$ и $\alpha_{m_2} \{S_{y_2}(\omega)\}$, $\alpha_{M_2} \{S_{y_2}(\omega)\}$; $\alpha_{m_3} \{R_{y_3}(v)\}$, $\alpha_{M_3} \{R_{y_3}(v)\}$ и $\alpha_{m_3} \{S_{y_3}(\omega)\}$, $\alpha_{M_3} \{S_{y_3}(\omega)\}$ – миноранта и мажоранта функций корреляции и спектральной плотности по выходу первого, второго и третьего каналов исходной системы, соответственно.

2) На примере внешнего стохастического воздействия $g(k) = \xi(k)$ типа «окрашенный» шум интенсивности $Q_j = 1, j = \overline{1,3}$, с частотой формирующего фильтра $\Omega_{\phi_j} = \gamma_j \Omega_{\phi_0}$, где $\Omega_{\phi_0} = 1$ и $\gamma^T = [1 \ 1 \ 1]$. Мажоранты и миноранты, а также поканальные характеристики функции корреляции $R_y(v)$ и спектральной плотности $S_y(\omega)$ дискретной системы по выходу приведены на рис. 3 (а–д) и рис. 4 (а–д), соответственно.

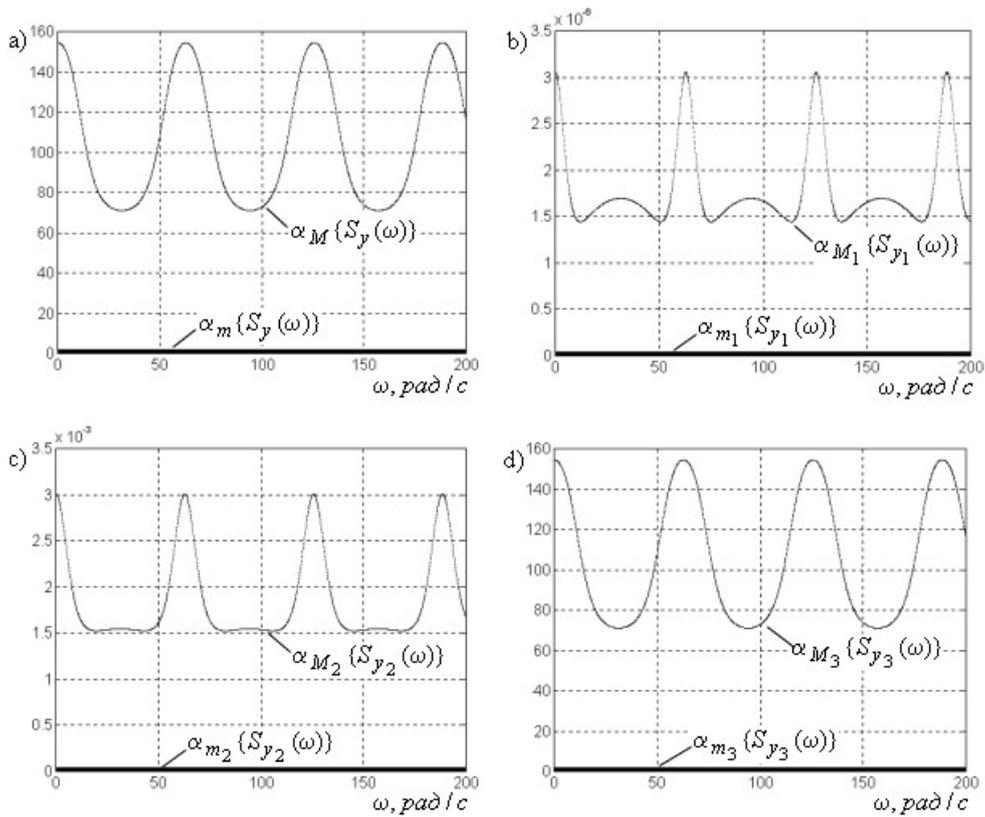


Рис. 2. Мажоранта, миноранта и поканальные характеристики спектральной плотности выхода для дискретной системы при стохастическом воздействии типа «белый» шум

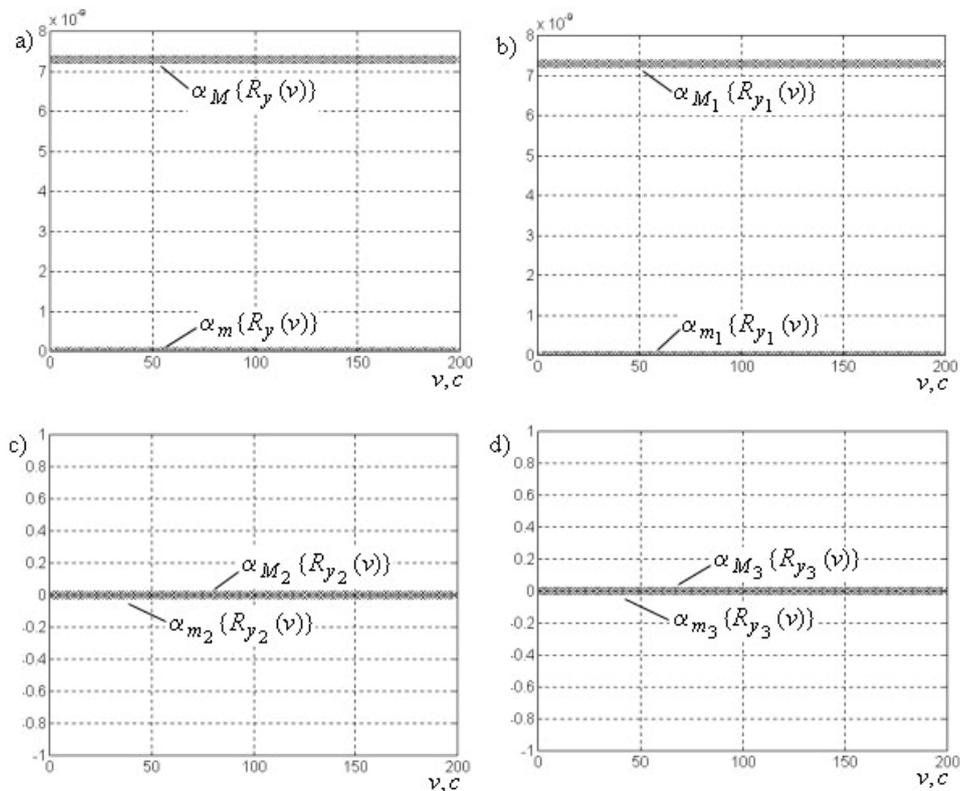


Рис. 3. Мажоранта, миноранта и поканальные характеристики корреляционной функции по выходу для дискретной системы при стохастическом воздействии типа «окрашенный» шум

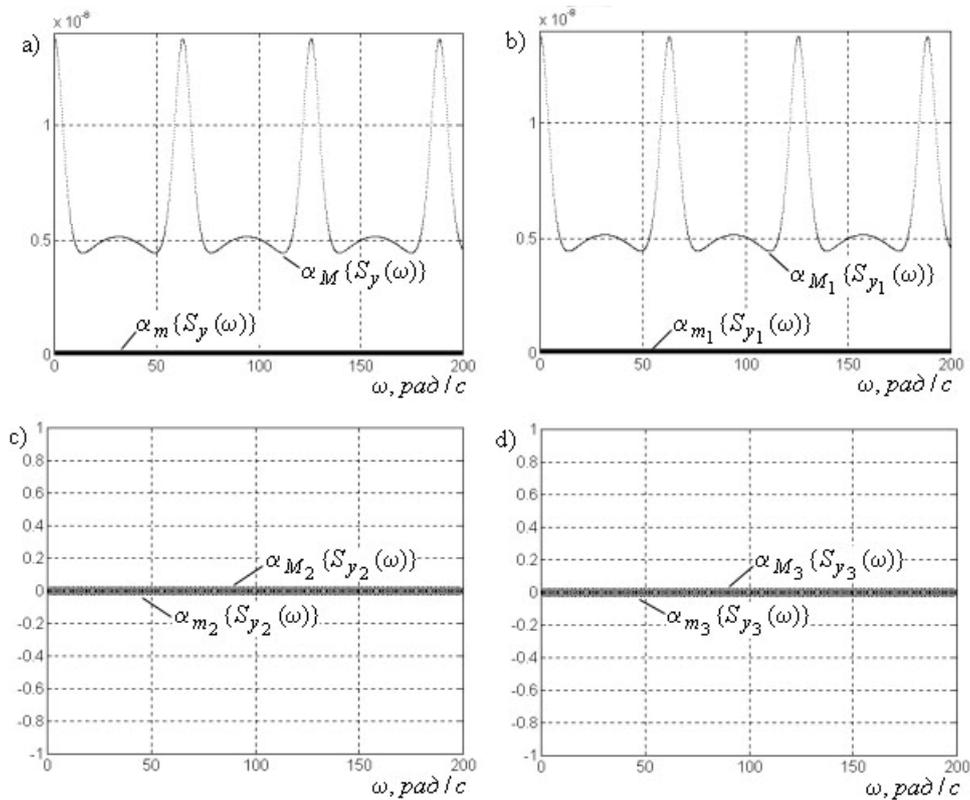


Рис. 4. Мажоранта, миноранта и поканальные характеристики спектральной плотности выхода для дискретной системы при стохастическом воздействии типа «окрашенный шум»

На рис 3 (а) и рис. 4 (а) $\alpha_m \{R_y(v)\}$, $\alpha_M \{R_y(v)\}$ и $\alpha_m \{S_y(\omega)\}$, $\alpha_M \{S_y(\omega)\}$ – миноранта и мажоранта функций корреляции и спектральной плотности по выходу для исходной системы; на рис. 3 (b, c, d) и рис. 4 (b, c, d) $\alpha_{m_1} \{R_{y_1}(v)\}$, $\alpha_{M_1} \{R_{y_1}(v)\}$ и $\alpha_{m_1} \{S_{y_1}(\omega)\}$, $\alpha_{M_1} \{S_{y_1}(\omega)\}$; $\alpha_{m_2} \{R_{y_2}(v)\}$, $\alpha_{M_2} \{R_{y_2}(v)\}$ и $\alpha_{m_2} \{S_{y_2}(\omega)\}$, $\alpha_{M_2} \{S_{y_2}(\omega)\}$; $\alpha_{m_3} \{R_{y_3}(v)\}$, $\alpha_{M_3} \{R_{y_3}(v)\}$ и $\alpha_{m_3} \{S_{y_3}(\omega)\}$, $\alpha_{M_3} \{S_{y_3}(\omega)\}$ – миноранта и мажоранта функций корреляции и спектральной плотности по выходу первого, второго и третьего каналов исходной системы, соответственно.

Заключение

Скаляризация векторных процессов, наблюдаемых в пространстве выхода сложных дискретных динамических систем при стохастических экзогенных воздействиях, с использованием алгебраического спектра сингулярной матрицы и матрицы спектральной плотности сводит решение задачи спектрального и корреляционного анализа к случаю систем SISO-типа в минорантной и мажорантной постановках. Степень различия минорант и мажорант позволяет разработчику контролировать удачность процесса проектирования, так как она позволяет сформировать интегральную оценку робастности системы в смысле отношения вход-выход.

Литература

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. СПб: Профессия, 2003.

2. Воеводин В.В., Кузнецов Ю.А. Матрицы и вычисления. М.: Наука, 1984.
3. Голуб Дж., Ван Лоун Ч. Матричные вычисления. / Пер. с англ. М.: Мир, 1999.
4. Дударенко Н.А., Ушаков А.В. Спектральный анализ сложных непрерывных систем при стохастических экзогенных воздействиях. / Проблемы машиноведения и машиностроения. Межвуз. сб. СПб: СЗТУ, 2005. Вып.34.
5. Акунов Т.А., Алишеров С., Оморов Р.О., Ушаков А.В. Матричные уравнения в задачах управления и наблюдения непрерывными объектами. Бишкек: Илим, 1991.
6. Дударенко Н.А., Ушаков А.В. Технология контроля вырождения сложных динамических систем с помощью частотных сепаратных чисел обусловленности. // Современные технологии: Сборник статей / Под ред. С.А. Козлова. СПб: СПбГУ ИТМО, 2003. 298 с.
7. Квакуернаак Х., Сиван Р., Линейные оптимальные системы управления. / Пер. с англ. М.: Мир, 1997.

АНАЛИЗ ЦИФРОВОГО ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕПРЕРЫВНЫМ ОБЪЕКТОМ ПРИ НАЛИЧИИ ПОМЕХ В КАНАЛЬНОЙ СРЕДЕ МЕТОДАМИ ТЕОРИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

О.С. Осипцева

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор А.В. Ушаков

В работе рассматривается задача синтеза цифрового дистанционного управления непрерывным объектом управления в протоколе PPP. Когда в формате помехозащищенного кода число проверочных разрядов не превышает число информационных, то задача оценки влияния фактора наличия помех в КС решается с использованием аппарата теории чувствительности.

Введение. Постановка задачи

Пространственное разнесение на значительное расстояние контролируемого пункта (КП), на котором размещается непрерывный объект управления (НОУ), и пункта управления (ПУ), на котором размещаются технические средства оперативного («on line») управления порождают необходимость дистанционного управления НОУ с использованием двоичной канальной среды.

В этой связи рассматривается задача синтеза цифрового дистанционного управления непрерывным объектом управления в протоколе PPP (point to point protocol) [2] использования предоставленной двоичной канальной среды в условиях наличия в последней помех, приводящих к необходимости для обеспечения достоверности передачи информации включения средств помехозащитного кодирования [2, 7]. Задача решается для случая модели помеховой обстановки в канале связи со стационарными вероятностными характеристиками, что позволяет использовать помехозащищенные коды при фиксированном передаваемом информационном массиве со стационарным форматом [7], не приводящим к необходимости использования интервальных модельных представлений [4].

Задача решается в три этапа. На первом этапе при заданных аппаратных средствах в виде АЦП, ЦАП, рабочих регистров хранения и сдвиговых регистров, информативным показателем которых является число разрядов n_p , предоставленном телемеханическом канале связи (ТМКС), основным информативным показателем которого является пропускная способность (скорость передачи) [2, 7], а также размерности n_{oy} модельного представления управляемого НОУ формируется априорная экспресс-оценка достижимости требуемых показателей динамических свойств системы дистанционного цифрового управления в переходном и установившемся режимах. При этом задача решается в предположении отсутствия помех в прямом и обратном каналах связи (КС) с использованием дискретной модели агрегированного объекта, включающей в себя $2n_p$ тактов процесса преобразования кодов типа «параллельный–последовательный» и наоборот в прямом канале связи (ПКС), собственно управляемый объект, а также аналогичный процесс в $2n_p$ тактов в обратном канале связи (ОКС). При решении поставленной задачи используется минимальное по размерности дискретное представление агрегированного объекта, при котором за интервал дискретности принимается величина $\Delta t_a = 2n_p \Delta t$, где Δt – длительность элементарного сигнала (бита) кода. В этом случае размерность n_a агрегированного дискретного ОУ (АДОУ) минимальной размерности становится равной величине $n_a = n_{oy} + 2$.

На втором этапе решается задача синтеза закона цифрового [1, 6] дистанционного [8] управления непрерывным объектом на основе агрегированного дискретного модельного представления НОУ, погруженного в канальную среду минимальной размерности. Показывается, что технически реализуемой оказывается версия динамического

цифрового дистанционного управления, имеющего в своем составе динамическое наблюдающее устройство (ДНУ), так как даже при полной измеримости вектора состояния АДОУ передача «векторного» сигнала по скалярному двоичному каналу связи является алгоритмической и технической проблемой. Алгоритмическое обеспечение процедуры синтеза динамического цифрового дистанционного управления строится на использовании возможностей дискретного модального управления, построенного на концепции подобию [4, 5].

На третьем этапе решения задачи синтеза закона цифрового дистанционного управления непрерывным объектом при наличии помех в канальной среде фактор наличия помех рассматривается как источник появления в формате кода проверочных разрядов, число которых определяется вероятностными характеристиками помеховой обстановки в КС, требованиями к достоверности передаваемой информации. Если в формате помехозащищенного кода число проверочных разрядов превышает число информационных, то в этом случае задача оценки влияния помех на динамические показатели процессов цифрового дистанционного управления НОУ в переходном и установившемся режимах может решаться модификацией модельного представления АДОУ без изменения его размерности, вызываемой увеличением длительности Δt_a интервала дискретности агрегированного дискретного объекта управления. Вторым способом решения задачи является сведение цифровой системы к эквивалентной непрерывной, что в рамках модального управления, опирающегося на канонические локализации [3, 5] собственных значений, с последующей оценкой влияния чистого запаздывания на качество процессов, определяемого числом проверочных разрядов, длительностью Δt элементарного сигнала кода (бита) и назначенного характеристической частотой выбранного распределения собственных значений, не составляет труда.

Обнаруживается, что, если в формате помехозащищенного кода число проверочных разрядов не превышает число информационных, то в этом случае задача оценки влияния фактора наличия помех в КС может быть решена с использованием аппарата теории чувствительности [4] к вариации длительности Δt_a интервала дискретности агрегированного дискретного объекта управления. Разработка высказанного тезиса является основным результатом предлагаемой статьи.

Построение дискретной модели агрегированного объекта для случая канала связи без помех с агрегированным интервалом дискретности в классе минимальных модельных представлений

Построение агрегированного дискретного объекта управления в классе минимальных модельных представлений в задаче синтеза цифрового дистанционного управления непрерывным объектом с учетом фактора канальной среды без помех основано на факте функционального последовательного соединения трех дискретных подсистем (см. структурную схему системы – рис. 1). Первой дискретной подсистемой является прямой КС, модельно представляющий собой элемент задержки (ЭЗ) на агрегированный интервал дискретности $\Delta t_a = 2n_p \Delta t$, второй подсистемой является дискретная модель непрерывного ОУ, третья подсистема – это ЭЗ на агрегированный интервал дискретности Δt_a , модельно представляющий обратный КС.

Построение дискретной модели агрегированного объекта для случая канала связи без помех с агрегированным интервалом дискретности осуществим в силу следующего алгоритма.

Алгоритм 1.(А1)

1. Априорно оценить разрядности n_p аппаратных средств кодового преобразования и длительность элементарного сигнала (бита) кода в форме $\Delta t = c^{-1}$, где c – скорость передачи кодовых посылок, осуществляемых предоставляемым телемеханическим протоколом (ТМП).

2. Сформировать агрегированный интервал дискретности Δt_a для случая двоичного канала связи (ДКС) без помех в силу соотношения $t_a=2(\Delta t) n_p$.
3. Сформировать векторно-матричное модельное представление (ВММП) непрерывного объекта управления (НОУ)

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu_{OY}(t); x(0); y(t) = Cx(t), \quad (1)$$

где x, u_{OY}, y – соответственно векторы состояния, управления и выхода объекта, $x \in R^n, u_{OY} \in R^r, y \in R^m$; A, B, C – соответственно матрицы состояния, управления и выхода, согласованные по размерности с векторами x, u, y .

4. Сформировать векторно-матричное дискретное представление НОУ (1) в форме

$$x(k+1) = \bar{A}x(k) + \bar{B}u_{OY}(k); x(0); y(k) = \bar{C}x(k), \quad (2)$$

где k – дискретное время, выраженное в числе интервалов дискретности, длительностью Δt_a , так, что непрерывное время t и дискретное k связаны соотношением $t = (\Delta t_a) \cdot k$; матрицы $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}$ вычисляются в силу соотношений:

$$\bar{A} = \exp(A \cdot \Delta t_a); \bar{B} = A^{-1} \cdot (\bar{A} - I) \cdot B; \bar{C} = C. \quad (3)$$

5. Построить модельное представление прямого и обратного каналов связи, осуществляющих задержку дискретного сигнала на один интервал дискретности длительности Δt_a , в форме

$$x_{ПК}(k+1) = A_{ПК}x_{ПК}(k) + B_{ПК}u_{ПК}(k); x(0); y_{ПК}(k) = C_{ПК}x_{ПК}(k), \quad (4)$$

$$u_{OY}(k) = y_{ПК}(k), \quad (5)$$

$$x_{OK}(k+1) = A_{OK}x_{OK}(k) + B_{OK}u_{OK}(k); x(0); y_{OK}(k) = C_{OK}x_{OK}(k); y(k) = u_{OK}(k), \quad (6)$$

где $x_{ПК}, u_{ПК}, y_{ПК}, x_{OK}, u_{OK}, y_{OK}$ – соответственно векторы состояния, управления и выхода в прямом и обратном каналах единичной размерности;

$x_{ПК} \in G^n, u_{ПК} \in G^r, y_{ПК} \in G^m, x_{OK} \in G^n, u_{OK} \in G^r, y_{OK} \in G^m; A_{ПК} = A_{OK} = [0];$

$B_{ПК} = B_{OK} = [1]; C_{ПК} = C_{OK} = [1]$

6. Сформировать агрегированный дискретный объект управления (АДОУ), составленный из последовательного соединения прямого канала связи, дискретного объекта управления (ДОУ) и обратного канала связи с вектором состояния $x_a = [x_{OK}^T; x_{ДОУ}^T; x_{ПК}^T]^T$ размерности $n_a=n+2$, вектором регулируемого выхода y , вектором измеряемого выхода y_u , представляющим собой выход ОКС, и матрицами $(A_A, B_A, C_A, \hat{C}_A)$.

$$x_A(k+1) = [x_{OK}(k+1); x(k+1); x_{ПК}(k+1)]^{-1}, \quad (7)$$

$$x_A(k+1) = A_A x_A(k) + B_A u_{ПК}(k); x(0); y(k) = C_A x_A(k); \hat{y}(k) = \hat{C}_A x(k), \quad (8)$$

где

$$A_A = \left[\begin{array}{ccc|c} A_{OK} & B_{OK} \bar{C} & 0 & \\ 0 & \bar{A} & \bar{B} C_{ПК} & \\ 0 & 0 & A_{ПК} & \end{array} \right]_{A_{ПК}=0; A_{OK}=0; C_{ПК}=I} = \left[\begin{array}{ccc} 0 & \bar{C} & 0 \\ 0 & \bar{A} & \bar{B} \\ 0 & 0 & 0 \end{array} \right]; \quad (9)$$

$$B_A = \left[\begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ B_{ПК} \end{array} \right]_{B_{ПК}=I} = \left[\begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 1 \end{array} \right]; C_A = [0 \quad C \quad 0]; \hat{C}_A = [1 \quad 0 \quad 0]; \quad (10)$$

$$A_{ПК} = A_{OK} = 0; C_{ПК} = B_{OK} = I. \quad \blacksquare \quad (11)$$

Синтез цифрового дистанционного управления АДОУ для случая канала связи без помех

Синтез цифрового дистанционного управления агрегированным дискретным ОУ для случая канала связи без помех приведем в классе цифровых модальных управлений в силу следующего алгоритма.

Алгоритм 2(А2)

1. Сформировать требования к показателям качества системы цифрового дистанционного управления в переходном и установившемся режимах ее функционирования.
2. Сформировать априорную оценку $t_{ап}$ длительности переходного процесса $t_{п}$ для случая системы дистанционного цифрового управления с регулятором без наблюдателя в форме $t_{ап}=(\Delta t_a)n_a$ и для случая регулятора с наблюдателем полной размерности n_a в форме $t_{ап}=2(\Delta t_a)n_a$.
3. Проверить выполнение условия $t_{пт} \leq t_{ап}$, где $t_{пт}$ – требуемая по техническому заданию длительность переходного процесса, при этом в случае выполнения неравенства – переход к п. 4 алгоритма, иначе осуществление действий:

- переход к п. 1 с целью согласования технического задания на предмет снижения требований к величине $t_{пт}$;
- смена ТМ-протокола на ТМП с большей скоростью передачи.

4. Сформировать закон управления в виде комбинации обратной связи по состоянию x_A с матрицей \bar{K} и прямой связи по задающему воздействию $g(k)$ матрицей \bar{K}_g

$$u_{ПК}(k) = \bar{K}_g g(k) - \bar{K}x(k). \quad (12)$$

5. Выбрать непрерывную динамическую модальную модель (ММ) в форме пары матриц (Γ_A, H_A) желаемого поведения «вход-выход» проектируемой системы. Γ_A – матрица состояния ММ – является носителем желаемой структуры собственных значений размерностью $n_a \times n_a$, $\dim H_A = \dim B_A^T$; (Γ_A, H_A) – наблюдаемая пара матриц.

6. Сконструировать дискретную версию модальной модели с парой матриц $(\bar{\Gamma}_A, \bar{H}_A)$, где матрица $\bar{\Gamma}_A$ вычисляется с помощью соотношения $\bar{\Gamma}_A = \exp(\Gamma_A \cdot \Delta t_a)$, а матрица \bar{H}_A вычисляется на основе пары матричных уравнений Сильвестра для непрерывного и дискретного случаев:

$$M_A \Gamma_A - A_A M_A = -B_A H_A \quad (13)$$

относительно матрицы M_A .

$$\bar{M}_A \bar{\Gamma}_A - \bar{A}_A \bar{M}_A = -\bar{B}_A \bar{H}_A \quad (14)$$

при известной матрице $\bar{M}_A = M_A$ относительно матрицы \bar{H}_A .

7. Сформировать матрицу \bar{K}_g прямых связей по задающему воздействию из условия равенства регулируемого выхода и задающего воздействия в неподвижном состоянии

$$\bar{K}_g = \arg\{ \bar{C}_A (zI - \bar{F}_A)^{-1} \cdot \bar{B}_A \bar{K}_g \Big|_{z=1} = I \} = [\bar{C}_A (I - \bar{F}_A)^{-1} \cdot \bar{B}_A]^{-1}, \quad (15)$$

а также матрицу \bar{K} обратных связей по состоянию АДОУ с помощью соотношения

$$\bar{K} = \bar{H}M^{-1}. \quad (16)$$

8. Построить цифровой закон управления, использующий сигнал ошибки $\varepsilon(k) = g(k) - y(k)$ по выходу

$$u_{ПК}(k) = \bar{K}_g g(k) - \bar{K}x(k) = \bar{K}_g g(k) - \bar{K}_y y(k) - \bar{K}_x x(k) \Big|_{\bar{K}_g = \bar{K}_y = \bar{K}_g} = \bar{K}_\varepsilon \varepsilon(k) - \bar{K}_x x(k). \quad (17)$$

9. Сформировать динамическое наблюдающее устройство вектора состояния $x_A(k)$ объекта (2) в форме

$$x_e(k+1) = \bar{F}_e x_e(k) + \bar{L}_e \hat{y}(k) + \bar{B}_e u(k), \quad (18)$$

где матрицы динамического наблюдающего устройства выбираются из условия

$$\bar{F}_e = \arg\{\sigma\{\bar{F}_e\} \prec \sigma\{\bar{F}_A\} \& \sigma\{\bar{A}_A\} \cap \sigma\{\bar{F}_e\} = 0\}, \quad (19)$$

$$\bar{L}_e = \arg\{\text{contr}(\bar{F}_e, \bar{L}_e)\}, \quad (20)$$

$$\bar{B}_e = \bar{T}_e \bar{B}_A, \quad (21)$$

где \prec – знак мажоризации, означающий в данной задаче, что моды матрицы состояния наблюдателя локализованы на комплексной плоскости в круге меньшего радиуса, чем радиус круга локализации мод матрицы состояния системы.

10. Вычислить матрицу \bar{T}_e подобия вектора наблюдения $x_e(k)$ вектору состояния $x_A(k)$, задаваемому в форме

$$x_e(k) = \bar{T}_e x_A(k) - \bar{\Theta}_e(k), \quad (22)$$

в силу решения матричного уравнения Сильвестра

$$\bar{T}_e \bar{A}_A - \bar{F}_e \bar{T}_e = \bar{L}_e \bar{C}_e, \quad (23)$$

которое, совместно с (21), обеспечивает асимптотическую сходимость к нулю вектора невязки наблюдения $\bar{\Theta}_e(k)$:

$$\bar{\Theta}_e(k+1) = \bar{F}_e \bar{\Theta}_e(k); \quad \bar{\Theta}_e(0) = \bar{T}_e x(0) - x_e(0), \quad (24)$$

$$\bar{\Theta}_e(k) = (\bar{F}_e)^k \bar{\Theta}_e(0). \quad (25)$$

11. Сформировать динамическую версию закона управления (17)

$$u_{ПК}(k) = \bar{K}_e \varepsilon(k) - \bar{N} \hat{y}(k) - \bar{D} x_e(k). \quad (26)$$

12. Проверить работоспособность просинтезированного цифрового дистанционного устройства управления и оценить его динамические свойства в модельной среде MatLab.

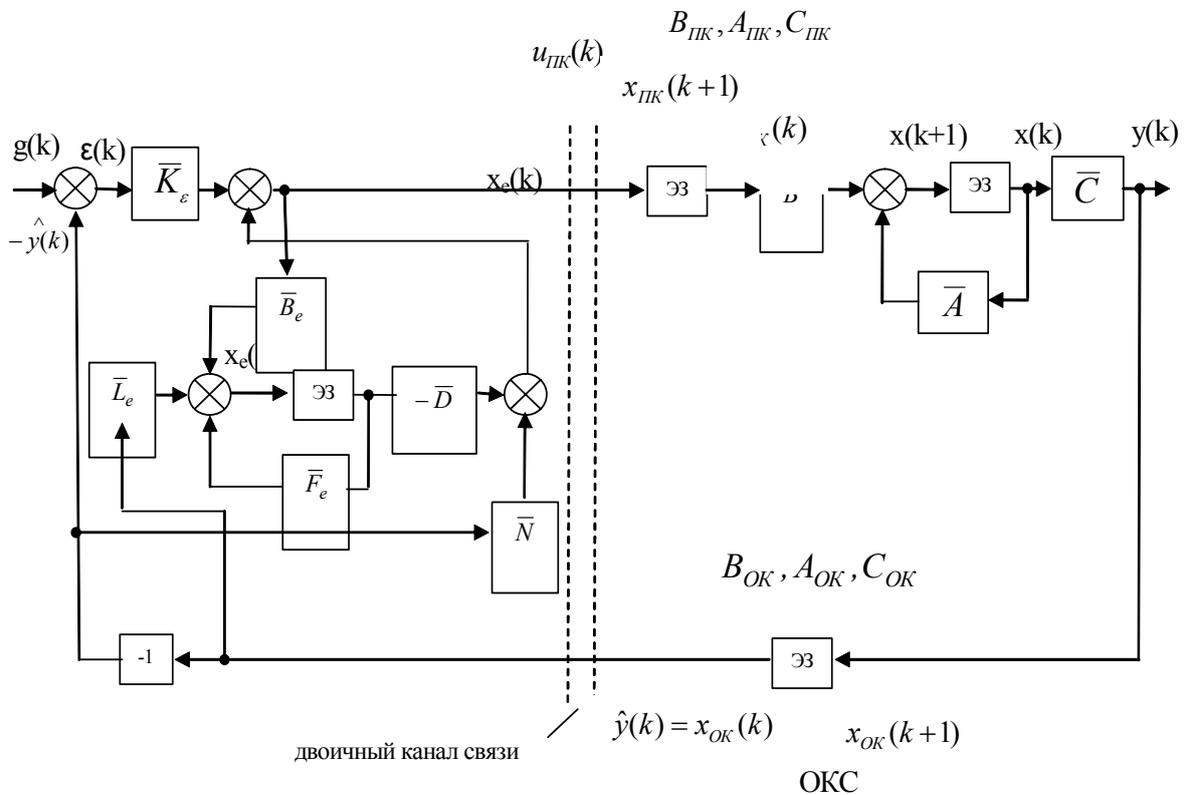


Рис. 1. Схема цифровой системы дистанционного управления с агрегированным интервалом дискретности

Синтез закона цифрового дистанционного управления непрерывным объектом при наличии помех в канальной среде

Алгоритм 3(А3)

1. Сформировать модель помеховой среды двоичного КС в форме вероятности искажения элементарного сигнала кода (бита) и осуществить его симметрирование [7] в форме

$$p = \max\{p_{01}, p_{10}\}. \quad (27)$$

2. В соответствии с категорией проектируемой системы цифрового дистанционного управления задать допустимую вероятность ошибочного приема $P_{\text{дон}}$.

3. Оценить кратность s исправляемой ошибки [7] на основе выполнения условия

$$s = \arg\{P_{\text{дон}} \geq P_{\text{ош}} = \sum_{i=s+1}^n C_n^i p^i (1-p)^{n-i}\}. \quad (28)$$

4. Оценить число m проверочных разрядов помехозащищенного кода, исправляющего ошибки кратности s , из условия

$$m = \arg\{N_c = 2^m - 1 \geq N_{\text{ош}} = \sum_{i=1}^s C_{n_p+m}^i\}. \quad (29)$$

5. Сформировать (n, k) -канонический формат [7] помехозащищенного кода (ПЗК), в котором $k = n_p$ – число информационных разрядов ПЗК, $n = k + m$ – полное число разрядов кода.

6. Если $m \leq k$, то влияние фактора избыточных разрядов на динамические свойства системы цифрового дистанционного управления оценить с помощью методов теории чувствительности [4].

7. Если $m \geq k$, то модифицировать длительность агрегированного интервала дискретности в силу соотношения $\Delta t_a = 2n\Delta t$, в соответствии с алгоритмом А1 модифицировать АДОУ и осуществить синтез закона цифрового дистанционного управления с помощью алгоритма А2.

Основной результат. Анализ цифрового дистанционного управления непрерывным объектом при наличии помех в канальной среде методами теории чувствительности

Современный аппарат теории чувствительности [4] предоставляет исследователю большие возможности для анализа влияния вариаций параметров системных компонентов на качество проектируемой системы. В проблемно-ориентированном виде наиболее адекватным задачам дистанционного управления является аппарат функций траекторной чувствительности [4], который позволяет выделить дополнительные движения по состоянию и выходу, порождаемые вариацией параметров относительно их номинальных значений. В решаемой проблеме эта вариация представляет собой вариацию агрегированного интервала дискретности. Результаты обладают хорошими интерпретационными свойствами, если варьируемый параметр задается в безразмерной форме. В этой связи в соотношении (3) для агрегированного интервала дискретности Δt_a следует положить его зависимость от безразмерного параметра q в форме

$$\Delta t_a(q) = \Delta t_a \cdot (1 + q); \quad q = q_0 + \Delta q|_{q_0=0} = \Delta q. \quad (30)$$

Содержательно $q = \Delta q$ в формуле (30) несет информацию о процентном изменении длительности агрегированного интервала дискретности Δt_a за счет введения в формат кода m проверочных разрядов в силу соотношения

$$\Delta q = m/k = m/n_p. \quad (31)$$

$$s = 1$$

$k = n_p$	4	8	12	16
m	3	4	5	5
Δq	0,75	0,5	0,42	0,3125

Таблица 1

В соответствии с аппаратом траекторной чувствительности [4] для дополнительного движения по выходу можно записать

$$\Delta y(k, q_0, \Delta q) = \eta(k) \cdot \Delta q, \quad (32)$$

где $\eta(k)$ – функция траекторной чувствительности системы цифрового дистанционного управления по выходу $y(k)$, при этом полное движение в системе цифрового дистанционного управления определится выражением

$$y(k, q = q_0 + \Delta q) = y(k, q_0) + \Delta y(k, q_0, \Delta q) = y(k) + \eta(k)\Delta q. \quad (33)$$

Технология формирования функций траекторной чувствительности по выходу и состоянию опирается на модели траекторной чувствительности, которая представлена в работе [4].

Литература

1. Изерман Р. Цифровые системы управления. / Пер. с англ. М.: Мир, 1984.
2. Ирвин Дж., Харль Д. Передача данных в сетях: инженерный подход. / Пер. с англ. СПб: БХВ–Питер, 2003.
3. Квакернаак Х., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления. / Пер. с англ. М.: Мир, 1977.
4. Никифоров В.О., Ушаков А.В. Управление в условиях неопределенности: чувствительность, адаптация, робастность. СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2002.
5. Синтез дискретных регуляторов при помощи ЭВМ. / В.В. Григорьев, В.Н. Дроздов, В.В. Лаврентьев, А.В. Ушаков. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983.
6. Ту Ю. Современная теория управления. / Пер. с англ. М.: Машиностроение, 1971.
7. Тугевич В.Н. Телемеханика. М.: Высшая школа, 1985.
8. Olga S. Osiptseva, The Influence of delay in binary channel on the quality of remote digital control in PP-protocol. / Preprints of 10th International Student Olympiad on Automatic Control (Baltic Olympiad), St.-Petersburg, Russia, 2004, SPb: SPSUITMO, 2004.

ВЛИЯНИЕ ЛЮФТА И СУХОГО ТРЕНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ МЕХАТРОННОГО ПРИВОДА (АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ)

Ч.К. Нгуен

(Санкт-Петербургский государственный морской технический университет)

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент В.Н. Шамберов

(Санкт-Петербургский государственный морской технический университет)

В работе предлагается математическая модель мехатронного привода, в которой учтены такие естественные нелинейности, как люфт и сухое трение. Модель исследуется методом точечных отображений на предмет выяснения причин и механизма возникновения в системе автоколебательных режимов.

Введение

За сравнительно короткий период существования мехатронные приводы, объединяющие в себе силовые качества механики с постоянно расширяющимися возможностями микроэлектроники, стали изделиями современных технологий. Высокое отношение выходной мощности к весу дает таким системам ощутимое преимущество, когда требуется точное управление движением при ограничениях на допустимые размеры и вес. По своей сути мехатронный привод представляет собой замкнутую автоматическую систему. Как правило, большинство таких систем являются существенно нелинейными из-за естественных нелинейностей, присущих механическим элементам их управляющих устройств.

Стремление в максимальной степени повысить точность и быстродействие привода часто приводит к тому, что нелинейности начинают оказывать решающее влияние на динамику и могут стать причиной возникновения нежелательного поведения технического объекта (возникновение автоколебательных режимов), вплоть до потери свойств устойчивости и создания аварийной ситуации.

Наиболее «вредными» с точки зрения их влияния на устойчивость автоматических систем являются такие нелинейности, как люфт и сухое трение.

Для успешного изучения нелинейных явлений, связанных с потерей устойчивости, необходима правильная математическая модель изучаемого явления, поскольку эффективность теоретического исследования во многом зависит от имеющейся в наличии содержательной математической модели физического явления, правильно отражающей его суть.

Целью данной работы является построение содержательной математической модели автоматической системы с люфтом и сухим трением и исследование ее пространства состояний (фазового пространства) на предмет выяснения причин и механизма возникновения в системе автоколебательных режимов.

Математическая модель объекта исследования

В качестве математической модели замкнутой автоматической системы с сухим трением и люфтом принято следующее описание:

$$x + g_1 \dot{x} = -d_1 n - d_2 n'; \quad n = n(n_-, n'); \quad n' = n'(n'_-, x), \quad (1)$$

где x, \dot{x}, n', n – переменные; g_1, d_1, d_2 – положительные вещественные коэффициенты; $n = n(n_-, n')$, $n' = n'(n'_-, x)$ – существенные нелинейности, характеризующие учет в

модели сухого трения и люфта, соответственно, при этом n_- , n'_- – предыстория состояния нелинейностей; $\bullet \equiv d/dt$; t – время.

Существенные нелинейности, характеризующие учет в модели люфта и сухого трения имеют следующее аналитическое описание:

$$n' = \begin{cases} n'_-, & \text{если } |x - n'| \leq \varepsilon; \\ x - \varepsilon, & \text{если } x > n'_- + \varepsilon; \\ x + \varepsilon, & \text{если } x < n'_- - \varepsilon; \end{cases} \quad n = \begin{cases} 0, & \text{если } |n'| \leq h_1, \text{ или если } h_1 < |n'| < h \text{ и } n_- = 0; \\ n = n'_- - h_1 \text{Sign}(n_-), & \text{если } |n'| = h \text{ и } n_- = 0 \text{ или} \\ & \text{если } |n'| > h_1 \text{ и } n_- \neq 0. \end{cases} \quad (2)$$

В описании (2) положительные параметры ε , h , h_1 характеризуют величину люфта, величину трения покоя и трения движения, соответственно, при этом $h \geq h_1 \geq 0$.

Математическая модель вида (1), (2) относится к кусочно-линейным динамическим моделям. В структурном виде модель (1), (2) представлена на рис. 1.

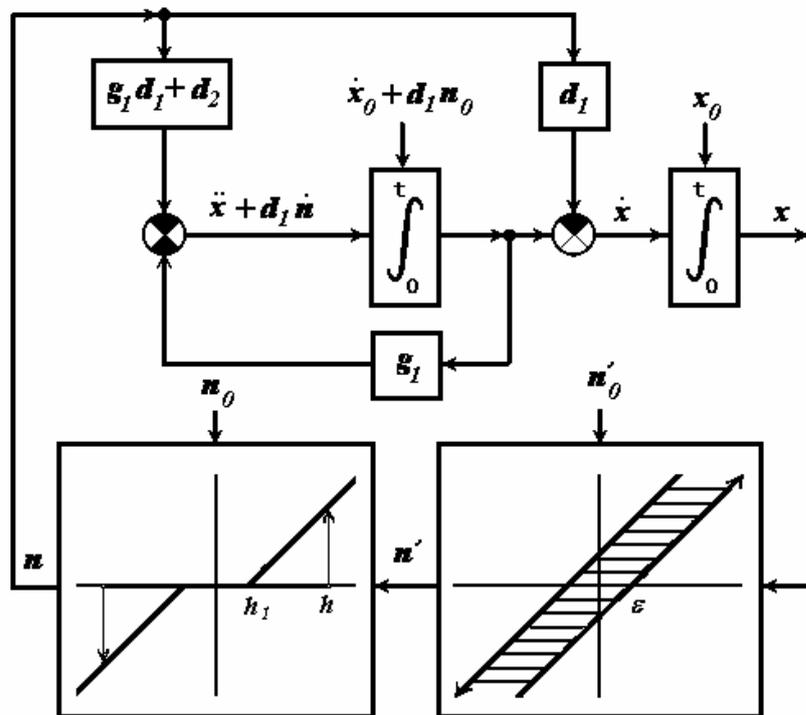


Рис. 1. Структура математической модели автоматической системы с люфтом и сухим трением

Ввиду неоднозначности нелинейных зависимостей начальные условия не могут определяться только x_0 , \dot{x}_0 , необходимо задавать начальные значения n_0, n'_0 .

Метод исследования

Для исследования был выбран метод точечных преобразований. Название метода определил академик А.А. Андронов в своем докладе «Теория точечных преобразований Пуанкаре – Брауэра – Биркгофа и теория нелинейных колебаний» [1]. Метод представляет собой строгий математический аппарат для решения принципиальных вопросов существования в фазовом пространстве (пространстве состояний) нелинейных динамических систем предельных циклов, выяснения их устойчивости (неустойчивости), объ-

яснения механизмов (условий) их возникновения и исчезновения (бифуркаций) [2]. Изучение фазовых пространств нелинейных систем методом точечных преобразований позволило решить ряд принципиальных задач теории автоматического регулирования [3].

Фазовым пространством рассматриваемой динамической системы (1), (2) является бесконечнолистная фазовая плоскость, отображающая совокупность всех возможных состояний рассматриваемой динамической системы. Каждому отдельно взятому состоянию системы соответствует «своя» изображающая точка на плоскости, непрерывному изменению состояний системы – движению изображающей точки вдоль фазовой траектории. В силу физического смысла параметра t (время) все фазовые траектории являются направленными интегральными кривыми, которые вместе с особыми точками (состояниями равновесия) и особыми траекториями (предельными циклами и сепаратрисами) качественно характеризуют динамическое поведение системы – определяют фазовый портрет системы.

Фазовой портрет системы может быть выяснен путем исследования точек пересечения фазовых траекторий с пересекающими их так называемыми линиями без контакта (секущими линиями).

Последовательность точек пересечений, осуществляемых в силу фазовых траекторий, с секущими линиями, образует некоторое точечное преобразование точек секущих линий друг в друга и в конечном итоге самих в себя в виде определенных непрерывных и однозначных функций, названных Пуанкаре функциями последования.

К изучению функций последования и сводится задача об исследовании структуры фазовой плоскости, которая однозначно определяется структурой порождаемого ею точечного преобразования, при этом предельным циклам будут соответствовать точки пересечения функций последования. Практический интерес представляет также определяемая с помощью функций последования структура разбиения пространства параметров на области качественно различного динамического поведения системы.

Примечание. Частный случай модели (1), (2) при $h = h_1 = 0$, что соответствовало учету только люфта, исследовался в работе [4]. Другой частный случай при $\varepsilon = 0$, что соответствовало учету в модели только сухого трения, исследовался в работах [5, 6]. Частный случай при $h = h_1 \neq 0$, что соответствовало учету в модели и люфта и сухого трения, однако при этом трение было учтено по простейшей его идеализации – кулоновской, был исследован в работе [7]. Модель (1), (2) в полном своем виде исследуется впервые.

Результаты исследования

В результате применения метода точечных отображений были получены (в параметрическом виде) функции последования $F_E(V)$, $F_E^*(V)$ и $\bar{F}_E(V_1)$, $\bar{F}_E^*(V_1)$ (представленные на рис. 2). Анализ функций показал, что их взаимное расположение ограничивается следующими случаями:

- 1) функции не имеют пересечений: $F_E(V) < F_E^*(V)$ и $\bar{F}_E(V_1) < \bar{F}_E^*(V_1)$ (представлено на рис. 2-а) – система (1), (2) глобально устойчива (устойчива «в целом»);
- 2) функции $\bar{F}_E(V_1)$, $\bar{F}_E^*(V_1)$ имеют одно пересечение, при этом $F_E(V) < F_E^*(V)$ (представлено на рис. 2-б) – на фазовой плоскости системы (1), (2) имеется устойчивый предельный цикла, проходящий через концы отрезка равновесия, чему соответствует существование автоколебаний «мягкого режима появления»;
- 3) функции $F_E(V)$, $F_E^*(V)$ имеют два пересечения, при этом $\bar{F}_E(V_1) < \bar{F}_E^*(V_1)$ (представлено на рис. 2-в) – на фазовой плоскости системы (1), (2) существуют два пре-

дельных цикла, охватывающие отрезок равновесия (наружный – устойчивый, внутренний – неустойчивый), чему соответствуют автоколебания «жесткого режима появления»;

- 4) функции $F_E(V)$, $F_E^*(V)$ имеют одно пересечение, при этом $\bar{F}_E(V_1) > \bar{F}_E^*(V_1)$ (представлено на рис. 2-г) – на фазовой плоскости существуют один предельный цикл, охватывающий отрезок равновесия, чему соответствуют автоколебания «мягкого режима»;
- 5) функции $F_E(V)$, $F_E^*(V)$ имеют два пересечения, а $\bar{F}_E(V_1)$, $\bar{F}_E^*(V_1)$ – одно пересечение (представлено на рис. 2-д) – на фазовой плоскости существуют три предельных цикла (два устойчивых, разделенные неустойчивым), чему соответствует существование автоколебаний как «мягкого режима» (устойчивый предельный цикл, проходящий через концы отрезка равновесия) так и «жесткого режима» (устойчивый предельный цикл, охватывающий отрезок состояний равновесия).

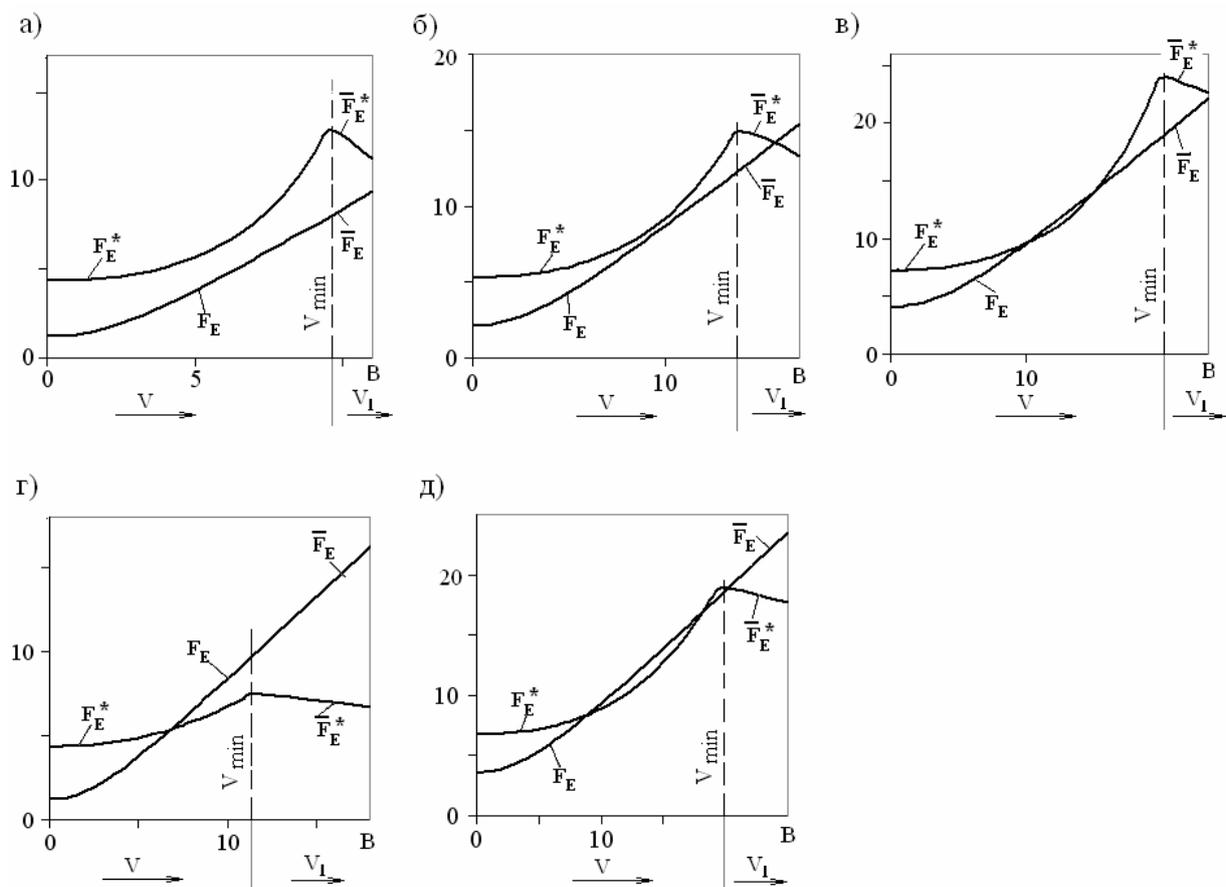


Рис. 2. Взаимное расположение функций последования при $h/h_1 = 8/9$, $\varepsilon = 1/2$

Граничную поверхность (представлено на рис. 3), отделяющую в пространстве коэффициентов системы (1), (2) область устойчивости «в целом» (глобальная устойчивость) от области существования автоколебаний различных режимов можно получить из условий

$$\bar{F}_E(B) = \bar{F}_E^*(B), F_E(V) = F_E^*(V) \text{ и } \frac{dF_E}{dV} = \frac{dF_E^*}{dV}, \quad (3)$$

где $B = \frac{d_2}{|\alpha|g_1} > 0$, α – вещественная часть корня характеристического уравнения $p^2 + (g_1 + d_1)p + d_2 = 0$; V, V_1 – параметры, определяемые координатами секущих линий. Первое уравнение в (3) соответствует пересечению $\bar{F}_E(V_1), \bar{F}_E^*(V_1)$ при $V_1 = B$ и определяет появление устойчивого предельного цикла из концов отрезка равновесия (представлено на рис. 4-а), второе соответствует касанию графиков функций $F_E(V), F_E^*(V)$ и определяет появление двух предельных циклов (устойчивого и неустойчивого), охватывающих отрезок состояний равновесия (представлено на рис. 4-б).

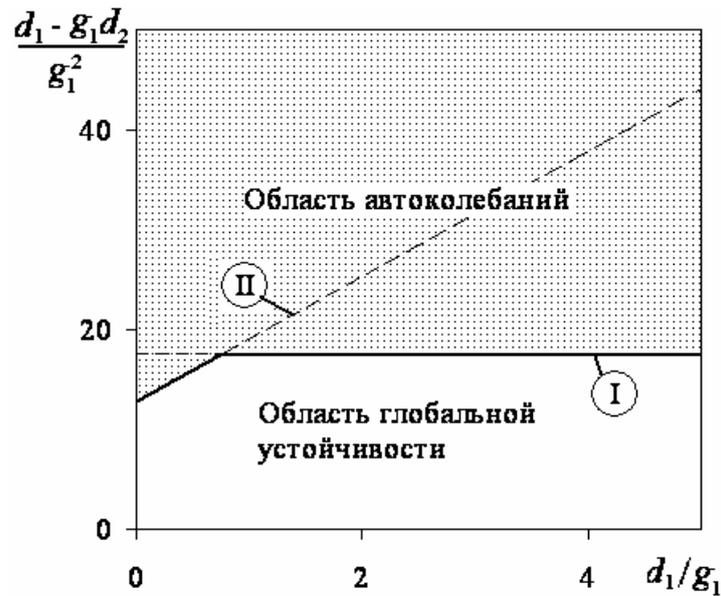


Рис. 3. Структура разбиения пространства параметров при $h/h_1 = 8/9, \varepsilon = 1/2$

На рис. 4 представлено взаимное расположение графиков функций последования для граничных линий, разделяющих область глобальной устойчивости и область автоколебаний при $h/h_1 = 8/9, \varepsilon = 1/2$.

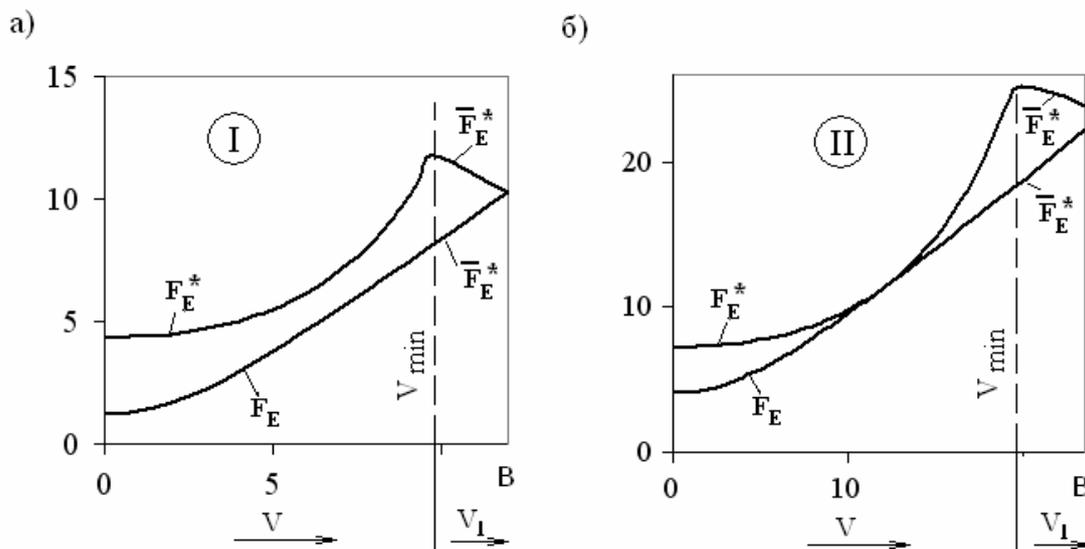


Рис. 4. Взаимное расположение функций последования на граничных линиях

Заключение

Проведенное исследование показало, что наличие в замкнутой автоматической системе таких естественных нелинейностей, как люфт и сухое трение, может вызвать автоколебания в системе. Полностью избавиться от нелинейностей практически невозможно, уменьшение их количественных значений связано с большими материальными расходами и трудностями технического характера.

Однако при правильном выборе параметров системы (из области глобальной устойчивости) автоколебания никогда не возникнут, и, если значения нелинейностей удовлетворяют требованиям точности, то с их присутствием можно мириться.

Литература

1. Андронов А.А. Теория точечных преобразований Пуанкаре–Брауэра–Биркгофа и теория нелинейных колебаний. // Вестн. АН СССР. 1946. № 6. С. 176.
2. Неймарк Ю.И. Метод точечных отображений в теории нелинейных колебаний. М.: Наука, 1972. 472 с.
3. Гаушус Э.В. Исследование динамических систем методом точечных преобразований. / М.: Наука, 1976. 368 с.
4. Андронов А.А. Теория непрямого регулирования при учете кулоновского трения в чувствительном элементе. // Автоматика и телемеханика. 1946. Т. 7. № 1. С. 15–41.
5. Шамберов В.Н. Исследование типовой промышленной системы автоматического регулирования с некулоновой моделью сухого трения. // Автореф. дис. канд. техн. наук. Л.: ЛГУ, 1988. 18 с.
6. Нгуен Чунг Киен, Шамберов В.Н. Влияние сухого трения в исполнительных механизмах с приводными электродвигателями на возникновение автоколебаний. // Доклады 16-й межвузовской научно-технической конференции. Петродворец: ВМИРЭ им. А.С/ Попова. 2005. №16. С. 271–273.
7. Нелепин Р.А. Динамика непрямого регулирования с переменной скоростью сервомотора при учете кулонова трения в золотнике и сервомоторе. // Автоматическое управление и вычислительная техника: Сб. научн. тр. М.: Машгиз, 1961. Вып. 4. С. 355–383.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ МНОГОСВЯЗНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.Ю. Никитин

(Санкт-Петербургский государственный морской технический университет)
Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент В.Н. Шамберов
(Санкт-Петербургский государственный морской технический университет)

Рассматривается новый прием исследования многосвязных (многомерных) существенно нелинейных автоматических систем. В его основе лежит метод точечных отображений на двумерной фазовой поверхности, эффективно применявшийся для анализа кусочно-линейных динамических систем второго порядка, и метод сечений пространства параметров, хорошо зарекомендовавший себя при исследовании нелинейных динамических систем n -го порядка.

Введение

В сложных технических объектах регулируемые величины связаны между собой в том смысле, что изменение какой-либо одной из них вызывает изменение других. В соответствии с целями автоматизации для каждой величины создается замкнутый контур автоматического регулирования. Часто задачи автоматизации требуют введения дополнительных связей между контурами регулирования для придания системе определенных свойств (например, свойств автономности). Стремление повысить точность и быстродействие многосвязных систем часто приводит к тому, что присущие автоматическим устройствам естественные нелинейности начинают оказывать решающее влияние на устойчивость систем. Исходя из этого, возникает необходимость рассматривать многосвязные системы, как существенно нелинейные. Предлагается для исследования таких систем использовать метод сечения пространства параметров [1] в сочетании с результатами исследования динамических систем второго порядка методом точечных отображений [2].

Постановка задачи

Техника автоматического регулирования насыщена многочисленными примерами многосвязных автоматических систем. Наиболее известным (давно ставшим классическим) является пример регулирования частоты вращения турбогенератора с отбором пара из паропровода (задача И.Н. Вознесенского). Суть задачи заключается в следующем: автоматическое регулирование числа оборотов турбины производится изменением величины открытия клапанов свежего пара под действием регулятора частоты вращения, а регулирование давления пара в камере отбора – путем изменения величины открытия клапанов перепуска пара в турбину низкого давления при помощи регулятора давления пара. При несвязанном регулировании каждый регулятор воздействует только на свою группу клапанов. При связанном регулировании каждый регулятор воздействует одновременно на обе группы клапанов свежего пара и пара в отборе. Для придания системе свойств автономности необходимо предусмотреть связи между регуляторами.

Описание динамики (математическая модель) такой системы при известных упущениях в стандартной форме следующее:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{v}; \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{v}; \dot{\mathbf{v}} = \mathbf{N}(\mathbf{y}), \quad (1)$$

$$\text{где } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{\theta_1}{T_{a_1}} & \frac{\alpha_2}{T_{a_1}} \\ \frac{\alpha_1}{T_{a_2}} & -\frac{\theta_2}{T_{a_2}} \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{a_1}T_{s_1}} & \frac{\alpha_4}{T_{a_1}T_{s_2}} \\ \frac{\alpha_3}{T_{a_2}T_{s_1}} & -\frac{1}{T_{a_2}T_{s_2}} \end{bmatrix}; \mathbf{C} = \begin{bmatrix} K_1 & \beta_2 K_2 \\ \beta_1 K_1 & K_2 \end{bmatrix}; \mathbf{D} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{s_1}} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_{s_2}} \end{bmatrix}.$$

При этом x_1, x_2 – регулируемые величины 1-го (частота вращения) и 2-го (давление

пара) контуров, соответственно; v_1, v_2 – управляющие воздействия со стороны регуляторов; y_1, y_2 – управляющие сигналы на входе исполнительных механизмов регуляторов; T_{a1}, T_{a2} – постоянные времени соответствующих контуров; θ_1, θ_2 – коэффициенты, характеризующие свойство саморегулируемости контуров; T_{S1}, T_{S2} – постоянные времени исполнительных механизмов регуляторов; K_1, K_2 – коэффициенты передачи измерительно-усилительных устройств регуляторов; α_1, α_2 – коэффициенты, характеризующие внутренние связи объекта регулирования; α_3, α_4 – коэффициенты, характеризующие внешние связи объекта с регуляторами; β_1, β_2 – коэффициенты, характеризующие связи между регуляторами; составляющие вектора $\mathbf{N}(y) = n_1(y_1), n_2(y_2)$ – существенные нелинейности, обусловленные учетом некулоновского сухого трения в исполнительных механизмах регуляторов (внешний вид нелинейностей представлен на рис. 1).

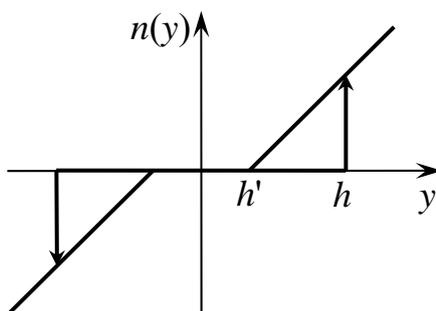


Рис. 1. Нелинейность, сочетающая в себе мертвую зону, скачок и гистерезис

Подчеркнем, что данная задача никогда не решалась как нелинейная.

Допустим, коэффициентам системы приданы следующие значения: $T_{a1} = 2.5c$, $T_{a2} = 1.0c$, $\theta_1 = 0.25$, $\theta_2 = 1.0$, $T_{S1} = T_{S2} = 0.1c$, $\alpha_1 = 0$, $\alpha_2 = -0.1$. Пусть параметры нелинейностей характеризуются отношениями $(h_1 + h'_1)/(h_1 - h'_1) = 3$, $(h_2 + h'_2)/(h_2 - h'_2) = 1$, где коэффициенты h_1, h_2 и h'_1, h'_2 характеризуют учет в исполнительных механизмах регуляторов трения покоя и трения скольжения, соответственно.

Необходимо определить значения коэффициентов усиления K_1, K_2 , коэффициентов связи регуляторов с объектом α_3, α_4 и коэффициентов связи между регуляторами β_1, β_2 , при которых исходная система будет устойчивой.

Решение задачи

Линейным преобразованием $\mathbf{x} = \mathbf{M}\mathbf{g}$, где $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & -2/45 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$ система (1) приводится к каноническому виду

$$\dot{\mathbf{g}} = \Lambda \mathbf{g} + \mathbf{B}_m \mathbf{v}; \quad \mathbf{y} = \mathbf{C}_m \mathbf{g} + \mathbf{D} \mathbf{v}; \quad \dot{\mathbf{v}} = \mathbf{N}(\mathbf{y}), \quad (2)$$

где $\Lambda = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{M} = \begin{bmatrix} -0.1 & 0 \\ 0 & -1.0 \end{bmatrix}$; $\mathbf{B}_m = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{B} = \begin{bmatrix} -4(1 + \alpha_3/9) & 4(\alpha_4 + 1/9) \\ -10\alpha_3 & 10 \end{bmatrix}$;

$$\mathbf{C}_m = \mathbf{M} \mathbf{C} = \begin{bmatrix} K_1 & -2K_1/45 - \beta_2 K_2 \\ \beta_1 K_1 & -2\beta_1 K_1/45 - K_2 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} -10 & 0 \\ 0 & -10 \end{bmatrix}.$$

При этом элементы диагональной матрицы Жордано Λ (-0.1, -1.0) являются собственными числами матрицы \mathbf{A} (вещественными и простыми).

Для эквивалентности преобразования необходимо потребовать выполнения условий управляемости по входу \mathbf{v} и наблюдаемости по выходу \mathbf{y} , т.е. ранг матриц $[\mathbf{B} \quad \mathbf{A}\mathbf{B}]$, $[\mathbf{C}^T \quad \mathbf{A}^T\mathbf{C}^T]$ должен равняться рангу матрицы \mathbf{A} .

В соответствии с принятыми значениями части коэффициентов система (1) будет неуправляемой по входу \mathbf{v} , если $\alpha_3 = -9$ и $\alpha_4 = -1/9$, и ненаблюдаемой по выходу \mathbf{y} , если $2K_1 = -45\beta_2K_2$ и $2\beta_1K_1 = -45K_2$.

Покажем, что исходную систему (1) и, соответственно, (2) можно исследовать до конца строго с помощью базовых подсистем вида

$$\dot{g} = \lambda g + b_m v, \quad y = c_m g + d v, \quad \dot{v} = n(y), \quad (3)$$

где g_1, g_2 – новые (канонические) переменные; λ, c_m, b_m, d – соответствующие элементы матриц $\mathbf{A}, \mathbf{B}_m, \mathbf{C}_m, \mathbf{D}$.

Выделим в пространстве параметров (коэффициентов $K_1, K_2, \alpha_3, \alpha_4, \beta_1, \beta_2$) системы (1) две подобласти (два сечения) для которых выполняются условия:

Для первой подобласти (сечение 1)

$$\alpha_4 = -\frac{1}{9}; \quad \frac{K_2}{K_1} = -\frac{2}{45\beta_2}. \quad (4)$$

Для второй подобласти (сечение 2)

$$\alpha_3 = -9; \quad \frac{K_2}{K_1} = -\frac{2\beta_1}{45}. \quad (5)$$

В условиях сечения 1 динамика системы (2) (и, соответственно, системы (1)) определяется уравнениями

$$\begin{cases} \dot{g}_1 = \lambda_1 g_1 + b_{m11} v_1, & y_1 = c_{m11} g_1 + d_{11} v_1; & \dot{v}_1 = n_1(y_1); \\ \dot{g}_2 = \lambda_2 g_2 + b_{m21} v_1 + b_{m22} v_2, & y_2 = c_{m21} g_1 + c_{m22} g_2 + d_{22} v_2; & \dot{v}_2 = n_2(y_2). \end{cases}$$

В условиях сечения 2 динамика системы (2) (и, соответственно, системы (1)) определяется уравнениями

$$\begin{cases} \dot{g}_1 = \lambda_1 g_1 + b_{m12} v_2, & y_2 = c_{m21} g_1 + d_{22} v_2, & \dot{v}_2 = n_2(y_2); \\ \dot{g}_2 = \lambda_2 g_2 + b_{m21} v_1 + b_{m22} v_2, & y_1 = c_{m11} g_1 + c_{m12} g_2 + d_{11} v_1, & \dot{v}_1 = n_1(y_1). \end{cases}$$

В условиях каждого сечения динамика исходной системы 4-го порядка соответствует динамике двух базовых подсистем 2-го порядка. При этом одна из подсистем воздействует на другую подсистему, которая, в свою очередь, не оказывает обратного воздействия.

Исходя из сказанного, можно сделать следующие утверждения: 1) если обе подсистемы устойчивы, то устойчива и исходная система; 2) если хотя бы одна подсистема автоколебательна, то автоколебательна и исходная система; 3) если хотя бы одна подсистема неустойчива, то исходная система не может быть устойчивой, при этом не представляется возможным заранее определить, неустойчива или автоколебательна исходная система.

Система вида (3) с заданной нелинейностью была полностью исследована методом точечных отображений на трехлистной фазовой плоскости [3]. Были получены условия, определяющие глобальную устойчивость (устойчивость «в целом») системы.

Устойчивость подсистем для сечения 1 (4) в соответствии с [3] определяется условиями:

$$1.675 > (9 + \alpha_3)K_1 > -0.5 \quad \text{и} \quad 67.5 > 2\beta_1K_1 + 45K_2 > -45. \quad (6)$$

Устойчивость подсистем для сечения 2 (5) определяется условиями:

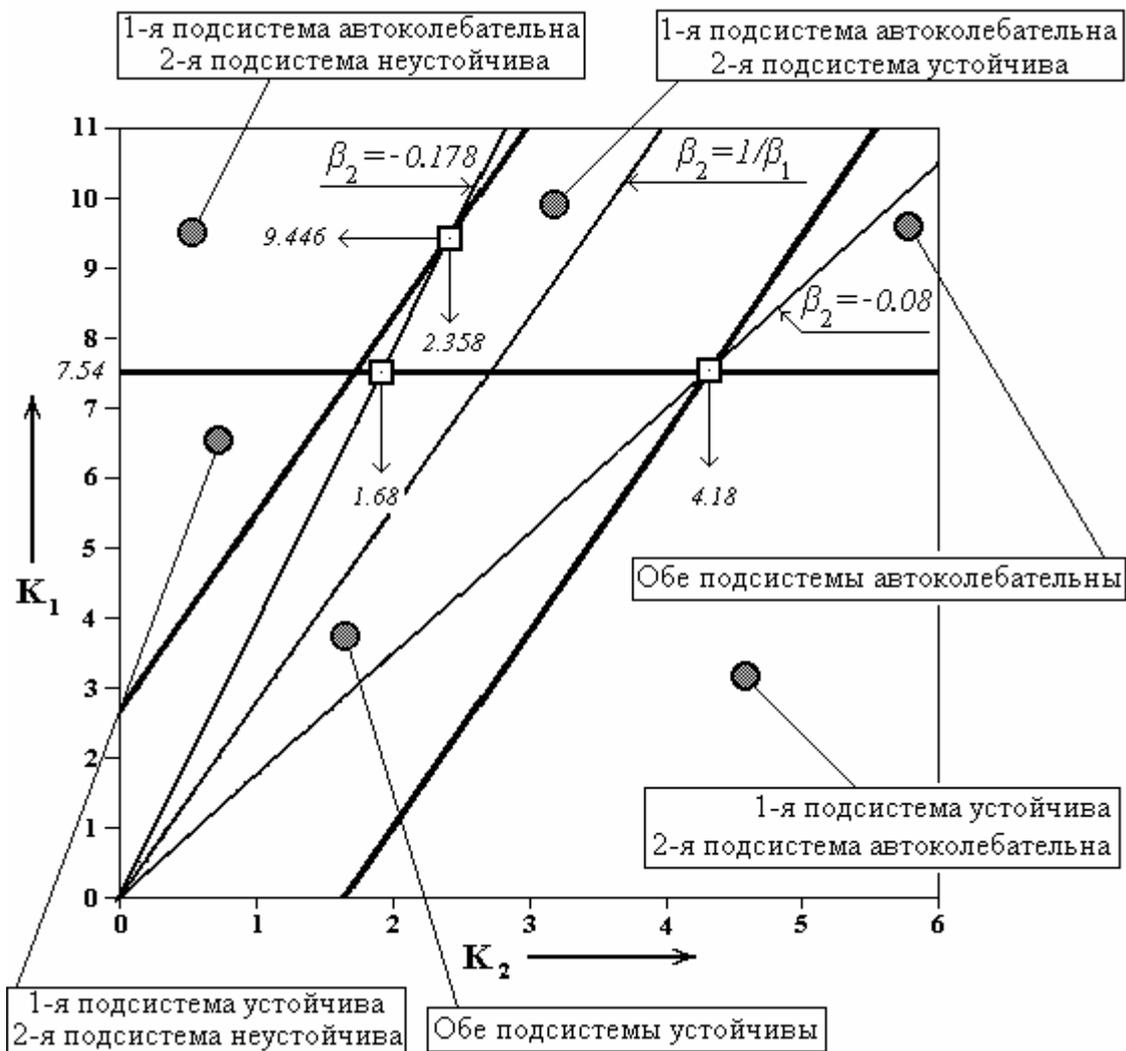
$$2.43 > -(9\alpha_4 + 1)\beta_1K_1 > -2.25 \quad \text{и} \quad 234 > -\alpha_3(2K_1 + 45\beta_2K_2) > -45. \quad (7)$$

При невыполнении условий (6), (7) соответствующие подсистемы являются автоколебательными.

Рассмотрим систему в условиях сечения 1 (4). Допустим, коэффициентам α_3, β_1 приданы значения $\alpha_3 = -8$ (можно выбирать любые значения коэффициента $\alpha_3 < 0$, за исключением $\alpha_3 = -9$, при котором нарушаются условия управляемости по вектору v), $\beta_1 = -8$. Условия устойчивости соответственно для 1-ой и 2-ой подсистем будут

$$K_1 < 7.5375, 4.21875 > 2.8125K_2 - K_1 > -2.8125. \quad (8)$$

Структура разбиения пространства параметров в соответствии с (8) представлена на рис. 2.



120

Рис. 2. Структура пространства параметров для сечения 1 при $\alpha_3 = -8; \beta_1 = -8$

Сечение 1 (4) при значениях $\beta_2 = -0.178$, $\beta_2 = -0.08$ и $\beta_2 = 1/\beta_1 = -0.125$ представлено на рис. 2. Можно выбирать любые значения коэффициента $\beta_2 < 0$, за исключением $\beta_2 = 1/\beta_1$, при котором нарушается условие наблюдаемости по вектору y .

Если, например, выбрать сечение с $\beta_2 = -0.178$, то при превышении значений $K_1 = 7.54, K_2 = 1.68$ 1-я подсистема станет автоколебательной (в исходной системе возникнут автоколебания). При значениях коэффициентов $K_1 > 9.446, K_2 > 2.358$ 2-я подсистема станет неустойчивой (исходная система либо неустойчива, либо автоколебательна с большими амплитудами колебаний). При значении коэффициента

$\beta_2 = -0.08$ можно получить максимальные значения коэффициентов $K_1 < 7.54$, $K_2 < 4.18$ для выбранного сечения, при $K_1 > 7.54$ и, соответственно, $K_2 > 4.18$ исходная система становится автоколебательной (обе подсистемы автоколебательны). Автоколебаниям соответствует устойчивый предельный цикл в пространстве состояний системы (представлен на рис. 3).

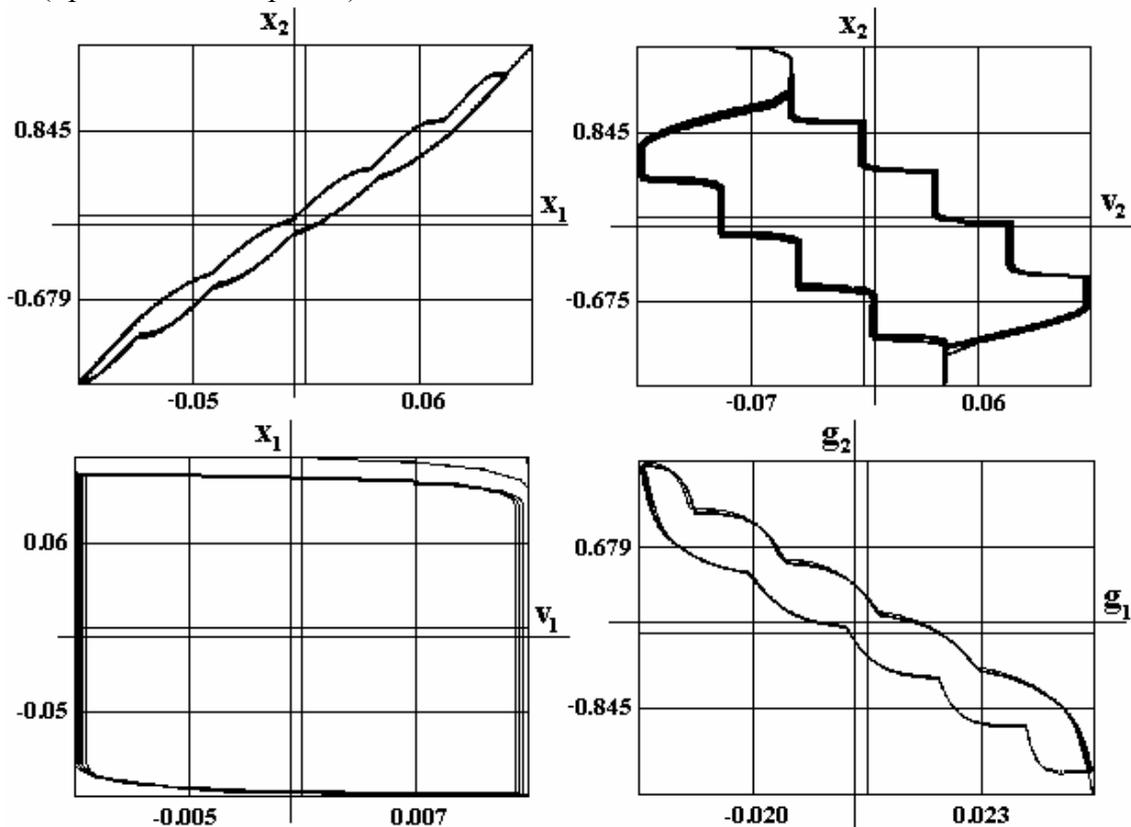


Рис. 3. Устойчивый предельный цикл в пространстве параметров исходной системы при $\alpha_3 = -8$, $\alpha_4 = -1/9$, $\beta_1 = -8$, $\beta_2 = -0.08$, $K_1 = 9$, $K_2 = 5$

Аналогичные исследования можно провести и для сечения 2 (5).

Заключение

Данный прием позволяет до конца строго исследовать существенно нелинейную многосвязную систему в условиях сечений. Ограниченность метода состоит в том, что он позволяет исследовать исходную систему не при любых, а лишь при определенных (заданных) значениях параметров (коэффициентов), образующих сечение. Однако точные решения, получаемые по сечениям, могут служить эталонами, на которые следует ориентироваться при использовании других (например, приближенных) методов исследования.

Литература

1. Точные методы исследования нелинейных систем автоматического управления. / Под общей редакцией Е.П. Попова. М.: Машиностроение, 1971. 323 с.
2. Баутин Н.Н., Леонтович Е.А. Методы и приемы качественного исследования динамических систем на плоскости. / 2-е изд., доп. / М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. 448 с.
3. Шамберов В.Н. Влияние некулоновского сухого трения на устойчивость автоматических систем. // ДАН. 2005. Т. 401. №2. С. 193–195.

СИНТЕЗ ТОЧНОСТИ ГРАДИЕНТНЫХ СИСТЕМ

М.С. Петрищев, Чан Нгок Чау

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор В.М. Мусалимов

В работе на примере кривошипно-ползунного механизма проведен динамический анализ точности. Вывод выражений для вычисления ошибок положения основан на составлении потенциальной функции с построением функции плотности вероятности. Функции плотности вероятности, представленные в таком виде, лежат в основе расчетов точности механических систем. Из полученных соотношений возможен синтез точности рассматриваемой системы.

Введение

В ряде разделов аналитической теории точности имеются подходы, которые можно рассмотреть в рамках теории катастроф с топологией фазовых потоков. Тогда анализ точности и синтез можно обобщенно представить состоящим из двух блоков [1].

В первом осуществляется построение локальной потенциальной функции «идеальной» механической системы, где потенциальная энергия является функцией переменных состояния $x \in R^n$ и управляющих параметров $c \in R^k$. Цель – оценка ошибок положения, скорости и ускорения, исходя из анализа дифференциальных уравнений движения механических систем. Решение проблемы включает следующие этапы: введение дополнительных связей в регистрационных точках; определение динамических реакций $R(t)$ в этих точках; анализ фазовых портретов при изменении $R(t)$ – здесь реакции выступают в качестве управляющего параметра; переход к градиентной системе и построение потенциальной функции $V(x; R)$, где x – переменные состояния, R – управляющий параметр.

Во втором блоке осуществляется построение локальной потенциальной функции «несовершенной» механической системы, где потенциальная энергия является функцией переменных состояния, управляющих параметров и параметров несовершенств $\varepsilon \in R^m$. Здесь же на основе построенной функции плотности вероятности исследуются аномалии дисперсии при изменении параметров. Цель – учет несовершенств при оценивании ошибок. Кроме переменных состояния x и параметров управления c , введены параметры несовершенств ε_n – дефекты, возникающие при изготовлении элементов системы, и ε_q – дефекты, возникающие в процессе сборки системы. Решение включает следующие этапы: построение (с учетом результатов первого блока) потенциальной функции $V(x; R; \varepsilon)$ – самого общего вида с учетом типа роста в критических точках [2]; переход к потенциальной функции $V(x; M; \varepsilon; \varepsilon_R)$, где ε_R – динамический параметр несовершенства, связанный с реакцией системы; M – внешняя сила, выступающая в качестве управляющего параметра; переход от переменных состояния x к переменным состояния (параметрам порядка) a ; анализ катастрофы сборки и построения диапазона изменения параметров порядка a , вычисление коэффициентов диффузии D^* , построение функции плотности вероятности

$$\Phi(a; M; \varepsilon) = N \exp\left[-\frac{V(a; M; \varepsilon)}{D^*}\right].$$

Затем осуществляется анализ аномалий дисперсии и анализ динамических ошибок на основе конкретного обобщенного закона распределения.

Модельная задача для кривошипно-ползунного механизма

Если n уравнений движения механической системы с n степенями свободы при включении дополнительных связей переходят в $(n - k)$ уравнений (где k – число введенных связей), то в ряде случаев удастся исключить вторые производные и перейти к

уравнениям только с первой производной. Например, для первоначальной системы с двумя степенями свободы при введении дополнительной связи получаем одно уравнение, где функционально связаны $\dot{\varphi}$ – обобщенная скорость, R – реакция системы, φ – обобщенная координата и M – внешняя сила.

Получаемые уравнения движения нелинейны относительно обобщенных скоростей, и анализ уравнений должен содержать элементы кинематического описания с использованием уравнения Колмогорова – Фоккера – Планка [3, 4]. Реакции связей R , параметризующие синтезируемые потенциальные функции, являются функциями координат φ и времени t : $R=R(\varphi(t))$. В реальных системах в силу процессов в механических связях (трение, износ и др.) функции являются случайными. Этим оправдывается применение уравнения Колмогорова – Фоккера – Планка для рассматриваемых систем.

Рассмотрим задачу о дрейфе дисперсии. На рис. 1 изображена механическая система, которая получена из системы с двумя степенями свободы после наложения дополнительной связи в точке A . Здесь M – задаваемый момент, $m_1=m_2=m$ – приведенные массы; $l_1=l_2=l$ – длины стержней. Дополнительная связь установлена в точке, где требуется в условиях динамики определить ошибку положения массы m_2 , ошибку скорости и ускорения. Последовательность вычислений: построение градиентной системы, построение потенциальных функций, переход к уравнению Колмогорова – Фоккера – Планка, вычисление ошибок распределения.

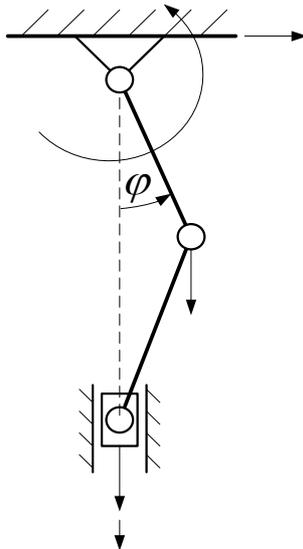


Рис. 1. К задаче о дрейфе дисперсии

Построение градиентной системы. Для безразмерной схемы рис. 1 получено уравнение движения [4, 5]:

$$\ddot{\varphi} + \dot{\varphi}^2 \frac{2 \sin 2\varphi}{1 + 4 \sin^2 \varphi} + \frac{3g}{l} \frac{\sin \varphi}{1 + 4 \sin^2 \varphi} = \frac{M}{ml^2(1 + 4 \sin^2 \varphi)}, \quad (1)$$

а также уравнение для вычисления реакции связи в точке A

$$\ddot{\varphi} - R \frac{2 \cos \varphi}{ml} + \frac{g}{l} \sin \varphi = \frac{M}{ml^2}. \quad (2)$$

Уравнения (1), (2) приводят к выражению, связанному с градиентной системой,

$$\frac{\dot{\varphi}^2}{\omega_0^2} = \frac{1 + 4 \sin^2 \varphi}{2 \sin 2\varphi} \left(-\frac{R}{mg} 2 \cos \varphi + \sin \varphi - \frac{4M \sin^2 \varphi}{mgl(1 + 4 \sin^2 \varphi)} \right) - \frac{3}{4 \cos \varphi}, \quad (3)$$

где $\omega_0^2 = g/l$.

M

O

Полученное решение устанавливает зависимость $\dot{\varphi}^2/\omega_0^2$ от обобщенной координаты φ , внешней нагрузки M и реакции связи R . В решении уравнения (3) возможны отрицательные значения энергии $\dot{\varphi}^2/\omega_0^2$, поэтому, для сохранения физического смысла, выражение (3) следует переписать в виде

$$\frac{\dot{\varphi}^2}{\omega_0^2} = \left| \frac{1 + 4 \sin^2 \varphi}{2 \sin 2\varphi} \left(-\frac{R}{mg} 2 \cos \varphi + \sin \varphi - \frac{4M \sin^2 \varphi}{mgl(1 + 4 \sin^2 \varphi)} \right) - \frac{3}{4 \cos \varphi} \right|. \quad (4)$$

Для перехода к градиентной системе положим $\frac{4M \sin^2 \varphi}{mgl(1 + 4 \sin^2 \varphi)} = \sin \varphi$, т.е. предположим, что задаваемый момент определяется выражением

$$M = \frac{mgl(1 + 4 \sin^2 \varphi)}{4 \sin \varphi}.$$

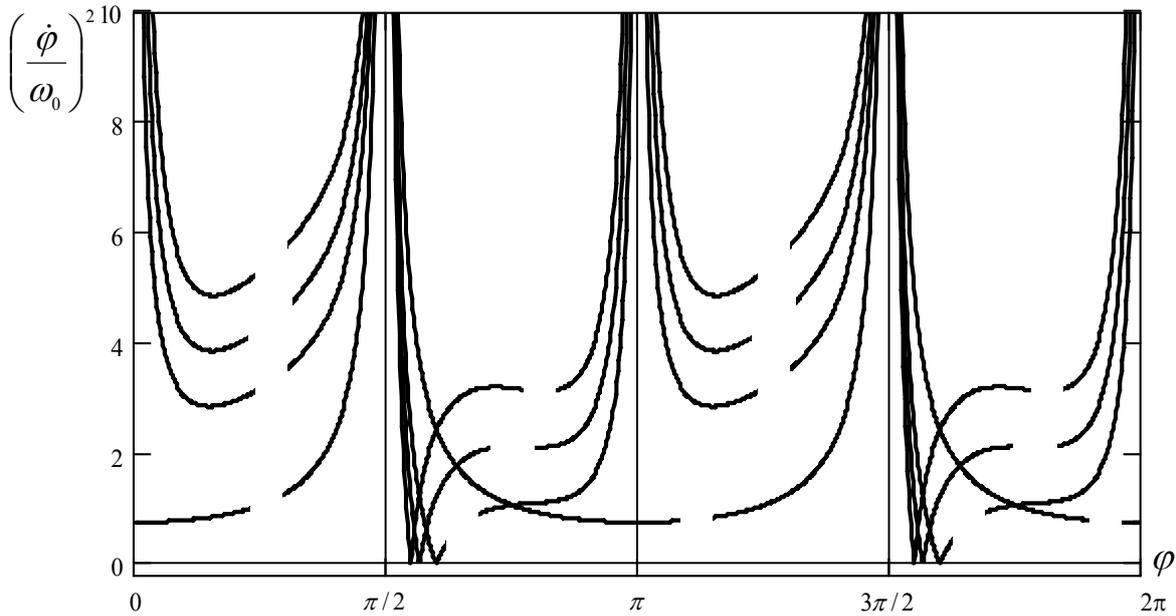


Рис. 2. Окна эквивалентных кривых

На рис. 2 представлены результаты расчета (4) для различных значений параметра $r = R/mg$, обозначенных цифрами у соответствующей линии.

Построение потенциальных функций. Из расчета и графиков следуют зависимости

$$\left(\frac{\dot{\varphi}}{\omega_0} \right)^2 = 8\varphi_1^2 + (1,2 + 2,1r),$$

отсюда

$$\dot{\varphi} = \pm \omega_0 \sqrt{8\varphi_1^2 + (1,2 + 2,1r)}. \quad (5)$$

Рассмотрим (5) как локальную градиентную систему в окрестности связи. Здесь реакция r выступает в качестве управляющего параметра. Тогда потенциальная функция в окне $0 < \varphi < \pi/2$ имеет вид

$$V(\varphi; r) = \omega_0 \left[\frac{\varphi \sqrt{(8\varphi_1^2 + (1,2 + 2,1r))}}{2} + \frac{(1,2 + 2,1r)}{2\sqrt{8}} \ln \left| 2\sqrt{8 + \sqrt{8\varphi_1^2 + (1,2 + 2,1r)}} \right| \right]. \quad (6)$$

Вычисление статистических моментов. Функция плотности вероятности $\Phi(\varphi)$ связана с потенциальной функцией $V(\varphi; r)$ посредством уравнения Колмогорова – Фок-

кера – Планка [3, 4]: $\partial\Phi/\partial t = \nabla(\Phi\nabla V + \nabla^2(D\Phi))$. Потенциал является функцией переменной состояния φ и управляющего параметра r . С потенциальной функцией (6) связана функция плотности вероятности

$$\Phi(\varphi) = N \exp\left\{-\frac{V(\varphi; r)}{D^*}\right\}, \quad (7)$$

где D^* – коэффициент диффузии; N – константа нормализации.

График функции плотности вероятности рассматриваемой системы в окне $0 < \varphi < \pi/2$ представлен на рис. 3.

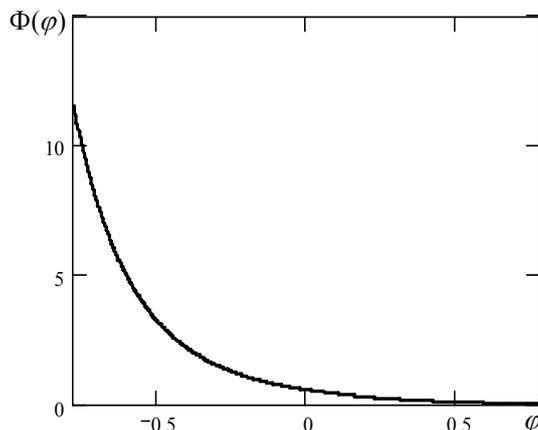


Рис. 3. График функции плотности вероятности рассматриваемой системы

Условие для определения значения константы нормализации N для рассматриваемого окна:

$$\int_{-\pi/4}^{\pi/4} N \exp\left\{-\frac{V(\varphi; r)}{D^*}\right\} d\varphi = 1,$$

$$N = \frac{1}{\int_{-\pi/4}^{\pi/4} \exp\left\{-\frac{V(\varphi; r)}{D^*}\right\} d\varphi} = 0,67.$$

Вычислим первый и второй статистические моменты (среднее значение угла и дисперсию):

$$\langle \varphi \rangle = \int_{-\pi/4}^{\pi/4} \varphi \Phi(\varphi) d\varphi = -0,25.$$

$$D = \int_{-\pi/4}^{\pi/4} (\varphi - \langle \varphi \rangle)^2 \Phi(\varphi) d\varphi = 0,17.$$

Первый и второй статистические моменты являются основой для оценки точности положения ползуна при нахождении кривошипа в пределах окна $0 < \varphi < \pi/2$.

Следует отметить, что анализ расчетов осуществлен при переходе $(\dot{\varphi}/\omega_0)^2 \rightarrow \dot{\varphi}/\omega_0$. При этом мнимые ветви не учитывали. В принципе можно в расчет включить непосредственно $(\dot{\varphi}/\omega_0)^2$.

Заключение

На примере модельной задачи продемонстрирован метод построения динамических нелинейных систем с последующим переходом к уравнению Колмогорова – Фоккера – Планка. Построение градиентной динамической системы обеспечивалось тем,

что в уравнение движения линейным образом входят вторая производная и множители Лагранжа – реакции связей. Техника перехода к потенциальной функции и далее к функции плотности вероятности во многом базировалась на математическом аппарате теории катастроф [2]. Показано, что дрейф дисперсии обеспечивается реакциями связей – параметрами потенциальной функции. Функции плотности вероятности, представленные в таком виде, лежат в основе расчетов точности механических систем.

Литература

1. Мусалимов В.М. Анализ градиентных систем при синтезе точности механизмов. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2001. №1. С. 27–33.
2. Гилмор Р. Прикладная теория катастроф. Кн. 1. М.: Мир, 1984. 350 с.
3. Баруча-Рид А.Т. Элементы теории марковских процессов и их приложения. М.: Наука, 1969. 512 с.
4. Risken H. The Fokker-Planck Equation. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1984. 454 s.
5. Бутенин Н.В., Фуфаев Н.А. Введение в аналитическую механику. М.: Наука, 1991. 256 с.
6. Булатов В.П., Фридлиндер И.Г., Мусалимов В.М. и др. Фундаментальные проблемы теории точности и качества машин, приборов, систем. СПб: ИПМ РАН, 1999. 223 с.

МАГНИТОВАРИОМЕТР КАК СРЕДСТВО ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

П.А. Сергушин

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор В.М. Мусалимов

В работе описывается магнитометрическая система, которая позволяет регистрировать в цифровом виде три взаимно-ортогональные компоненты переменного магнитного поля, три компоненты электрического (теллурического) поля и три компоненты сейсмических колебаний в диапазоне частот от 0 до 8 Гц.

Введение

В настоящее время актуален вопрос исследования влияния магнитных полей на организм человека. В лаборатории наземных геомагнитных исследований СПбФ ИЗМИРАН ведется разработка устройств, позволяющих измерять напряженность магнитного поля Земли, а также других внешних магнитных полей.

На рис. 1. изображен геофизический комплекс GI-MTS-1, разработанный и выпускаемый СПбФ ИЗМИРАН [1], а в табл. 1 приведены его параметры.

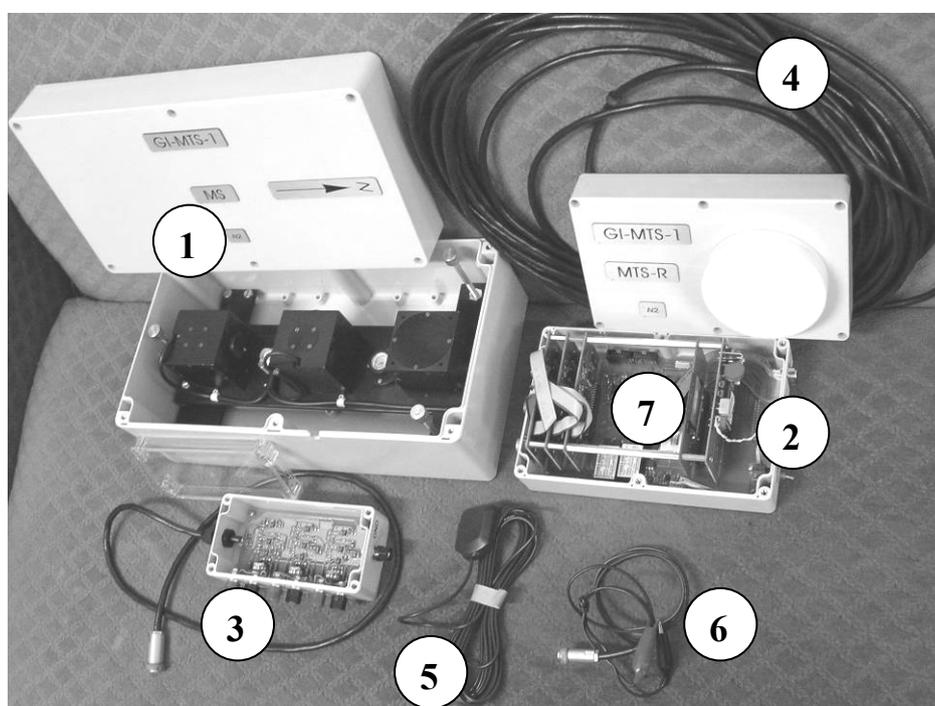


Рис. 1. Магнитометрическая система GI-MTS-1: 1 – блок магнитных датчиков (MS); 2 – регистратор MTS-R, включающий приемник GPS; 3 – блок аналоговых фильтров (AF); 4 – кабель, соединяющий блоки MS и MTS-R, длиной 15 м; 5 – антенна GPS; 6 – кабель питания 12 В; 7 – компакт флэш-карта (до 2 Gb)

Чувствительность	0.1 нТл
Диапазон измерений	0.001-8 Гц
Динамический диапазон измерений индукции магнитного поля	± 1800 нТл
Потребление электроэнергии	1.8 Вт
Напряжение питания	Постоянное напряжение 12В
Рабочий диапазон температуры внешней среды	-20° до +50°С
Вес прибора (без аккумулятора)	6.5 kg

Таблица. Основные параметры комплекса GI-MTS-1

Блок магнитных датчиков MS состоит из трех одинаковых блоков (по одному блоку на каждую компоненту) (рис. 2).

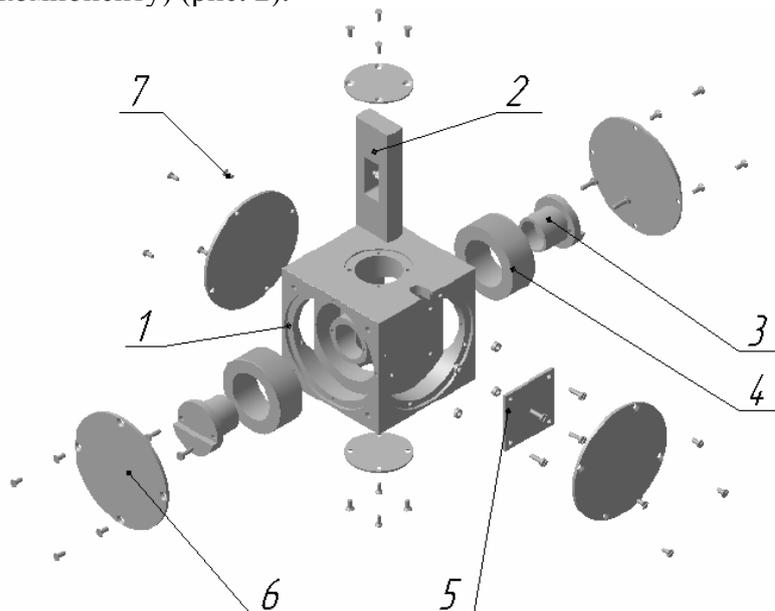


Рис. 2. Магнитный датчик MS: 1 – корпус («кубик»); 2 – втулка-чувствительный элемент; 3 – блоки диодов; 4 – катушки индуктивности; 5 – предусилитель; 6 – крышки; 7 – крепежные винты

Принцип действия магнитного датчика

Для регистрации изменений в магнитном поле используется магнитовариометр (рис. 3).

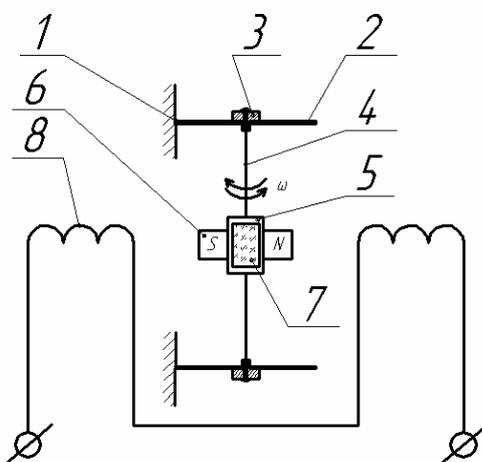


Рис. 3. Принципиальная схема магнитовариометра: 1 – стойка; 2 – плоские пружины; 3 – втулки; 4 – кевларовая нить; 5 – втулка; 6 – магнит; 7 – зеркало; 8 – катушки индуктивности

Чувствительный элемент (ЧЭ) представляет собой магнит 6 (из самарий-кобальтового сплава), подвешенный между плоскими пружинами 2 на кевларовой нити 4, закрепленной во втулках 3.

Под действием изменяющегося внешнего магнитного поля происходит переориентация магниточувствительной системы. На втулке 5 жестко закреплено зеркало, на которое с излучающего светодиода падает оптическое излучение. Отраженный луч принимается фотодиодами [2]. С фотодиодов снимается разность фототоков, происходит фильтрация сигнала по низким частотам, затем производится усиление и распреде-

ление сигнала – на АЦП и в цепь обратной связи. Катушки индуктивности (обратной связи) создают магнитное поле, препятствующее повороту магнита.

Для повышения надежности и точности измерения изделия узлы, обеспечивающие «считывание» сигнала (блок диодов), дублируются, а их измерения усредняются.

Полученный и усиленный сигнал подвергают аналого-цифровой обработке, затем в зависимости от поставленной задачи проводится обработка данных: быстрое преобразование Фурье или вейвлет-анализ.

При необходимости данные могут быть отправлены в удаленный центр сбора и оперативной обработки информации по модему через телефонную линию или средствами сотовой связи по GPRS (модуль в комплект не входит).

Устройство обеспечивает:

- измерение магнитных параметров с высокой точностью;
- сбор и хранение полученной информации;
- передачу информации в удаленный центр сбора и оперативной обработки геофизической информации.

Заключение

В работе приведено описание геофизического комплекса, основной возможностью которого является измерение внешнего магнитного поля; описан принцип его работы.

Данная работа является началом исследования магнитометрических систем и методов их модернизации путем внедрения новых технологий изготовления компонентов и новых методов измерения величин.

Литература

1. Геофизический комплекс GI-MTS-1. Техническое описание. // СПб: СПбФ ИЗМИРАН, 2005. С. 1–15.
2. Кротевич Н.Ф. Магнитные микровариационные измерения и аппаратура для магнитотеллурических исследований. Новосибирск: Наука, 1972. С.7–47.

СВЯЗАННЫЕ МАЯТНИКИ ПРИ ДИССИПАЦИИ ЭНЕРГИИ

Р.А. Бузунов, М.С. Петрищев, А.А. Сизова

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор В.М. Мусалимов

В работе рассматривается модельная задача связанных маятников при различных видах диссипации энергии. Проведен анализ динамики линейной системы, системы при вязком трении, модели Максвелла.

Введение

Колебаниями двух масс, соединенных упругой связью, описывается достаточно широкий класс объектов. В частности, моделью связанных маятников описывается поведение молекул ДНК и ряд других систем. Линейная задача имеет аналитическое решение, для исследования нелинейных моделей используются асимптотические методы или численное моделирование.

В данной работе рассмотрим линейную модель системы, модель вязкого трения и модель Максвелла. Сравним полученные результаты.

Модельная задача связанных маятников

Два однородных стержня длиной L и весом P каждый соединены на уровне h пружиной жесткости C , прикрепленной концами к стержням (рис. 1).

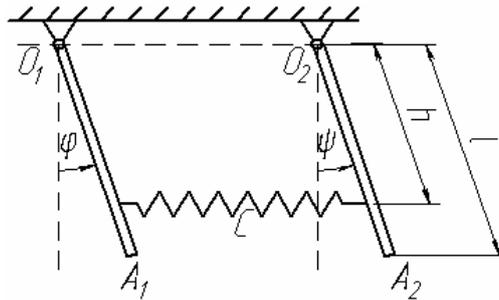


Рис. 1. Схема системы

Для составления уравнений движения рассматриваемой системы используем уравнение Лагранжа II рода. Для этого требуется выбрать обобщенные координаты и составить функцию Лагранжа. Уравнения движения определяются дифференцированием функции Лагранжа по соответствующей переменной.

Выберем в качестве обобщенных координат углы φ и ψ отклонения стержней от вертикали. Механическая система имеет две степени свободы, при составлении линейной модели будем пренебрегать силами трения в шарнирах. Так как силы тяжести и сила упругости пружины являются потенциальными, то потенциальная энергия системы равна

$$V = V_1 + V_2 + V_3,$$

где V_1 и V_2 – потенциальная энергия сил тяжести первого и второго стержня, V_3 – потенциальная энергия пружины.

$$V_1 = P \frac{l}{2} (1 - \cos \varphi) \cong \frac{Pl}{4} \varphi^2, \quad V_2 = P \frac{l}{2} (1 - \cos \psi) \cong \frac{Pl}{4} \psi^2.$$

Потенциальная энергия растянутой пружины при малых ее деформациях и малых углах отклонения стержней равна

$$V_3 = C \frac{h^2}{2} (\psi - \varphi)^2.$$

Таким образом,

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = \frac{Pl}{4}(\varphi^2 + \psi^2) + C \frac{h^2}{2}(\psi - \varphi)^2.$$

Найдем теперь кинетическую энергию системы T . Так как каждый из стержней вращается около неподвижной оси, то

$$T = T_1 + T_2 = \frac{J_{01}\dot{\varphi}^2}{2} + \frac{J_{02}\dot{\psi}^2}{2},$$

где $J_{01} = J_{02} = Pl^2/3g$, g – ускорение свободного падения. Следовательно,

$$T = \frac{Pl^2}{6g}(\dot{\varphi}^2 + \dot{\psi}^2).$$

Образуем функцию Лагранжа:

$$L = T - V = \frac{Pl^2}{6g}(\dot{\varphi}^2 + \dot{\psi}^2) - \frac{Pl}{4}(\varphi^2 + \psi^2) - C \frac{h^2}{2}(\psi - \varphi)^2.$$

Определив вид необходимых величин, составим уравнения Лагранжа II рода:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi} \equiv \frac{1}{3} \frac{Pl^2}{g} \ddot{\varphi} + \left(Ch^2 + \frac{1}{2} Pl \right) \varphi - Ch^2 \psi = 0, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\psi}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \psi} \equiv \frac{1}{3} \frac{Pl^2}{g} \ddot{\psi} + \left(Ch^2 + \frac{1}{2} Pl \right) \psi - Ch^2 \varphi = 0. \end{cases}$$

Вводя для краткости обозначения $\omega^2 = g/l$ и $x^2 = Ch^2/ml^2$, получаем

$$\begin{cases} \ddot{\varphi} + 3 \left(x^2 + \frac{\omega^2}{2} \right) \varphi - 3x^2 \psi = 0, \\ \ddot{\psi} - 3x^2 \varphi + 3 \left(x^2 + \frac{\omega^2}{2} \right) \psi = 0. \end{cases}$$

При соотношении $\frac{0,5\omega^2}{x^2} > 1$ и начальных условиях $\varphi = 0,1$ рад, $\psi = 0$ рад первый

маятник, обладая энергией, начинает передавать ее второму маятнику (рис. 2). Пружина тормозит первый маятник, но помогает двигаться второму, что обеспечивает передачу энергии между маятниками. После того, как колебания первого маятника затухли, второй совершает колебания с той же амплитудой, что и первый в начальный момент

времени. При тех же начальных условиях и при соотношении $\frac{0,5\omega^2}{x^2} < 1$ колебания маятников происходят в противофазе с биениями (рис. 3).

При начальных условиях $\varphi = \psi$ маятники колеблются в одинаковой фазе с одной и той же частотой и амплитудой, пружина не деформируется, можно считать, что маятники соединены жесткой связью. При $\varphi = -\psi$ колебания происходят в противофазе с постоянной амплитудой.

Вязкое трение. Для учета вязкого трения добавим в уравнения движения слагаемые $2\varepsilon\dot{\varphi}$ и $2\varepsilon\dot{\psi}$:

$$\begin{cases} \ddot{\varphi} + 3 \left(x^2 + \frac{\omega^2}{2} \right) \varphi - 3x^2 \psi + 2\varepsilon\dot{\varphi} = 0, \\ \ddot{\psi} - 3x^2 \varphi + 3 \left(x^2 + \frac{\omega^2}{2} \right) \psi + 2\varepsilon\dot{\psi} = 0. \end{cases}$$

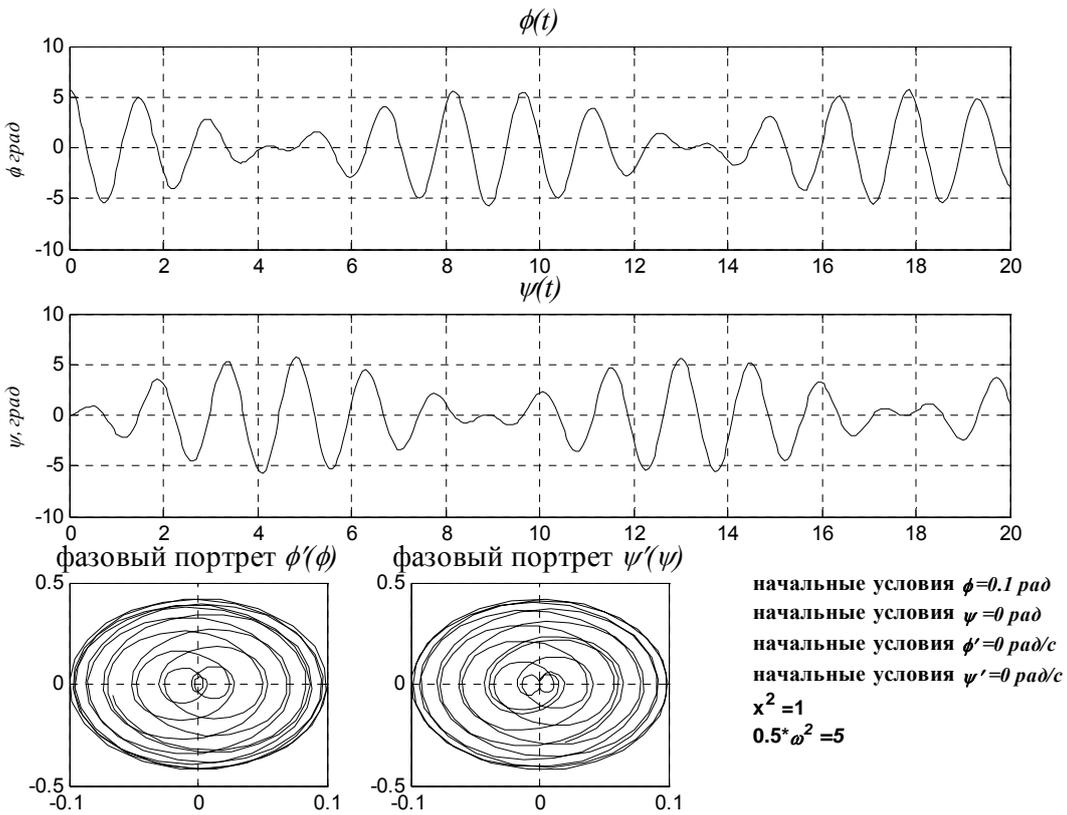


Рис. 2. Передача энергии от одного маятника к другому

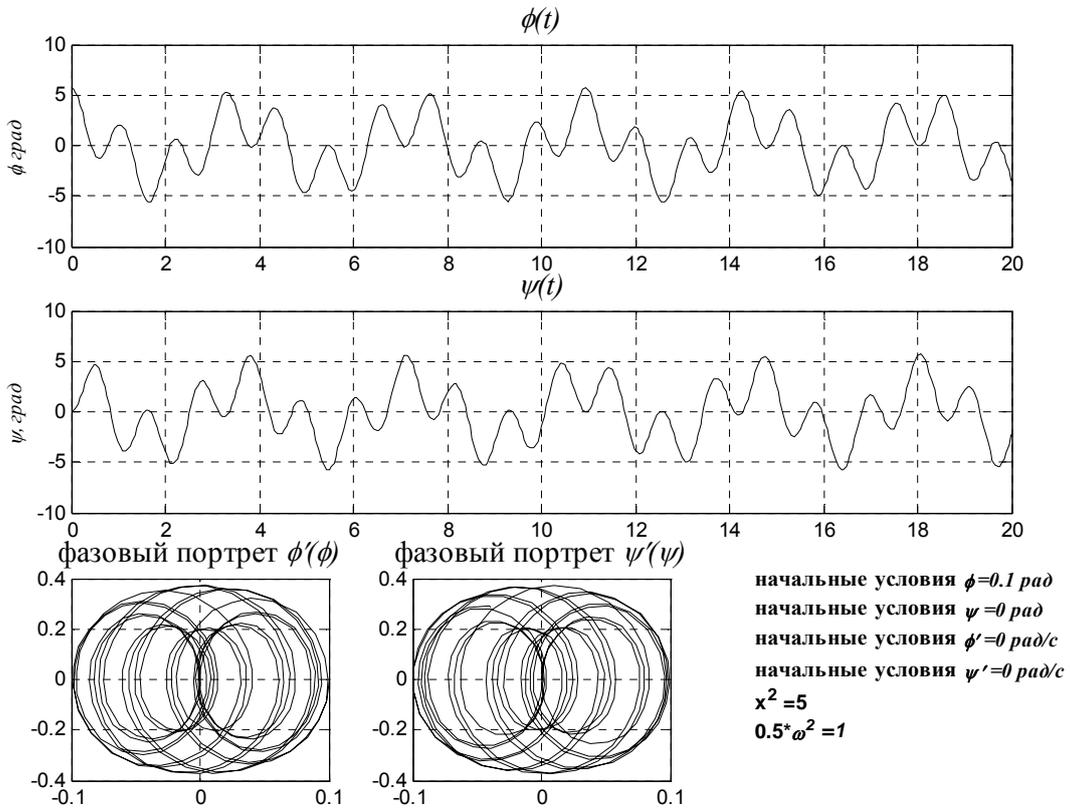


Рис. 3. Противофазные колебания связанных маятников

В случаях, когда начальные условия $\phi = \psi$ и $\phi = -\psi$, тип колебаний не изменяется, происходит их затухание. При $\phi = 0,1 \text{ рад}$, $\psi = 0$ и соотношении $\frac{0,5\omega^2}{x^2} < 1$ происхо-

дит затухание колебаний, причем амплитуда второго маятника примерно в полтора раза меньше амплитуды первого маятника (рис. 4). При тех же начальных условиях и соотношении $\frac{0,5\omega^2}{x^2} > 1$ амплитуда колебаний первого маятника падает вдвое, амплитуда второго маятника достигает своего максимального значения, но примерно в 7 раз меньше амплитуды первого маятника. Чем больше значение коэффициента вязкого трения, тем быстрее происходит затухание колебаний.

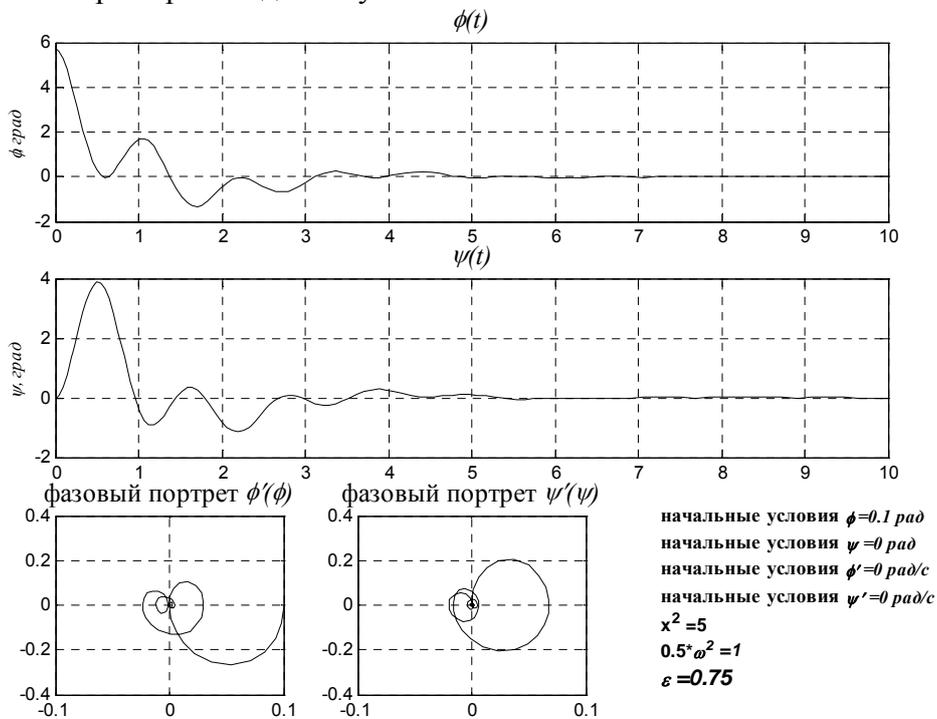


Рис. 4. Движение связанных маятников в случае вязкого трения

Модель Максвелла. В соответствии с моделью Максвелла соединим каждый из стержней с неподвижным основанием последовательно пружиной и демпфером (рис. 5).

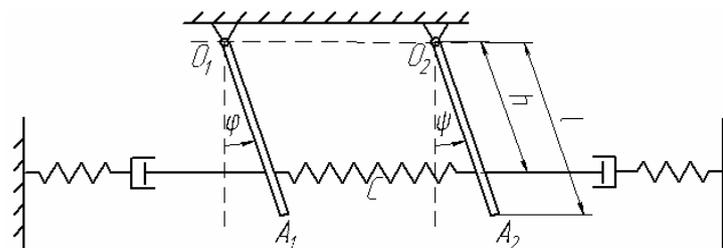


Рис. 5. Модель Максвелла

Введем коэффициент k , который устанавливает соотношение между пружинной жесткостью и коэффициентом демпфирования. Соответственно, добавим слагаемые в уравнения движения:

$$\begin{cases} \ddot{\phi} + 3\left(x^2 + \frac{\omega^2}{2}\right)\phi - 3x^2\psi + k \cdot \dot{\phi} \cdot \phi = 0 \\ \ddot{\psi} - 3x^2\phi + 3\left(x^2 + \frac{\omega^2}{2}\right)\psi + k \cdot \dot{\psi} \cdot \psi = 0 \end{cases}$$

При неравных начальных углах отклонения маятников их переход слева направо занимает меньше времени, чем справа налево. Чем больше коэффициент k , тем сильнее заметна эта тенденция (рис. 6).

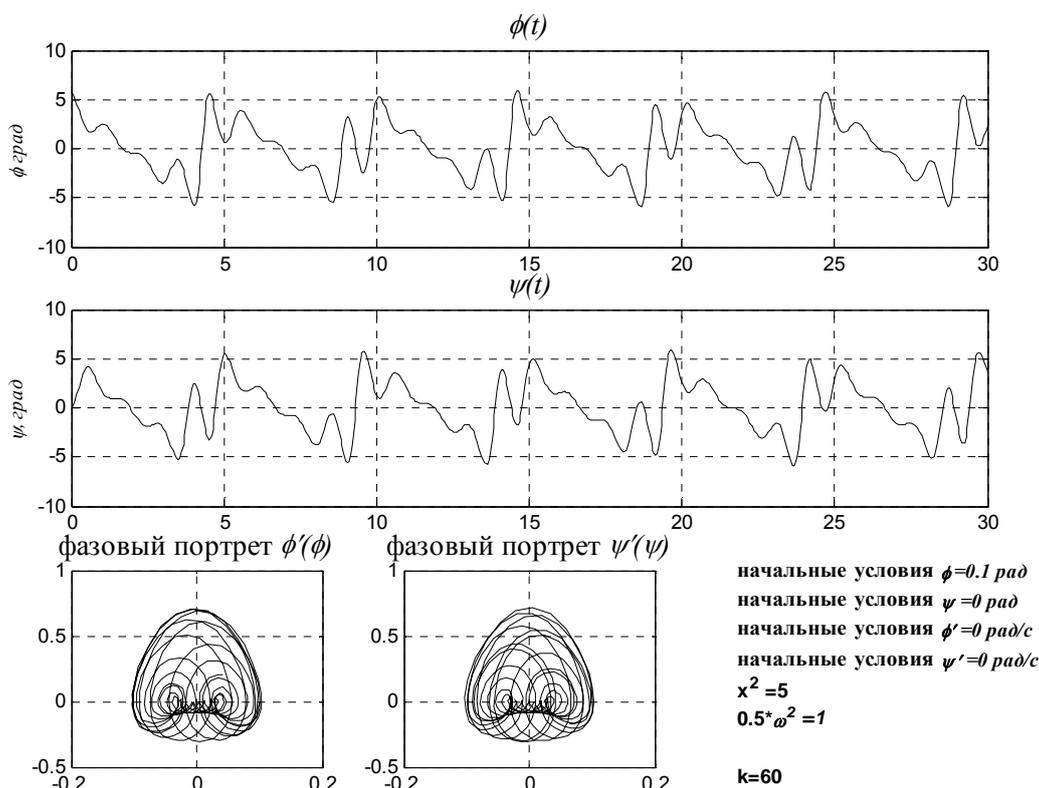


Рис. 6. Движение маятников в модели Максвелла

Заключение

Исследовано поведение системы связанных маятников при различных видах диссипации энергии. Рассмотрены линейная модель, система при вязком трении и модель Максвелла. Проведен сравнительный и качественный анализ динамики системы по результатам численного исследования в пакете Simulink системы Matlab. В случае линейной системы, которая представляется идеальной, процесс диссипации энергии отсутствует. При введении вязкого трения колебания затухают по экспоненциальному закону. Чем больше значение коэффициента вязкого трения, тем выше степень затухания колебаний. В модели Максвелла имеет место неравномерный процесс колебаний относительно нижнего положения равновесия маятников. Чем больше значение коэффициента, определяющего соотношение между пружинной жесткостью и коэффициентом демпфирования, тем более ярко выражена эта особенность.

Литература

1. Мусалимов В.М. Методические указания по курсу «Аналитическая механика». СПб: СПб ГИТМО(ТУ), 2002. 52 с.
2. Гульятев А. Визуальное моделирование в среде MatLab. Учебный курс. СПб: Питер-пресс, 2000. 432 с.
3. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в Matlab. Учебный курс. СПб: Питер; Киев: ВHV, 2005. 512 с.

МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ РЕЗОНАНСНЫЕ ДАТЧИКИ

Д.В. Король, М.С. Петрищев,

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор В.М. Мусалимов

В работе проводится обзор состояния микромеханических резонансных датчиков. Рассматриваются типовые колебательные схемы, приводятся примеры датчиков – микромагнитный датчик, микрогирроскоп и микроакселерометры.

Введение

Развитие науки и техники, появление новых технологий ужесточает требования к характеристикам и размерам измерительных приборов и датчиков. Микросистемная техника в настоящий момент является одним из наиболее динамично развивающихся междисциплинарных научно-технических направлений, определяющих новую революцию в области систем, реализуемых на микроуровне [1]. Наиболее яркими конструктивно-технологическими отличительными особенностями техники микросистем нового поколения являются:

- активное использование третьего измерения;
- интеграция электрических и оптических связей с механическими;
- интеграция физико-химических и технологических базисов микро- и биотехнологии;
- интеграция исполнительно-технологических и контрольно-диагностических в микрообъемах и на поверхности твердого тела.

По сравнению с обычными системами, микросистемы характеризуются малыми размерами и весом, повышенной надежностью, гибкостью технологии производства, меньшими стоимостью и энергопотреблением. Для общего представления о габаритах устройств, относящихся к микросистемам, вводят определенную шкалу размеров (рис. 1).

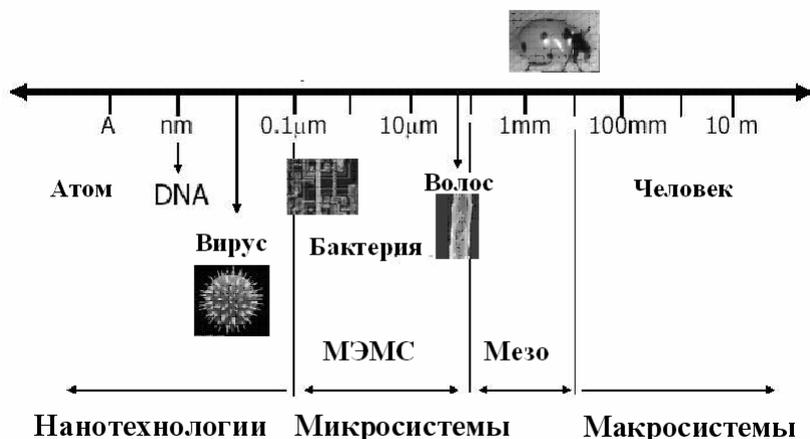


Рис. 1. Шкала размеров микросистем

Мировой стереотип изготовления микроэлектромеханических систем (МЭМС), наиболее развитого направления в области микросистемной техники, основан на широком использовании кремния – дешевого и доступного материала. Наибольшее значение имеют гибридные системы, в которых, наряду с кремнием и другими полупроводниковыми материалами, используются полимеры, керамика, металлы. В классической микроэлектромеханике, ориентированной на базовые кремниевые микротехнологии, в настоящее время господствует структура «кремний на диоксиде кремния». Микросистемы представляют собой сложные гетерогенные композиции, требующие сочетания совокупности разнородных материалов.

Механический резонанс и датчики на его основе

В настоящий момент ведется ряд работ по созданию датчиков на основе технологии микросистемной техники. Наиболее развитой областью является технология МЭМС. Принцип работы практически всех измерительных МЭМС-устройств основан на механическом резонансе. Индуцируют колебания чувствительного элемента с резонансной частотой, которая определяется свойствами материала и геометрии элемента. При действии измеряемого возмущения изменяется амплитуда и (или) фаза резонансных колебаний, по которым количественно оценивают действующее возмущение. Применение кремния и соединений на его основе позволяет создавать высокодобротные колебательные системы.

Для увеличения чувствительности параметры устройств выбирают таким образом, чтобы частота вынужденных колебаний по координате возбуждения совпадала с частотой собственных колебаний, а частота выходных колебаний была также близка к частоте вынужденных колебаний. В конструкции используют высокодобротные материалы, обладающие низкими внутренними потерями на трение. В этом случае осуществляется динамическая настройка прибора и происходит резонансное усиление сигнала.

Самыми простыми и наиболее часто используемыми структурами резонаторов являются (рис. 2) консоль (Beam), мост (Bridge) и диафрагма (Diaphragm), хотя возможны и иные схемы.

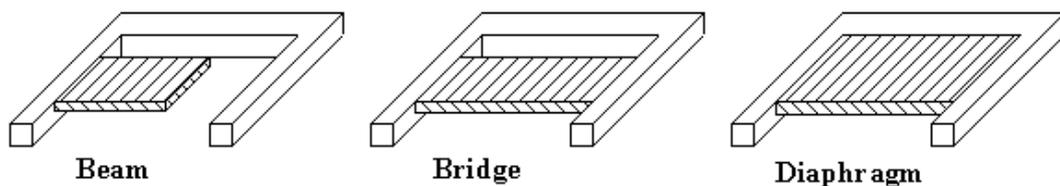


Рис. 2. Часто используемые структуры резонаторов

Можно организовывать колебания различных видов – изгибные, крутильные и растяжения-сжатия. Более сложные структуры могут использоваться с целью повышения чувствительности и добротности системы. Рассмотрим примеры проектирования микромеханических датчиков.

Датчик для измерения параметров магнитного поля. В работе [2] описан один из первых магнитных датчиков на базе МЭМС-технологий. Возбуждение резонатора (рис. 3) осуществляется силой Лоренца, произведенной переменным током, текущим через помещенную на поверхность вибратора катушку. Амплитуда вибрации преобразуется в электрический сигнал пьезорезисторами, расположенных также на резонаторе. Измерение магнитного поля осуществляется методом компенсации. Еще одна катушка помещена под резонатором. При измерении за счет введения обратной связи колебания резонатора компенсируются внешней катушкой. По току, подаваемому во внешнюю катушку, судят о величине действующего магнитного поля.

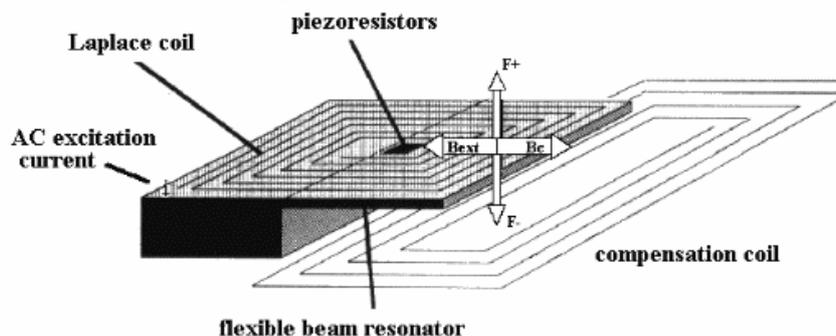


Рис. 3. Датчик для измерения параметров магнитного поля

Микромеханические гироскопы и акселерометры, изготавливаемые групповым методом на основе интегральной технологии, в силу малых энергомассовых характеристик (масса – доли грамма, энергопотребление – доли ватта) и низкой стоимости представляют большой интерес для различных областей техники.

Микрогироскоп. На рис. 4 представлены микрофотографии сложного варианта микрогироскопа колебательного типа [3].

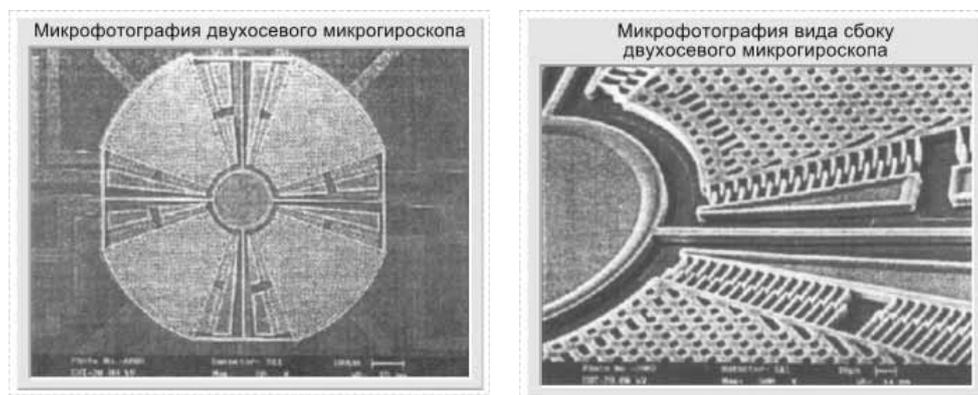


Рис. 4. Микрогироскоп

Резонирующая структура реализована при помощи технологии микромеханики с толстым поликремневым слоем. Микрогироскоп основан на угловой вибрации четырех плоскостей. Управляемое гребенкой вращательное тело наклоняется к каждой входной оси, параллельной подложке, и наклонное движение определяется по изменению емкости между нижним электродом и структурой. Резонансные частоты согласованы с помощью источника постоянного напряжения. Для максимизации силы Кориолиса используется масса толщиной 7 мкм и зазор 2 мкм гребенки. Размер структуры составил $0,9 \times 0,9 \text{ мм}^2$. Сила Кориолиса пропорциональна массе колеблющегося элемента, скорости колебаний и угловой скорости. Угол наклона, который пропорционален скорости, модулируется скоростью. Чтобы получить угловую скорость, выходной сигнал демодулируется. Для высокой чувствительности вибрационный гироскоп должен функционировать в сильном вакууме, поскольку Q-фактор (добротность) при нормальном атмосферном давлении очень низок.

Двухнаклонный режим дает возможность датчику определять угловую скорость по двум осям одновременно. В частности, структура использует простой балансирующий торсионный преобразователь для уменьшения собственной нелинейности сенсора емкостного типа. Из эксперимента получено эквивалентное поле шума 0.1%.

Другой микроколебательной системой, основанной на гироскопическом эффекте, является микроакселерометр.

Акселерометр с поступательным перемещением чувствительной массы. Микроакселерометр, представленный на рис. 5, относится к типу акселерометров с поступательным перемещением чувствительной массы [4]. Чувствительный элемент микроакселерометра представляет собой пластину толщиной 15 мкм и размерами в плоскости подвеса $0,5 \times 1,0 \text{ мм}^2$, подвешенную на четырех торсионах к неподвижной части. Микроакселерометр может работать по компенсационной схеме с обратной связью. Съем информации производится по дифференциальной схеме с помощью гребенчатого емкостного датчика перемещений. Датчиком силы в системе обратной связи является гребенчатый электростатический датчик. Система обратной связи микроакселерометра реализована на аналого-цифровой БИС.

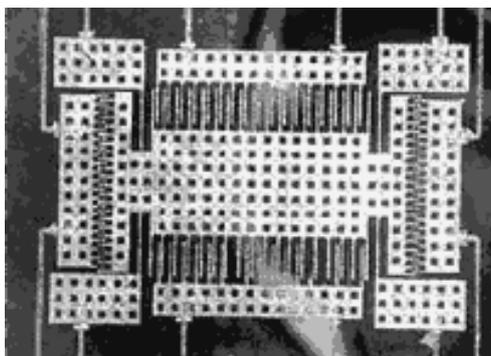


Рис. 5. Акселерометр с поступательным перемещением чувствительной массы

Акселерометр маятникового типа. Микроакселерометр, представленный на рис. 6, относится к акселерометрам маятникового типа [4]. Чувствительным элементом является маятник размерами $0,8 \times 1,0 \times 0,015 \text{ мм}^3$, изготовленный вместе с упругими торсионами по технологии «кремний на стекле». Съем информации производится с помощью емкостного датчика перемещений. Акселерометр может работать по схеме с обратной связью. Датчиком силы в системе обратной связи служит электростатический датчик силы. Одну из обкладок датчика составляет проводящий чувствительный элемент, а вторую – металлический слой, напыленный на стеклянное изолирующее основание.

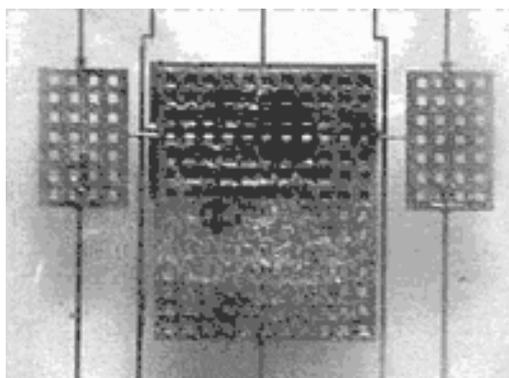


Рис. 6. Акселерометр маятникового типа

Заключение

МЭМС-технологии являются наиболее разработанными и технологичными для производства микродатчиков. Применение кремния и соединений на его основе позволяет создавать высокочастотные колебательные системы. Резонаторы различаются формой, схемой организации колебаний и схемой крепления чувствительного элемента. Они могут использоваться в различных устройствах, что, и представлено в данной работе. Дальнейшие работы в этой области направлены на улучшение технических характеристик датчиков.

Литература

1. Васильев А., Лучинин В., Мальцев П. Микросистемная техника. Материалы, технологии, элементная база. // Электронные компоненты. 2000. №4. С. 3–11.
2. Donzier E., Lefort O. Integrated magnetic field sensor. // Sensors and Actuators. 1991. A25–27. P. 357–361.
3. An S., Oh Y. S., Park K. Y., Lee S. S., Song C. M. Dualaxis microgyroscope with closed loop detection. // Sensors and Actuators. 1999. 73. P. 1–6.
4. Каталоги изделий фирмы ЗАО «Гирооптика» <<http://www.gyro.ru>>

СИЛЬФОН КАК ОБЪЕКТ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

И.М. Кудрявцева

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор В.М. Мусалимов

В статье построена передаточная функция сиффона, рассмотрены переходные характеристики собственно сиффонов с различными геометрическими параметрами, а также сиффонов в составе систем автоматического управления на примере схемы с пропорционально-интегральным (ПИ) регулятором.

Введение

Измерительные сиффоны, рассматриваемые в статье, используются в качестве чувствительных элементов различных приборов, например, в манометрах, манометрических термометрах, датчиках перемещения, в пневматической и гидравлической регистрирующей аппаратуре. В последнее время значительно возросла роль сиффонов, применяемых в составе различных датчиков автоматизированных систем управления. В статье показано, что и сам сиффон может выступать в качестве объекта управления, что позволяет получить измерительный прибор более высокого качества, повысить требования к его характеристикам, улучшить его работу в определенных режимах.

Ранее автором были исследованы статические и динамические характеристики изучаемых объектов, аналитическими методами была определена жесткость гофров сиффона и ее зависимость от геометрических параметров объекта, показано, как можно эффективно изменять его динамические характеристики, варьируя геометрические параметры и приложенную внешнюю нагрузку [1–3].

Построение передаточной функции сиффона

Представим изучаемый объект с геометрическими характеристиками по ГОСТ 21482-76 (см. рис. 1.а) в виде расчетной схемы, изображенной на рис. 1.б.

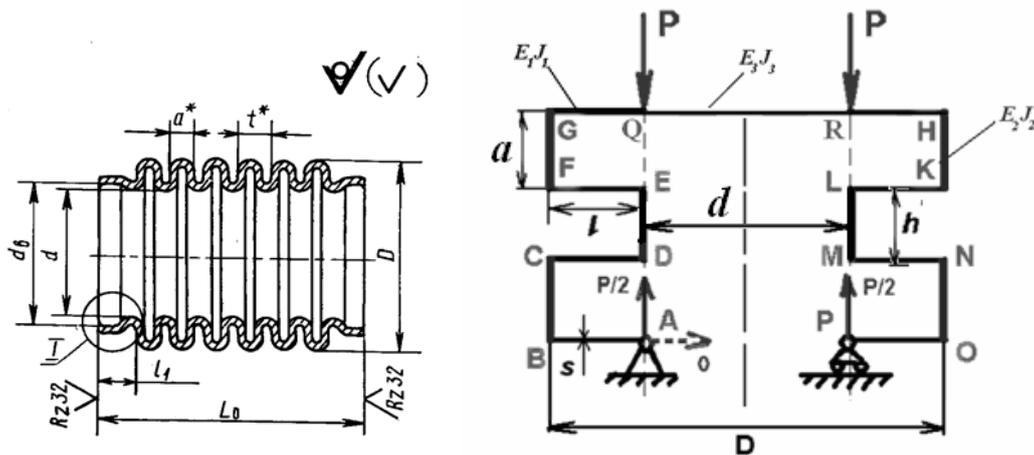


Рис. 1. а – геометрические параметры однослойных измерительных сиффонов по ГОСТ 21482-76; б – расчетная схема сиффонов

Возьмем в качестве объектов исследования данной статьи два сиффона с различными геометрическими параметрами (см. табл. 1).

Так как для упругой системы перемещение точки приложения силы прямо пропорционально силе, то дифференциальное уравнение малых колебаний расчетной конструкции, представленной на рис. 1.б имеет вид

$$\ddot{\Delta} + \omega_0^2 \cdot \Delta = A(x). \quad (1)$$

сильфон	D h15	d H15	дв H11	n	L ₀ ±IT17/2	l	l1 h14	t	a	s ₀ ±10%	Fэфф см ²
16x10x0.12	16	9.5	11.5	10	22.5	3.5	4.15	1.5	0.95	0.12	1.25
160x10x0.25	160	120.0	125.0	10	77.5	5.0	7.90	6.5	3.80	0.25	160.00

Таблица 1. Геометрические параметры объектов исследования

Здесь $\ddot{\Delta}$ – вторая производная по времени от перемещения Δ точки приложения силы, вычисляемого аналитическими методами по формуле

$$\Delta = \frac{12n(P_1 + P_2)}{E} \left(\int_0^{\frac{D-d}{2}} \frac{x^2}{s^3 \cdot (2\pi x + \pi d)} dx + \frac{1}{4E\pi D s^3} \int_0^a (D-d)^2 dx + \int_0^{\frac{D-d}{2}} \frac{\left(\frac{D-d}{2} - x\right)^2}{s^3 \cdot (-2\pi x + \pi d)} dx \right); \quad (2)$$

$$\omega^2 = \frac{C}{m} \quad (3)$$

– частота собственных колебаний системы;

$$C = \frac{P}{\Delta} \quad (4)$$

– жесткость элемента сильфона; m – масса нагружения ($P = m \cdot 9.807 H$); P – сила нагружения (см. рис.1б); $P_1 = P_2 = P$; n – число гофров сильфона; E – модуль Юнга материала сильфона, $E = 2 \cdot 10^6$ МПа; D – внешний диаметр сильфона; d – внутренний диаметр сильфона; s – толщина сильфона; a – наружный радиус гофров.

сильфон	ГОСТ		расчет			
	$\Delta_{x \max}$, мм	C, Н/мм	C, Н/мм	P _{max} , Н	m _{max} , кг	ω_0 , Гц
16x10x0.12	2,3	91-169	154,4	70	7,14	65,311
160x10x0.25	23,5	51,75-86,25	79,12	370,9	37,821	20,427

Таблица 2. Рассчитанные параметры сильфонов

Используя формулу (4), рассчитаем максимально допустимую нагрузку на изучаемые сильфоны, используя для этого значение его максимального перемещения $\Delta_{x \max}$, указанное в ГОСТ 21482-76. Значения жесткости C , максимально допустимой нагрузки P_{\max} и m_{\max} , частоты собственных колебаний ω_0 представлены в табл. 2. Например, для сильфона 16×10×0.12 зависимость частоты собственных колебаний от приложенной нагрузки представлена на рис. 2.

Передаточная функция описывает свойства системы от входа к выходу в алгебраической форме и в общем виде может быть представлена уравнением

$$W(p) = \frac{B(p)}{A(p)}, \quad (5)$$

где

$$B(p) = b_{n-1}p^{n-1} + b_{n-2}p^{n-2} + \dots + b_0; \quad (6)$$

$$A(p) = p^n + a_{n-1}p^{n-1} + \dots + a_0. \quad (7)$$

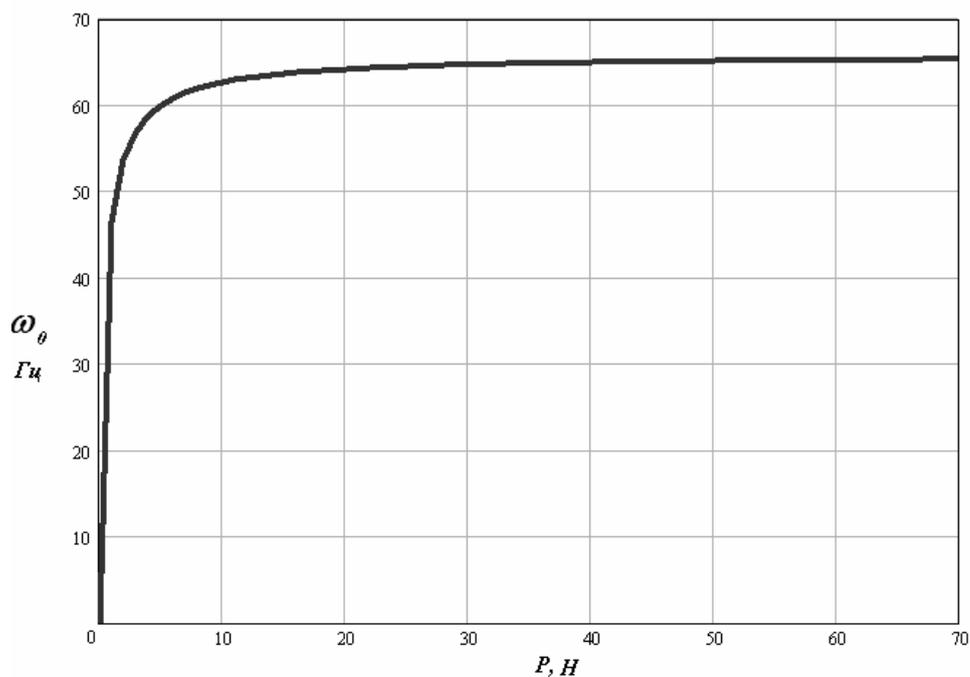


Рис. 2. Зависимость частоты собственных колебаний сифона от приложенной нагрузки P_1 для сифона 16x10x0,12 по ГОСТ 21482-76

Исследуем колебательные процессы, протекающие в рассматриваемых сифонах при действии на них единичной ступенчатой внешней нагрузки (см. рис. 3)

$$1(t - \tau) = \begin{cases} 1, & t > \tau \\ 0, & t \leq \tau \end{cases} \quad (8)$$

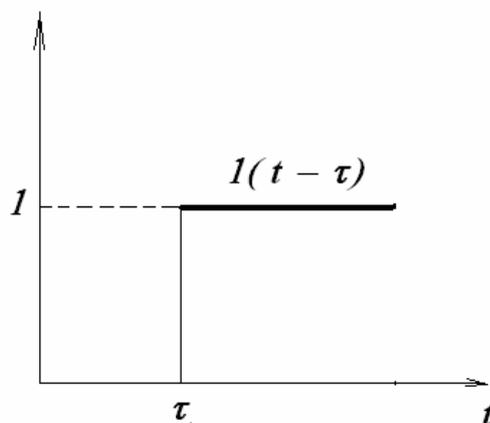


Рис. 3. Единичная ступенчатая внешняя нагрузка

Для конструкции, представленной на рис. 1.б, с уравнением колебаний (1) передаточная функция (5) принимает вид

$$W(p) = \frac{1}{p^2 + \omega_0^2} \quad (9)$$

В реальном сифоне всегда присутствуют несовершенства, которые оказывают влияние на его динамические характеристики, а именно – обуславливают появление вязкости. Уравнение малых колебаний (1) и передаточная функция (9) для сифона с демпфированием в этом случае принимают вид

$$\ddot{\Delta} + 2\xi\omega_0 \cdot \dot{\Delta} + \omega_0^2 \cdot \Delta = A(x); \quad (10)$$

$$W(p) = \frac{1}{p^2 + 2\xi\omega_0 p + \omega_0^2}, \quad (11)$$

где ξ – относительный коэффициент затухания.

Исследование переходной характеристики сиффонов в системе MATLAB

Промоделируем рассматриваемый процесс в пакете расширения Simulink системы MATLAB (смотри рис. 4). Блок Step задает входной сигнал – единичный скачок. Блок LTI System представляет собой передаточную функцию звена. Для визуализации результатов моделирования используется блок Scope (осциллограф).

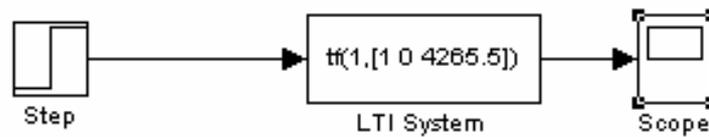


Рис. 4. Моделирование колебаний в системе MATLAB. Передаточная функция tf сиффона 16x10x0,12 по ГОСТ 21482-76 при частоте собственных колебаний ω_0

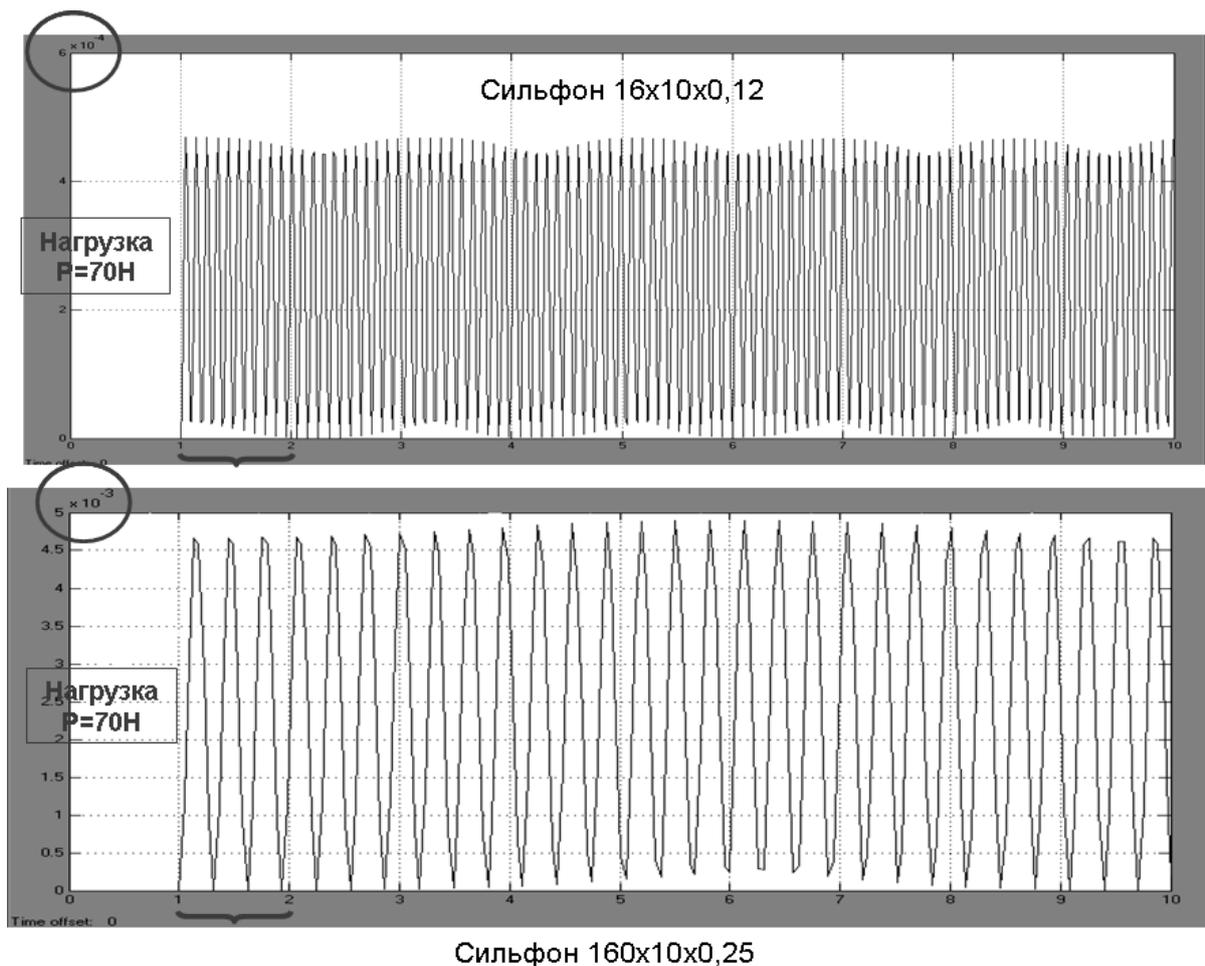


Рис. 5. Переходная характеристика изучаемых сиффонов

Переходная характеристика сильфонов, снятая с блока Score, представлена на рис. 5. Из этого рисунка видно, что отклик идеального сильфона на единичную ступенчатую внешнюю нагрузку представляет собой процесс незатухающих гармонических колебаний, причем сильфоны с различными геометрическими параметрами имеют переходную характеристику, отличающуюся как по амплитуде, так и по фазе колебаний.

Система с передаточной функцией (11) имеет переходную характеристику, представленную на Рис.6. Если сравнить ее с характеристикой того же сильфона, но без демпфирования (см. рис. 5), то можно обнаружить, что колебательный процесс стал затухающим, а частота колебаний не изменилась. Таким образом, относительный коэффициент затухания ξ влияет на переходную характеристику сильфона. Чем больше ξ , тем быстрее происходит уменьшение амплитуды колебаний.

При проектировании измерительного прибора с заданными параметрами чувствительного элемента можно подбирать подходящий для конкретной задачи сильфон, но так же можно менять параметры переходной характеристики конкретного сильфона, оснащая его системой автоматического управления.

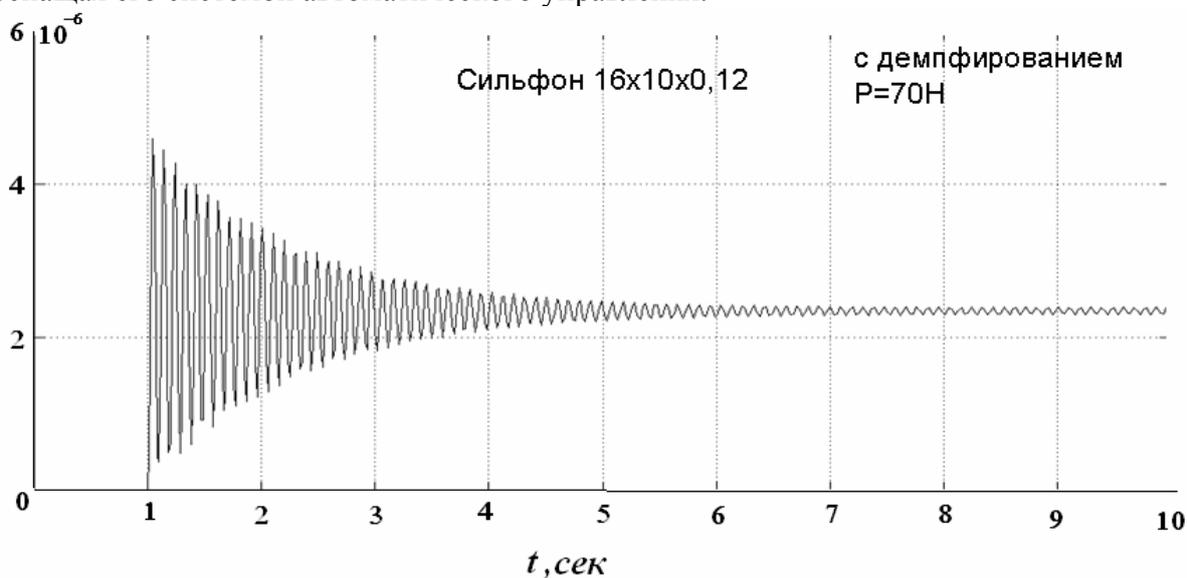


Рис. 6. Переходная характеристика сильфона 16x10x0,12 по ГОСТ 21482-76 с демпфированием

Исследование переходных характеристик сильфона как объекта регулирования

Построим систему автоматического управления, содержащую пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор, объектом регулирования которой будет являться сильфон. Для этого введем в рассматриваемую схему, представленную на рис. 4, несколько дополнительных блоков, а именно:

- регулятор, в состав которого входят последовательно соединенные пропорциональное звено с коэффициентом передачи K_{int} и интегрирующее звено с ограничением выходного сигнала - Limited integrator;
- контур обратной связи и звено сравнения Sum;
- блок задержки сигнала Transport Delay.

Контролируемым сигналом является реакция системы на единичный скачок, а настраиваемым (оптимизируемым) параметром – коэффициент K_{int} . На переходную функцию накладываются следующие ограничения:

- 1) максимальное перерегулирование (максимальная величина, на которую переходная характеристика превышает установившееся значение) – не более 10%;

- 2) время нарастания (время до момента, когда переходная характеристика впервые достигает величины установившегося значения) – не более 5 с;
- 3) длительность переходного процесса (время до момента, когда реакция на ступеньку попадает в полосу отклонений от допустимого значения) – не более 15 с.

Зададим начальные значения параметров: $K_{int} = 0,3$; ω_0 – собственная частота сильфона; $Zeta = 0,011$ – коэффициент затухания.

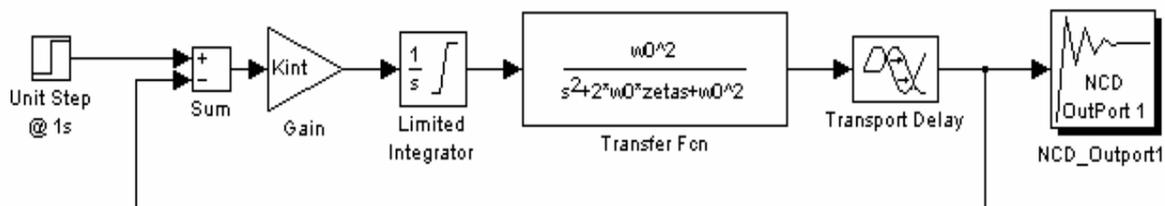


Рис. 7. Моделирование колебаний в системе MATLAB. ПИ-регулятор

Кривая 1 на рис. 8 представляет собой переходную характеристику сильфона $16 \times 10 \times 0,12$ при заданных начальных параметрах системы. Данная кривая не удовлетворяет заданным нами ограничениям. В частности, время нарастания характеристики превышает допустимое – 5с. Кривая 2 представляет собой оптимизированную переходную характеристику того же сильфона при неизменных начальных условиях.

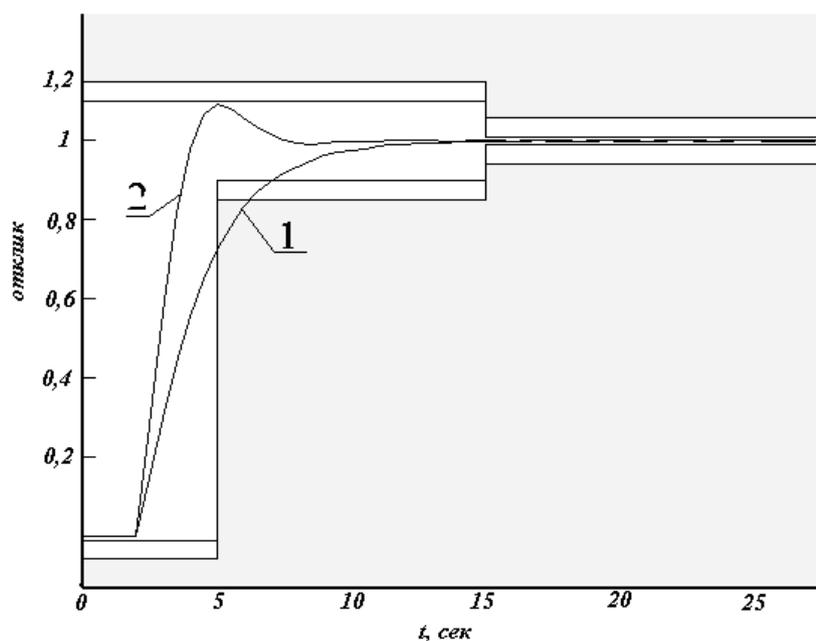


Рис. 8. Оптимизация параметра K_{int} ПИ-регулятора

Оптимальное значение коэффициента K_{int} равно 0,5699. Для сравнения: при тех же ограничениях для сильфона $160 \times 10 \times 0,25$ оптимальным будет $K_{int} = 0,4069$.

На рис. 9 представлен вид переходной характеристики сильфона $16 \times 10 \times 0,12$ в составе системы автоматического управления при оптимизированных параметрах. Если сравнить ее с характеристикой того же сильфона, представленной на рис. 6, то можно заметить, что добавление системы управления позволило существенным образом изменить ее вид (амплитуда, частота и скорость затухания) при неизменных начальных условиях (внешней нагрузке и т.д.).

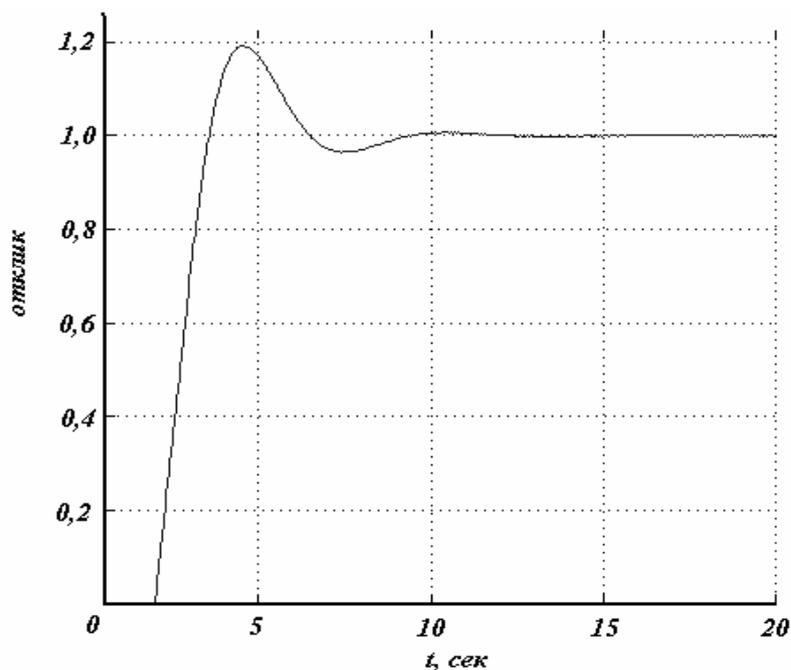


Рис. 8. Переходная характеристика сильфона 16x10x0,12 при оптимизированных параметрах регулятора

Заключение

В статье построены передаточные функции для отдельного сильфона без демпфирования и с демпфированием, а также для сильфона как объекта системы управления с ПИ-регулятором. Рассмотрены переходные характеристики объектов с данными передаточными функциями. Для этого проведено их моделирование в пакете расширения Simulink системы MATLAB.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что переходные характеристики реальных сильфонов представляют собой процесс затухающих со временем колебаний с постоянной частотой, зависящей как от внешней нагрузки, так и от параметров самого объекта. Вид переходной характеристики сильфона можно существенным образом изменить, если применять его в приборе совместно с системой управления. Для этого ее нужно предварительно настроить, исходя из необходимых проектировщику параметров чувствительного элемента измерительных приборов, что позволит повысить требования к их характеристикам и улучшить их работу в определенных режимах.

Литература

1. Кудрявцева И.М. Расчет надежности сильфонов с различными геометрическими несовершенствами / Программа и тезисы докладов Седьмой сессии международной научной школы «Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов», СПб, 24–28 октября 2005 г. СПб: СПбГУИТМО, 2005. С.111.
2. Кудрявцева И.М. Динамика сильфона, работающего в резонансном режиме. / Сборник научных трудов II Межвузовской конференции молодых ученых СПб ГУ ИТМО. С-Пб: СПбГУ ИТМО, 2005. Т.2. С. 8–12.
3. Кудрявцева И.М. Аналитическое определение жесткости гофров сильфона. / Сборник научных трудов II Межвузовской конференции молодых ученых СПб ГУ ИТМО. СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. Т.2. С. 23-29.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ ПАРАМЕТРОВ ИСХОДНОГО КОНТУРА ДЛЯ НАРЕЗАНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС С НЕСИММЕТРИЧНЫМ ПРОФИЛЕМ

Д.А. Фролов

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Б.П. Тимофеев

В работе приведены рекомендации по выбору параметров исходного контура и коэффициентов смещения зубчатой передачи, составленной из колес с несимметричным профилем зубьев, при расчете стандартными методами ГОСТ 16532-70 [1].

Введение

В настоящее время все большее распространение получают зубчатые передачи, составленные из колес с несимметричным профилем зубьев. Эта тенденция особенно явно прослеживается в авиационной промышленности. В работах [2] и [3] показан опыт применения подобных передач в планетарном редукторе воздушного винта авиационного турбовинтового двигателя ТВ7-117 самолета Ил-114. При проектировании зубчатых передач здесь использовалась теория эвольвентного зацепления в обобщающих параметрах. При проектировании зубчатых передач в обобщающих параметрах, согласно Вулгакову [4], производящий контур появляется на завершающем этапе проектирования, исходя из свойств зацепления. В данной работе выбран метод проектирования при помощи стандартизованных методов расчета. Исходный контур соответствует стандартному по высотным параметрам, при этом углы профиля задаются из условия оптимальной долговечности передачи. Используемый метод – от инструмента к изделию. В работе приведены рекомендации по выбору параметров исходного контура и коэффициентов смещения зубчатой передачи, составленной из колес с несимметричным профилем зуба при расчете стандартными методами ГОСТ 16532-70 [1].

Зубчатые колеса с несимметричным профилем используются тогда, когда нагрузка в прямом и обратном направлении вращения различна, либо рабочая нагрузка на одном профиле значительно выше, чем на другом, либо нагрузка одинакова, но один из профилей используется в течение существенно более длительного периода времени. И в том, и в другом случае несимметричный зуб может обеспечить одинаковый срок службы по обеим сторонам. Главная выгода от применения несимметричных зубьев состоит в повышении контактной прочности по мере увеличения угла профиля.

Рекомендации по выбору исходного контура

Рассмотрим (рис. 1) исходный контур, положенный в основу инструмента для нарезания колес с несимметричным зубом по методу обката.

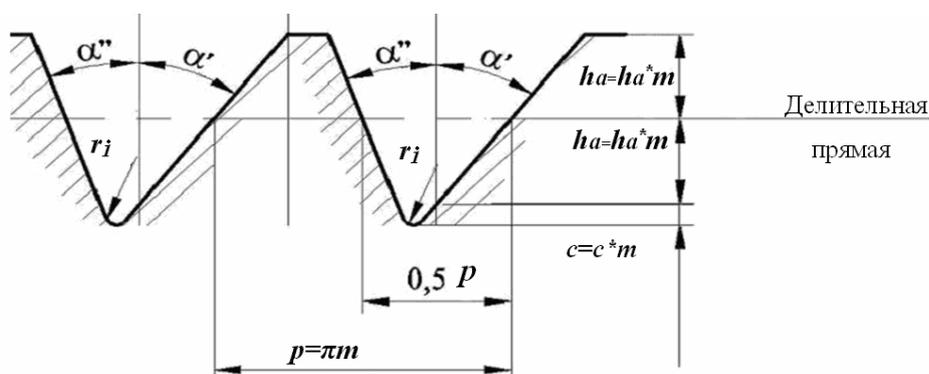


Рис. 1. Исходный контур для несимметричных зубьев

На рис. 1: α', α'' – углы профилей, равные 38° и 20° соответственно; p – шаг; r_i^* – коэффициент радиуса скругления зуба впадины исходного контура; h_a^* – коэффициент высоты головки; h_{*1} – коэффициент граничной высоты, c^* – коэффициент радиального зазора.

За основу для проектирования взят исходный контур по ГОСТ Р50531-93 [5], в котором переходные кривые являются частью одной и той же окружности, ибо при закруглении зуба червячной фрезы увеличивается стойкость инструмента и повышается прочность зубьев нарезаемого колеса [6].

При проектировании контура используются высотные параметры исходного контура, регламентируемые ГОСТ 13755-81, т.е. $h_a^* = 1,0$; $h_{*1} = 2,0$; $c^* = 0,25$. Их целесообразность подтверждена многолетней практикой. В работе [7] говорится, что, уменьшая радиальный зазор в зацеплении, можно увеличить коэффициент перекрытия. Однако следует учитывать, что радиальный зазор – дренажное отверстие, через которое проходит поток масла, охлаждающий зубья зубчатых колес, и в которое попадает масло с их рабочих поверхностей [3]. Уменьшение радиального зазора может быть целесообразным при рассмотрении конкретных условий работы передачи – виде смазки, скорости, нагрузки, температуры масла и т.д. Без учета этих конкретных условий рекомендовать уменьшение коэффициента радиального зазора, с нашей точки зрения, нельзя.

При выборе углов профиля исходного контура следует учитывать, что увеличение угла профиля зуба α на стороне, испытывающей большую нагрузку, как и увеличение угла наклона зуба β , ведет к уменьшению действующих контактных напряжений в зубчатых передачах. При этом для разных углов β минимальные контактные напряжения действуют при различных углах α . Необходимо также учесть, что допускаемые контактные напряжения для передач также меняются при изменении α и β . Таким образом, нужно не только подобрать такие α и β , при которых действующие контактные напряжения будут минимальными, но и обязательно проверить, чтобы эти напряжения были меньше допускаемых. Для каждой зубчатой передачи оптимальное значение углов α и β различно. Однако для большинства передач общего назначения значение угла α находится около 40° [8].

Влияние коэффициента смещения

Рассмотрим теперь влияние коэффициента смещения на профиль несимметричного зуба при $\beta=0^\circ$ и $\alpha' = 38^\circ, \alpha'' = 20^\circ$.

Из табл. 1 видно, что с увеличением коэффициента смещения увеличивается толщина зуба на делительной окружности, уменьшается толщина зуба на окружности вершин зубьев, уменьшается радиус впадин зубчатого колеса, растут радиусы кривизны эвольвент, очерчивающих боковые поверхности зубьев, уменьшаются радиусы переходной кривой у основания зубьев, увеличивается толщина у основания зуба и, как следствие, уменьшается подрезание зубьев. При $z=9$ заострение зуба происходит при всех рассмотренных x . С увеличением коэффициента смещения происходит уменьшение высоты головки зуба. При $z=37$, как видно из рис. 2, заострения зуба не происходит даже при коэффициенте смещения $x=+0,5$.

Из табл. 1 явно видно, что переходная поверхность, получаемая при зубофрезеровании, ступенчатая.

На рис. 2 представлена пара колес, находящихся в зацеплении, нарезанная фрезой, в основу которой положен исходный контур, представленный на рис. 1. Параметры колес передачи следующие: числа зубьев шестерни $z_1 = 14$, колеса $z_2 = 25$, угол наклона зубьев $\beta = 15^\circ$. Все обозначения по ГОСТ 16530-70 и ГОСТ 16531-70 [4].

Коэффициент смещения	Форма зуба при $z=9$	Форма зуба при $z=37$
$x=-1$		
$x=-0.5$		
$x=-0.3$		
$x=0$		
$x=+0.3$		
$x=+0.5$		

Таблица 1. Влияние коэффициента смещения на форму зуба

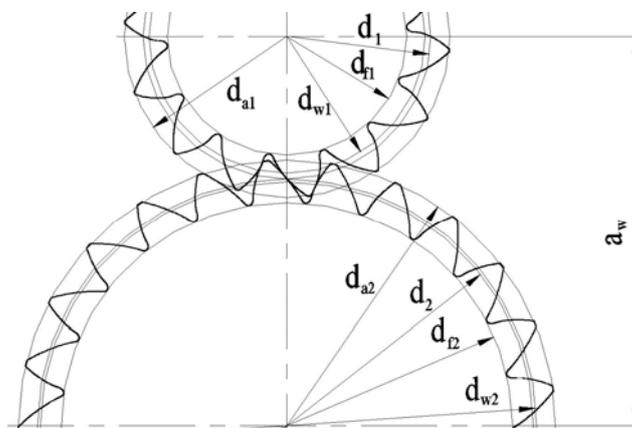


Рис. 2. Торцовое сечение двух сопряженных зубчатых колес внешнего зацепления с несимметричными профилями зубьев

Здесь также нужно заметить, что увеличение коэффициентов смещения x_1 и x_2 ведет к уменьшению контактных напряжений. При этом увеличение x_1 и x_2 эффективно только в диапазоне от 0 до 0,2–0,25. Эффективность дальнейшего роста x_i резко снижается. Кроме того, применение коэффициентов смещения в диапазоне от 0 до 0,2–0,25 эффективно только при углах $\alpha < 30^\circ$. При подборе углов профиля необходимо произвести исследования на отсутствие подрезания и заострения зубьев, отсутствие интерференции, а также произвести проверку по коэффициенту перекрытия. При исследовании зубчатых колес с несимметричными профилями зубьев коэффициент наименьшего смещения достаточно определить для стороны зуба с меньшим углом профиля [9].

Литература

1. ГОСТ 16530-83, ГОСТ 16531-83, ГОСТ 16532-70, «Передачи зубчатые», М., 1983.
2. Вулгаков Э.Б., Капелевич А.Л. Редуктор авиационного турбовинтового двигателя ТВ7 – 177. // Вестник машиностроения. 2000. № 11. С. 13–17.
3. Вулгаков Э.Б. Новое поколение эвольвентных зубчатых передач. // Вестник машиностроения. 2004. №1. С.3-6.
4. Вулгаков Э.Б. Теория эвольвентных зубчатых передач. М.: Машиностроение, 1995. 320 с.
5. ГОСТ Р 50531-93 «Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные. Исходные контур высоконапряженных передач».
6. Калашников С.Н., Калашников А.С. Зубчатые колеса и их изготовление. М.: Машиностроение, 1983. 264 с., ил.
7. Волюшко Ю.С. Роль радиального зазора в зубчатой передаче. // Вестник машиностроения. 1967. №2. С.28–30.
8. Тимофеев Б.П., Кириченко А.И. Расчет долговечности зубчатых передач, составленных из колес с несимметричным профилем зубьев. / В кн. Труды Шестой сессии международной научной школы «Фундаментальные и прикладные проблемы теории точности процессов, машин, приборов и систем». Часть 2 / Под редакцией д.т.н., проф. В.М. Мусалимова и к.т.н., проф. Б.С.Падуна. СПб: ИПМаш РАН, 2003. 172 с. С. 70–74.
9. Тимофеев Б.П., Фролов Д.А. Отыскание параметров колес с несимметричными профилями зубьев обеспечивающих отсутствие заострения и подрезания. / В кн. Современные направления приборостроения, информационных и гуманитарных наук. Сборник научных трудов / Под. ред. В.Л. Ткалич. Т.2. СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. 328 с. С. 3–7.

ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРЕМЕННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ РАДИУСА ВДОЛЬ ОСИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ В ЦЕХОВЫХ УСЛОВИЯХ

С.Ю. Млокосевич

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Б.П. Тимофеев

В работе рассматриваются наиболее распространенные средства измерения переменной составляющей радиуса крупногабаритных валов вдоль оси (отклонения профиля продольного сечения) в цеховых условиях. Приводятся отличительные характеристики различных систем измерения, области их применения.

Введение

Переменная составляющая размера (диаметра) вала вдоль оси служит для характеристики отклонения формы профиля продольного сечения, в частности, бочкообразности, конусообразности, седлообразности и др., и является компонентом отклонения от цилиндричности. Наиболее актуальна задача измерения и контроля профиля продольного сечения для валов прокатных станков и бумагоделательных машин, пятивалковых мельниц.

Средства измерения

Чаще всего в цеховых условиях для контроля и измерения формы профиля продольного сечения используют следующие способы:

- измерение в центрах (центрах детали, на шарах и т.п.) – одноточечное (одна точка контакта между измерительной системой и поверхностью детали);
- измерение скобами (в том числе пассаметрами) – двухточечное;
- измерение «тележками» (двухточечное);
- измерение встроенными средствами станка (двухточечные измерения, реализованы на вальцешлифовальных станках Hercules Maschinenfabrik GmbH, Waldrich Siegen и др.);
- RollCal – двух- и четырехточечные измерительные системы;
- RON-Pilot™ – девятиточечные приборы.

Измерения в центрах

Измерение в центрах (рис. 1) – наиболее простой и доступный способ. Для его реализации контролируемая деталь должна иметь центровые отверстия подходящей степени точности. Если прогиб детали оказывает значительное влияние на результат измерений, например вследствие переменной жесткости (как у коленчатых валов), ось вращения размещают вертикально.

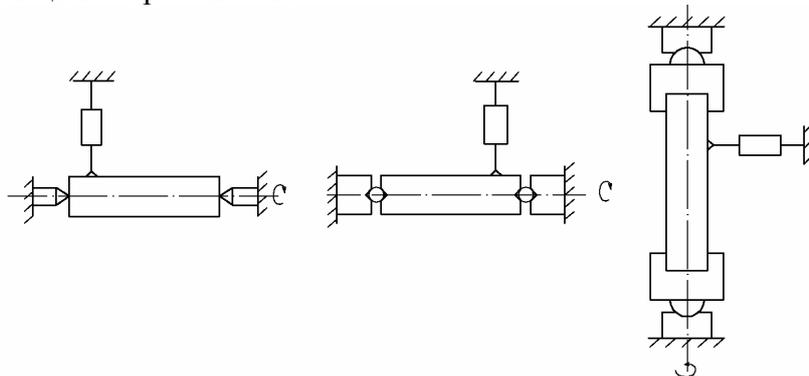


Рис. 1. Измерения в центрах

Метод не может использоваться для деталей большой длины.

Часто этот метод используется для измерения деталей конусообразности: датчиком измеряется биение со стороны, обратной положению инструмента. Конусообразность равна половине полученной величины.

Измерения при помощи скоб

Измерение профиля продольного сечения при помощи микрометрических скоб и пассаметров часто используется непосредственно на станке для контроля отклонения размера вдоль оси и проверки его абсолютной величины.

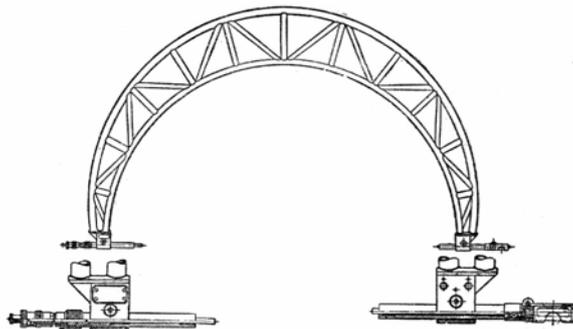


Рис. 2. Микрометрическая скоба завода «Калибр»

Измерение выполняется быстро, в нескольких сечениях и не требует каких-либо дополнительных действий. Для удобства работы скобу оснащают дополнительной опорой между измерительными точками.

С увеличением размера контролируемой поверхности точность результата падает, изготовление скобы и работа с ней становятся все более сложной задачей.

Измерение при помощи «тележек»

Измерение формы крупногабаритных деталей вдоль оси чаще всего осуществляют с помощью модернизированных скоб на роликах, напоминающих тележку. Такие приборы опускаются сверху на деталь и прокатываются вдоль ее оси.



Рис. 3. «Тележки» для измерения бочкообразности

Приборы этой группы просты в эксплуатации, как следствие – надежны и относительно недороги. Однако они не учитывают погрешность формы отдельных сечений (некруглость и волнистость), что снижает точность результата.

Постоянно ужесточающиеся требования по производительности и точности вынудили производителей оснастить станки измерительными системами.

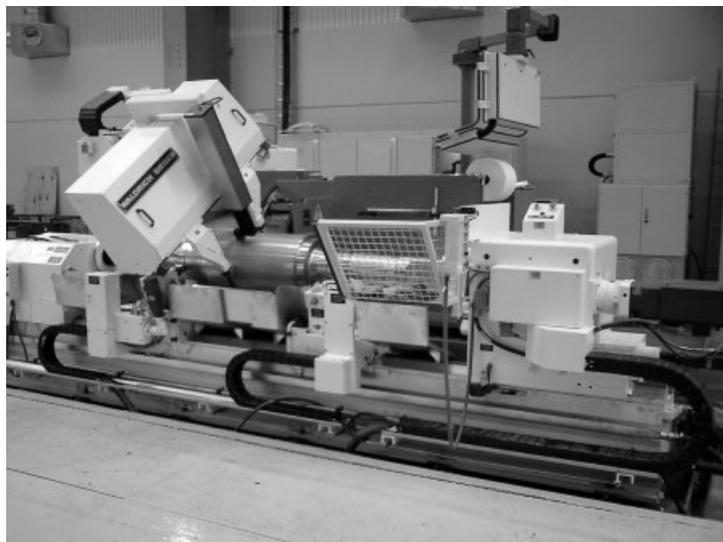


Рис. 4. Вальцешлифовальный станок Waldrich Siegen ProfiGrid 600

Главная их отличительная особенность – в том, что измерения проводятся непосредственно во время обработки. ЧПУ станка управляет инструментом по результатам текущих измерений, формируя необходимую продольную форму детали.

Измерительные системы RollCal



Рис. 5. Измерительная система RollCal-2

Финская фирма RollTest Oy значительное внимание уделяет измерению и контролю формы валков бумагоделательных машин и прокатных станков. Первая двухточечная измерительная система RollCal Classic была выпущена достаточно давно и установлена в 17 странах мира. Принцип измерения не отличается от обычных двухточечных скоб,

однако он автоматизирован: все необходимые перемещения осуществляются средствами измерительной системы, которая встраивается в станок. Результаты измерения выводятся на встроенном компьютере.

Главным недостатком данной измерительной системы (помимо высокой стоимости и достаточно сложной конструкции) является ее нечувствительность к нечетным составляющим отклонений формы поперечных сечений (трехгранности, пятигранности и т.д.), что существенно ограничивает возможности по измерению отклонений от круглости отдельных сечений. Этот недостаток был впоследствии уменьшен в приборах RollCal-2TM и RollCal-3TM введением двух дополнительных точек контакта (у RollCal-2TM две точки контакта подвижны (измерительные преобразователи) и две неподвижны (опоры), у RollCal-3TM – четыре подвижные точки контакта).

Приборы серии RON-PilotTM

Приборы серии RON-PilotTM являются разработкой отечественной фирмы «Техномаш». С их помощью можно проводить измерение и контроль отклонений формы цилиндрических деталей непосредственно на станке. При этом разделяются отклонения формы вдоль оси детали и в поперечном сечении.

Габариты деталей (длина и диаметр) практически не ограничены, измерения производятся непосредственно на станке. Прибор легко переставляется со станка на станок. Результаты измерений выводятся на портативный компьютер прибора.

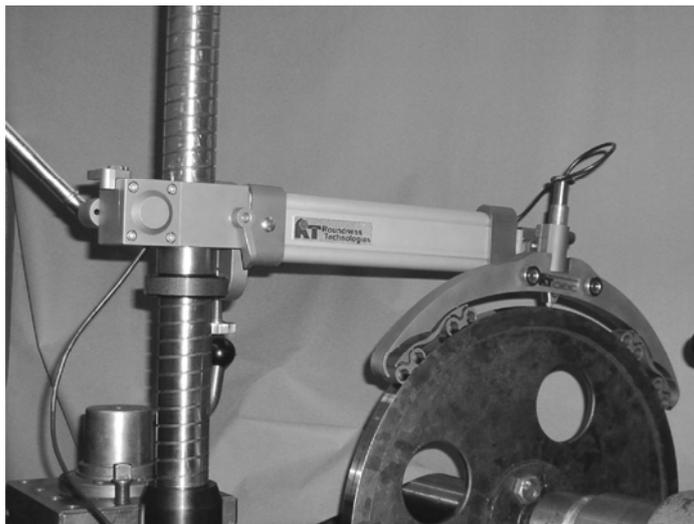


Рис. 6. Накладной кругломер RON-Pilot™

Заключение

Измерение в центрах – наиболее распространенный способ измерения формы деталей относительно малых и средних размеров, имеющих центровые отверстия. Этот способ прост, нагляден и не требует приобретения какого-либо специального, в том числе дорогостоящего, оборудования.

Измерения скобами также отличаются простотой и наглядностью, однако требуют наличия измерительных скоб нужного размера. Кроме отклонения размера (диаметра) вдоль оси, они позволяют также определить абсолютную величину.

Получение информации о размере большого количества сечений при помощи скоб неудобно. Этому недостатка лишены подвижные скобы – приборы-«тележки». Они позволяют получить подробную информацию об измерении размера (диаметра) вдоль

оси, даже на неподвижной детали. Чаще всего такие приборы используются для измерения деталей с $l \gg R$, таких как, например, прокатные валы.

Если скобы, центровые измерения позволяют получить некоторое представление о форме поперечного сечения (по овальности и радиальному биению), то приборы-«тележки» такой информации предоставить не могут.

Все станочные системы позволяют проводить измерения, в том числе, и непосредственно во время обработки изделия. Совместно с ЧПУ станка такие системы позволяют легко (без переналадки) получать продольные профили заданной формы и размера. Системы позволяют также контролировать (а в паре с ЧПУ – устранять) четные составляющие отклонения формы поперечного сечения детали.

Специализированные измерительные системы RollCal позволяют определить параметры геометрической формы более точно. Причем, если RollCal Classic™ корректно могут измерять только четные составляющие отклонений формы поперечного сечения (прежде всего – овальности), то, по словам фирмы-производителя, RollCal-2™ и RollCal-3™ корректно измеряют отклонения от круглости. Системы автоматизированы, встраиваются в станок.

Приборы серии RON-Pilot™ во многом повторяют возможности RollCal-2™ и RollCal-3™, однако они более ориентированы на измерения формы поперечных сечений. Для этого количество точек контакта увеличено до девяти. Эти приборы конструктивно проще и позволяют обслуживать несколько станков одновременно благодаря возможности быстрой установки.

Литература

1. Авдулов А.Н. Контроль и оценка круглости деталей машин. М.: Изд. стандартов, 1974.
2. Апарин Г.А., Городецкий И.Е. Допуски и технические измерения. М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1956.
3. Машиностроение. Энциклопедия. Раздел III. Том III-7. М.: Машиностроение, 1996.
4. Патент №2158895. Способ измерения геометрической формы номинально круглой цилиндрической детали и устройство для его реализации.
5. <http://www.ab-systems.ru/rolltest>
6. <http://www.rondness.net>
7. <http://www.waldrich-siegen.de>

РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОНУСНО-КЛИНОВОГО ЗУБЧАТОГО ВЕНЦА

С.А. Горбунов

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор В.М. Медунецкий

В статье рассматривается один из вариантов расчета профиля конусно-клинового зубчатого колеса. Выведены пограничные условия при выборе параметров цилиндрических зубчатых колес.

Введение

Современное развитие техники требует новых технологий изготовления деталей для устройств машино- и приборостроения, а также новых конструкторских и технологических решений. Одним из способов улучшения качеств механизмов является использование нестандартных зубчатых колес, полученных по оболочковому способу из полимеров и композиционных материалов.

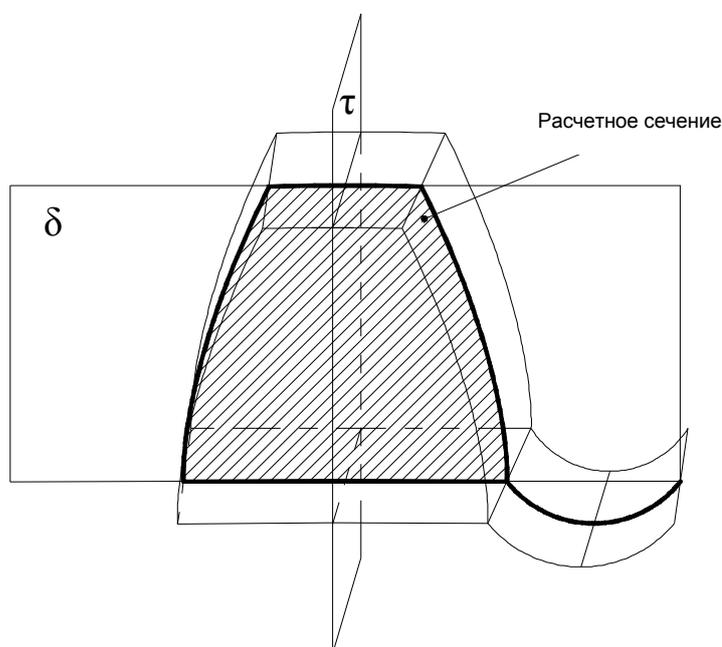


Рис. 1. Конусно-клиновой зубчатый венец

В настоящее время достаточно широко используют малогабаритные зубчатые передачи в исполнительных механизмах. В некоторых вариантах для повышения качественных показателей зубчатого зацепления целесообразно использовать колеса с нестандартным зубчатым профилем. Одним из таких нестандартных зацеплений является использование конусно-клинового зубчатого венца (рис. 1). Особенностью конусно-клинового зубчатого венца является изменение значения модуля для каждого поперечного сечения зубчатого колеса по определенному закону. При этом, несмотря на изменение модуля, такие геометрические параметры зубчатого колеса, как диаметр основной окружности, диаметр вершин, диаметр впадин, шаг зацепления и число зубьев, остаются неизменными. В таком зубчатом венце в зависимости от изменения модуля меняется толщина зуба и ширина впадины по делительной окружности.

Основная часть

При проектировании конусно-клинового колеса необходимо выбрать расчетное сечение (рис. 1), определяющее основные параметры всего зубчатого колеса (d, d_b, d_a, z, p_t). Необходимо выбрать такое сечение, при котором зубчатое колесо способно адекватно сопрягаться с другим зубчатым колесом. Для этого необходимо рассчитать область выбора модуля основного (расчетного) сечения (расчетного модуля). Каждое сечение зубчатого колеса, параллельное расчетному, должно иметь делительный диаметр и не иметь явления подрезания ножки зуба. Таким образом, можно выделить несколько условий для определения расчетного модуля:

$$d' > d_b, \quad (1)$$

где d' – делительный диаметр сечения с самым малым модулем; d_b – диаметр основной окружности расчетного сечения,

$$d' = m' \cdot z; \quad d_b = m \cdot z \cdot \cos(\alpha),$$

где m' – модуль сечения с наименьшей толщиной зуба, z – количество зубьев конусно-клинового колеса, m – модуль расчетного сечения, α – угол профиля в расчетном сечении. Используя неравенство (1), получим:

$$m' \cdot z > m \cdot z \cdot \cos(\alpha),$$

и выведем первое условие при выборе модуля расчетного сечения

$$m < \frac{m'}{\cos(\alpha)}. \quad (2)$$

Второе условие касается сечения с наибольшим модулем:

$$d_a > d'', \quad (3)$$

где d_a – диаметр вершин сечения расчетного модуля, d'' – делительный диаметр наибольшего сечения. Используя известные зависимости [1] для определения диаметров вершин цилиндрического прямозубого зубчатого колеса, выведем второе условие для выбора параметров расчетного сечения:

$$d_a = d + 2 \cdot m = m \cdot z + 2 \cdot m = (z+2) \cdot m,$$

$$d'' = m \cdot z;$$

$$m > \frac{m'' \cdot z}{z + 2}, \quad (4)$$

где m'' – модуль сечения с наибольшей толщиной зуба, d'' – делительный диаметр сечения с наибольшей толщиной зуба.

В ходе изготовления зубчатых колес оболочковым способом появляется возможность выбирать форму впадины зубчатого профиля. Для облегчения расчета боковой поверхности и формирования зубчатого колеса целесообразно представить впадину в виде дуги окружности с радиусом R . Чтобы отсутствовало подрезание ножки зуба, необходимо, чтобы центр дуги окружности, образующей впадину, находился выше линии AA_1 (рис. 2).

Из рис. 1 следует, что

$$AO_1 = FO_1 = R. \quad (5)$$

Из прямоугольного треугольника ABO (рис. 2) найдем

$$AO = d_b/2 \text{ и } AB = AO \cdot \sin(\gamma),$$

а угол γ определится как

$$\gamma = \tau/2 - \beta, \quad (6)$$

где τ – угловой шаг зубьев,

$$\tau = 2 \cdot \pi / z. \quad (7)$$

Толщина у ножки зуба равна

$$S_b = \beta \cdot d_b. \quad (8)$$

Толщину ножки можно определить через формулу толщины зуба на заданном диаметре d_b :

$$S_b = d_b \cdot (\pi/2 \cdot z + \text{inv}(\alpha_n)) , \quad (9)$$

где α_n – угол профиля на делительном диаметре нерасчетного сечения.

Используя формулы (7) и (8), найдем угол β :

$$\beta = S_b / d_b = \pi/2 \cdot z + \text{inv}(\alpha_n) ,$$

а из формул (5) и (6) найдем угол γ :

$$\gamma = \pi/2 \cdot z - \text{inv}(\alpha_n) . \quad (10)$$

Из прямоугольного треугольника ABF (рис. 3) найдем

$$AF = \sqrt{AB^2 + BF^2} , \quad \cos(\theta) = \frac{BF}{AF} . \quad (11)$$

Рассмотрим равносторонний треугольник AFO₁ :

$$AE = \frac{AF}{2} , \quad \angle\theta = \angle FAO_1 = \angle AFO_1 .$$

Из прямоугольного треугольника AEO₁ найдем радиус впадины:

$$R = AO_1 = \frac{AE}{\cos(\theta)} = \frac{AF}{2 \cdot \cos(\theta)} . \quad (12)$$

Подставив (11) в (12), получим:

$$R = \frac{AB^2 + BF^2}{2 \cdot BF} . \quad (13)$$

Из рис. 2 и 3 можно определить, что подрезания не будет в том случае, когда $R > BF$; (14)

$$BF = OB - \frac{d_f}{2} = AO \cdot \cos(\gamma) - \frac{d_f}{2} = \frac{d_b}{2} \cdot \cos(\gamma) - \frac{d_f}{2} ; \quad (15)$$

$$AB = \frac{d_b}{2} \cdot \sin(\gamma) . \quad (16)$$

Из треугольника ABO и треугольника ABF, раскрывая неравенство (14) и используя формулы (13), (15) и (16), получим:

$$\frac{AB^2 + BF^2}{2 \cdot BF} > BF , \quad AB^2 + BF^2 > 2 \cdot BF^2 ,$$

тогда

$$AB^2 > BF^2 .$$

При $AB > 0$ и $BF > 0$ в итоге получим

$$AB > BF . \quad (17)$$

Используя формулы (15) и (16), найдём условие построения зубчатого профиля без подрезания ножки:

$$\begin{aligned} \frac{d_b}{2} \cdot \sin(\gamma) &> \frac{d_b}{2} \cdot \cos(\gamma) - \frac{d_f}{2} ; \\ d_f &> d_b \cdot (\cos(\gamma) - \sin(\gamma)) , \end{aligned} \quad (18)$$

где d_f – диаметр впадин зубчатого колеса расчетного сечения, d_b – диаметр основной окружности расчетного сечения.

По расчетным формулам для цилиндрических зубчатых передач [1] выразим диаметры впадин и диаметр основной окружности.

$$d_f = d - 2.5 \cdot m = m \cdot (z - 2.5) , \quad (19)$$

$$d_b = m \cdot z \cdot \cos(\alpha) . \quad (20)$$

Используя зависимость

$$\cos(\alpha_b) = \frac{d_n \cdot \cos(\alpha_n)}{d_b},$$

при $\alpha_b=0$ получим:

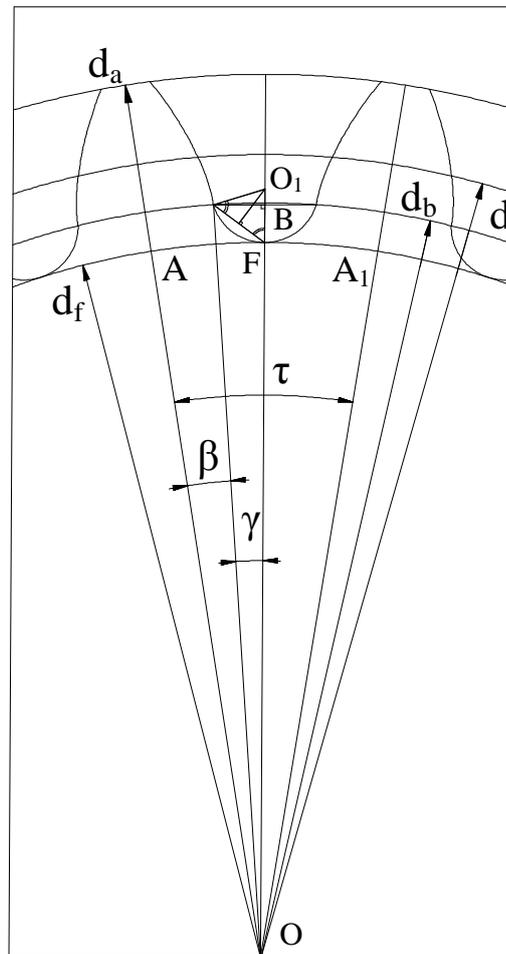


Рис. 2. К расчету формы впадины зубчатого профиля

$$\alpha_n = \arccos\left(\frac{d_b}{d_n}\right) = \arccos\left(\frac{m \cdot \cos(\alpha)}{m_n}\right), \quad (21)$$

где d_n – делительный диаметр нерасчетного сечения, m_n – модуль нерасчетного сечения.

В итоге, подставив в неравенство (18) выражения (10), (19), (20), (21) и преобразовав полученное выражение, получим третье условие выбора расчетного сечения:

$$\frac{z - 2.5}{z \cdot \cos(\alpha)} > \cos\left(\frac{\pi}{2 \cdot z} - \text{inv}\left[\arccos\left(\frac{m \cdot \cos(\alpha)}{m_n}\right)\right]\right) - \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot z} - \text{inv}\left[\arccos\left(\frac{m \cdot \cos(\alpha)}{m_n}\right)\right]\right). \quad (22)$$

Модуль расчетного сечения определяет максимальное отклонение модуля от его первоначального значения.

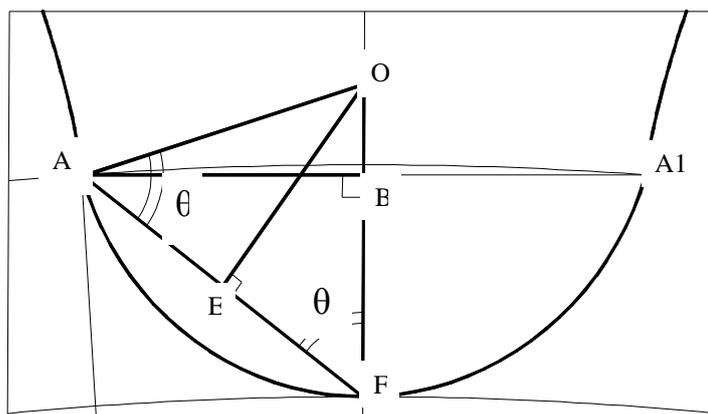


Рис. 3. Впадина зубчатого профиля

Третье условие (22) справедливо также для цилиндрических прямозубых передач. При этом оно будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{z - 2.5}{z \cdot \cos(\alpha)} > \cos\left(\frac{\pi}{2 \cdot z} - \text{inv}(\alpha)\right) - \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot z} - \text{inv}(\alpha)\right). \quad (23)$$

Из формулы (23) видно, что подрезания ножки зуба зависит от двух параметров зубчатого колеса, от количества зубьев z и угла профиля α .

Заключение

В работе получены три условия для выбора модуля расчетного сечения и проверки качества формы зубчатого венца при проектировании конусно-клиновой передачи.

Литература

1. Зубчатые передачи: Справочник / Е.Г. Гинзбург, Н.Ф. Голованов, Н.Б. Фирун, Н.Т. Халебский. Под общ. ред. Е.Г. Гинзбурга. 2-е изд., пер. и доп. Л: Машиностроение, 1980. 416 с.
2. Медунецкий В.М. Обеспечение качественных показателей комбинированных цилиндрических передач. СПб: Политехника, 2002. 160 с.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ КОНТРОЛЯ БОКОВОГО ЗАЗОРА В ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧАХ

М.В. Абрамчук

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Б.П. Тимофеев

В статье сравниваются стандарты ISO/TR 10064-2:1996 и ГОСТ 1643-81 в плане организации нормирования и контроля бокового зазора в зубчатых передачах. Также производится сравнение величин минимального бокового зазора в обоих указанных стандартах.

Введение

Рассмотрим технический отчет «ISO/TR 10064-2 Передачи зубчатые цилиндрические. Практическое руководство по приемке. Часть 2: Контроль суммарных радиальных отклонений, биения, толщины зуба и зазора». При этом начнем с Приложения А, имеющего заголовок «Боковой зазор и допуск на толщину зуба». Будем последовательно сравнивать положения упомянутого Приложения А с разделом 3 базового стандарта ГОСТ 1643-81 «Нормы бокового зазора».

Контроль бокового зазора

Стандарт ISO/TR 10064-2 содержит рекомендации по нормированию бокового зазора сопряжения и толщины зубьев колес. При этом все, говорящееся в стандарте, носит рекомендательный характер, в то время как нормы, приведенные в отечественном стандарте ГОСТ 1643-81, являлись обязательными для исполнения.

В первом пункте Приложения А стандарта ISO/TR 10064-2 приводится метод выбора допусков на толщину зуба колес и минимального бокового зазора. Кроме того, приводятся метод расчета максимального предполагаемого бокового зазора в зубчатом зацеплении и рекомендуемые величины минимального бокового зазора [1, с. 23]. В ГОСТ 1643-81 устанавливаются нормы бокового зазора и приводятся таблицы с величинами соответствующих норм. Методов расчета, аналогичных приведенным в рекомендациях стандарта ISO/TR 10064-2, в ГОСТ 1643-81 нет.

Во втором пункте стандарта ISO/TR 10064-2 дается определение бокового зазора и приводится обоснование необходимой его величины. Также говорится, что «боковой зазор в зацеплении изменяется в процессе функционирования передачи вследствие изменения скорости вращения колес, температуры, нагрузки и т.д.» [1, с. 23]. Наш стандарт не содержит определения бокового зазора и условий функционирования передачи, обуславливающих его изменение.

Третий пункт Приложения А стандарта ISO/TR 10064-2 называется «Максимальная толщина зуба колеса». В нем дается определение этого понятия. В ГОСТ 1643-81 никаких пояснений по максимальной толщине зуба колеса не содержится, приводятся только таблицы со значениями допусков E_{cs} (наименьшего отклонения толщины зуба) и T_c (допуска на толщину зуба).

В четвертом пункте Приложения А стандарта ISO/TR 10064-2, имеющем заголовок «Минимальный боковой зазор» дается определение минимального бокового зазора и описывается необходимость наличия минимального бокового зазора – «это так называемый традиционный «допуск на боковой зазор», который создается конструктором, чтобы компенсировать:

- (а) погрешности корпуса и подшипников, прогибы валов;
- (б) несоосность осей колес вследствие погрешностей корпуса и зазоров в подшипниках;
- (в) перекос осей вследствие погрешностей корпуса и зазоров в подшипниках;

(г) погрешности монтажа, такие как эксцентриситет валов;
(д) биения опор;
(е) температурные воздействия (функция разности температуры между корпусом и элементами колеса, межосевого расстояния и разницы материалов);
(ж) увеличение центробежной силы вращающихся элементов;
(з) другие факторы, такие как загрязнение смазки и увеличение в размерах неметаллических частей колеса» [1, с. 23–24].

Также говорится, что «величина минимального бокового зазора может быть небольшой при условии того, что приведенные выше факторы контролируются. Каждый из факторов можно оценить посредством анализа допусков, а затем, вычислить минимальные требования» [1, с. 24].

Рекомендации стандарта ISO/TR 10064-2:1996 обязывают нас при расчете допусков на боковой зазор учитывать погрешности незубчатых элементов передачи, а также условия ее работы, что в действующем базовом стандарте ГОСТ 1643-81 абсолютно не учитывается. Об этом недостатке нашего стандарта говорили многие отечественные специалисты, особенно настойчиво Б.П. Тимофеев (см., например, [2]). Необходима стандартизация расчета бокового зазора на основании проведения широких экспериментальных работ ввиду недостаточности и противоречивости имеющихся рекомендаций [2].

В целом же базовый стандарт ГОСТ 1643-81 нормирует боковой зазор следующим образом. Вид сопряжений зубьев колес в передаче характеризуется наименьшим гарантированным боковым зазором j_n [3, с. 322]. Требования к боковому зазору устанавливаются независимо от точности изготовления зубчатых колес. Стандартом установлены гарантированный (наименьший) боковой зазор в зубчатой передаче $j_{n \min}$ – наименьший предписанный боковой зазор, и допуск на боковой зазор T_{jn} , равный разности между наибольшим допустимым и гарантированным (наименьшим) боковыми зазорами. Нормы бокового зазора не связаны однозначно с конструкцией и условиями эксплуатации передач, что в некоторых случаях приводит к заклиниванию передачи, несмотря на «гарантированный» стандартом минимальный боковой зазор [4].

В зависимости от величины гарантированного бокового зазора стандартом ГОСТ 1643-81 установлено шесть видов сопряжений зубьев колес в передаче: Н, Е, D, С, В, А и восемь видов допуска на боковой зазор, обозначаемых в порядке его возрастания буквами h, d, c, b, a, x, y, z. Сопряжение Н – с нулевым наименьшим зазором, Е – с малым, С и D – с уменьшенным, А – с увеличенным. Сопряжение вида В обеспечивает минимальную величину бокового зазора, при котором исключается возможность заклинивания стальной или чугунной передачи от нагрева при разности температур зубчатых колес и корпуса в 25°С [5, с. 2].

При отсутствии специальных требований к зубчатым передачам необходимо исходить из следующих положений: видам сопряжений Н и Е соответствует вид допуска на боковой зазор h, видам сопряжений D, С, В и А – виды допусков d, c, b и a, соответственно.

Соответствие между видом сопряжения зубчатых колес в передаче и видом допуска на боковой зазор допускается изменять; при этом также могут быть использованы виды допусков x, y, z [5, с. 3].

Также устанавливаются шесть классов отклонений межосевого расстояния, обозначаемых в порядке убывания точности римскими цифрами от I до VI.

Точность изготовления зубчатых колес и передач задается степенью точности, а требования к боковому зазору определяются видом сопряжения по нормам бокового зазора. Гарантированный боковой зазор в каждом сопряжении обеспечивается при соблюдении предусмотренных классов отклонений межосевого расстояния (для сопряжений Н и Е – II класса, а для сопряжений D, С, В и А – классов III, IV, V и VI, соответст-

венно). При этом получается переопределение величины гарантированного бокового зазора: с одной стороны, он зависит от вида сопряжений, с другой – от класса отклонения межосевого расстояния.

Указывается также, что допускается изменять соответствие между видом сопряжения и классом отклонений межосевого расстояния.

Полный боковой зазор состоит из гарантированного бокового зазора, j_{\min} и части бокового зазора, k_j , так называемой компенсации уменьшения бокового зазора, возникающей из-за погрешности изготовления зубчатых колес и монтажа передачи [2, с. 62]. Величина компенсации определяется по формуле:

$$k_j = \sqrt{(f_a 2 \sin \alpha)^2 + 2f_{pb}^2 + 2F_\beta^2 + (f_x \sin \alpha)^2 + (f_y \sin \alpha)^2},$$

где f_a – предельное отклонение межосевого расстояния, f_{pb} – предельное отклонение шага зацепления, F_β – погрешность направления профиля, f_x – допуск на параллельность осей, f_y – допуск на перекос осей, α – угол зацепления передачи.

При определении k_j не учитывается радиальное биение зубчатого венца, F_{rr} , а при некратных числах зубьев любая выставка эксцентриситетов колес не исключает положения, когда боковой зазор j_n в передаче будет определяться именно этим фактором [6].

В уже упомянутом четвертом пункте Приложения А стандарта ISO/TR 10064-2 приведена таблица с величинами минимального бокового зазора, рекомендуемыми для промышленных приводов с колесами из черных металлов в корпусах из черных металлов, работающих при окружных скоростях меньше, чем 15 м/с, с типичными коммерческими (термин оригинала, у нас более принятым является термин «экономически обоснованными») производственными допусками для корпусов, валов и опор [1, с. 24].

Произведем сравнение величин минимального бокового зазора в ISO/TR 10064-2 и ГОСТ 1643-81, учитывая то обстоятельство, что в ISO/TR 10064-2 величина зазора зависит от модуля зубьев m_n и минимального межосевого расстояния a_i , в то время как в нашем стандарте – от вида сопряжения и межосевого расстояния a_w . Возьмем вид сопряжения В для модулей зубьев в диапазоне $m_n=(1,5-5)$ мм и вид сопряжения А, для модулей $m_n=(12-18)$ мм. Полученные результаты сведем в таблицу. Жирным выделены значения гарантированного бокового зазора, взятые из ГОСТ 1643-81.

m_n , мм	Минимальное межосевое расстояние, a_i , мм					
	50	100	200	400	800	1600
	МКМ					
1,5	90 120	110 140	–	–	–	–
3	120 120	140 140	170 185	240 230	–	–
5	–	180 140	210 185	280 230	–	–
12	–	–	350 290	420 360	550 500	–
18	–	–	–	540 360	670 500	940 780

Таблица. Сравнение величин минимального бокового зазора в ISO/TR 10064-2 и ГОСТ 1643-81

Как видно из таблицы, при модуле зубьев $m_n=3$ мм величины минимального бокового зазора в ISO/TR 10064-2 и гарантированного бокового зазора в ГОСТ 1643-81

практически совпадают. При $m_n < 3$ минимальный боковой зазор по ISO/TR 10064-2 меньше, чем в ГОСТ 1643-81, $m_n > 3$ – больше.

Величины, приведенные в таблице стандарта в ISO/TR 10064-2 можно рассчитать, пользуясь выражением:

$$j_{bn\min} = \left(\frac{2}{3}\right) [0,06 + 0,0005 a_i + 0,03 m_n].$$

ГОСТ 1643-81 не содержит зависимостей для расчета значений гарантированного бокового зазора, $j_{n\min}$.

Также в четвертом пункте стандарта ISO/TR 10064-2 приводится формула для расчета бокового зазора:

$$j_{bn\min} = (E_{sns1} + E_{sns2}) \cos \alpha_n,$$

где E_{sns1} и E_{sns2} – верхнее отклонение толщины зуба шестерни и колеса, соответственно, а α_n – угол профиля нормальный.

Далее говорится, что «если E_{sns1} и E_{sns2} равны, то тогда $j_{bn} = 2E_{sns} \cos \alpha_n$, глубина утонения и доля радиального зазора шестерни и колеса равны, а значение коэффициента перекрытия максимально» [1, с. 24]. В отличие от стандарта ISO/TR 10064-2, в ГОСТ 1643-81 наименьшие отклонения толщины зуба колеса и шестерни равны быть не могут, потому что зависят от делительного диаметра, величины которого у шестерни и зубчатого колеса разные.

Пятый пункт стандарта ISO/TR 10064-2:1996 посвящен нормированию толщины зуба. В нем, в частности, даются рекомендации по определению максимальной и минимальной толщины зуба. В нашем стандарте ГОСТ 1643-81 тема нормирования толщины зуба, помимо приведения табличных значений наименьшего отклонения толщины зуба и допуска на толщину зуба, не затрагивается.

Шестой пункт ISO/TR 10064-2 содержит рекомендации по нормированию максимального бокового зазора. Приводится определение этого параметра точности – «максимальный боковой зазор в зубчатой передаче, $j_{bn\max}$ – это сумма допуска на толщину зуба, влияния отклонений межосевого расстояния и влияния отклонений геометрии зуба колеса» [1, с. 24] и условие его возникновения: «теоретический максимальный боковой зазор возникает, когда два качественных зубчатых колеса, сделанных в соответствии с нормой минимальной толщины зуба, находятся в зацеплении на максимально допустимом свободном межосевом расстоянии» [1, с. 24]. Приводятся формулы для подсчета минимальной действительной толщины зуба и максимального окружного бокового зазора, а также формула перевода величины окружного зазора в нормальный боковой зазор. Также говорится, что «любые производственные отклонения зуба будут увеличивать максимальный предполагаемый боковой зазор. Для оценки приемлемых величин требуется серьезная исследовательская работа на базе большого количества опытов» [1, с. 25]. Подчеркивается, что «если требуется контролировать максимальный боковой зазор, то нужно провести тщательное изучение каждого его компонента и выбранной степени точности, ограничивающей отклонения геометрии зуба колеса» [1, с. 25]. Нормирование максимального бокового зазора в ГОСТ 1643-81 сводится к приведению величин гарантированного бокового зазора, $j_{n\min}$, а величину допуска на боковой зазор, T_{jn} рекомендуется получать из выражения:

$$T_{jn} = (T_{H1} + T_{H2} + f_\alpha) \sin \alpha,$$

где T_{H1} и T_{H2} – допуски на смещение исходного контура шестерни и колеса.

Выводы

Положения стандарта ISO/TR 10064-2 носят рекомендательный характер, конкретных данных по нормированию он не содержит. В качестве показателей зазора ис-

пользуются величины E_{sns} и T_{sn} (верхнее отклонение толщины зуба и допуск на толщину зуба колеса). У нас это E_{cs} (наименьшее отклонение толщины зуба) и T_c (допуск на толщину зуба). Величины E_{sns} и T_{sn} в ISO/TR 10064-2 не нормируются, а даются только рекомендации в части методов их определения. Таким образом, принятие этих рекомендаций без разработки стандартных норм, обеспечивающих боковой зазор, означало бы отказ от использования методов и средств измерения всех показателей, приведенных в нашем стандарте, а именно:

- E_{Hs} (наименьшее дополнительное смещение исходного контура);
- E_{Wms} (наименьшее отклонение средней длины общей нормали);
- E_{ws} (наименьшее отклонение длины общей нормали);
- $E_{a'_{s}}$ (верхнее предельное отклонение измерительного межосевого расстояния) и других.

Рекомендации стандарта ISO/TR 10064-2 не связывают величину зазора и ее нормирование ни с видом сопряжения, ни с видом допуска на боковой зазор, ни с классом отклонения межосевого расстояния. Однако они требуют обязательного учета погрешности изготовления и монтажа незубчатых деталей передачи (корпуса, валов, подшипников и т.д.), условий работы зубчатой передачи, а также вида смазки, ее загрязнения, наличия неметаллических частей колес и других элементов.

Заключение

Подробное рассмотрение стандарта ISO/TR 10064-2:1996 и его сравнение с ГОСТ 1643-81 приводит нас к выводу о необходимости безотлагательной разработки отечественного стандарта, содержащего конкретные допуски на нормируемые величины, позволяющие в полном объеме использовать существующее оборудование для контроля зубчатых колес и передач. Упомянутый нормативный документ должен, в противоположность стандарту ГОСТ 1643-81, соответствовать основным принципам рекомендаций стандарта ISO. Организовать производство зубчатых колес и передач только на базе рекомендаций ISO без использования отечественного стандарта невозможно. Существующий же стандарт ГОСТ 1643-81 в целом ряде положений прямо противоречит упомянутым рекомендациям.

Литература

1. ISO/TR 10064-2:1996. Cylindrical gears. Code of inspection practice. Part 2. Inspection related to radial composite deviations, runout, tooth thickness and backlash.
2. Тимофеев Б.П., Шалобаев Е.В. Состояние и перспективы нормирования точности зубчатых колес и передач. // Вестник машиностроения. № 12. 1990. С. 34–36.
3. Тищенко О.Ф., Валединский А.С. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. М.: Машиностроение, 1977.
4. Тимофеев Б.П., Шалобаев Е.В. Установление вида сопряжения в зубчатой передаче и регламентация норм бокового зазора. // Метрологическая служба в СССР. М.: Изд-во стандартов. 1990. Вып. 2. С. 27–31.
5. ГОСТ 1643-81. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. М., Издательство стандартов, 1989.
6. Юрьев Ю.А., Мурашев В.А., Шалобаев Е.В. Выбор вида сопряжения и вероятностная оценка мертвого хода передачи. Л.: ЛИТМО., 1977. 28 с.

О РАЗБИЕНИИ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ЧИСЕЛ ПО СТУПЕНЯМ ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ

И.А. Абдурахманов, Д.В. Король, И.С. Пустошкин, П.А. Сергушин, А.Л. Ткачев
Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент С.С. Киселев

Работа посвящена вопросу разбиения передаточных чисел по ступеням в зубчатых передачах. Рассмотрены случаи линейного и нелинейного вида. Показано, что полученная система уравнений имеет единственное решение, зависящее от выбранных значений максимального передаточного числа передачи и максимального передаточного числа на последней ступени.

Введение

Редуктор – ключевой элемент любого устройства, связанного с передачей вращения. Область применения редукторов невозможно охватить – это коробки передач, приводы приборов и устройств, микромеханизмы, разного рода передаточные механизмы. Можно с уверенностью сказать, что 80% механизмов имеют в своем составе редуктор.

В настоящее время производство редукторов пошло по пути создания стандартных изделий, т.е. производится определенное количество стандартных редукторов, которые способны обеспечить определенные передаточные числа. В том случае, когда возникает необходимость выйти за рамки стандартного ряда, или если требуется обеспечить большую точность, приходится заказывать и производить требуемый редуктор специально и, как правило, за гораздо большую цену.

Вопросами построения рядов зубчатых передач в 70-х гг. XX века активно занимался А.Г. Снесарев [1]. В 80-х годах им были рассмотрены вопросы создания систем редукторов: «Создание ряда редукторов – проблема качественно иная, чем разработка индивидуального редуктора. Критерии оптимальности отдельного редуктора и ряда редукторов различны. Вопросы параметризации, номенклатуры, технического уровня, надежности, унификации, в значительной части, присущи только рядам редукторов, а остальные решаются иначе, чем в индивидуальных...».

Разбиение общего передаточного числа по ступеням

Вопрос разбиения передаточного числа по ступеням для ряда может быть решен для следующих случаев:

1. равные значения передаточных чисел на ступенях, при этом обеспечиваются минимальные габаритные размеры (при одинаковых модулях на ступенях);
2. неравные значения передаточных чисел на ступенях, появляется возможность обеспечения минимального момента инерции, при разных модулях на ступенях – минимальных габаритов и т.д.

Случай 1 – равные значения передаточных чисел на ступенях. Известно, что передаточное число на одной ступени равно

$$U_i = i \sqrt{U_{\text{общ}}} \quad (1)$$

где i – номер ступени. На рис. 1 представлены зависимости для трехступенчатой зубчатой передачи. Здесь по оси X откладываем значение общего передаточного числа $U_{\text{общ}}$, по оси Y – величину передаточного числа на ступени $U_{\text{ступ}n}$. Необходимо выбрать минимальное и максимальное значение передаточного числа на первой ступени. Тогда согласно [3–7] легко построить ряды зубчатых передач.

По общему передаточному числу выбирается передаточное число на каждой ступени, которое легко обеспечивается стандартными зубчатыми колесами.

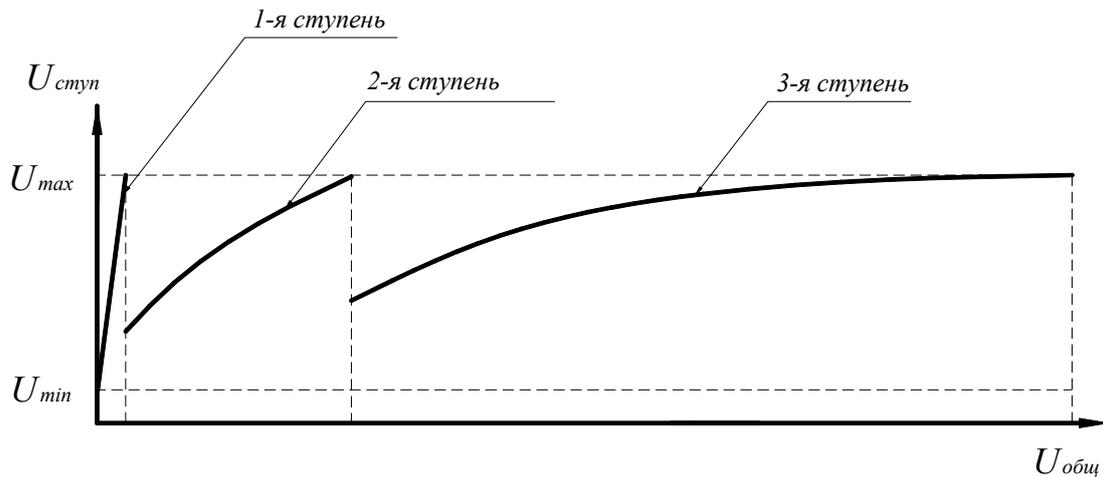


Рис. 1. Распределение общего передаточного числа при равных передаточных числах на ступенях

Случай 2 – неравные значения передаточных чисел на ступенях. В этом случае принимаем, что максимальное значение передаточных чисел на каждой ступени рассчитывается по некоторой функциональной зависимости $f(U_{общ})$. Данная линия проходит через точки A , C и E (см. рис. 2).

В статье рассматриваются два варианта функции с двумя параметрами – линейная и экспоненциальная.

Линейная функция

$$f(x) = kx + b \quad (2)$$

представлена на рис. 2, где обозначено: ось $U_{общ}$ – X , ось $U_{ступ}$ – Y . соответствующие координаты точек – (X, Y) .

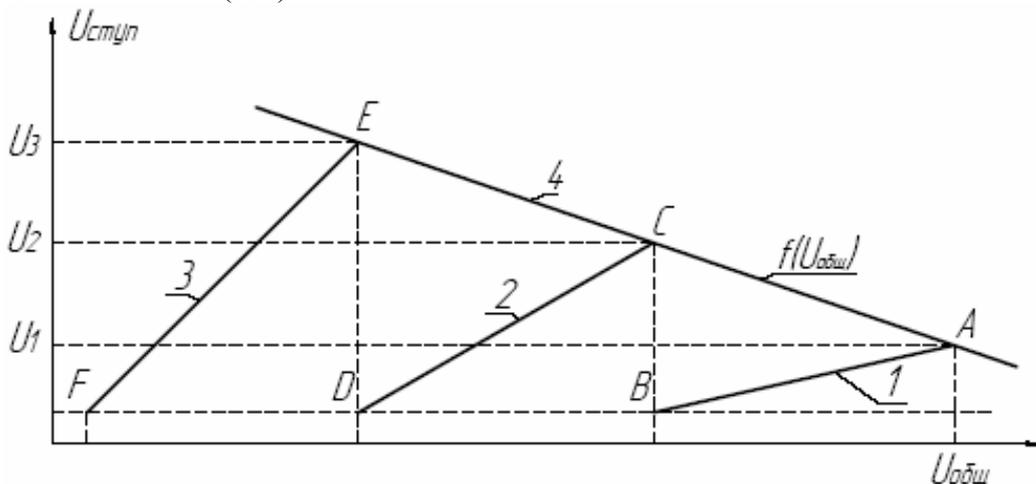


Рис. 2. Распределение общего передаточного числа при условии неравных передаточных чисел на ступенях. Линейная функция

Для каждой линии запишем уравнения прямой, проходящей через 2 точки. Для линии 1 прямая проходит через точки A и B , и ее уравнения (3), (4), для остальных линий аналогично запишутся уравнения (5)–(14):

$$y_A = k_1 \cdot x_A + b_1, \quad (3)$$

$$y_B = k_1 \cdot x_B + b_1, \quad (4)$$

$$y_C = k_2 \cdot x_C + b_2, \quad (5)$$

$$y_D = k_2 \cdot x_D + b_2, \quad (6)$$

$$y_E = k_3 \cdot x_E + b_3, \quad (7)$$

$$y_F = k_3 \cdot x_F + b_3, \quad (8)$$

$$y_A = k_4 \cdot x_A + b_4, \quad (9)$$

$$y_C = k_4 \cdot x_C + b_4, \quad (10)$$

$$y_E = k_4 \cdot x_E + b_4, \quad (11)$$

$$y_E \cdot y_C \cdot y_A = x_A, \quad (12)$$

$$x_E = y_E = x_D, \quad (13)$$

$$x_C = x_B. \quad (14)$$

Полученная система имеет только одно решение, удовлетворяющее условиям $U_{общ}$, $U_{ступ}$. Причем координаты одной из точек A или E полностью и единственным образом определяют решение системы уравнений (3)–(14) при распределении общего передаточного числа по всем ступеням.

Экспоненциальная функция

$$f(x) = e^{kx} + b, \quad (15)$$

где k и b – параметры функции, представлена на рис. 3 (X соответствует координате $U_{общ}$, Y – соответствует $U_{ступ}$).

Для каждой линии 1, 2, 3 и 4 записываем значения параметров k и b в систему уравнений. Аналогично линейному случаю, можно предположить, что и решение существует и единственно.

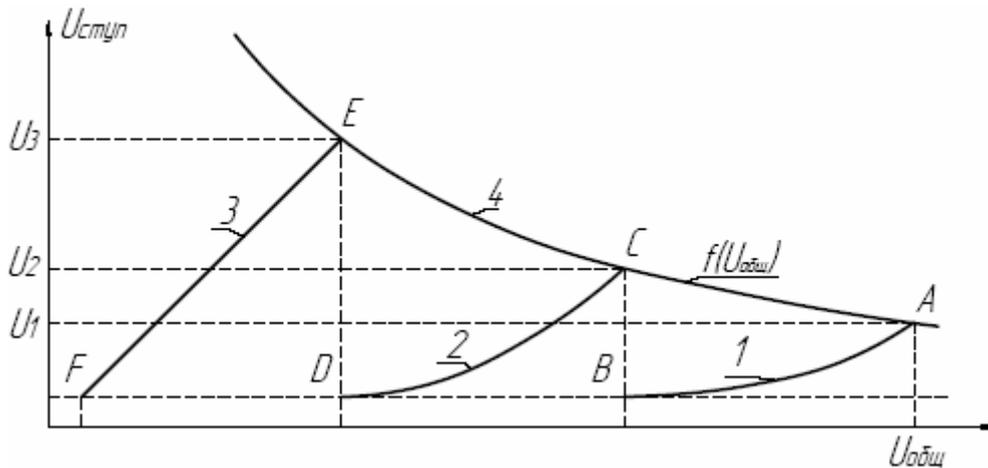


Рис. 3. Распределение общего передаточного числа при неравных передаточных числах на ступенях (экспоненциальная функция)

Необходимо отметить, что линия 3 в любом случае будет иметь линейную зависимость и тангенс угла наклона касательной, коэффициент k , равен единице.

Анализ методов разбиения общего передаточного числа по ступеням

Как видно из системы уравнений (3)–(14), решение зависит от координат точки A или E (см. рис. 2 и 3). Для определенности считаем, что редуктор силовой.

При анализе данного способа разбиения было выяснено, что зависимость изменения максимального передаточного отношения на первой ступени имеет вид, представленный на рис. 4 (X_A соответствует координате $U_{общ}$; Y_A – координате $U_{ступ}$).

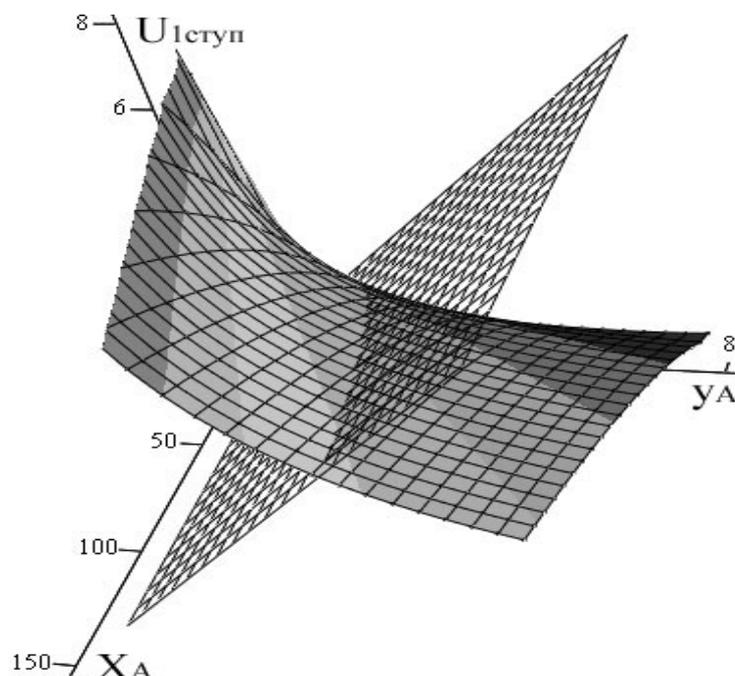


Рис. 4. Зависимость передаточного числа на первой ступени от общего передаточного числа и числа на последней ступени

На рис. 4 присутствует еще одна плоскость $F(x,y) = y$, которая отсекает правую нижнюю часть, не удовлетворяющую условию убывания максимального передаточного числа на ступенях.

Передаточное число на первой ступени зависит от значения общего передаточного числа и передаточного числа последней ступени следующим образом (см. рис. 4):

- увеличение общего передаточного числа приводит к увеличению передаточного числа на первой ступени, и наоборот;
- увеличение передаточного числа последней ступени приводит к уменьшению передаточного числа на первой;
- поверхность не имеет особых точек, поэтому выбор передаточного числа на последней ступени зависит только от максимального значения на первой ступени;
- все предположения о «избранности» некоторых передаточных чисел с точки зрения кинематики неверны.

Пример применения метода разбиения передаточного числа по ступеням

При распределении общего передаточного числа по ступеням для ряда редукторов трех ступенчатой зубчатой передачи при линейных функциях примем следующие условия (см. рис. 2):

- общее передаточное число $x_A=90$;
- передаточное отношение на первой ступени $y_A=3,2$;
- минимальное передаточное число на ступени – 1,06;
- максимальное передаточное число на ступени – 8;
- передаточное число каждой следующей ступени должно быть меньше, чем на предыдущей (коэффициент k_4 (из уравнения 2) линии 4 должен быть отрицательным).

Для нахождения передаточного числа на ступенях необходимо решить систему уравнений (3)–(14).

Положение точки A задано в условии: $(U_{общ}, U_{ступ})$ (в примере $A(90; 3,2)$).

Положение точки B – координата по оси Ox – обозначает произведение передаточного отношения всех ступеней, идущих после первой ступени; координата по оси Oy обозначает минимально возможное значение передаточного отношения на ступени – 1,06). Исходя из этого, решаем первые два уравнения нашей системы и получаем: $k_1 = 0,035$; $b_1 = 0,087$; $B(28,125; 1,06)$.

Положение точки F известно, так как известно минимально возможное передаточное отношение $F(1,06; 1,06)$. Также известно, что на последней ступени передаточное число будет равно частному

$$\frac{\text{общее ПЧ}}{\text{произведение ПЧ предыдущих ступеней}}.$$

Отсюда можно получить, что $k_3 = 1$; $b_3 = 0$; $x_E = y_E$.

Исключив из общей системы уравнений уравнения (3), (4), (7), (8), получаем систему уравнений, в результате решения которой находим $k_2=0,175$; $b_2=0,075$; $k_4=-0,029$; $b_4=5,801$, а значениями передаточных чисел на ступенях являются координаты по оси Oy точек D, C, A :

- 1-я ступень – 5,638
- 2-я ступень – 4,988
- 3-я ступень – 3,2.

Заключение

Достоинство данного метода состоит в том, что его можно использовать как для силовых, так и для отсчетных передач. Для силовых редукторов от первой ступени к последней уменьшаем передаточное отношение (на последней ступени имеем наименьшее возможно передаточное отношение). Для отсчетных редукторов, наоборот, на последней ступени получаем максимально возможное передаточное отношение, тем самым имея возможность уменьшения погрешности редуктора.

Еще одним достоинством данного способа является возможность изменять общее передаточное число в некоторых пределах (желательно изменять в меньшую сторону), не пересчитывая заново уравнения. Для этого необходимо найти координату по оси Oy ($U_{\text{смын}}$) точки на прямой AB с координатой по оси Ox ($U_{\text{общ}}$), равной новому общему передаточному числу. Таким образом, в случае силового редуктора на последней ступени мы получаем меньшее передаточное отношение при больших передаточных отношениях на других передачах, а в случае отсчетного редуктора – большее передаточное число на последней ступени.

Более подробный пример применения методов построения зубчатых передач приведен в курсовой работе авторов, где показано, что ряд редукторов с передаточными числами от 1.06 до 90 с точностью получения передаточного числа 5% содержит 90 членов. Для построения всего ряда необходимо использовать 5 стандартных шестерен и 6 зубчатых колес.

Литература

1. Снесарев Г.А. Теоретические основы построения рядов редукторов. Автореф. дис. д.т.н. МВТУ им. Н.Э.Баумана, 1980. 32 с.
2. Свищерский Ю.И., Макейчик Н.Н. Расчет и конструирование коробок скоростей и подач. Минск: Высшая школа, 1976. 589 с.
3. Тимофеев Б.П., Брицкий В.Д., Степанов А.А., Киселев С.С. Общая таблица ПЧ и некоторые ее свойства. // Труды V сессии Международной научной школы «Фун-

даментальные и прикладные проблемы теории точности, процессов машин, приборов и систем». СПб: ИПМаш, 2002. С. 186–195.

4. Тимофеев Б.П., Брицкий В.Д., Степанов А.А., Киселев С.С. Основы методов построения рядов зубчатых передач для одной ступени. // Там же. С. 175–181.
5. Тимофеев Б.П., Брицкий В.Д., Степанов А.А., Киселев С.С. Построение рядов одноступенчатой зубчатой передачи. // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Редукторостроение России: состояние, проблемы, перспективы». Изд. 2-е, исп. и доп. СПб: ЦЦП «Светоч». С. 105–113.
6. Киселев С.С. К вопросу о методах построения систем зубчатых передач. // Системный анализ при создании и применении кораблей, вооружения и военной техники. Выпуск 14. СПб: ВМА, 2003. С.109–117.
7. Тимофеев Б.П., Брицкий В.Д., Степанов А.А., Киселев С.С. Построение рядов одноступенчатой зубчатой передачи. / Редукторостроение России: состояние, проблемы, перспективы. Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием Изд. 2-е исп. и доп. СПб: ЦЦП «Светоч», 2002. С. 105–110.

ПОСТРОЕНИЕ ТАБЛИЦ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ЧИСЕЛ ДЛЯ ПЛАНЕТАРНОГО ПЕРЕДАТОЧНОГО МЕХАНИЗМА

Г.А. Гладышев

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент С.С. Киселев

В работе рассматривается проблема выбора передаточных чисел при проектировании планетарного передаточного механизма, исследуются зависимости существования передаточных чисел на примере наиболее распространенной планетарной передачи.

Введение

К настоящему времени планетарные передаточные механизмы обрели широкую область применения. Их различные виды входят в большинство производящихся механических и мехатронных устройств, практически ни одна современная машина вне зависимости от назначения не может обойтись в своей конструкции без использования планетарных механизмов. Однако при проектировании последних конструкторы сталкиваются с проблемой выбора конкретных передаточных чисел из возможного широчайшего ряда комбинаций. Эта задача осложняется отсутствием общей классификации передаточных чисел даже для наиболее распространенных видов передаточных механизмов, что приводит к необходимости неоднократно пересчитывать конечные передаточные отношения. Последнее сильно сказывается на общей длительности процесса проектирования в сторону его увеличения, которого можно избежать, имея в распоряжении при проектировании общую таблицу передаточных чисел или зависимостей их существования.

Целью работы является нахождение конкретных зависимостей существования передаточных чисел и составления общей таблицы передаточных чисел для конкретного передаточного механизма путем проверки всего возможного ряда комбинаций чисел зубьев колес, составляющих передаточный механизм, по условиям соседства и условиям сборки.

Теоретический аспект

Планетарным зубчатым называется механизм, содержащий зубчатые колеса, именуемые сателлитами, оси которых подвижны. По сравнению с другими передаточными механизмами с одной степенью свободы планетарные редукторы и мультипликаторы имеют меньшие габариты и массу, позволяют реализовать большие (до нескольких тысяч) передаточные числа при малом количестве колес.

Из большого многообразия различных типов планетарных механизмов выделяются несколько наиболее распространенных в механических приводах. Для краткого обозначения их широко используются классификационные формулы, в которых указывается число и вид основных звеньев.

В работе рассматривается один из механизмов $2k-h$ (см. табл.1), в котором в качестве основных звеньев имеются два центральных колеса ($2k$) и водило (h). Рассматривается планетарная передача типа A_{ba}^h . Все расчеты проводятся только для этого типа передачи, в котором водило h неподвижно, звено b – ведущее, звено a – ведомое, звенья g – сателлиты.

Для передачи типа A_{ba}^h величина $\frac{Z_b}{Z_a} = -i_{ab}^h$ обозначается через P , следовательно, передаточное число определяется как $-P = \frac{Z_b}{Z_a}$. Допустимые значения чисел зубьев (z):

- (1) $130 < z < 500$ для колеса с внутренним зацеплением (b);
 (2) $13 < z < 130$ для центрального колеса (a);
 (3) $13 < z < 130$ для спутников (g).

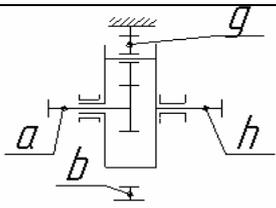
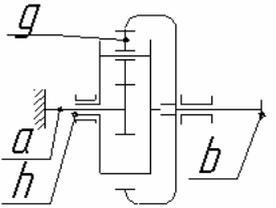
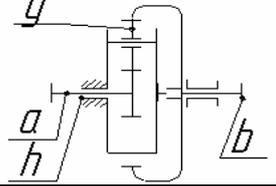
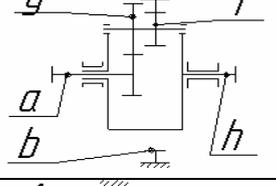
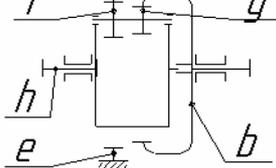
№	Условное обозначение	Условная схема
1	A_{ha}^b	
2	A_{hb}^a	
3	A_{ba}^h	
4	B_{ha}^b	
5	C_{bh}^e	

Таблица 1. Схемы передаточных механизмов

Метод исследования

Для исследуемого типа передачи рассчитываются все возможные передаточные числа, которые проверяются на условие соседства $Z_a = 2Z_g = Z_b$. При увеличении числа спутников до 3 в первом случае и до 6 во втором условие соседства изменяется на $Z_a + 3Z_g = Z_b$ в первом случае и $Z_a + 6Z_g = Z_b$ во втором случае.

Условия соседства в каждом случае учитываются при построении таблиц передаточных чисел планетарной передачи типа A_{ba}^h . При этом в таблицах существующие передаточные числа выстраиваются в диагонали с промежутками, величина которых линейно зависит от числа спутников. Зависимость выражается в следующем: каждое последующее значение передаточного отношения отстоит от предыдущего вправо или влево по строке и вниз или вверх по столбцу на $n-1$ ячеек, где n – число спутников.

Получившиеся таблицы передаточных отношений, приведенные на рис. 1–3, представляются как усеченные трехмерные виды таблиц без конкретных значений.

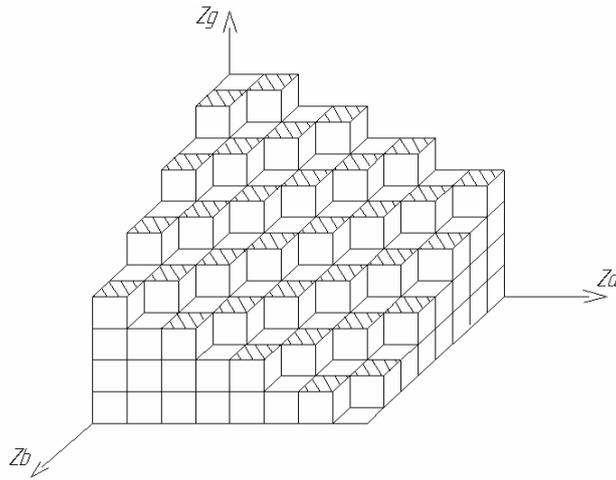


Рис. 1. Схема передаточных чисел для передачи с 2 спутниками

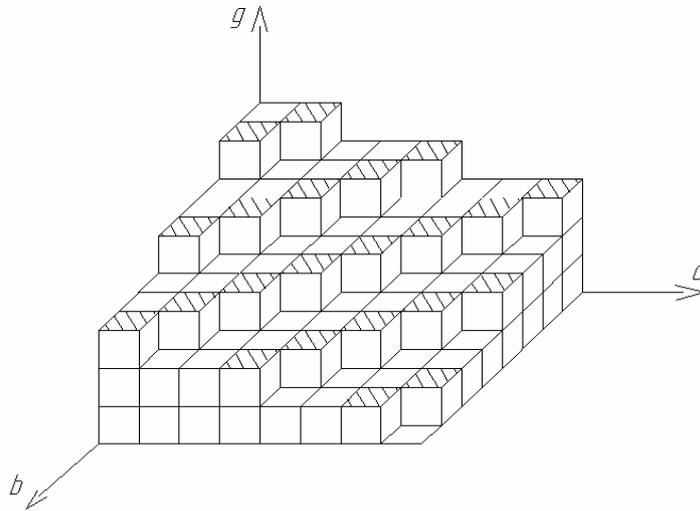


Рис. 2. Схема передаточных чисел для передачи с 3 спутниками

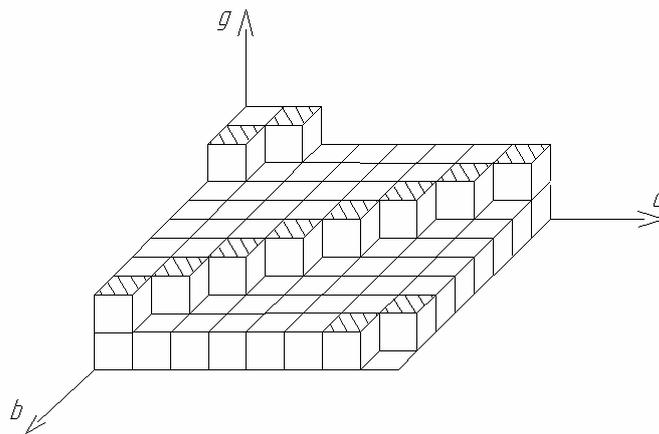


Рис. 4. Схема передаточных чисел для передачи с 6 спутниками

На все верхние грани единичных ячеек таблиц, в которых существуют передаточные числа, наносится штриховка. Далее при числе спутников $n > 1$ для возможности сборки передач все получившиеся передаточные числа проверяются на условие сборки: $(Z_a + Z_b)/n$ – целое число.

Результаты исследования

Таблица для передачи с $n = 2$ не изменила своего вида.

Таблица для передачи с $n = 3$ перестроилась. Существование передаточных чисел в этой таблице стало подчиняться следующей зависимости: каждое последующее существующее значение передаточного числа отстоит от предыдущего вправо или влево по строке, вниз или вверх по столбцу и выше или ниже по диагонали на $n - 1$ ячеек, где n – число спутников.

Таблица для передачи с $n = 6$ перестроилась. Существование передаточных чисел в этой таблице стало подчиняться следующей зависимости: каждое последующее существующее значение передаточного числа отстоит от предыдущего вправо или влево по строке и вниз или вверх по столбцу на $n - 1$ ячеек и выше или ниже по диагонали на $n/2 - 1$ ячеек, где n – число спутников.

В таблицах с $n = 3$ и с $n = 6$ все передаточные числа существуют только при числе зубьев центрального колеса z , кратном числу 3.

Окончательные таблицы передаточных чисел с $n = 3$ и с $n = 6$ приводятся на рис. 5, 6 и представляются как усеченные трехмерные виды таблиц без конкретных значений.

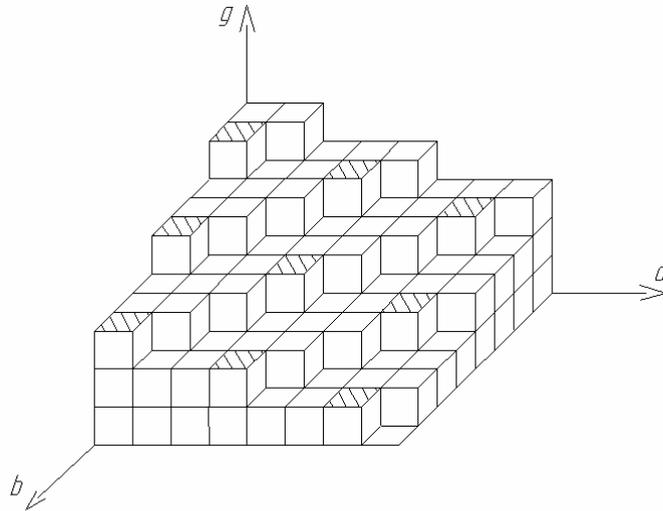


Рис. 5. Схема передаточных чисел для передачи с 3 спутниками

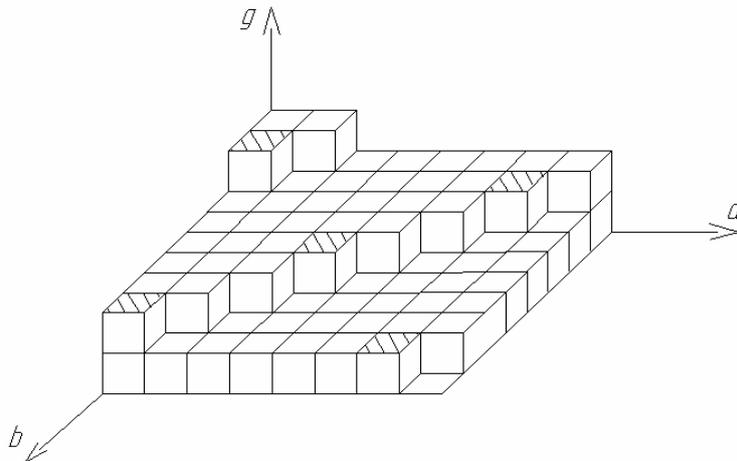


Рис. 6. Схема передаточных чисел для передачи с 6 спутниками

Все полученные передаточные числа для передач типа A_{ba}^h с числами спутников $n = 2, n = 3$ и $n = 6$ сведены в общие таблицы передаточных чисел (табл.2, табл.3 и табл.4, соответственно).

Zb	13	...	124	125	Za	126	127	128	129	130	Zh
130		...									
153	-11,769	-1,224	...	-1,205	
154		...	-1,242		-1,222		-1,203				
155	-11,923	...		-1,24		-1,22		-1,202			
156		...	-1,258		-1,238		-1,219			-1,2	13
157	-12,077	...		-1,256		-1,236		-1,217			
158		...	-1,274		-1,254		-1,234			-1,215	14
159	-12,231	...		-1,272		-1,252		-1,233			
160		...	-1,29		-1,27		-1,25			-1,231	15
161	-12,385	...		-1,288		-1,268		-1,248			
162		...	-1,306		-1,286		-1,266			-1,246	16
163	-12,538	...		-1,304		-1,283		-1,264			
164		...	-1,323		-1,302		-1,281			-1,262	17
165	-12,692	...		-1,32		-1,299		-1,279			
166		...	-1,339		-1,317		-1,297			-1,277	18
167	-12,846	...		-1,336		-1,315		-1,295			
168		...	-1,355		-1,333		-1,313			-1,292	19
169	-13,000	...		-1,352		-1,349		-1,31			
170		...	-1,371		-1,349		-1,328			-1,308	20

Таблица 2. Передаточные числа передачи A_{ba}^h с числами спутников $n = 2$

Zb	13	...	124	125	Za	126	127	128	129	130	Zh
130		...									
163	-12,538	...	-1,315								
164		...									
165		...									
166	-12,769	...	-1,339			-1,307					
167		...									
168		...									
169	-13,000	...	-1,363			-1,331				-1,3	13
170		...									
171		...									
172	-13,231	...	-1,387			-1,354				-1,323	14
173		...									
174		...									
175	-13,462	...	-1,411			-1,378				-1,346	15
176		...									
177		...									
178	-13,692	...	-1,435			-1,402				-1,369	16
179		...									
180		...									
181	-13,923	...	-1,46			-1,425				-1,392	17

Таблица 3. Передаточные числа передачи A_{ba}^h с числами саттелитов $n = 3$

Zb	13	124	125	126	127	128	129	130	Zh
130	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''
202	'''	-1,629	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''
203	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''
204	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''
205	-15,769	'''	'''	'''	-1,641	'''	'''	'''	'''
206	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''
207	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''
208	'''	-1,677	'''	'''	'''	'''	'''	-1,6	13
209	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''
201	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''
211	-16,231	'''	'''	'''	-1,661	'''	'''	'''	'''
212	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''
213	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''
214	'''	-1,726	'''	'''	'''	'''	'''	-1,646	14
215	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''
216	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''
217	-16,692	'''	'''	'''	-1,709	'''	'''	'''	'''
218	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''	'''

Таблица 4. Передаточные числа передачи A_{ba}^h с числами саттелитов $n = 6$

Заключение

В результате проведенного исследования удалось заполнить таблицы передаточных чисел для планетарного передаточного механизма типа A_{ba}^h и найти зависимости существования передаточных чисел в этих таблицах, что упрощает вопросы изучения и проектирования планетарных передаточных механизмов.

Литература

1. Кудрявцев В.Н., Кирдяшев Ю.Н., Гинзбург Е.Г. и др. Планетарные передачи. Справочник. Л., Машиностроение, 1977. С. 9–45.
2. Красковский Е.Я., Дружинин Ю.А., Филатова Е.М. Расчет и конструирование механизмов приборов и вычислительных систем: Учеб. пособие для приборостроит. спец. вузов / Под ред. Дружинина Ю.А. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1991. С. 249–266.
3. Кудрявцев В.Н., Державец Ю.А., Арефьев И.И. и др. Курсовое проектирование деталей машин: Учебное пособие для студентов машиностроительных специальностей вузов. Л.: Машиностроение, 1984. С.103–121.

СРЕДСТВА ВИЗУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

Ю.Н. Фомина

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент Е.И. Яблочников

Рыночные отношения, усиление значимости фактора времени выпуска продукции, улучшение информированности потребителей – все это привело к усилению конкуренции между промышленными компаниями. Для сохранения конкурентоспособности предприятиям необходимо использовать новые информационные технологии. Их разработка невозможна без системного анализа проблемной области.

Введение

В настоящее время большинство отечественных предприятий осознает необходимость реорганизации технической подготовки производства (ТПП), в частности, важность внедрения новых информационных технологий и создания автоматизированных систем технической подготовки производства (АСТПП). Современный рынок промышленных товаров и услуг претерпел за последние 10 лет существенные изменения и стал ориентироваться на удовлетворение запросов различных групп потребителей. Появились новые формы кооперации в виде виртуальных предприятий, возросла конкуренция среди производителей, увеличилась информированность заказчиков. Чтобы сохранить положение на рынке в таких условиях, компании вынуждены кардинально пересмотреть формы и способы ведения своей деятельности [1].

Перед разработчиками АСТПП ставится задача систематизации и совершенствования методов анализа проблемной области (ТПП) как ключ к созданию систем, эффективных по стоимости, производительности и надежности [2]. Чтобы выжить в современных условиях, фирма должна адаптироваться и постоянно приспосабливаться к изменяющемуся окружению. Для этого компания должна быть организована таким образом, чтобы отслеживать постоянные изменения рынка сбыта, не уступать соперникам в условиях жесткой конкуренции, совершенствовать свои внутренние процессы, расширять спектр предлагаемых товаров и услуг при одновременном снижении времени их выпуска.

Исследования показывают, что наибольший процент ошибок при разработке систем возникает в процессе анализа и проектирования. Цена (временная и денежная) обнаружения и исправления ошибок становится выше на более поздних стадиях проекта. Например, исправление ошибки на стадии проектирования стоит в 2 раза, на стадии тестирования – в 10 раз, а на стадии эксплуатации системы – в 100 раз дороже, чем на стадии анализа. Рост объема и сложности проектов является реальностью [2].

Каждый проект по разработке АСТПП является уникальным. Это следует из вариации типов систем, клиентов, организаций, технологий и т.д. Также существуют различные отправные точки для определения требований. В некоторых случаях можно использовать готовую бизнес-модель, разработанную для другой организации. Иногда основой для проектирования служит детальное техническое задание заказчика. В других случаях клиенты могут иметь весьма неопределенное представление о том, что должна выполнять создаваемая система. Возможность существования столь различных отправных точек предполагает, что аналитики должны быть способны приспособить свой подход к определению требований к любой ситуации [3].

Для решения обозначенной проблемы требуется:

- создать типовой, подходящий для большинства случаев подход к анализу исходных требований;
- провести комплексный анализ ТПП различных промышленных предприятий;
- разработать унифицированные бизнес-процессы ТПП на основании полученных данных.

Основная часть

Особенностью проектирования АСТПП является то, что на промышленных предприятиях уже существует своя система ТПП. Это, с одной стороны, дает базу для анализа, а с другой – осложняет переход компании к новой системе организации и функционирования (эволюционный и революционный подходы). Следовательно, начальная стадия проектирования подсистем АСТПП заключается в системном анализе существующей ТПП предприятия.

Необходимо обозначить цели, методы и средства выполнения такого анализа. Целью выполнения этого этапа является комплексный анализ предметной области, состоящий из выявления требований к проектируемой подсистеме ТПП (определение того, что должно быть создано) и моделирования ТПП. Этот процесс в стандартах ЕСТПП назван стадией предпроектного анализа ТПП и разработкой технического задания. Его необходимость вызвана тем обстоятельством, что технологическая подготовка производства изделий на каждом предприятии имеет свои особенности, поэтому подсистемы ТПП каждой компании являются уникальными, хотя и реализованы на базе общих принципов, зафиксированных в соответствующих стандартах ЕСТПП, ЕСКД, ЕСТД и т. д.

Несмотря на различие отправных точек, существуют шаги, которые можно сделать в большинстве случаев. Это позволяет предложить типовой рабочий процесс по определению требований (логический аппарат исследования):

- перечисление возможных требований;
- осознание контекста системы;
- определение функциональных требований;
- определение нефункциональных требований.

На первом этапе при подготовке исходных данных (возможных требований) клиенты, разработчики и аналитики выдвигают множество идей, которые, возможно, стоит использовать при проектировании системы. В любом случае их необходимо сохранить для дальнейшего анализа. Этот список используется исключительно для планирования работ.

Множество людей, вовлеченных в процесс создания системы, не являются специалистами в области ТПП, т.е. необходимо описать контекст, в котором работает система (осознание контекста системы). Это реализуется за счет моделирования предметной области ТПП.

Определение функциональных требований сводится к построению различных вариантов функциональных моделей ТПП. К нефункциональным требованиям относятся такие свойства системы, как ограничения среды, производительность, зависимость от аппаратной платформы, ремонтпригодность, расширяемость, надежность и пр. [3].

Уровень формулировки требований особенно важен как стартовая точка при описании реализации. Документы, созданные на уровне формулировки требований, имеют наиболее продолжительный жизненный цикл, и в силу их близости к описанию проблем бизнеса они чрезвычайно полезны для проработки информационных систем. По этой причине уровень формулировки требований имеет наивысший приоритет – образует связь между пользователями и первоначальным описанием их проблем [4].

При предпроектном анализе описание ТПП производится поверхностно и ориентировано на цели и язык пользователя, поэтому используются, в основном, полуформа-

лизованные описательные методы. Создание различных типов моделей и проработка каждой из них по уровням описания в сочетании с формулировкой проблем бизнеса и составляет процесс анализа [4]. Предпроектный анализ в общем случае предполагает исследование предметной области ТПП в трех направлениях: информационном, функциональном и организационном. На основе полученных данных строится концептуальная модель ТПП предприятия.

Организационный анализ приводит к построению иерархической структуры компании.

С помощью функционального анализа выясняются функциональные связи и последовательности выполнения функций, задач и процедур ТПП. Данный анализ основывается на многоуровневом рассмотрении ТПП: на основе декомпозиции каждая функция разделяется на задачи, а те, в свою очередь, разделяются на процедуры. Это означает, что на каждом уровне модель должна давать ответы на вопросы пользователей с заданной степенью детализации. Такое исследование в практике создания информационных систем получило название бизнес-моделирования, а содержание функциональных моделей названо бизнес-процессом. Функциональный анализ выполняется на основе соответствующей методической и инструментальной поддержки, а также с учетом информации о предприятии (конкретном и среднем).

Информационный анализ заключается в исследовании информационных потоков, циркулирующих между функциональными компонентами ТПП. Информационный анализ выполняется для определения взаимодействия между подразделениями ТПП и состава передаваемой документации.

Ранее предложенная в стандартах ЕСТПП методика предпроектного анализа ТПП не нашла широкого применения на промышленных предприятиях, так как не была обеспечена соответствующими инструментальными средствами.

После определения цели анализа необходимо рассмотреть современные методы и средства его реализации (инструментарий).

Для функционального анализа ТПП целесообразно использовать:

- методологию SADT и разработанные на ее основе стандарты IDEF0, IDEFX и IDEFIX, а в качестве инструментальных средств – пакет Platinum BPwin 4.0 фирмы Computer Associates;
- методологию ADONIS (пакет ADONIS фирмы BOS Information Technologies Consulting);
- методологию UP и разработанный на ее основе пакет Rational Rose фирмы Rational Software Corporation.

Рассмотрим кратко указанные средства моделирования.

Пакет BPwin рекомендуется для небольших предприятий и основан на использовании стандартов IDEF0, IDEFX и IDEFIX, что позволяет обеспечить семантическую строгость, необходимую для гарантии правильности и непротиворечивости получаемых моделей, а также наглядность и полноту их отображения.

Функциональное моделирование BPwin выполняется с помощью диаграмм IDEF0. В диаграмме первого уровня (IDEF0), пример которой приведен на рис. 1, фиксируются все подсистемы, отражающие основные функции ТПП.

В соответствии с поставленной целью на диаграммах (диаграммах декомпозиций) следующих уровней детализации фиксируются результаты декомпозиции блоков вышестоящих уровней. Необходимо отметить, что функциональный анализ на базе диаграмм IDEF0 не является полным, так как в них не фиксируются правила перехода от одних функций к другим и правила ветвления процесса ТПП. Диаграммы IDEF0 используются на первом этапе функционального анализа ТПП для первичной оценки бизнес-процессов ТПП [2]. Наиболее полный функциональный анализ достигается на основе стандарта IDEF3, так как позволяет более точно определить правила функцио-

нирования анализируемой ТПП. Диаграммы в нотации IDEF3 позволяют представить бизнес-процессы с указанием последовательности выполнения функций за счет использования символов логики (последовательные и параллельное исполнение этапов, условие ЕСЛИ (да, нет)), но не содержат указаний о механизмах управления и исполнителях (рис. 2).

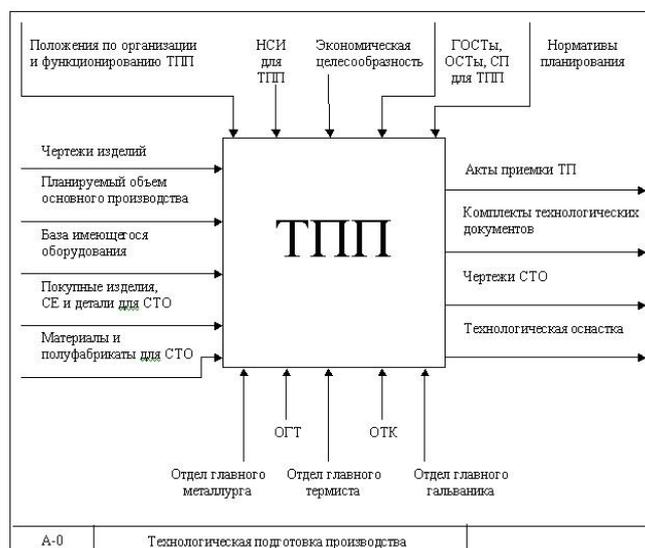


Рис. 1. Модель верхнего уровня бизнес-процесса «Техническая подготовка производства» в нотации IDEF0

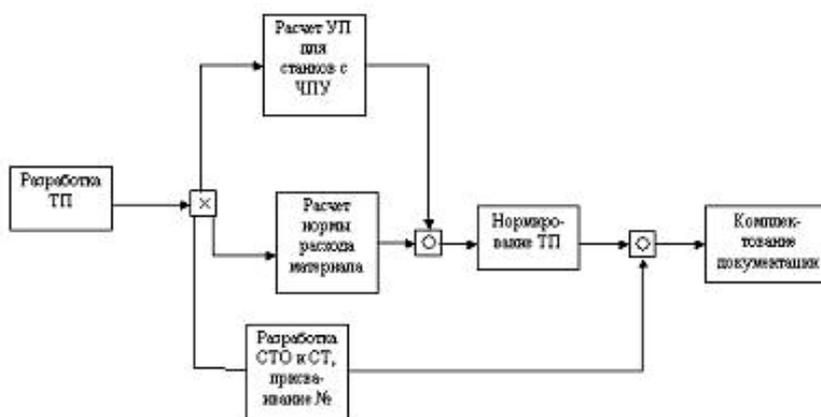


Рис. 2. Модель бизнес-процесса «Проектирование технологического процесса» в нотации IDEF3

Таким образом, при использовании методологии SADT нельзя ограничиться одним стандартом, к примеру, IDEF0 или IDEF3. Тем самым при разработке с ее помощью комплексной модели ТПП не удастся сохранить целостность, семантическую строгость получаемых моделей.

Функциональный анализ на базе ADONIS основан на составлении карты компании. Она представляет собой комплексное описание бизнеса и включает модели бизнес-процессов, документов, рабочей среды и др. Диаграмма более низкого уровня выступает в виде подпрограммы. Параметры функций содержат события, исполнителей, временные и стоимостные характеристики процесса. Организационные модели позволяют задавать структуру отделов и число исполнителей. Все данные представляют единую структуру, что увеличивает прозрачность системы и позволяет легко ее оценивать и модифицировать. Таким образом, методология ADONIS превосходит суммарные

возможности диаграмм IDEF0 и IDEF3. На рис. 3 представлена диаграмма бизнес-процесса в нотации ADONIS с использованием логических переходов.

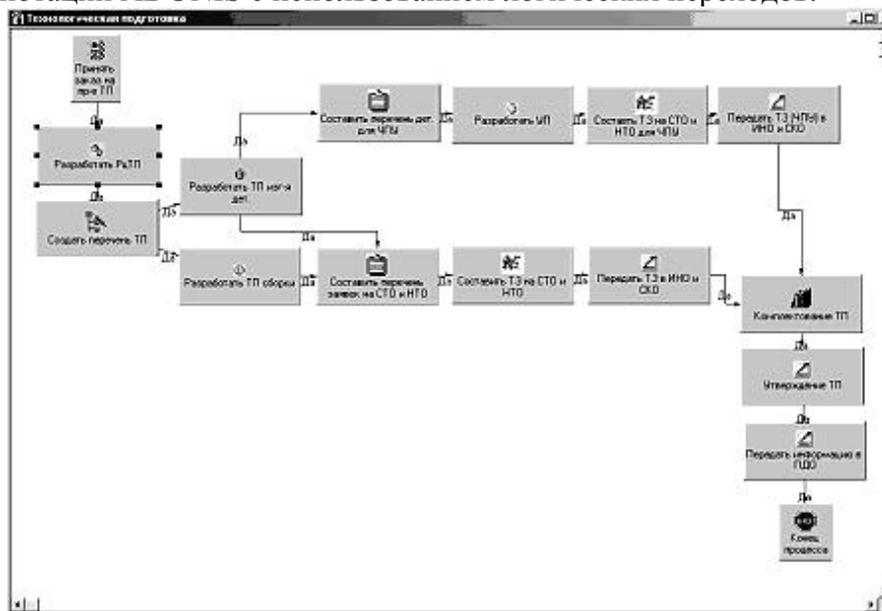


Рис. 3. Модель бизнес-процесса «Проектирование технологического процесса» в нотации ADONIS

К достоинствам данной системы относится возможность визуализации процессов – получение данных о временных и денежных затратах на процесс. Использование ADONIS удобно еще и тем, что диаграммы ADONIS могут быть выполнены в нотации UML и использованы на последующих этапах UP.

Функциональный анализ на базе UP предполагает использование диаграмм прецедентов и диаграмм деятельности в нотации UML. Именно в них основным структурным элементом является функциональная компонента ТПП: данный тип диаграмм используется при описании бизнес-процессов автоматизируемой предметной области, определении требований к будущей программной системе, а также отражает объекты системы и задачи, ими выполняемые. Принципиальное различие между ними состоит в том, что в диаграммах прецедентов функция (прецедент) определяется по отношению к внешнему субъекту (актору), что существенно ограничивает возможность ее дальнейшей детализации. В отличие от этого, в диаграммах деятельности процесс не имеет подобных ограничений, что позволяет детализировать диаграммы до того уровня, при котором они непосредственно могут быть использованы для построения алгоритмов бизнес-процессов в создаваемой системе (в данном случае в АСТПП). Этот тип диаграмм позволяет показать не только последовательность процессов, но их ветвление и синхронизацию [4].

В диаграммах деятельности имеется возможность выполнить разделение бизнес-процесса по различным подразделениям предприятия, в которых он выполняется. Пересекать линию дорожки могут только переходы, которые при этом обозначают вход потока управления в соответствующую службу или выход из него. Пример диаграммы деятельности с дорожками приведен на рис. 4.

Модели, представленные на рис. 2– 4, отображают один и тот же бизнес-процесс, но выполнены с помощью различных методик. Сравнение существующих методологий позволит найти наиболее наглядное, удобное и информационное средство визуализации процессов, наилучшим образом подходящее для моделирования ТПП. Подобный анализ требует большой подготовительной работы, а именно детального исследо-

вания процессов функционирования ТПП, а также получения навыков по эксплуатации автоматизированных систем моделирования.

Далее представлены результаты проведения различных видов анализа.

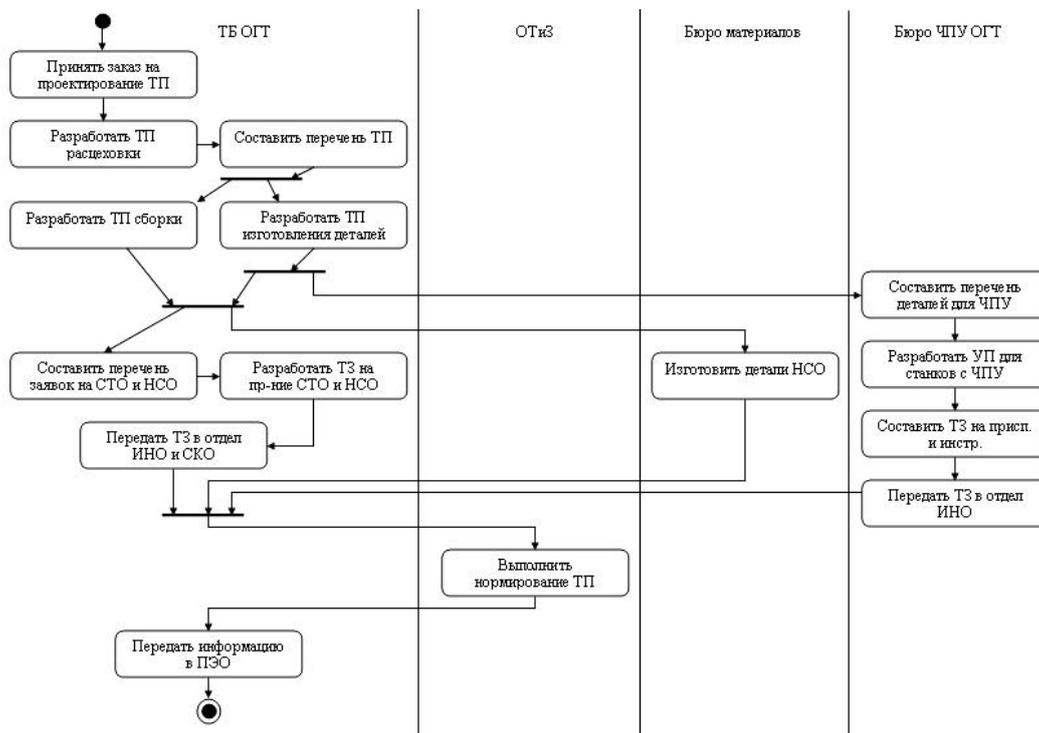


Рис. 4. Модель бизнес-процесса «Проектирование технологического процесса» в виде диаграммы деятельности UML

Результатом функционального анализа является получение комплекса функциональных моделей, отражающих ТПП конкретного предприятия с заданным уровнем детализации. Необходимо отметить, что достаточно часто функции на моделях изображаются без указания управляющих элементов (выдача распоряжение или заданий на выполнение работ). Таким образом, теряются этапы типа комплектования и перемещения, которые, в свою очередь, зависят от элементов, связанных с планированием и составлением графиков выполнения работ. Учет управляющих компонентов может значительно изменить функциональную модель. Отсутствие указанных элементов существенно снижает ценность функционального анализа и может привести к серьезным ошибкам при оценке его результатов [5].

Если документы выполнены на твердом носителе, то при переходе из подразделения в подразделение требуется процедура передачи (следует formalizovat сами правила передачи и заказа документов для их дальнейшего автоматизирования), в которой выполняется регистрация выходных и входных документов. Если не учитывать процедуры передачи документов, то этим самым будет занижен экономический эффект от внедрения электронного архива, при котором не нужен перенос документа из подразделения в подразделение и, кроме того, возможен одновременный доступ к документу из разных подразделений, что значительно сокращает цикл ТПП [1].

Анализ функциональной модели позволяет локализовать проблемные места, оценить преимущества новых функциональных компонентов ТПП и глубину изменений существующей организации ТПП. Детализация функциональных компонентов ТПП позволяет выявить недостатки организации даже там, где функциональность на первый взгляд кажется очевидной. Признаками несовершенной деятельности могут быть неуправляемые и дублирующиеся работы, неэффективный документооборот (нужного

документа не оказывается в нужном месте в нужное время), отсутствие обратных связей по управлению (проведение работы не зависит от промежуточных результатов) и по входу (объекты и информация используются нерационально). Целью является сокращение времени выполнения, что должно быть выражено количественно.

Функциональный анализ дополняется информационным анализом ТПП, основанным на описании информационных потоков, циркулирующих в ТПП. Основой для создания информационной модели являются входящие и выходящие информационные потоки функциональной модели.

Каждое из рассмотренных выше инструментальных средств может фиксировать информационные потоки ТПП. Информационные потоки на диаграммах фиксируются двунаправленными стрелками, а также комментариями, которые могут быть видны или нет в зависимости от «точки зрения» (что реализовано, например, в методологии ADONIS).

При унификации процессов информационный анализ может быть выполнен различными способами. Простейшим из них является использование диаграмм деятельности, в которых вместо линий связи показаны информационные потоки между функциональными компонентами и даны указания на используемые документы в виде комментариев.

Результаты информационного анализа необходимы в дальнейшем при классификации объектов. Они отражаются как элементы описания, характеристики и атрибуты. Т.е. для создания классов необходимо оперировать данными и информационной, и функциональной модели.

Информационные потоки для каждой функциональной компоненты можно разделить на входной/выходной основной поток, входной/выходной управляющий поток, входной/выходной поток с нормативно-справочной информацией (НСИ) (рис. 5).

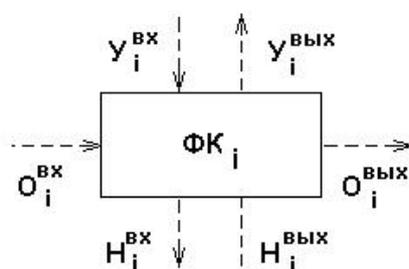


Рис. 5. Информационные потоки для i -й функциональной компоненты

На рис. 5 приняты обозначения: O – основной поток, Y – управляющий поток, H – поток с нормативно-справочной документацией, $ФК_i$ – функциональная компонента (i -й этап функциональной модели). Входной основной поток – это материал для исполнения основного назначения функциональной компоненты, преобразуемый в выходной основной поток. Входной управляющий поток содержит распоряжение (задание) на выполнение работы, для которой предназначена функциональная компонента. Выходной управляющий поток содержит информацию о завершении или не выполнении заданной работы. Управляющие потоки чаще всего фиксируются с помощью таких атрибутов, как «утвержден», «на изменении», «существует неутвержденная версия» и др. На диаграммах они могут отображаться в виде отдельных функциональных компонентов, элементов прямой и обратной связи или не показываться вообще. Входной поток с НСИ обычно содержит запрос, связанный с получением НСИ, а выходной поток – результаты выполнения запроса.

На рис. 6 показана схема информационных потоков, выраженная в виде диаграммы деятельности.

Схема информационных потоков (на рис. 6 обозначена «ИП») образована путем удаления связей из функциональной модели и добавления информационных потоков. Линии слияния (разделения) используются для указания соединения (разделения) информационных потоков, при этом сторожевое условие «И» на линии слияния означает, что выполнение задачи может начаться лишь тогда, когда на задачу поступили все необходимые для неё информационные потоки. Например, входной поток $ИП_2^{вх}$ будет сформирован только после создания потоков $O_{1,2}^{вх}$ и $Y_2^{вх}$, т. е. если пришел поток $O_{1,2}^{вх}$, то задача 2 будет выполняться лишь после того, как пришло распоряжение на ее выполнение (поток $Y_2^{вх}$).

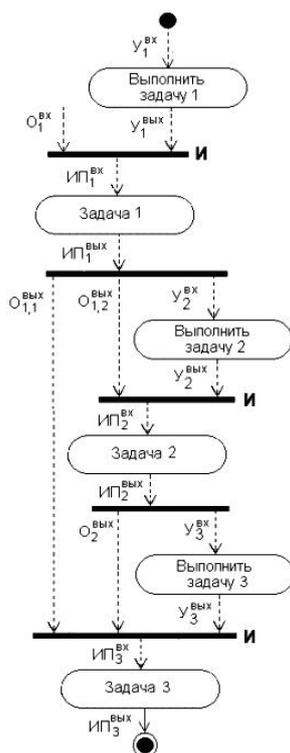


Рис. 6. Пример схемы документооборота, выдержанной в виде диаграммы деятельности UML

Таким образом, при правильно и полно составленных диаграммах с информационными потоками в случае дальнейшей реорганизации какой-либо функциональной компоненты будет ясно, какие документированные знания нужно будет модифицировать.

Понимание важности оценки применяемых в бизнес-процессах знаний привело создателей ADONIS к разработке дополнительных средств для идентификации и структурирования содержимого соответствующих категорий знаний в виде моделей документов.

Информационный анализ не может завершиться лишь составлением диаграмм. Нужны данные об информационных потоках и документах, применяемых в ТПП. Поэтому параллельно с составлением диаграмм создаются спецификации документов для уже сформированных моделей. Описанный выше процесс необходим для создания классов объектов, при этом производится анализ всех имеющихся данных, накопленных в функциональных информационных моделях всех уровней. Необходимо отметить,

что без словаря данных невозможна эффективная интеграция подсистем ТПП как между собой, так и с системами управления предприятием.

На основе информационного анализа необходимо получить ответы на следующие вопросы:

- какие информационные связи существуют между задачами ТПП;
- имеет ли место дублирование и нерациональные потоки информации;
- какие виды и формы документов используются при решении задач ТПП, какова периодичность создания документов и их объемы;
- какие входящие документы использует каждая функциональная компонента ТПП;
- какие исходящие документы генерирует функциональная компонента ТПП;
- какие документы регламентируют выполнение функциональной компоненты ТПП;
- каковы состав и структура баз данных технологического назначения;
- наличие и формы хранения нормативной, инструктивной и нормативно-справочной информации.

Организационный анализ основан на составлении диаграммы, фиксирующей организационную структуру ТПП.

В ADONIS имеются средства для создания организационных структур: модели рабочей среды, встраиваемые в комплексную диаграмму компании. В них отражаются состав подразделения, информация о руководителе и составе исполнителей.

Организационные модели дополняются спецификацией подразделений ТПП. В этой спецификации за каждым подразделением закреплены его атрибуты: назначение, количество и состав исполнителей и т.д. На основе организационного анализа необходимо получить ответы на следующие вопросы:

- какова организационная структура и схема работ в ТПП;
- каковы функциональные связи между подразделениями ТПП;
- каковы функциональные связи между подразделениями ТПП и внешними к ТПП отделами предприятия;
- каковы характеристики подразделений ТПП.

Критерием оценки при выполнении предпроектного анализа служат функционально-стоимостные расчеты (другое распространенное название – ABC-анализ, Activity-Based Costing). ABC-анализ – это технология, применяемая для оценки затрат и количества используемых ресурсов. Она помогает распознать и выделить наиболее дорогостоящие операции для дальнейшего анализа.

В данном случае ABC-анализ необходим для определения стоимости выполнения работ в функциональных компонентах ТПП. Возможность и успешность применения ABC-анализа зависит от результатов накопленной статистики по трудоемкости решения технологических задач, по нормативной базе и применяемым программным средствам. Для каждой компоненты в функциональной модели рассчитывается прямая стоимость ее выполнения плюс стоимость накладных расходов, распределенных по всей модели с помощью некоего алгоритма. В итоге мы получаем стоимостную оценку функциональной компоненты заданного уровня детализации.

Для крупных промышленных предприятий проведение предпроектного анализа ТПП – трудоемкий и сложный процесс. Это обстоятельство осложняет проведение анализа. Здесь может быть использован подход, согласно которому утверждается, что 20 % работ составляют 80 % затрат [5].

Для проведения функционально-стоимостного анализа можно воспользоваться специализированными программными средствами, такими, например, как блок симуляции в ADONIS.

По результатам ABC-анализа оцениваются варианты бизнес-процессов ТПП и выбираются наиболее эффективные из них по стоимости, производительности и др.

Заключение

Построение компании и управление ею является очень сложной деятельностью, и ранее она осуществлялась интуитивно. Реинжиниринг бизнес-процессов ставит своей целью превратить искусство управления компанией в инженерную дисциплину. Для этого необходимо построить адекватные, понятные модели предприятия и дать возможность менеджерам анализировать последствия изменения этих моделей. Реинжиниринг бизнес-процессов обозначает совокупность методов и средств, предназначенных для кардинального улучшения основных показателей деятельности компании путем моделирования, анализа и перепроектирования существующих бизнес-процессов. Деятельность компании должна быть детально исследована, чтобы каждый, имеющий с ней дело, в любой ситуации располагал достаточной информацией для принятия наилучшего решения. Известно, что сложные вещи проще воспринимаются, если они каким-либо образом зрительно представлены, а не только описаны. Формальный способ визуализации чего-либо – построение моделей. Следует понимать, что модель – это более или менее верное представление моделируемой сущности, выполненное с заданной степенью детализации [3].

Существуют различные методики моделирования бизнеса. В данном случае рассмотрены следующие три из них: SADT, UP и ADONIS. Сравнительный анализ этих методов применительно к предметной области ТПП до сих пор еще не проводился, тем самым увеличивается значимость проведенной работы. Главным недостатком рассмотренных выше методов моделирования, за исключением ADONIS, является то, что они позволяют лишь формализовать описание бизнес-процессов, но не подходят для системного формирования функциональных структур и оптимизации деятельности компании. ADONIS же дает возможность комплексного подхода к анализу за счет всестороннего описания (функционального, организационного и информационного) предметной области, реализованного в единой карте компании.

Подобные методики позволяют создать концептуальную модель предприятия. Благодаря им можно непосредственно представлять в моделях плохо формализуемые знания менеджеров о бизнес-процессах, в частности о рабочих процедурах. На их основе строятся рабочие модели и осуществляется связь между менеджерами и программистами.

Литература

1. Яблочников Е.И. Автоматизация технологической подготовки производства в приборостроении. СПб: СПбГУ ИТМО, 2002. 92 с.
2. Марка Д., Мак-Гоуэн К. Методология структурного анализа и проектирования. М.: Метатехнология, 1993. 240 с.
3. Ойхман Е.Г., Попов Э.В. Реинжиниринг бизнеса: реинжиниринг организаций и информационные технологии. М.: Финансы и статистика, 1997. 336 с.
4. Буч Г., Рамбо Д., Джекобсон А. Язык UML. Руководство пользователя. М.: ДМК, 2000. 432 с.
5. Куликов Д.Д., Яблочников Е.И. Методологические аспекты автоматизации технологической подготовки производства. // Вестник информационных и компьютерных технологий. 2004. №4. С. 35–42.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ МИКРОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

В.О. Сабадаш

(Санкт-Петербургский государственный политехнический университет)

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник Е.Н. Пятышев

(Санкт-Петербургский государственный политехнический университет)

Работа содержит обзор и краткий анализ требований к моделированию тепловых микропреобразователей.

Введение

Объектом исследования является тепловой микропреобразователь среднеквадратичной мощности переменного напряжения.

Тепловой микропреобразователь – это устройство, которое создает электрический сигнал на выходе, отображающий измеренную физическую величину посредством промежуточного теплового преобразователя. В качестве измеряемой физической величины может служить среднеквадратичная мощность переменного напряжения тока (квадратор), расход газа или жидкости (микрорасходомер), давление остаточных газов при вакуумировании, величина касательного трения при измерениях в пограничном слое газа [1, 2].

Главным элементом преобразователя является термопара. Термопара – это устройство, которое генерирует разность электрического потенциала, когда находится в области температурного градиента. Термопара состоит из двух соединенных между собой разнородных электропроводящих элементов (из металлических проводников или полупроводников). Если спаи проводящих элементов, образующих термопары, находятся при разных температурах ($T_A \neq T_B$), то в цепи термопары возникает термоЭДС. Величина термоЭДС ΔV_r однозначно определяется температурой холодного и горячего спаев и природой материалов, т.е. величиной коэффициента Зеебека P :

$$\Delta V_r = (P_1 - P_2) \Delta T.$$

Простейший тепловой микропреобразователь, показанный на рис. 1, состоит из консольно закрепленной кремневой пластины (или мембраны), содержащей электрическое сопротивление – нагреватель – на одном ее конце, и из термобатареи, которая термически соединяет сопротивление с подложкой.

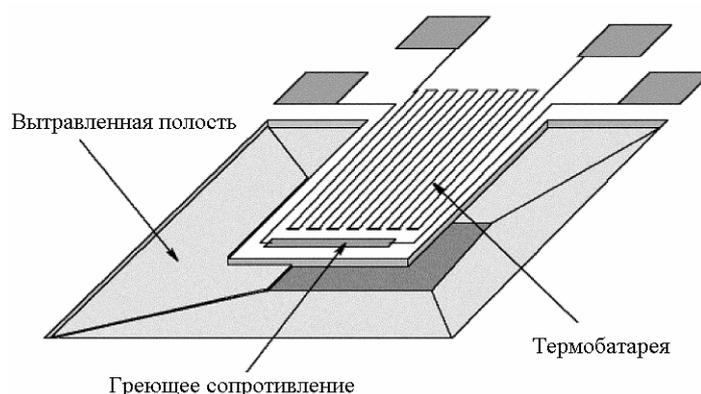


Рис. 1. Простейшая схема теплового микропреобразователя

Один спай термопары поддерживается при температуре подложки, которая находится при температуре окружающей среды и играет роль стока теплоты. Другой спай лежит рядом с нагревателем и термически изолирован окружающим воздушным зазором. Особенности микротехнологии производства микропреобразователей ограничивает выбор материалов для термопар.

- Процесс преобразования разбивается на три основные стадии:
- преобразование электрической энергии в тепловую посредством джоулевой теплоты, выделяемой на нагревателе при прохождении через него электрического тока;
 - перенос тепла через среду с определенной теплоемкостью и теплопроводностью и нагрев горячих спаев термопар;
 - преобразование разности температуры между горячими и холодными спаями термопар в выходное напряжение посредством термоэлектрического эффекта Зеебека [3].

Эффекты миниатюризации

При разработке тепловых микроустройств проектировщик сталкивается с «проблемой масштаба», так как на микронном и субмикронном уровне относительное влияние фундаментальных взаимодействий на характеристики устройства сильно отличается от существующих на макроуровне.

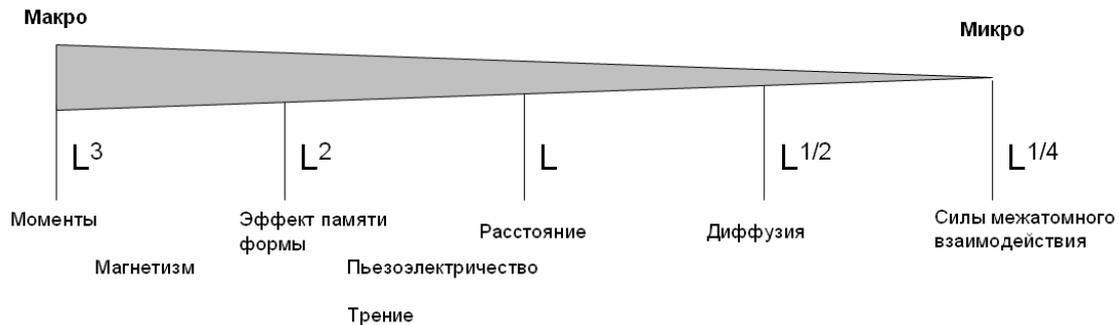


Рис. 2. Линейный размер и фундаментальные взаимодействия

На рис. 2 показан относительный масштаб основных взаимодействий в зависимости от линейных размеров. Например, устройство, эффективность работы которого зависит от увеличения отношения его поверхности к объему, будет сильно выигрывать от миниатюризации. Это справедливо для тепловых преобразователей, микрофлюидных систем и электростатических переключателей.

Характерными следствиями миниатюризации являются следующие эффекты.

- Трение начинает влиять больше, чем инерция. Капиллярные, электростатические и силы межатомного взаимодействия становятся значительными.
- Рассеивание тепла в микроустройствах начинает играть большую роль, чем теплоемкость, и, соответственно, параметры теплопереноса могут быть использованы для создания оригинальных устройств.
- Течение жидкостей и газов в сверхмалых объемах характеризуется склонностью к запиранию каналов, что может быть эффективно использовано для управления потоками.
- Механические свойства материалов сильно зависят от масштаба и технологий изготовления.
- Сборка и упаковка микродатчиков усложнена тем, что, обеспечивая взаимодействие датчика с внешней средой, необходимо защитить его от нежелательных внешних воздействий.
- Массовое производство значительно снижает цену микроизделия [4].

Микропреобразователи и численное моделирование

В настоящее время тепловые микропреобразователи уже широко применяются в автомобильных системах безопасности и технологических системах контроля потоков газов, а также в метрологии и аэрогазодинамике.

В процессе разработки и изготовления подобных объектов встает вопрос достоверного предсказания их характеристик на этапе проектирования. Эксперимент является, как правило, наиболее надежным с точки зрения достоверности получаемой информации и адекватности воспроизведения рассматриваемых явлений. Экспериментальные данные были и остаются той отправной точкой отсчета, которая обеспечивает правильность выбора используемой математической модели и последующих выводов, полученных на ее основе.

Аналитические методы имеют свои области применения, в которых они обладают рядом неоспоримых достоинств по сравнению с другими подходами. Однако практика ставит сложные, сильно нелинейные, часто стоящие на стыке различных разделов науки задачи, требующие создания и решения комплексных математических моделей, что представляет значительные трудности при использовании только аналитических методов.

Эффективным компромиссным подходом в подобных случаях становятся методы численного моделирования, представляющие собой системную цепочку элементов научного исследования, которая начинается с постановки проблемы (физической, математической) и завершается получением численных результатов и их анализом. В случае, когда наблюдается заметное рассогласование с известными экспериментальными или аналитическими данными, осуществляется возврат к уточнению выбранной математической модели и методов расчета.

Процесс проектирования типового теплового микропреобразователя включает следующие типы расчетов:

- нахождение распределение температур с учетом теплопроводности, конвекции и радиационного теплообмена;
- решение задач аэро- и термодинамики;
- нахождение температурных напряжений и деформаций;
- решение связанных электромеханических задач;
- расчет электростатических сил при различных напряжениях;
- учет преднапряженного состояния, вызванного особенностями технологического процесса.

Моделирование эти связанных задач осложняется тем, что микропреобразователь в сборке, например, при использовании в качестве датчика вакуума или анемометра, часто является геометрически сложным трехмерным объектом.

Реальные конструкции. Тепловой преобразователь

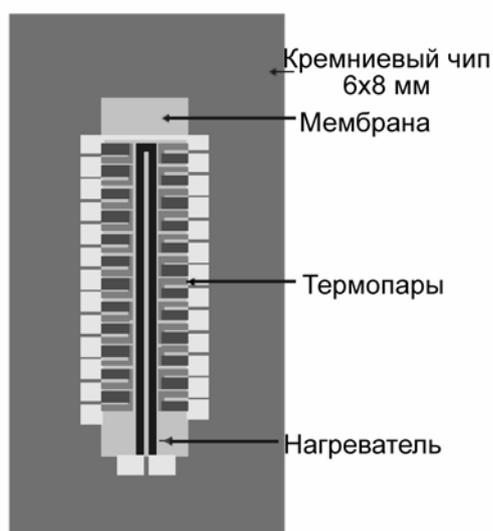


Рис. 3. Тепловой микропреобразователь мощности переменного тока

Микромеханический тепловой преобразователь (рис. 3) предназначен для нахождения высокоточных значений напряжения переменного тока в частотном диапазоне от 0,1 Гц до 1 МГц. Микропреобразователь разрабатывается с целью обеспечения метрологических измерений переменных электрических величин. Кроме основного назначения, преобразователь может быть применен в цифровых вольтметрах и мультиметрах, в устройствах анализа сигналов сложной формы (акустических, механических, радио- и гидролокационных).

Реальные конструкции. Датчик вакуума

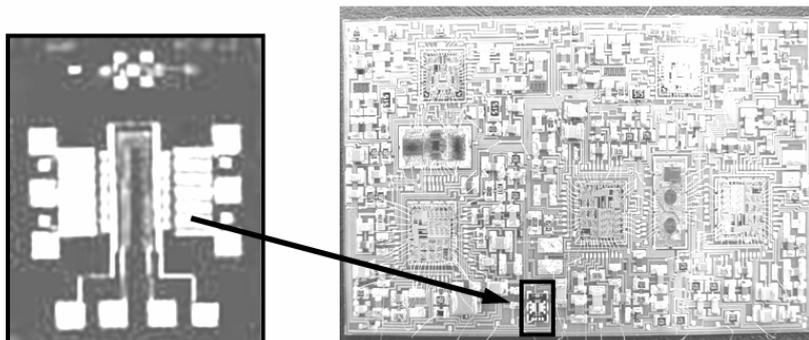


Рис. 4. Датчик вакуума и его размещение на печатной плате

Датчик вакуума (рис. 4) используется для контроля производственных процессов в полупроводниковой промышленности, проверки качества сборки герметичных устройств в процессе их производства и работы.

Реальные конструкции. Угломер



Рис. 5. Схема работы угломера и тестовая установка

Типы моделирования

Типы моделирования, необходимые при проектировании устройств на базе тепловых микропреобразователей, сведены в табл. 1.

Тип преобразователя	Задачи моделирования
Метрологический тепловой преобразователь переменного тока	Теплопроводность Радиационный теплообмен Конвективный теплообмен Связанные термоэлектрические задачи

Датчик вакуума	Теплопроводность Радиационный теплообмен Конвективный теплообмен Связанные термоэлектрические задачи
Угломер	Теплопроводность Радиационный теплообмен Конвективный теплообмен Газодинамика: естественная конвекция Связанные термоэлектрические задачи Связанные задачи газодинамики и теплопроводности
Термоанемометр/ Расходомер	Теплопроводность Радиационный теплообмен Конвективный теплообмен Газодинамика: естественная конвекция Связанные термоэлектрические задачи Связанные задачи газодинамики и теплопроводности

Таблица 1. Задачи моделирования

Заключение

Показаны основные типы задач численного моделирования, которые встают перед разработчиком тепловых микропреобразователей на этапе моделирования.

Литература

1. Пятыхев Е.Н., Одинцов А.В. Микромеханический тепловой преобразователь напряжения переменного тока. / Датчики и системы: Сборник докладов международной конференции. Том II. СПб: Изд-во СПбГПУ, 2002.
2. Пятыхев Е.Н., Лурье М.С. Микротехнологии и микроэлектромеханические системы - новое научно-техническое направление. // Научно-технический вестник СПбГТУ. 1999. №3.
3. Zeynep Celik-Butler. Introduction to Microelectromechanical Systems (MEMS) and Devices. EE5349/4328: Electrical Engineering Department. University of Texas at Arlington.
4. Tamara Bechtold, Evgenii B. Rudnyi, Jan G. Korvink. Dynamic electro-thermal simulation of Microsystems – a review. // Journal of micromechanics and microengineering. 2005. 15. R17–R31.

РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ПРИБОРОВ ПИТАНИЯ

К.В. Трушков

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор А.В. Шарков

В статье рассмотрена методика расчета тепловых режимов приборов питания, характеризующихся большими мощностями тепловыделений и имеющих радиаторы на задних стенках.

Введение

По мере совершенствования и усложнения современных вычислительных комплексов, применяемых в судостроительной и авиационной промышленности, возникла необходимость подачи больших напряжений и токов питания, входных и выходных мощностей. Но увеличение выходных мощностей влечет за собой рост величины тепловыделений в приборах питания, которые необходимо учитывать уже на стадии проектирования. Ввиду локальных перегревов в приборах увеличивается вероятность отказа элементов, температура которых превышает допустимую. Вследствие этого могут возникнуть перебои с питанием, которые повлекут за собой аварийную ситуацию. Поэтому обеспечение нормального теплового режима таких приборов является важной и даже необходимой задачей.

Существующие на данный момент методики расчета тепловых режимов приборов питания позволяют рассчитывать лишь довольно узкий класс приборов, в которых тепловыделяющие элементы располагаются на вертикально ориентированных печатных платах, закрепленных в корпусе блока [1]. В данной работе рассматриваются герметичные блоки питания, представленные на рис. 1, особенностью которых является наличие радиаторов, на которые монтируются теплонагруженные элементы. Радиаторы выведены сквозь корпус блока в окружающую среду. Межэтажные перегородки не позволяют воздуху перетекать с этажа на этаж.

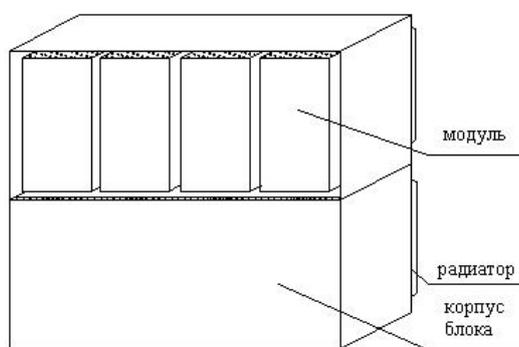


Рис. 1. Блок питания

Прибор состоит из герметичных модулей, вводимых внутрь корпуса по направляющим, причем между модулями практически не остается свободного пространства. Данный вид монтажа не позволяет рассчитывать тепловые режимы приборов такого класса по методикам, созданным для аппаратов кассетной конструкции ввиду того, что отсутствуют ярко выраженные каналы для воздушной конвекции.

Предлагаемое решение данной задачи основывается на допущении, что конвекция внутри прибора отсутствует, а отвод тепла с элементов, не контактирующих с радиатором, осуществляется лишь путем теплового излучения стенок модуля на корпус блока. Теплоотдача с корпуса блока в окружающую среду идет за счет естественной конвекции и теплового излучения.

Основные допущения

- Кондуктивные тепловые связи модулей с корпусом отсутствуют;
- переток тепла с корпуса модуля на радиатор осуществляется только за счет излучения;
- корпус блока и модуля имеет равномерное температурное поле;
- электрорадиоэлементы, расположенные на внутренних стенках модуля, имеют небольшие размеры и тем самым не препятствуют тепловому излучению от внутренней стенки радиатора к стенкам модуля;
- радиатор имеет равномерное температурное поле;
- отток тепла с корпуса прибора по элементам конструкции и подводящим кабелям отсутствует;
- тепловая связь радиатора с корпусом блока пренебрежимо мала.

Математическая постановка задачи

Рассмотрим эквивалентную схему тепловых связей внутри и снаружи блока, изображенную на рис. 2.

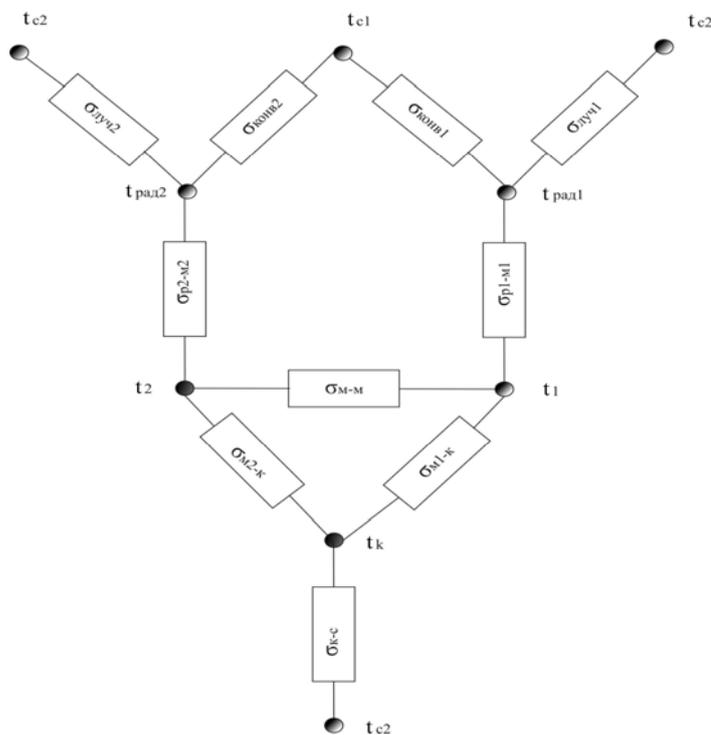


Рис. 2. Тепловая схема блока питания

На схеме рассматриваются два расположенных рядом модуля, имеющих среднеповерхностные температуры стенок корпуса t_1 и t_2 , соответственно. Радиатор первого модуля имеет температуру t_{rad1} , второго – t_{rad2} . Среднеповерхностная температура корпуса блока обозначается t_k . Воздух, с которым происходит лучистый теплообмен радиатора модуля, имеет температуру t_{c2} ; воздух, входящий в радиатор с нижележащего этажа, нагревается и имеет температуру t_{c1} . Теплообмен корпуса блока происходит с воздухом, нагретым до t_{c2} .

Конструктивной особенностью рассматриваемого модуля, показанного на рис. 3, является то, что тепловыделяющие элементы, расположенные на радиаторе, отделены от внутреннего объема модуля печатной платой для уменьшения оттока тепла внутрь прибора.

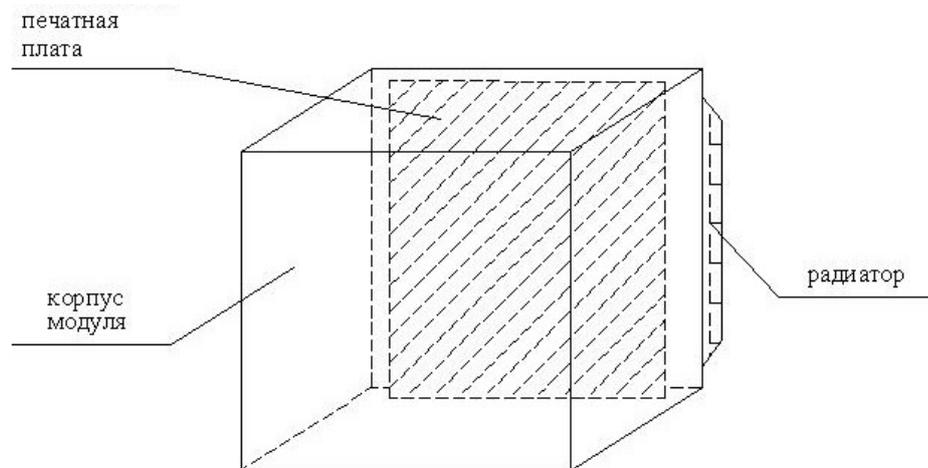


Рис. 3. Схематичное изображение модуля

Определение тепловых проводимостей

Все тепловые проводимости определяются из соотношения

$$\sigma_i = \alpha_i \cdot S_i, \quad (1)$$

где α_i – соответствующий коэффициент теплоотдачи, S_i – площадь теплоотдающей поверхности.

Лучистый коэффициент теплоотдачи корпус-среда вычисляется как

$$\alpha_{k-c} = \alpha_l + \alpha_k, \quad \alpha_l = 5.67 \cdot 10^{-8} \varepsilon \frac{T_k^4 - T_c^4}{t_k - t_c},$$

где ε – коэффициент черноты корпуса, T_k , T_c , t_k , t_c – температуры корпуса и среды в [K] и [°C], соответственно.

Конвективный коэффициент теплоотдачи от корпуса блока в окружающую среду определяется из [2]:

$$\alpha_k = (1.42 - 0.0014t_m)^4 \sqrt{\frac{t_k - t_{cp}}{L_y}}$$

при $(t - t_{cp}) < (840 / (L_y \cdot 10^{-3}))^3$. При невыполнении этого условия

$\alpha_k = (1.67 - 0.0036t_m) \sqrt[3]{(t_k - t_{cp})}$, причем $t_m = \frac{t_k + t_c}{2}$, а L_y – глубина корпуса блока.

Лучистый коэффициент теплоотдачи между корпусом модуля и корпусом блока определяется из выражения

$$\alpha_{m-k} = 5.67 \cdot 10^{-8} \varepsilon_{np} \frac{T_m^4 - T_k^4}{t_m - t_k}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_m} + \frac{1}{\varepsilon_k} - 1}$ – приведенный коэффициент черноты, ε_m – коэффициент черноты

внешней поверхности корпуса модуля, ε_k – коэффициент черноты внутренней поверхности корпуса блока.

Коэффициент лучистого теплообмена между модулями определяется аналогично коэффициенту теплообмена модуль-корпус из формулы (2), куда вместо температур модуля и корпуса следует подставлять температуры рядом стоящих модулей t_1 и t_2 .

Проводимость радиатор-модуль определяется следующим образом:

$$\sigma_{p-m} = \left(\frac{1}{\alpha_{n1}S} + \frac{\delta}{\lambda_m S} + \frac{1}{\alpha_{n2}S} \right)^{-1},$$

где α_{n1} и α_{n2} – лучистые коэффициенты теплоотдачи задняя панель радиатора – текстолитовая печатная плата и плата – стенки модуля, соответственно, S – площадь поверхности задней панели радиатора, δ и λ_m – толщина и коэффициент теплопроводности текстолитовой платы.

Конвективная тепловая связь радиатора с внешней средой определяется тепловой проводимостью [2]:

$$\sigma_{p-k} = N \cdot \lambda \cdot f \cdot b \cdot th(b \cdot h'),$$

где $b^2 = \alpha \cdot U / (\lambda \cdot f)$, $h' = h + f/U$, U – периметр сечения ребра, h – высота ребра, f – площадь сечения ребра, N – количество ребер, λ – коэффициент теплопроводности ребра, α – конвективный коэффициент теплоотдачи от ребер радиатора, который находится из выражения $\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_e}{s'}$.

Безразмерный критерий Нуссельта для одиночного ребра радиатора равен $Nu = 0.112 \left(\frac{s' \cdot Ra}{L} \right)^{0.534} \cdot [1 - \exp(-129/s' \cdot Ra/L)]^{0.284}$, критерий Релея $Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot \theta \cdot (s')^3 \cdot Pr}{\nu^2}$, где Pr – критерий Прандтля для воздуха, β – коэффициент объемного расширения воздуха, θ – перепад температур между радиатором и средой, s' – шаг оребрения радиатора (расстояние между ребрами), ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха, L – высота радиатора, g – ускорение свободного падения. Лучистая связь радиатора со средой определяется проводимостью

$$\sigma_{p_s} = \alpha_{p_s} \cdot S_{луч}$$

где $S_{луч}$ – площадь излучающей поверхности радиатора:

$$S_{луч} = 2hL + N \cdot b(L + 2h) + \left[(N-1) \frac{L1-b \cdot N}{N-1} \cdot L + 2(N-1)hL \right] \cdot \frac{\frac{L1-b \cdot N}{N-1}}{\frac{L1-b \cdot N}{N-1} + 2h}.$$

Здесь h – высота ребра, $L1$ – ширина радиатора, b – толщина ребра.

Ход расчета

Для определения температур составных частей прибора решается система нелинейных уравнений (3):

$$\begin{aligned} P_1 &= (t_1 - t_2) \cdot \sigma_{m_1-m_2} + (t_1 - t_{p_1}) \cdot \sigma_{m_1-p_1} + (t_1 - t_k) \cdot \sigma_{m_1-k} \\ P_i &= (t_i - t_{i-1}) \cdot \sigma_{m_i-m_{i-1}} + (t_i - t_{i+1}) \cdot \sigma_{m_i-m_{i+1}} + (t_i - t_{p_i}) \cdot \sigma_{m_i-p_i} + (t_i - t_k) \cdot \sigma_{m_i-k} \\ P_N &= (t_N - t_{N-1}) \cdot \sigma_{m_N-m_{N-1}} + (t_N - t_{p_N}) \cdot \sigma_{m_N-p_N} + (t_N - t_k) \cdot \sigma_{m_N-k} \\ \sum_{i=1}^N (t_i - t_k) \cdot \sigma_{m_i-k} &= (t_k - t_c) \cdot \sigma_{k-c} \\ (t_{p_1} - t_{m_1}) \cdot \sigma_{m_1-p_1} &+ (t_{p_i} - t_{c_1}) \cdot \sigma_{p_k} + (t_{p_i} - t_{c_2}) \cdot \sigma_{p_s} = P_{p_i}. \end{aligned} \quad (3)$$

Для первоначального расчета примем, что 60 % мощности тепловыделений модуля уходит через радиатор (в системе уравнений обозначена как P_{p_i}), а остальные 40 % – внутрь блока. После каждой итерации значения мощности, рассеиваемой радиатором, равно как и проводимости внутри и снаружи блока, пересчитываются, исходя из найденных температур. Тепловой поток с внешней поверхности радиатора определяется как $P_p = (t_p - t_{c_1}) \cdot \sigma_{p_k} + (t_p - t_{c_2}) \cdot \sigma_{p_n}$. Омывающий радиаторы i -го этажа воздух имеет температуру [3] $t_{c_i} = 0.7 \cdot \sum_{j=1}^Z t_{p_j} / Z$, где Z – количество радиаторов на нижележащем (i -1)-м этаже. Пересчет значений искомых температур продолжается до тех пор, пока расхождение значений, найденных на предыдущей и последующей итерациях, не достигнет заданной величины точности расчета.

Результаты расчета и сравнение их с экспериментальными данными

Для расчета зададимся следующими исходными данными: одноэтажный прибор питания имеет высоту 0.35 м, ширину 0.5 м и глубину 0.25 м. Коэффициент черноты корпуса и модулей 0.9. В приборе расположены два модуля с мощностью тепловыделений 88 Вт каждый. Высота модулей 0.28 м, ширина 0.2 м, глубина 0.19 м. Окружающая среда имеет температуру 24,4 °С. Вследствие симметричности тепловыделений и условий теплообмена температуры модулей одинаковы. Результаты расчета и эксперимента сведены в табл. 1.

	Температура расчетная, °С	Температура экспериментальная, °С	Перегрев расчетный, °С	Перегрев экспериментальный, °С	Относительная погрешность расчета, %
Радиатор	70.4	70.1	46	45.7	0.7
Стенки модуля	69.4	67.5	45	43.1	4.4
Корпус блока	42.8	43	18.4	18.2	0.6

Таблица 1. Сравнение расчетных и экспериментальных данных

Заключение

Сравнение экспериментальных данных и значений, полученных путем расчета, показывает достаточно высокую точность определения температур составных частей прибора. Хорошее совпадение расчета с экспериментом также демонстрирует обоснованность допущений об отсутствии конвекции внутри прибора. Таким образом, предложенная авторами методика расчета тепловых режимов приборов питания может использоваться на стадии проектирования для предотвращения при дальнейшей эксплуатации избыточных перегревов составных частей приборов.

Литература

1. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Методы расчета теплового режима приборов. М.: Радио и связь, 1990. 312 с.
2. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в РЭА. М.: Высшая школа, 1984. 247с.
3. Быченко М.В. Теплоотдача радиаторов в канале. / Магистерская диссертация. СПб ГУИТМО, 2005. 62 с.

ВЛИЯНИЕ ВСПУЧИВАЮЩЕГОСЯ ПОКРЫТИЯ НА ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ МНОГОСЛОЙНОЙ ЗАЩИТЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

В.Ю. Сушко

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент В.А. Кораблев

Рассмотрено влияние вспучивающегося покрытия на тепловой режим многослойной защиты при пожаре. Приведены методика и результаты расчета температурных полей для различных параметров вспучивающегося покрытия реальной конструкции.

Введение

Для защиты электронных устройств, в частности, накопителей информации, в аварийных условиях применяется многослойная защита. Она должна обеспечивать сохранение электронных компонентов при различных воздействиях: ударах, повышенных и пониженных температурах и пр. Одним из наиболее опасных воздействий является пожар, так как нежелателен перегрев электронных компонентов выше 100–120 °С, а некоторые существующие стандарты предусматривают воздействие на них воздуха с температурой 1100 °С при пожаре в течение 2-х часов.

Одним из средств защиты от разрушения при пожаре различных конструкций являются огнезащитные вспучивающиеся покрытия. Такие покрытия применяются и в качестве одного из слоев многослойной защиты электронных приборов. Здесь интерес представляет определение влияния внесения вспучивающегося покрытия на тепловой режим защиты в целом.

Вспучивающиеся покрытия представляют собой однокомпонентные или же многокомпонентные, как правило, полимерные материалы. При воздействии теплового потока на вспучивающиеся покрытия в них происходят различные процессы, в результате которых образуется объемный карбонизированный остаток – пенококс [1–2]. Толщина пенококса в десятки раз превышает первоначальную толщину материала, и он служит препятствием тепловому потоку за счет высокого теплового сопротивления.

Несмотря на то, что первый патент на вспучивающиеся покрытия был получен еще в 1938 году, процессы, происходящие в них, остаются не до конца проясненными [3]. В некоторых работах экспериментально определяются характеристики таких покрытий [4–6], но имеющиеся данные носят ограниченный характер. Не было найдено работ, где были бы приведены экспериментальные данные о тепловом эффекте реакций, происходящих при вспучивании. В то же время существуют детально разработанные модели, в которых рассматривается множество процессов, протекающих во вспучивающихся покрытиях: испарение воды и фильтрация водяного пара [7], термическое разложение материала, унос массы и вспучивание-усадка [8]. Сами авторы подчеркивают сложности, возникающие при численном решении уравнений, составляющих модель, так как итерации не всегда сходятся, и приходится применять различные методы для улучшения сходимости. Подобные модели применяются к одно- или, максимум, двухслойным системам. Их применение к многослойным системам представляется затруднительным, так как здесь намного сложнее обеспечить сходимость численного решения. Также такие модели включают большое число параметров, которые сложно определить экспериментально.

Все это приводит к необходимости рассмотрения более простых моделей для вспучивающихся покрытий при расчете многослойной конструкции. Полученные экспериментальные результаты для конструкций с меньшим числом слоев не могут быть использованы напрямую, так как, например, в [6] подчеркивается влияние характеристик внутреннего слоя на характер вспучивания.

Методика расчета

Рассматривается процесс переноса теплоты через многослойную тепловую защиту, наружным слоем которой, подверженным действию пожара, является вспучивающееся покрытие. На внутренний слой действует тепловой поток от защищаемого электронного прибора. В некоторых слоях защиты происходит фазовый переход, за счет поглощения теплоты при котором ослабляется тепловой поток к внутренним слоям. Для таких слоев записывается уравнение теплопроводности в выбранной системе координат, а граничные условия на подвижных границах учитывают фазовые изменения [9].

Процесс изменения плотности вспучивающегося покрытия учитывается посредством рассмотрения уравнения теплопроводности в переменных Лагранжа, т.е. рассматривается не действительная координата частиц вспучивающегося покрытия x , а их положение до начала вспучивания ξ . Переменные Лагранжа применяются при решении задач течения жидкости [10]. Использование координат Лагранжа при решении уравнений для вспучивающихся покрытий предлагается в [11], но для пузырьковой модели. В ней вспучивание моделируется набуханием пузырьков, содержащих водяной пар. Как отмечено в [3], пузырьковая модель слабо согласуется с экспериментом.

Уравнение теплопроводности в координатах Лагранжа для вспучивающегося покрытия в одномерном случае для прямоугольной системы координат имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\lambda_{эф}(t) \frac{\partial t}{\partial \xi} \right) = c \rho_0 \frac{\partial t}{\partial \tau}, \quad (1)$$

где $t(\xi)$ – температура, c – удельная теплоемкость покрытия, $\lambda_{эф}$ – эффективный коэффициент теплопроводности, учитывающий изменение плотности покрытия по мере вспучивания,

$$\lambda_{эф}(t) = \lambda(t) \cdot \frac{\rho(t)}{\rho_0}, \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности вспучивающегося покрытия, ρ_0 – его плотность до начала вспучивания, ρ – плотность покрытия в зависимости от температуры.

В уравнение (1) также вводится подвижная граница раздела фаз для учета скрытой теплоты фазового перехода в покрытии. Также учитывается, что при следующем после пожара охлаждении многослойной конструкции не происходит уменьшения толщины пенококса, а также фазового перехода в нем. Для вспучивающегося покрытия в этом случае применяется то же уравнение, что и для остальных слоев.

Описанные системы уравнений громоздки для аналитического решения, поэтому их удобно решать при помощи специализированных CAE-систем. Большими возможностями здесь обладает программный комплекс ANSYS, позволяющий решать краевые задачи во многих инженерных приложениях, в том числе и задачи теплопроводности [12]. Математической основой этого программного комплекса является метод конечных элементов. Принципы решения некоторых задач теплопроводности в ANSYS описаны в [13]. Моделирование многослойной защиты с фазовыми переходами проводится с применением энтальпийного подхода [9].

Благодаря возможности задания в ANSYS температурной зависимости свойств материалов вспучивающееся покрытие моделируется как слой постоянной толщины с эффективным коэффициентом теплопроводности, заданным по формуле (2). Температурная зависимость плотности от температуры задается в зависимости от кратности вспучивания E_f (отношения толщины пенококса к исходной толщине покрытия) и интервала температур вспучивания. Считается, что изменение плотности за счет уноса массы мало. Тогда эффективный коэффициент теплопроводности вспученного слоя материала в E_f раз меньше значения его коэффициента теплопроводности при рассматри-

ваемой температуре. Промежуточные значения плотности аппроксимируются линейной зависимостью в интервале температур вспучивания.

Результаты расчета

По описанной выше модели были проведены расчеты в ANSYS для многослойной защиты, состоящей из семи слоев. Двумерная модель защиты в цилиндрической системе координат представлена на рис. 1. Внутренний корпус 1 состоит из титанового сплава. Его средняя толщина составляет 3 мм. Внутренний корпус окружен слоем вещества 2, поглощающим теплоту за счет скрытой теплоты фазового перехода, со средней толщиной 30 мм, суммарная скрытая теплота фазового перехода всего слоя составляет 2,37 МДж. Далее расположены слой теплоизоляционного материала на основе кремнеземных волокон 3 толщиной 10 мм, корпус из жаропрочной стали 4 толщиной 5 мм, воздушный зазор 5 толщиной 11 мм, наружный корпус из нержавеющей стали 6 толщиной 5 мм и огнезащитное вспучивающееся покрытие 7 ОВКП-2.

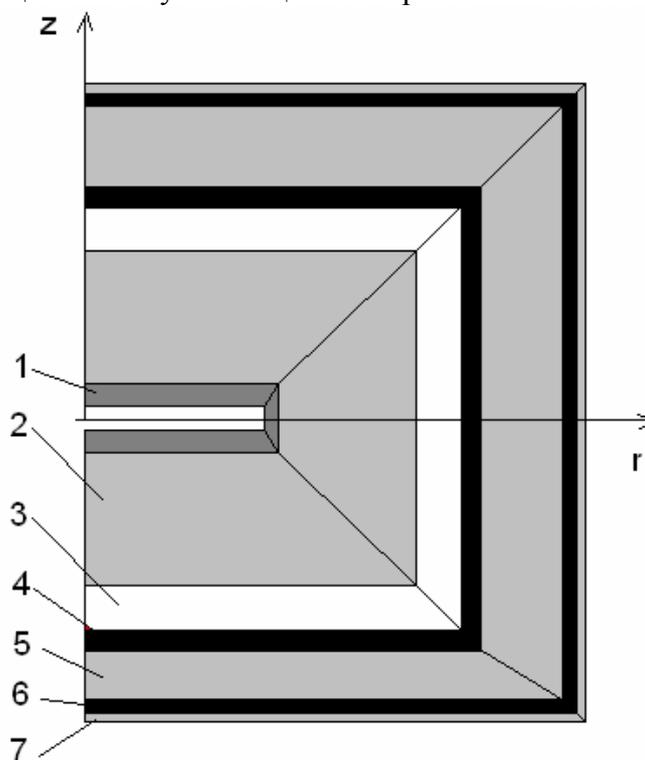


Рис. 1. Модель многослойной защиты в цилиндрической системе координат: r – координата по радиусу, z – координата по высоте, 1 – внутренний корпус, 2 – вещество, испытывающее фазовые превращения, 3 – тепловая изоляция, 4 – средний корпус, 5 – воздушный зазор, 6 – наружный корпус, 7 – вспучивающееся покрытие

Поскольку толщина вспучивающегося покрытия намного меньше радиуса цилиндра, то для него применимо одномерное уравнение в декартовой системе координат (1).

Теплофизические свойства материалов при расчетах взяты в соответствии с [14]. В тех слоях, как, например, в воздушном зазоре, где, помимо механизма теплопроводности, значительная доля теплоты переносится излучением, введен эффективный коэффициент теплопроводности. Для композиционных материалов теплопроводность рассчитана по методике, изложенной в [15]. Для ОВКП-2 известно значение коэффициента теплопроводности $\lambda = 0,41 \frac{Вт}{м \cdot К}$, плотности $\rho = 2200 \frac{кг}{м^3}$ и удельной теплоемкости

$c = 970 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$. Его кратность вспучивания полагается равной десяти. К сожалению, нет данных о теплоте фазового перехода в покрытии. Поэтому при расчетах она полагалась равной теплоте фазового перехода содержащейся в покрытии воды, которая составляет примерно 12 % его массы, а температура фазового перехода лежит в диапазоне 90–110 °С.

Для проверки модели проводились расчеты температурного поля пластинки из Ст. 3 толщиной 1 мм с нанесенным на ее поверхность ОВКП-2 толщиной 1, 2 и 3 мм. Расчеты проводились для двумерного случая, покрытие рассматривалось как одномерное. На одну из сторон пластинки с покрытием воздействует воздух с температурой 700 °С, обратная сторона охлаждается воздухом при естественной конвекции с температурой 20 °С. На рис. 2 изображено изменение средней температуры стальной пластинки в течение 10 минут воздействия, начальная температура составляет 20 °С, толщина покрытия 1 мм. Расчеты проводятся с учетом теплоты фазового перехода и без учета ее. Полученные кривые в случае, когда теплота фазового перехода учитывается (кривая 2), качественно согласуются с известными экспериментальными данными.

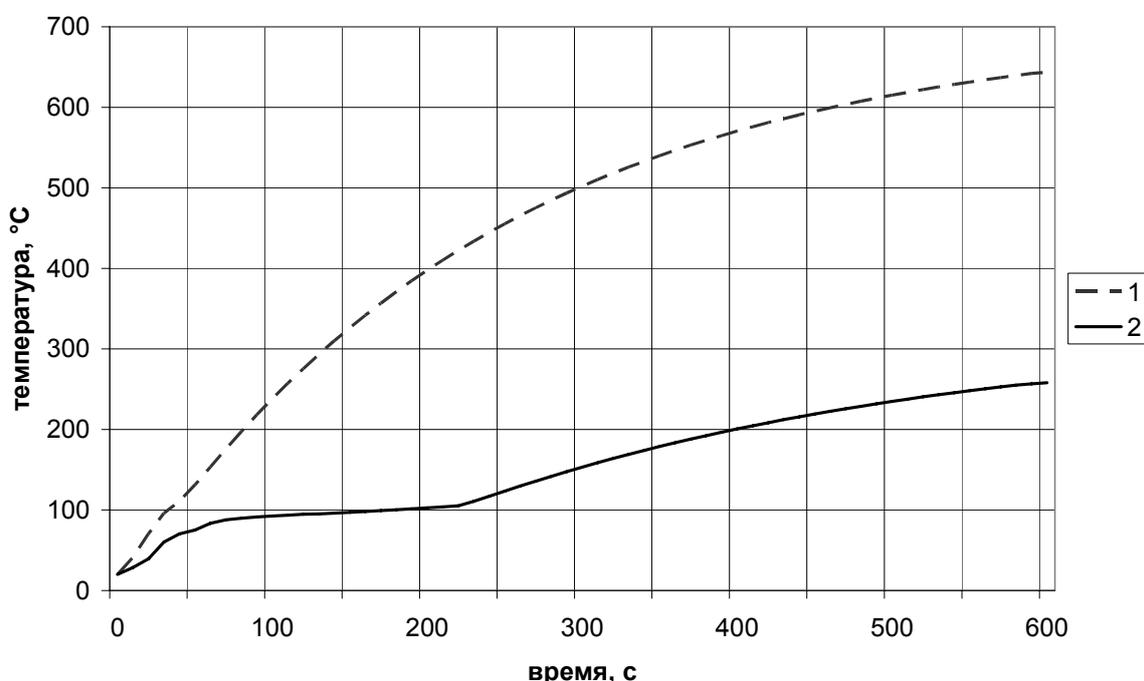


Рис. 2. Расчетные температуры стальной пластинки с ОВКП-2 толщиной 1 мм: 1 – теплота фазового перехода не учитывается, 2 – теплота фазового перехода учитывается

Поскольку количественное значение теплоты фазового перехода в покрытии неизвестно, то необходимо оценить, насколько изменение ее значения влияет на результаты расчета многослойной конструкции. Поэтому все последующие расчеты проводились также для случая, когда теплота фазового перехода в покрытии равна нулю. Результаты сравнивались между собой.

Расчеты проводились для пожара, при температуре воздуха на наружной поверхности описанной выше многослойной защиты, равной 1100 °С. Начальная температура конструкции – 20 °С. Через 2 часа температура воздуха с наружной поверхности уменьшается до 20 °С и рассматривается процесс охлаждения до окончания фазового перехода в поглощающем слое. Вычисляется процент оставшегося поглощающего вещества: чем он больше, тем более надежной является тепловая защита.

В таблице приведены результаты расчета массы оставшегося поглощающего вещества для различных толщин покрытия и характера вспучивания. Из таблицы следует, что величина теплоты фазового перехода не влияет на результаты расчета и ее можно не учитывать. Сравнение результатов расчета для защиты со вспучивающимся покрытием и с покрытием с такими же свойствами, но без вспучивания, показывает, что наличие вспучивания существенно изменяет температуры защиты при пожаре. При последующем охлаждении его влияние негативно, так как затрудняет охлаждение.

Толщина покрытия, мм	Учет теплоты фазового перехода в покрытии	Процент оставшегося поглощающего вещества через 2 часа	Минимальный процент оставшегося поглощающего вещества
2	да	65,7	44,6
2	нет	65,7	44,6
2 (не вспучивается)	нет	55,4	41,4
3	да	65,7	43,8
3	нет	65,7	43,8

Таблица. Результаты расчета оставшейся после воздействия массы поглощающего вещества

На рис. 3 приведены средние температуры некоторых элементов тепловой защиты по результатам расчета для толщины вспучивающегося покрытия 2 мм. На рис. 4 приведены температурные поля в защите через 2 часа воздействия пожара в случае, когда покрытие толщиной 2 мм вспучивается, и в случае, когда вспучивания не происходит.

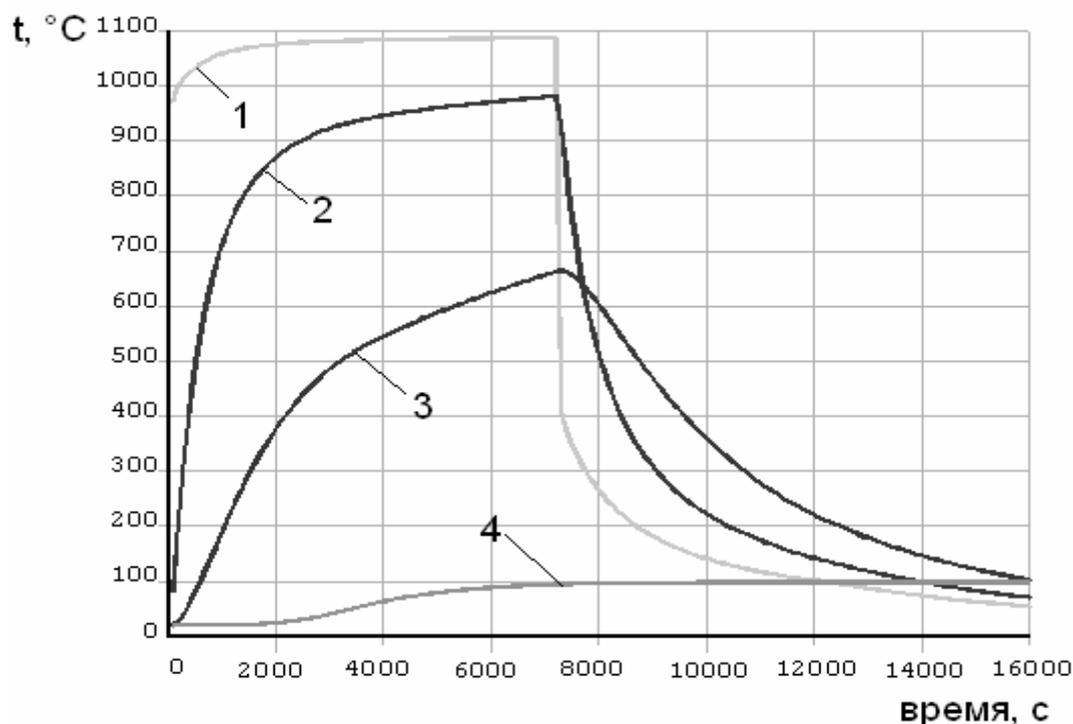


Рис. 3. Средние температуры элементов многослойной защиты со вспучивающимся покрытием толщиной 2 мм: 1 – температура наружной поверхности, 2 – температура наружного корпуса, 3 – температура промежуточного корпуса, 4 – температура внутреннего корпуса

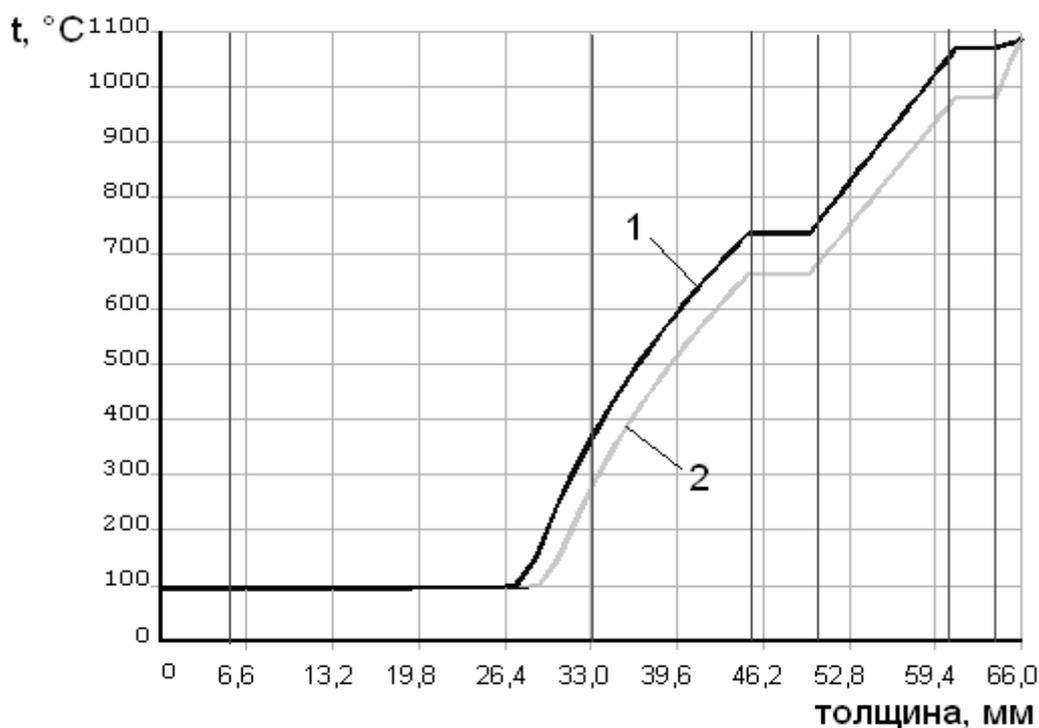


Рис. 4. Температурное поле в защите вдоль оси симметрии через 2 часа воздействия с температурой 1100 °С, для вспучивающегося покрытия даны координаты Лагранжа: 1 – покрытие толщиной 2 мм без вспучивания, 2 – покрытие толщиной 2 мм со вспучиванием

Заключение

Было рассмотрено влияние вспучивающегося покрытия ОВКП-2 на тепловой режим многослойной защиты электронного прибора при пожаре. Для этого проведены расчеты температурных полей при помощи пакета ANSYS, реализующего решение уравнения теплопроводности методом конечных элементов. Из-за наличия большого числа слоев для улучшения сходимости решения применена упрощенная модель переноса теплоты во вспучивающихся покрытиях. Установлено, что для рассматриваемой конструкции защиты влиянием теплоты фазового перехода в покрытии на конечные температуры можно пренебречь.

Также из результатов расчетов следует, что вспучивающееся покрытие толщиной до 3 мм увеличивает время работы защиты при пожаре. Для больших толщин покрытия время работы при пожаре уменьшается из-за уменьшения скорости охлаждения после окончания воздействия пожара.

Литература

1. Берлин А.А. Горение полимеров и полимерные материалы пониженной горючести. // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 9. С. 57–63.
2. Решетников И.С., Рудакова Т.А., Халтуринский Н.А. Полимерные материалы пониженной горючести на основе поликарбоната. // Пластические массы. 1996. № 3. С. 22–24.
3. Решетников И.С., Антонов А.В., Халтуринский Н.А. Математическое описание горения вспучивающихся полимерных систем. // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33. № 6. С. 48–67.

4. Ismat A. Abu-Isa Intumescent Thermoplastic Elastomer Fire Shield Material. // Presented at SAE 2002 World Congress, Detroit, Michigan, March 4-7, 2002, Publication No. 2002-01-1318.
5. Баженов С.В., Наумов Ю.В. Влияние неоднородности толщины вспучивающегося покрытия для металлических конструкций на огнезащитную эффективность с учетом деформации коксового слоя при тепловом воздействии (условия пожара). // Пожарная безопасность. 2004. № 6. С. 57–62.
6. Баженов С.В., Наумов Ю.В. Прогнозирование динамики нагрева металлических конструкций с огнезащитной обработкой по результатам определения теплоизолирующих свойств огнезащитных покрытий (лабораторный метод). // Пожарная безопасность. 2005. № 1. С. 50–54.
7. Страхов В.Л., Гаращенко А.Н., Кузнецов Г.В., Рудзинский В.П. Процессы тепло-массообмена в водосодержащих материалах при пожаре. // Математическое моделирование. 2000. Т. 12. № 6. С. 21–26.
8. Страхов В.Л., Гаращенко А.Н., Кузнецов Г.В., Рудзинский В.П. Теплообмен в тепло- и огнезащите с учетом процессов термического разложения, испарения-конденсации, уноса массы и вспучивания-усадки. // Математическое моделирование. 2000. Т. 12. № 5. С. 107–113.
9. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 599 с.
10. Христианович С.А., Михлин С.Г., Девисон Б.Б. Некоторые вопросы механики сплошной среды: Неустановившееся движение в каналах и реках. Математическая теория пластичности. Движение грунтовых вод /АН СССР. Мат. ин-т им. В.А.Стеклова; Под ред. Кочина Н.Е. М., Л.: Изд-во АН СССР, 1938. 407 с.
11. Butler K.M., Baum H.R., Kashiwagi T. Heat Transfer in an Intumescent Material Using a Tree-dimensional Lagrangian Model. / International Conference on Fire Research and Engineering, September 10-15, 1995. Orlando, FL. Proceedings. P. 261–266.
12. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. М.: Едиториал УРСС, 2003. 272 с.
13. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров: Справ. пособие. М.: Машиностроение-1, 2004. 512 с.
14. Физические величины: справочник /А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др. / Под. ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
15. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л.: Энергия, 1974. 264 с.

ПРИМЕНЕНИЕ WEB-ТЕХНОЛОГИЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКЕ ПРОИЗВОДСТВА

М.С. Варакин

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Д.Д. Куликов

Рассматриваются основные направления применения WEB-технологий в технологической подготовке производства. Раскрываются принципы организации единого информационного пространства ТПП. Выделяются основные концепции применения XML-документов в ТПП.

Введение

В настоящее время в технологической подготовке производства (ТПП) начинают использовать современные информационные технологии и PDM-системы, однако методы их применения еще только создаются. Поэтому применение WEB-технологий в ТПП является актуальной темой.

В рамках применения WEB-технологий необходимо провести комплекс научных исследований, посвященных использованию современных информационных средств планирования и управления ТПП. В частности, необходимо рассмотреть использование XML-документов для ведения проекта изделия, записанного в PDM-системе SMARTTEAM, и произвести замену учетных карточек на соответствующие XML-документы.

Подсистемы ТПП используют информацию из распределенных и разнородных источников и поставляют ее в АСУ предприятия. Таким образом, использование XML-документов в качестве посредника при передаче информации между различными системами позволяет произвести интеграцию подсистем ТПП с ERP предприятия.

Основные направления применения WEB-технологий в ТПП

Современный подход к автоматизации технологической подготовки производства основывается на рассмотрении ТПП как информационной системы, причем главное внимание уделяется информационным и организационным аспектам построения автоматизированной системы технологической подготовки производства (АСТПП). АСТПП представляет собой сложную информационную систему, в которой, кроме специализированных подсистем, применяется комплекс универсальных инструментальных средств CAD/CAE/CAM. Исследования последних лет показывают, что управление АСТПП и отслеживание ее жизненного цикла целесообразно выполнять с помощью PDM-систем. Организация эффективного функционирования АСТПП в этих условиях является важной и актуальной задачей, решение которой может быть выполнено лишь на основе применения современных информационных технологий (WEB-технологий).

В настоящее время можно выделить следующие основные направления применения WEB-технологий в ТПП:

1. организация единого информационного пространства для различных подсистем ТПП;
2. создание удаленных баз данных технологического назначения;
3. создание WEB-приложений для подсистем АСТПП;
4. создание технологического центра для актуальной информации о существующих в мире технологических ресурсах;
5. интеграция разнообразных подсистем с автоматизированной системой управления (АСУ) предприятием.

Методология создания АСТПП предполагает, что организация взаимодействия между подсистемами ТПП возможно лишь на основе единого информационного пространства (ЕИП) и обобщенной модели изделия. Организация взаимодействия основана на специальных программных компонентах (трансляторах), использующих словарь параметров и язык-посредник, что позволяет выполнить эффективное информационное взаимодействие подсистем ТПП, а также открывает перспективы для интеграции с автоматизированными системами предприятия.

Основные принципы организации единого информационного пространства на основе применения XML-документов

Основная сложность интеграции подсистем АСТПП заключается в сложности информационной интеграции между автоматизированными подсистемами ТПП. Функционирование подсистем с невысоким уровнем автоматизации, но информационно состыкованных между собой, более эффективно, чем подсистем с высоким уровнем автоматизации, но не интегрированных между собой.

Подход, основанный на создании единого информационного пространства, является основополагающим, так как определяет не только информационное взаимодействие между подсистемами ТПП, но и способы организации жизненного цикла изделия на стадии ТПП. Единое информационное пространство характеризуется следующими основными свойствами:

- ЕИП – это способ организации интегрированной информационной среды ТПП, основанный на обобщенной модели изделия и объектно-ориентированных базах данных (знаний), а также использующий единый словарь данных (тезаурус);
- единое информационное пространство совместно с программными средствами дает возможность обеспечить информационное согласование подсистем АСТПП как между собой, так и с внешними к ТПП системами;
- основной инструментальной компонентой, реализующей единое информационное пространство, является система управления данными (PDM-система).

Организация ЕИП (рисунок) должна основываться на использовании языка программирования XML – многофункционального формата представления данных. Выбор языка XML вызван возможностью описать с его помощью целый класс объектов данных, называемых XML-документами, ориентированных на технологическую подготовку производства.

Выделим круг задач АСТПП, связанных с созданием и обработкой структурированной информации, для решения которых может использоваться XML.

1. Разработка сложных подсистем ТПП, с большим количеством приложений, связанных потоками информации самой различной структуры. XML-документы служат универсальным форматом для обмена информацией как между отдельными подсистемами ТПП, так и их внешним окружением.
2. XML может стать базовым стандартом для нового языка описания объектов ТПП, основанного на пространстве имен ТПП и позволяющего упростить многие проблемы в WEB, связанные с поиском нужной информации и созданием электронных архивов ТПП.
3. XML может использоваться в приложениях подсистем ТПП для хранения и обработки структурированных данных в едином формате, так как позволяет описывать данные произвольного типа и использоваться для представления специализированной информации.
4. XML-документы могут использоваться в качестве промежуточного формата данных в трехзвенных системах при поиске информации в удаленных базах данных технологического назначения с помощью языка запросов XQuery.

5. Информация, содержащаяся в XML-документах, может изменяться, передаваться на машину клиента и обновляться по частям.

Например, имеется возможность использования XML-документов для ведения проекта изделия, записанного в PDM-системе SMARTTEAM. Данный процесс осуществляется путем замены учетных карточек SMARTTEAM на соответствующие XML-документы. Таким образом, XML-документы используются в качестве посредника при передаче информации между различными системами. Данная технология позволяет произвести интеграцию подсистем ТПП с ERP предприятия.

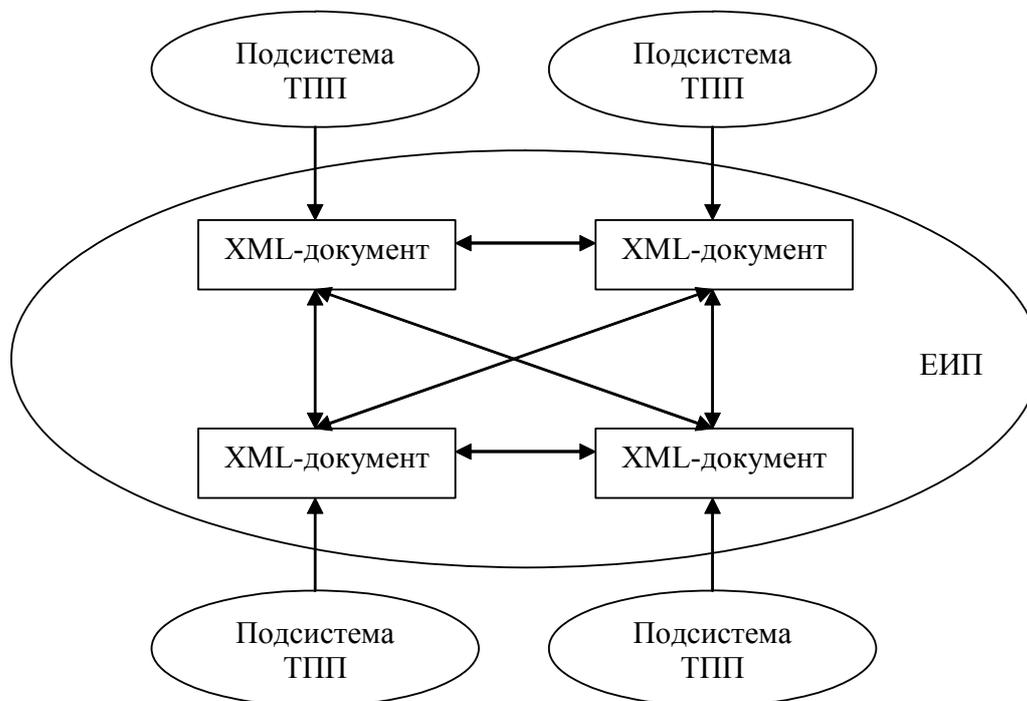


Рис. Схема организация единого информационного пространства на основе применения XML-документов

Организация единого информационного пространства ТПП на основе XML-документов базируется на следующих принципах.

- В основе единого информационного пространства лежит электронный архив для всех видов документов.
- Если осуществляется хранение и использование документов в электронном виде, то необходимо отображение данных системы в виде WEB-компонентов.
- Для обмена данными в среде единого информационного пространства используется единый формат на основе XML-документов. В этом случае язык XML используется как универсальный формат (единый язык-посредник) для организации процесса передачи данных между различными системами. Для этого необходимо, чтобы каждая система оформляла свои результаты в виде XML-документов.
- Необходима организация единого пространства имен – все теги XML-документов согласованы с подсистемами, которые используют язык XML.
- В дополнение к единому пространству имен необходимо создание единого тезауруса, где определены все понятия, используемые для организации единого информационного пространства.
- Необходимо произвести информационную интеграцию подсистем ТПП на основе единого формата данных.

Заключение

Таким образом, можно выделить следующие концепции применения XML-документов в технологической подготовке производства:

1. организация хранения документов в электронном архиве в виде XML-документов;
2. взаимодействие с удаленными и распределенными базами данных с помощью XML-документов;
3. создание единого информационного пространства на базе XML-документов;
4. организация параметрической модели технологического процесса и деталей в виде XML-документа;
5. информационная интеграция подсистем ТПП на базе преобразования информации в виде XML-документов.

ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ ХРАНИЛИЩА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

А.В. Голубев

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Д.Д. Куликов

В статье рассматриваются предпосылки создания хранилища данных технологической информации, концепция использования и принципы работы с хранилищем.

Введение

Использование информационных технологий – один из немногих технологически и экономически выгодных способов повышения эффективности подготовки производства.

Рынок требует все более технически совершенных продуктов, но при этом не позволяет увеличивать стоимость. Каждый день и даже каждый час специалистам предприятия приходится принимать ответственные решения, которые должны быть и правильными, и своевременными. Если раньше успех предприятия зависел только от решений первых лиц, то сейчас решения рядовых конструкторов, технологов, снабженцев, экономистов и других специалистов напрямую влияют на эффективность предприятия. Конкуренция заставляет принимать решения во все более сжатые сроки. Стоимость промедления, как и ошибки, растет с каждым днем.

Законы рынка требуют немедленного реагирования на изменения технологической составляющей процесса обработки изделий: использование новейших технологий и современного оборудования, нахождение выгодных поставщиков сложной технологической оснастки и управляющих программ.

Информационные системы масштаба предприятия, как правило, содержат приложения, предназначенные для комплексного многомерного анализа данных, их динамики, тенденций и т.п. Такой анализ в конечном итоге призван содействовать принятию решений. Нередко эти системы так и называются – системы поддержки принятия решений (СППР).

Хранилища технологической информации

На уровне управления бизнес-процессами предприятия уже довольно давно применяются методы создания хранилищ данных. Разработка таких хранилищ направлена на сбор и обработку данных для принятия управленческих решений.

Здесь должна быть представлена информация, отражающая различные направления деятельности компании и пригодная для проведения всестороннего анализа. Хранилище данных выполняет следующие функции:

- собирает информацию из различных источников, прежде всего из корпоративных оперативных приложений, а также от внешних источников, например, организаций по исследованию рынка, лабораторий по оценке качества, консалтинговых компаний и независимых аналитиков;
- интегрирует данные в логические модели по определенным предметным областям;
- хранит информацию таким образом, чтобы она была легко доступна и понятна различным категориям пользователей;
- предоставляет данные разнообразным системам поддержки принятия решений.

В основе концепции хранилища данных лежат две основные идеи: интеграция разьединенных детализированных данных (описывающих некоторые конкретные факты, свойства, события и т.д.) в едином хранилище и разделение наборов данных и приложений, используемых для обработки и анализа.

В нашем же случае предполагается рассмотреть вариант создания подобного хранилища применительно к технологической информации, т.е. предоставить возможность пользоваться СППР не только на уровне руководства предприятия, но и на уровне технологов, конструкторов или проектировщиков.

Реализация современных требований сокращения сроков и стоимости конструирования, проектирования и изготовления повторного использования накопленной информации при проектировании новых изделий, а также обеспечения необходимой информационной поддержки изделия на протяжении всего его жизненного цикла невозможна без применения современных актуальных методологий проектирования.

В проект хранилища технологической информации подразумевается заложить такие возможности, как хранение информации по:

- новым технологиям и методам обработки;
- новому оборудованию, инструменту, оснастке;
- фирмам-производителям и фирмам-проектировщикам;
- фирмам – разработчикам управляющих программ и проектировщикам технологических процессов.

Информация предусматривает обзор всех аспектов, с нею связанных, к примеру, информация о фирмах содержит не только наименование, но и все необходимые реквизиты, контакты, страну происхождения и т.д. Данные по оборудованию подразумевают сведения о типах и видах, размерах обрабатываемых деталей и стоимости самого оборудования.

На рис. 1 представлен пример реализации хранилища данных.

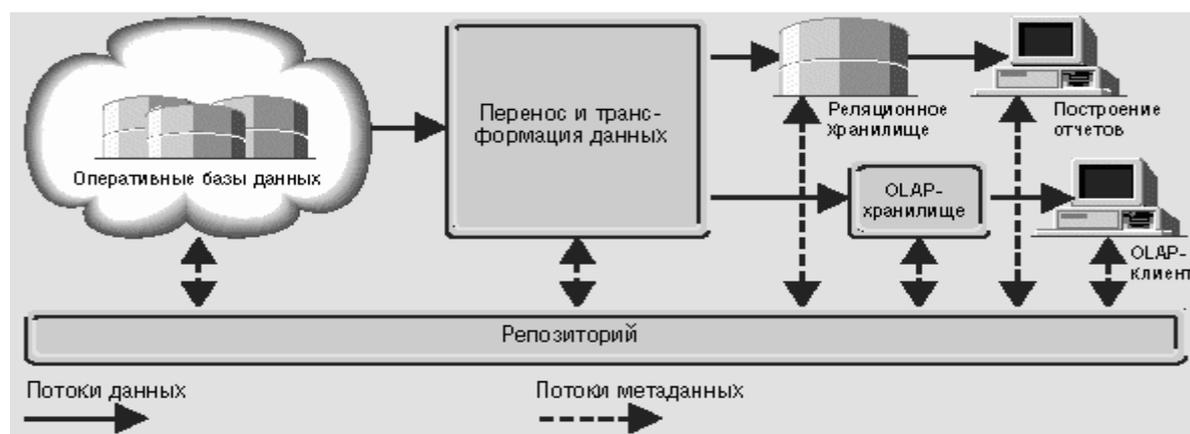


Рис. 1. Схема хранилища данных

Типичная структура хранилища данных существенно отличается от структуры обычной реляционной СУБД. Как правило, эта структура денормализована (это позволяет повысить скорость выполнения запросов), поэтому может допускать избыточность данных.

В хранилище предусмотрена возможность постоянного пополнения данных, как в ручном режиме, так и с использованием автоматического метода извлечения, преобразования и очистки данных из внешних источников (Интернет).

СППР обычно обладают средствами предоставления пользователю агрегатных данных для различных выборок из исходного набора в удобном для восприятия и анализа виде. Как правило, такие агрегатные функции образуют многомерный (и, следовательно, нереляционный) набор данных (нередко называемый гиперкубом или метакубом), оси которого содержат параметры, а ячейки – зависящие от них агрегатные данные. Храниться такие данные могут и в реляционных таблицах, но в данном случае мы говорим о логической организации данных, а не о физической реализации их хранения.

Вдоль каждой оси данные могут быть организованы в виде иерархии, представляющей различные уровни их детализации. Благодаря такой модели данных пользователи могут формулировать сложные запросы, генерировать отчеты, получать подмножества данных. OLAP предоставляет удобные быстродействующие средства доступа, просмотра и анализа деловой информации. Пользователь получает естественную, интуитивно понятную модель данных, организуя их в виде многомерных кубов (Cubes). Пользователь, анализирующий информацию, может «разрезать» куб по разным направлениям, получать сводные или, наоборот, детальные сведения и осуществлять прочие манипуляции, необходимые для анализа.

Вывод

Концепция, методы и средства хранилища данных (Data warehousing) определяют подходы и обеспечивают интеграцию, очистку, ретроспективное хранение информации, предназначенной для анализа. Технология СППР определяет методы и средства доступа и оперативного анализа информации в терминах предметной области. Основные стыки идут не только на уровне информации, но и на уровне метаданных. В случае хранилища данных можно обеспечить централизованное управление метаданными.

Инструменты OLAP являются аналитическими инструментами, которые первоначально были основаны на многомерных базах данных (МБД). МБД – это базы данных, сконструированные специально для поддержки анализа количественных данных с множеством измерений, которые содержат данные в многомерной форме. Для поддержки МБД используются OLAP-серверы, оптимизированные для многомерного анализа и поставляемые с аналитическими возможностями.

Используя эту технологию, можно наглядно представлять возможность выбора той или иной технологии, выбора предприятия-подрядчика, оптимальный подход к определению способа обработки. И все эти материалы можно увидеть в различных разрезах и аспектах, одновременно получая информацию о стоимости и контактах.

Литература

1. Архипенков С., Голубев Д., Максименко О. Хранилища данных. От концепции до внедрения. / Под общ. ред. С.Я. Архипенкова. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002.
2. Thomsen E. OLAP Solutions: Building Multidimensional Information Systems. Wiley Computer Publishing, 1997.
3. Kimbal R. The Data Warehouse Toolkit: Practical Techniques for Building Dimensional Data Warehouses. John Willey&Sons, 1996.
4. Артемьев В. Что такое Business Intelligence? // Открытые системы. 2003. №4.
5. Стулов А. Особенности построения информационных хранилищ. // Открытые системы. 2003. №4.

ИНТЕГРАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА БАЗЕ PDM-СИСТЕМ. ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

Р.М. Шаймарданов

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент Б.С. Падун

В статье описаны принципы и методы обмена информации о составе изделия между подразделениями предприятия или между конструкторским бюро и заводом-производителем, затрагивается тема технологической подготовки производства и проведения изменений.

Введение

В современных условиях большое значение имеет совместная работа нескольких территориально распределенных подразделений предприятия, а также тесное взаимодействие с предприятиями-поставщиками составных частей продукции или взаимодействие между конструкторским бюро и заводом. В настоящий момент на многих предприятиях действует старая схема, по которой происходит передача бумажной конструкторской и технологической документации. Сегодня это одна из сдерживающих причин для сокращения цикла подготовки производства и адаптации КД. Но необходимо отметить, что этому препятствуют объективные причины, такие как:

- непризнание электронного документа как первоисточника;
- отсутствие адаптированных стандартов в этой области, в частности ЕСКД и ЕСТД;
- сложность применения закона об «электронной подписи»;
- слабая подготовленность и недоверие инженерно-технического персонала;

и др. Несмотря на это, во многих западных продуктах уже существуют различные решения по взаимодействию территориально распределенных подразделений предприятия. И на текущий момент многие предприятия пытаются внедрить данные решения. Отечественные решения пока имеют довольно слабые механизмы синхронизации, но само их появление уже говорит о том, насколько они необходимы предприятиям.

К сожалению, в России проявляется не очень хорошая тенденция «сделаем свое», и это приводит к тому, что состав изделия можно передавать только между одинаковыми как по версии, так и по производителю программными системами.

Классификация методов обмена данными

Можно выделить следующие варианты классификации методов обмена данными.

По виду репликации:

- off-line (SmarTeam BOM Briefcase, Search Briefcase),
- on-line по запросу (SmarTeam BOM),
- on-line непрерывная репликация (SmarTeam MultiSite).

По назначению:

- для совместной работы по кооперации,
- для работы удаленных подразделений в единой среде,
- для учета изменений.

По методу передачи:

- стандартизованные форматы (IXF, STEP и др.),
- собственная программная реализация,
- внутренняя разработка (закрытый формат).

В данной статье будут рассмотрены 2 системы управления данными об изделиях (PDM/PLM) – Search и SmarTeam – и их механизмы выгрузки, репликации состава изделия. Но это не значит, что в других системах не существует аналогичных механизмов, скорее наоборот, просто автору не известны механизмы их функционирования.

PDM система Search 8.1

В текущей версии существует только off-line механизм передачи – портфель. Для этого администратор системы выделяет те объекты, которые необходимо экспортировать. Таким образом, в портфель помещается состав изделия вместе с файлами, т.е. модели CAD систем, файлы технологических процессов TechCard, а также любые другие файлы, связанные с экспортируемыми объектами.

Полученный файл можно записать любой носитель данных и передать организации-партнеру. Другая организация производит импорт данных в свою БД Search.

Необходимо отметить, что передача состава может происходить только между одинаковыми версиями ПО. Формат обмена не опирается ни на какие стандарты и является внутренней разработкой компании Интермех. Если организация-партнер использует другую систему PDM, то ей необходимо либо закупать для импорта данных систему Search, либо разрабатывать собственное программное обеспечение для импорта-экспорта данных через стандартизированный или собственный формат.

PLM система SmarTeam

В системе SmarTeam существует все 4 вида обмена данными:

- SmartIXF (off-line программный инструментарий (SDK) для передачи данных с использованием стандарта IXF (Interoperable Product Data eXchange Format for Supply Chain)),
- Multi-Site (on-line),
- Community Workspace,
- BOM (on-line по запросу),
- BOM Breafcase(off-line).

Рассмотрим подробнее эти виды обмена данными.

Модуль SmartIXF позволяет выгружать и загружать данные в формат IXF основанном на XML. С помощью IXF формата возможен обмен данными не только между PDM системами, но и с ERP и CAD (рис. 1).

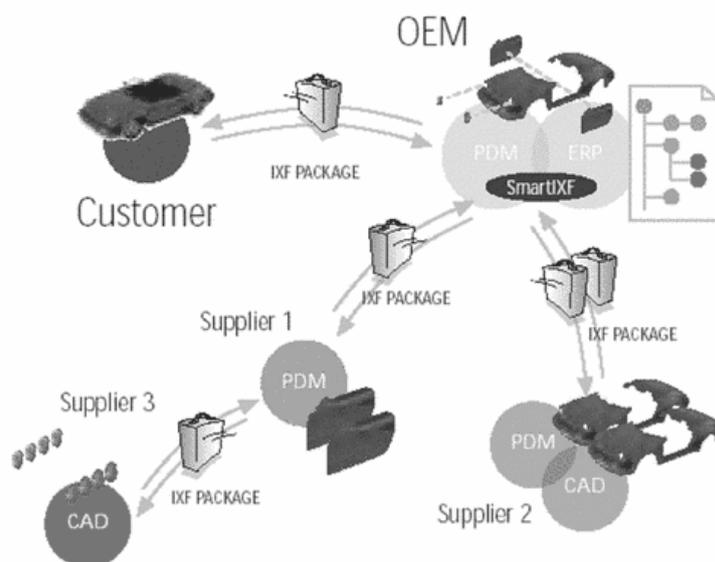


Рис. 1. Схема обмена данными по изделию с поставщиками при помощи формата IXF

Модуль Multi-Site позволяет работать территориально распределенным по всему миру подразделениям. Этот модуль связывает различные подразделения при помощи WAN соединения и обеспечивает совместную, безопасную работу над одним или не-

сколькими проектами. Фактически производится репликация проектов на сайты всех подразделений (рис.2).

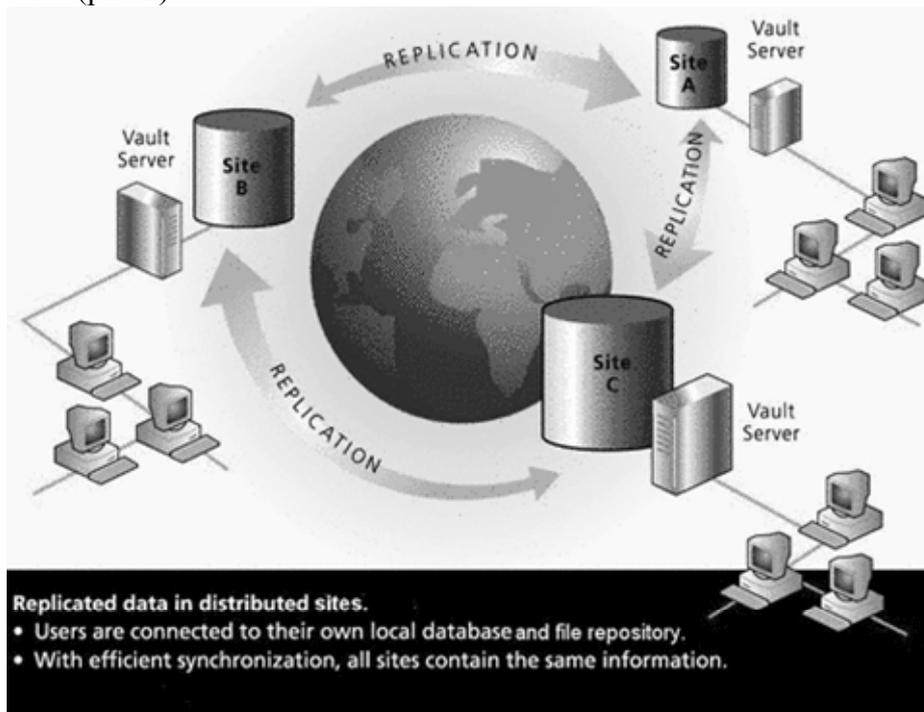


Рис. 2. Схема репликации между подразделениями предприятия

Community Workspace – портал, основанный на Web интерфейсе доступа к проектам. Предназначен для обмена данными с заказчиками, поставщиками и для работ по кооперации. Позволяет согласовывать проекты с партнерами, используя технологии workflow, а также обеспечивает высокий уровень безопасности и разграничения доступа к данным (рис. 3).

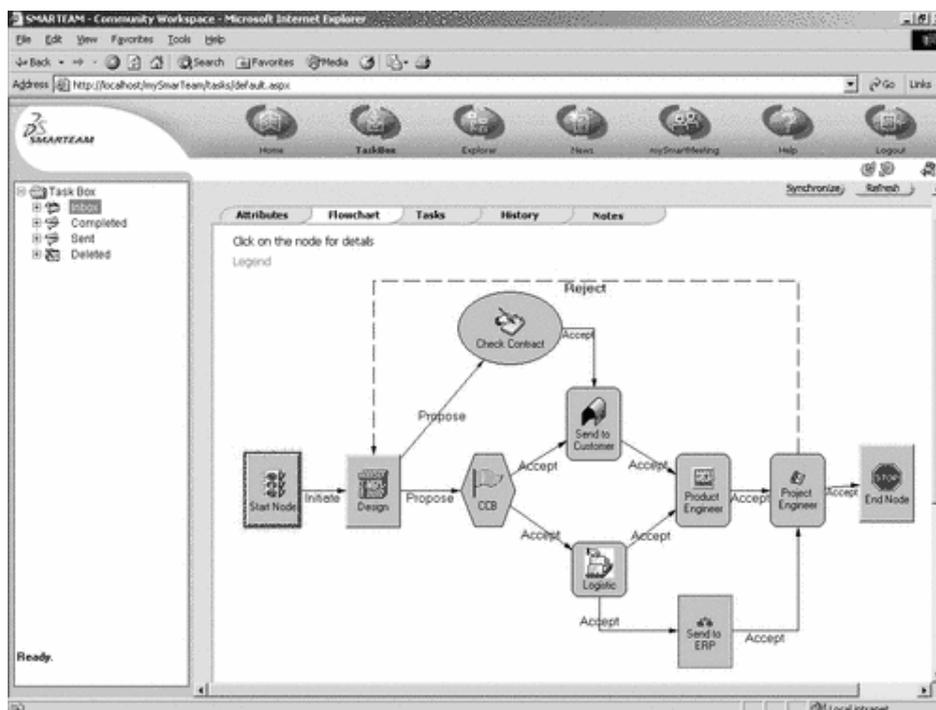


Рис. 3. Фрагмент схемы согласования контракта

ВОМ позволяет формировать различные «взгляды» (срезы) на продукцию, выгружая их из системы SmarTeam. Можно манипулировать структурой изделия, меняя его состав, но при этом не воздействуя на основной состав изделия. Например, можно сформировать только первый уровень изделия, без входящих в него документов и частей, или же можно сформировать поставку запасных частей изделия. Также можно сформировать взгляды «как проектируется», «как производится», «как сопровождается», можно сформировать коммерческое предложение для покупателя. При этом наглядно отображаются изменения состава.

ВОМ Briefcase – аналог ВОМ, отличающийся тем, что он позволяет упаковывать пакет ВОМ в формат zip и работать отдельно с составом изделия, не обращаясь к БД SmarTeam. Синхронизацию состава можно произвести позже.

Области применения

Если говорить о практическом применении данных технологий на производстве, то можно рассматривать несколько направлений применения:

- хранение копий номеров изделий на предприятии-производителе продукции;
- учет изменений в архивах цехов – держателей копий;
- выгрузка состава сборок, отдаваемых на производство по кооперации;
- формирование ведомости эксплуатационных документов (ведомости эксплуатационных документов).

Хранение копий составов номеров изделий необходимо, например, при длительной эксплуатации изделия. В таких случаях зачастую возникает необходимость выпуска запасных частей на изделие, которое уже не выпускается или на которое уже прошло большое количество изменений. Если же производилась выгрузка в ВОМ конкретного номера изделия, то можно, выгрузив оттуда документацию, изготовить запасные части.

В данный момент на многих предприятиях цеха из-за большого удаления не подключены в корпоративную сеть или же имеют низкоскоростные каналы. В таком случае возможна пересылка записанных на любой носитель информации пакетов ВОМ.

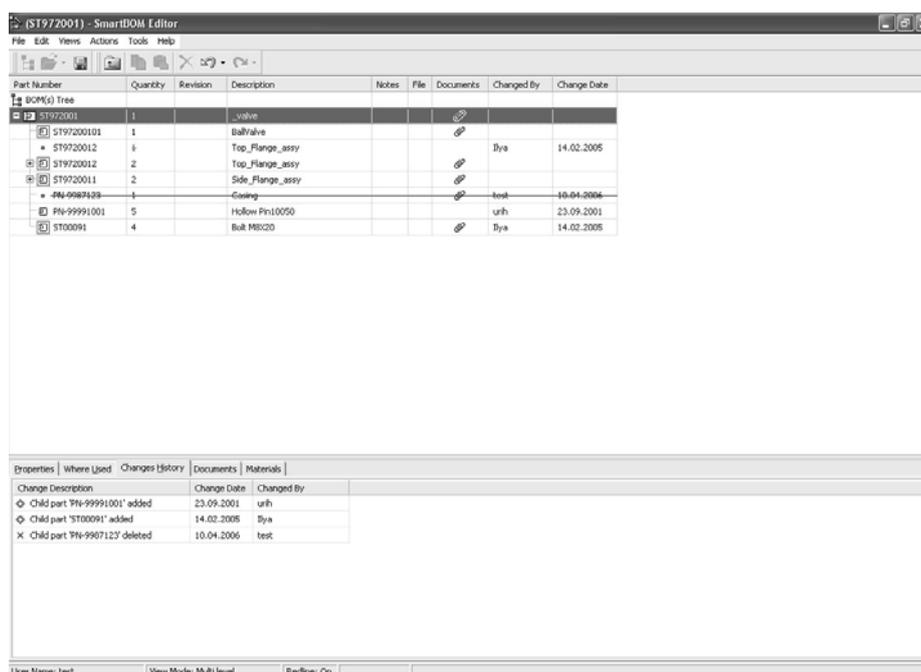


Рис. 4. Проведение изменений в ВОМ

Степень Функции	Обозначение	Наименование	Коды объектов			П/И/С/Д	Пр/И	Материал				Маршрут
			Обозначение	Код	Идентификатор			Заказчик	Исполнитель	Срок	Состояние	
1	CA2005.0002-163-01	Прокладка	CA2005.0002-150	1	1	000	1-05	00	0000	00	279-00-00-00-00-027-000-004	
2	CA2005.0002-164	Клей	CA2005.0002-150	2	2	000	1-05	1	0000	00	279-00-00-00-00-027-000-004	
3	CA2005.0002-165	Прокладка	CA2005.0002-150	2	2	000	1-05	00	0000	00	279-00-00-00-00-027-000-004	
4	CA2005.0002-165-01	Прокладка	CA2005.0002-150	1	1	000	1-05	00	0000	00	279-00-00-00-00-027-000-004	
5	CA2005.0002-166	Клей	CA2005.0002-150	1	1	000	1-05	00	0000	00	279-00-00-00-00-027-000-004	
6	CA2005.0002-166-01	Клей	CA2005.0002-150	1	1	000	1-05	00	0000	00	279-00-00-00-00-027-000-004	
7	CA2005.0002-166-02	Клей	CA2005.0002-150	1	1	000	1-05	00	0000	00	279-00-00-00-00-027-000-004	
8	CA2005.0002-166-03	Клей	CA2005.0002-150	1	1	000	1-05	00	0000	00	279-00-00-00-00-027-000-004	
9	CA2005.0002-166-04	Клей	CA2005.0002-150	1	1	000	1-05	00	0000	00	279-00-00-00-00-027-000-004	
10	CA2005.0002-211	Клей	CA2005.0002-210	1	1	000	1	1	0000	00	279-00-00-00-00-027-000-004	

Рис. 5. Проведение изменений в традиционном документообороте

Еще одно достоинство, на которое нельзя не обращать внимания, – это наглядность проводимых изменений (рис. 4). Если рассматривать традиционный документооборот между технологическим подразделением и цехом (рис. 5), то по сравнению с ним видны следующие достоинства: повышается наглядность проведения изменения, ведется истории изменения, отслеживается авторство на всех этапах. Таким образом, во многом пакеты BOM могут заменить традиционную схему проведения извещений.

Другое очевидное применение BOM – передача части изделия на изготовление по кооперации, при этом в пакете BOM будут сохраняться конструкторские документы, а также, если необходимо, – технологическая документация. Аналогично происходит формирование ведомости эксплуатационных документов: из пакета изымаются конструкторские модели и чертежи и вместо них помещаются интерактивные руководства по обслуживанию изделия на месте.

Заключение

Современные программные продукты могут значительно улучшить качество подготовки производства и сократить ее срок: во-первых, все данные имеют один источник, что исключает дублирование и несогласованность, а во-вторых, повышается скорость проведения изменений и согласования. К сожалению, в российской действительности эти достоинства нивелируются тем, что необходимо параллельно вести бумажный документооборот по ЕСКД и ЕСТД (т.е. бумага может быть оформлена в Word, но при этом на ней невозможно поставить подпись или же произвести, как, например, с извещениями, автоматический разбор изменяемых параметров). Теоретически, поскольку эти стандарты имеют статус рекомендуемых, возможно разработка собственных стандартов предприятия, но она затруднена из-за недостаточного понимания всех возможностей современных систем.

Литература

1. Search 7.1. Руководство администратора и программиста.
2. Сайт системы SmarTeam: <http://www.3ds.com/corporate/about-us/brands/smarteam/>
3. Документация по формату IXF: <http://www.ixfstd.org/>

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММНОЙ СИСТЕМЫ ADONIS

Д.Ю. Колобов, М.В. Кузнецова, В.П. Савченко, А.А. Саломатина
Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент Б.С. Падун

Введение

Усовершенствованию и автоматизации решения производственных задач должны предшествовать работы по моделированию процессов управления и проектирования. Это позволяет выявить «узкие» места в управлении и проектировании и спланировать выполнение работ по усовершенствованию и автоматизации производственных процессов. В настоящее время рынок программных продуктов предлагает достаточно широкий спектр специальных систем, ориентированных на построение и анализ бизнес-процессов [1–3]. Но материалов по применению подобных систем для построения моделей и моделированию процессов управления промышленными предприятиями и проектирования и изготовления изделий практически нет.

Поэтому требуется разработать методику формирования моделей производства и производственных процессов промышленного предприятия, которые в дальнейшем будут применяться для моделирования, анализа и формирования рекомендаций по усовершенствованию и автоматизации производственных процессов.

Схема решения

В качестве объекта исследования выбрано инструментальное производство предприятия, предназначенное для эффективной организации работ по производству изделий основного производства. Рассматривается жизненный цикл технологической оснастки от момента проектирования до момента утилизации.

Для построения моделей производства и производственных процессов необходимо провести анализ решаемых задач, материальных и информационных потоков в производственных службах предприятия, связанных с проектированием конструкций и технологических процессов изготовления, складированием, учётом, использованием, ремонтом, модернизацией, списанием и утилизацией технологической оснастки, а также определить состав документов и последовательность их формирования.

В процессе работы была реализована следующая схема: сбор данных → анализ данных и построение моделей → анализ полученных результатов на контрольных примерах.

Сбор данных. Для сбора данных были разработаны специальные таблицы: состав подразделений (табл. 1), состав задач (табл. 2), материальные потоки (табл. 3), документопотоки (табл. 4), состав документов и взаимосвязь документов и задач (табл. 5). В таблицах отражалась связь между различными объектами производственного процесса. Информация, заносимая в таблицы, сознательно дублировалась, чтобы иметь возможность при анализе табличных данных выявить несогласованность данных и устранить их. Такой подход позволил выявить ошибки сбора данных и избежать появления ошибок при моделировании производства и производственных процессов на предприятии.

№ пп	Должность сотрудника	Квалификация	Число сотрудников	Решаемые задачи

Таблица 1. Состав подразделения

№ пп	Задача	Кто решает	Входные документы	Выходные документы	С кем объект связан	Время решения/ периодичность	Кол-во сотрудников

Таблица 2. Состав задач

№ пп	Объект	С каким документом связан объект	Маршрут движения	Какие действия над объектом выполняются

Таблица 3. Материальные потоки

№ пп	Документ	Кто заполняет	Решаемая задача	Время решения	С каким объектом связан документ

Таблица 4. Потоки документов

№ пп	Документ	Объем документа	Единица измерения	Сложность документа	Используемые документы и/или материалы	Задачи, в которых документ формируется	Исполнитель

Таблица 5. Состав документов и взаимосвязь документов и задач

Построение моделей. На основе анализа полученных данных строились модели. Модели формировались в следующей последовательности:

- модели производственных подразделений (см. пример на рис. 1), отражающие их состав, структуру и функции, а также функции каждого сотрудника. Кроме того, были описаны организационные взаимосвязи производственных подразделений. При этом рассматривались производственные подразделения, связанные с проектированием конструкций и технологических процессов изготовления, складированием, учётом, использованием, ремонтом, модернизацией, списанием и утилизацией технологической оснастки;
- модели материальных потоков (см. пример на рис. 2), связанных с изготовлением, покупкой, применением, контролем и утилизацией технологической оснастки;
- модели производственных процессов (см. пример на рис. 3);
- модели документопотока, отражающих временную последовательность их формирования (см. пример на рис. 4).

Моделирование. На основе построенных моделей было проведено моделирование производственных процессов инструментальной подготовки производства на контрольных данных, сформированных работниками предприятия. Во время моделирования разработанные модели уточнялись и модифицировались, а для некоторых моделей разрабатывались новые версии.

Для построения моделей использовалась система Adonis®, компании ВОО. К достоинствам системы Adonis® можно отнести: поддержка множества языков описания производственных подразделений, простота использования и наличие встроенных средств документирования производственных подразделений. Для моделирования также использовались компоненты Adonis®.

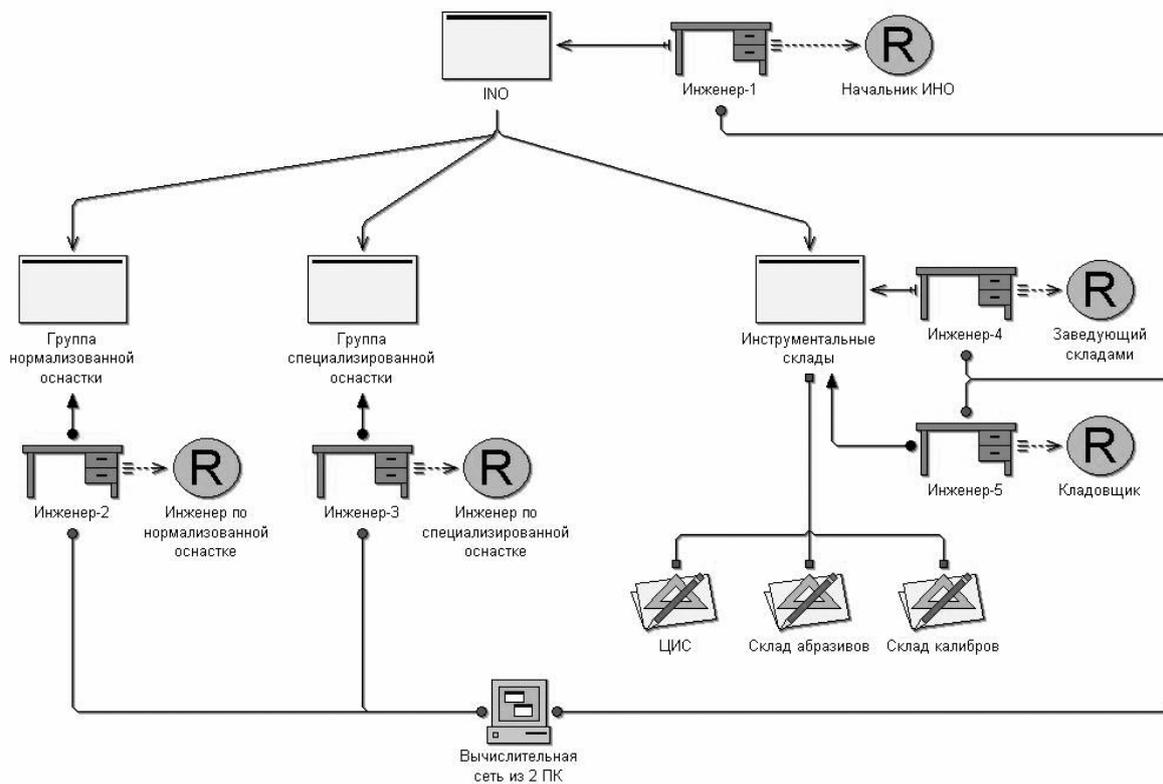


Рис. 1. Структура ИНО

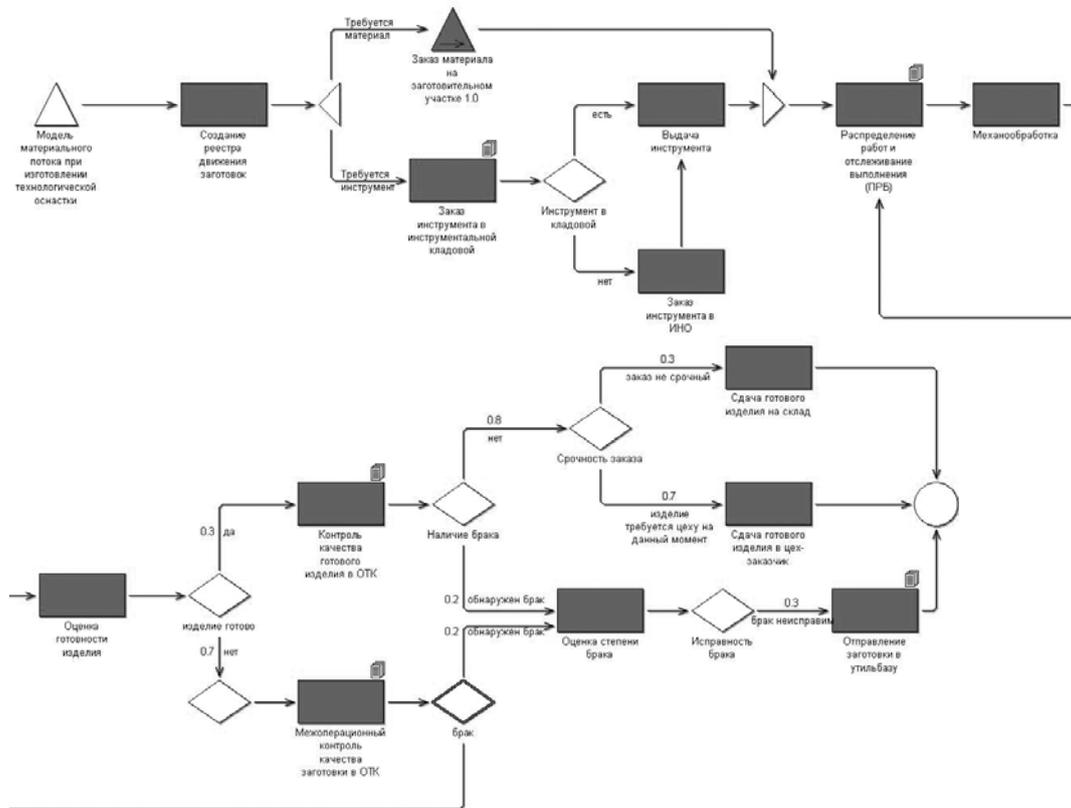


Рис. 2. Модель материального потока при изготовлении технологической оснастки

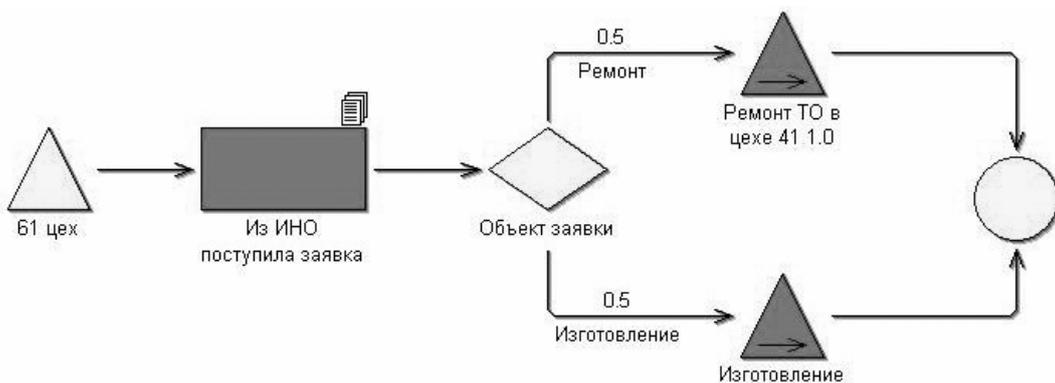


Рис. 3. Модель производственного процесса 61 цеха

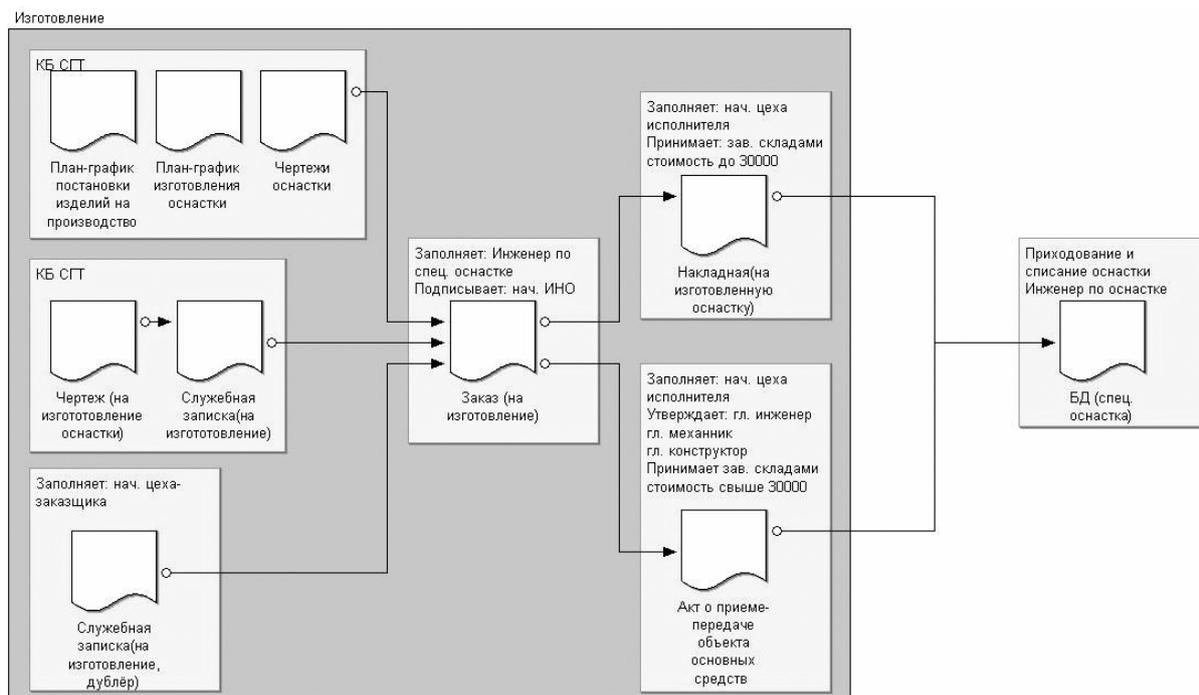


Рис. 4. Временная модель формирования документов в ИНО при изготовлении ТО

На основании проделанной работы было показано, что Adonis® предлагает обширный модельный редактор, с интуитивным, легко поддающимся изучению обслуживанием. Этот редактор позволяет отображать важные области предприятия в форме процессных (производственные процессы, методы) или структурных (конструктивная организация, системные географические карты) моделей. Модельный редактор многофункционален и предлагает инновации, облегчающие работу.

Анализируя полученные в результате моделирования данные, можно:

- определить максимальную и минимальную загрузку производства;
- определить мероприятия, необходимые для того, чтобы уложиться в сроки при максимальном объеме загрузки производства.

Выводы

Построенные модели могут использоваться:

- для моделирования инструментальной подготовки производства и выявления «узких» мест по времени производственных процессов обеспечения технологической оснасткой основного производства;

- как справочный материал для работников предприятия;
- для построения автоматизированной системы анализа инструментального производства, с помощью которой можно было бы планировать работы по производству технологического оснащения и формировать перспективы развития инструментального производства;
- для обоснования потребности и технико-экономической целесообразности создания автоматизированной системы управления инструментальным производством.

Для проведения моделирования необходимо создание нормативной базы, так как существующие нормативы не учитывают внедрения информационных систем и программных продуктов автоматизирующих и ускоряющих выполнение работ. Поэтому в дальнейшем работа должна проводиться по схеме: разработка нормативов на проведение работ → оперативное моделирование → анализ полученных результатов → оптимизация служб и производственных процессов предприятия.

Экономическая эффективность выполненной работы заключается в выявлении экстремальных ситуаций в инструментальном производстве и правильном распределении ресурсов при решении задач обеспечения технологической оснасткой, что позволит снизить затраты на инструментальную подготовку производства.

Литература

1. Елиферов В.Г., Репин В.В. Бизнес-процессы: Регламентация и управление. М: Инфра-М, 2005. 319с.
2. Андерсен Б. Бизнес-процессы. Инструменты для совершенствования. М: РИА «Стандарты и качество», 2005. 272с.
3. Железко Б., Реинжиниринг бизнес-процессов: Учебное пособие. М: Книжный Дом, 2006. 216 с.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ WEB-ТЕХНОЛОГИЙ

В.В. Богданов

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Д.Д. Куликов

В статье рассматривается проблема проектирования технологических процессов при помощи программных средств, разработанных с использованием WEB-технологий.

Введение

Современная методология создания автоматизированных систем технологической подготовки производства (ТПП) основывается на рассмотрении технологической подготовки как сложной информационной системы, управление которой выполняется с помощью PDM-системы и в которой применяют комплекс инструментальных средств CAD/CAE/CAM/CAPP. Подсистемы ТПП используют информацию из распределенных и разнородных источников. Организация эффективного функционирования систем ТПП в этих условиях является важной и актуальной задачей. Эффективность применения автоматизации для решения задач ТПП напрямую зависит от круга задач, для которого представляется возможным применять средства автоматизации [1]. В данной статье рассматриваются возможности современных информационных технологий для организации системы проектирования технологических процессов (ТП), удовлетворяющей современным требованиям к специализированному программному обеспечению, а также методы их использования в ТПП.

Постановка задачи

Возможность формализации технологических знаний определяется средствами, методами, инструментальным аппаратом формализации этих знаний. До настоящего времени основным аппаратом формализации являлись традиционные математические модели, однако они позволили формализовать только небольшую часть технологических знаний, связанных с рабочими ТП. Большая часть технологических знаний остается неформализованной [2]. Это определяется несовершенством аппарата, который не предназначен для описания и учета всех особенностей ТП. Представляется рациональным разработать аппарат формирования моделей, который позволит использовать не только традиционные математические модели, но и логические, а также логико-лингвистические модели, для создания которых возможно использование естественного технического языка предметного специалиста. Это значительно расширит круг задач, которые могут быть формализованы. На основе логико-лингвистических моделей, проведя их обобщение, можно формализовать экспертные знания специалистов. Знания могут быть обобщены, оценены их адекватность, область применения, точность, объективность. Они могут быть обобщены в определенные группы с методиками нахождения подходящих для решения поставленной задачи данных или определения по некоторым входным параметрам их областей применения [3].

Инструментарий для решения формализованных задач может быть различным. Но, учитывая сложность технологических задач, базой для любого инструментария должны быть компьютерные технологии. Это означает формализацию предметным специалистом знаний в виде логико-лингвистических и логико-математических моделей на его предметном языке. Последующие их преобразования в алгоритмическое представление осуществляется механизмом преобразования и лежат вне сферы деятельности предметного специалиста. Это избавляет его от необходимости овладения

специальными методами программирования. Переход к модельному представлению отдельных ТП позволит значительно ускорить развитие производственных технологий.

Результатом проектирования ТП является комплекс технологической документации. В этот комплекс в зависимости от сложности ТП могут входить различные документы – технологические карты, ведомости оснастки, карты с операционными эскизами, карты наладки оборудования, карты с управляющими программами для станков с ЧПУ и т.д. Одним из способов хранения информации о ТП является хранение информационной модели ТП, выраженной на формальном языке. Использование для хранения информационных моделей позволяет на порядок сократить объем базы данных для технологических процессов. Для решения проблемы комплексной автоматизации проектирования ТП одним из самых важных аспектов является наличие единой конструкторско-технологической базы данных, доступ к которой контролируется централизованно.

Краткое описание предлагаемого программного решения

В данный момент на кафедре технологии приборостроения СПбГУ ИТМО ведется разработка программного комплекса, предназначенного для решения задач ТПП и основанного на модели ТП, которая будет описана ниже. Учитывая предъявляемые к системе проектирования ТП требования, а также разнородность информации, необходимой в процессе проектирования, было принято решение разрабатывать такую систему на основе комплекса стандартов XML, WEB-технологий и технологии MDA (Model Driven Architecture). Разработанная при помощи этих средств система будет удовлетворять следующим требованиям:

- открытость и простота структуры;
- возможность исправления структуры (простота добавления параметров) без изменения приложения;
- адаптивность и гибкость системы, удобство интеграции с другими подсистемами;
- программная адаптация, простота функционального расширения.

Рассмотрим подробнее, за счет чего достигается указанная выше функциональность. Создается информационная модель ТП, выраженная на формальном языке. В качестве такого языка представляется возможным использовать язык XML, поскольку он может стать базовым стандартом для нового языка описания объектов ТПП. XML может использоваться в приложениях подсистем ТПП для хранения и обработки структурированных данных в едином формате, так как он позволяет описывать данные произвольного типа и представлять специализированную информацию. Кроме того, XML-документы могут использоваться в качестве промежуточного формата данных в трехзвенных системах при поиске информации в удаленных базах данных технологического назначения. Информация, содержащаяся в XML-документах, может изменяться, передаваться на машину клиента и обновляться по частям. Спецификации XLink и XPointer позволяют ссылаться на отдельные элементы документа, с учетом их вложенности и значений атрибутов. В дополнение к вышперечисленному, язык XML получил поддержку в достаточно большом количестве программных продуктов, что упрощает организацию взаимодействия между различными программными средствами. XML обладает достаточной гибкостью и позволяет переносить информацию, выраженную на языке UML, в XML. Это позволяет в случае необходимости создавать модель ТП при помощи стороннего программного обеспечения (например, специализированного программного обеспечения фирмы Rational Rose), что позволяет в еще большей степени упростить создание информационной модели ТП. Полученная модель технологического процесса жестко связывается с кодом программы. Для каждого типа элементов, используемых при создании информационной модели ТП, должен быть заранее разрабо-

тан программный код, который позволяет сформировать программное приложение для работы с ТП на основе его модели и удаленной базы данных. Этот этап реализуется при помощи технологии WEB-сервисов. Схема предлагаемого решения представлена на рис. 1

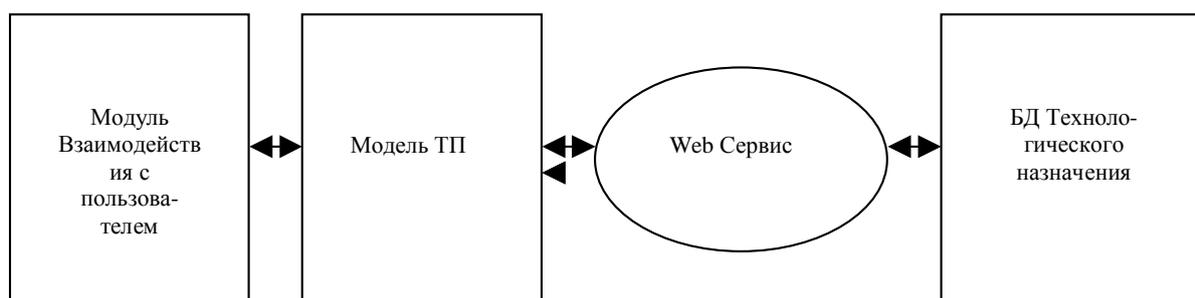


Рис. 1. Структурная схема программного модуля

Таким образом, предлагаемая технология ТПП обеспечивает следующие преимущества:

- модульность. Процесс разработки разбивается на отдельные задачи;
- итеративность. Процесс разработки разбивается на короткие по времени циклы;
- экономичность. В процесс разработки включается минимальное число задач, необходимых для достижения поставленной цели;
- постепенность. Проект разбивается на части, которые могут разрабатываться параллельно, в разное время и с разной скоростью;
- гибкость. Каждый модуль может быть заменен на другой.

Поскольку информация, извлекаемая из БД, представляется в виде XML, то возникает необходимость перевести ее в вид, пригодный для представления пользователю. Это представление выполняется при помощи модуля взаимодействия с пользователем. Он может быть реализован как в виде Web-приложения, так и в виде дополнительного модуля к какому-нибудь стороннему программному продукту. В программном модуле, разработанном на кафедре ТПС, модуль взаимодействия с пользователем реализован в виде отдельного Web-приложения. Выбор в качестве модуля взаимодействия с пользователем Web-приложения обусловлен относительной простотой разработки и гибкими возможностями Web-интерфейса для реализации пользовательского интерфейса.

Описание модели ТП

Модель ТП является сложной, динамичной и может быть представлена в виде трехуровневой структуры (рис. 2). Выделены три уровня моделирования ТП: уровень маршрута, уровень операций, уровень переходов. Уровень рабочих и вспомогательных ходов не рассматривается. Каждый уровень характеризуется множеством допустимых для уровня параметров, однако для конкретного ТП может использоваться лишь часть этих параметров. В процессе проектирования ТП эта структура последовательно модифицируется: в процесс добавляются новые операции, а в операции – новые переходы. При нормировании процесса в операцию добавляют нормы времени, а в переходы – режимы резания. В процессе утверждения ТП может существенно измениться как по составу, так и по содержанию параметров. Таким образом, ТП – это сложные объекты, отличающиеся друг от друга структурой и динамически меняющиеся во времени. Такие сложные объекты наиболее целесообразно выражать в виде фреймовой формы представления знаний (иерархической структуре тэгов).

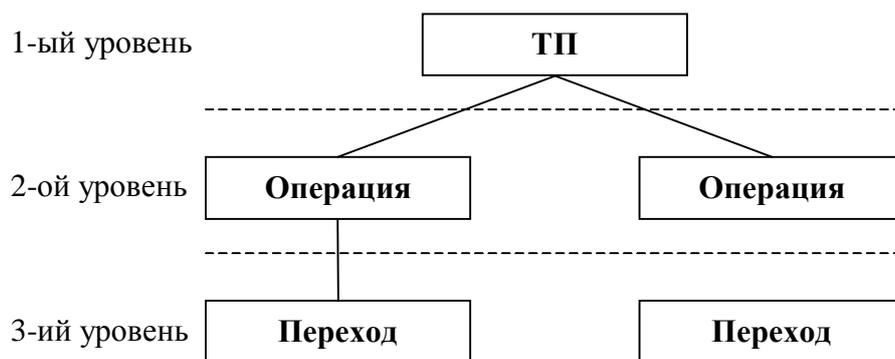


Рис. 2. Иерархическая структура модели ТП

Таким образом, использование XML-модели для создания фактографической модели ТП дает возможность удобным способом описывать ТП как сложные и динамические объекты. Методика моделирования ТП основана на поэтапном моделировании ТП. Это означает, что модели ТП могут заноситься в XML-модель по этапам с разным уровнем детализации.

На первом этапе выполняется моделирование, отражающее лишь маршрутную технологию, при этом модель ТП содержит лишь модель маршрута, содержащую перечень выполняемых операций и модели этих операций. На втором этапе модель маршрута дополняется списками переходов, выполняемых на операциях, и моделями этих переходов. На третьем этапе модель ТП дополняется моделями операционных эскизов и моделями управляющих программ. Модель ТП на любом уровне детализации может быть создана с любой заданной степенью полноты описания. Для этого в нее заносят лишь те параметры, которые необходимы для решаемой задачи или класса задач.

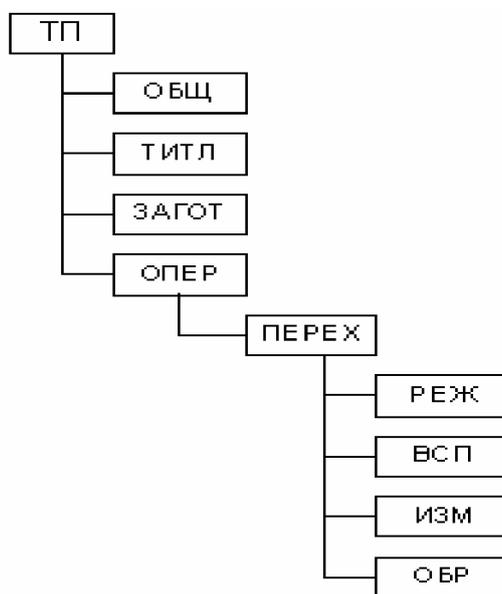


Рис. 3. Дерево ТП

Модель ТП разделяется на структурные единицы, называемые фреймами. В свою очередь, фреймы содержат заголовок и тело фрейма. Заголовок содержит обозначение, называемое меткой (короткое алфавитное слово), и название, которое может быть полным или сокращенным. Тело фрейма содержит слоты, каждый из которых обычно выражает какой либо параметр. В соответствии со сказанным модель ТП (рис. 3) содержит:

- описание общих характеристик (фрейм ОБЩ);
- описание титульного листа (фрейм ТИТЛ);
- описание материала и заготовки (фрейм ЗАГОТ);
- описание структуры процесса (фрейм ОПЕР);
- модели операций, входящих в ТП (фрейм ПЕРЕХ).

В свою очередь, модель операции содержит описание общих характеристик операции и, возможно, ссылку на модель заготовки, обработанной на операции, ссылку на управляющую программу, на карту-наладку и т.д. Если операцию необходимо описать более подробно, то структура каждой операции (последовательность выполняемых переходов) заносится в фрейм ОПЕР. Кроме того, создаются модели переходов, входящих в операцию. Для этого используется фрейм ПЕРЕХ.

Технологический процесс может храниться в иерархической XML-модели, имеющей структуру, представленную на рис. 4.

```

<?xml version="1.0" encoding="windows-1251"?>
<TABLE>
  <par>
    <lev1> </lev1>
    <lev2> </lev2>
    <lev3> </lev3>
      <name> </name>
      <oboz> </oboz>
      <otn> </otn>
      <vel> </vel>
      <razm> </razm>
      <kl> </kl>
  </par>

```

Рис. 4. Иерархическая XML-модель ТП

Каждый тэг <par></par> реализует собой одну запись, которая включает в себя трехуровневый идентификатор и шесть полей с данными. Первый уровень (<lev1></lev1>) является структурным. По номеру структурного уровня можно судить о информации находящейся в восьми оставшихся тэгах, так как на разных позициях структуры интерпретация тэгов тоже различна. Второй уровень (<lev2></lev2>) несет информацию о номере операции. Третий уровень (<lev3></lev3>) несет информацию о номере

Как уже упоминалось, полученная таким образом модель ТП может быть сохранена в базе данных для последующего использования, а также для формирования комплекта технологической документации, получаемого на основе заранее разработанных шаблонов.

Заключение

Разработка методов моделирования ТП при помощи логических и лингвистических моделей позволит в значительной мере облегчить процесс разработки ТП и, что особенно важно, процесс формирования технологической документации. Кроме того, хранение моделей ТП позволит организовать базы знаний. Как выяснилось в процессе разработки экспериментальных программных модулей, Web-технологии по-

зволяют реализовать основные требования, предъявляемые к такого рода программным комплексам. Однако требуется проведение дополнительных экспериментов, которые позволят создать более точные и гибкие методы моделирования ТП, а также организовать хранение и доступ к информации наиболее рациональными способами.

Литература

1. Митрофанов С.П., Куликов Д.Д., Миляев О.Н., Падун Б.С. Технологическая подготовка гибких производственных систем. / Под общ. ред. С.П. Митрофанова. Л.: Машиностроение, 1987. 352 с.
2. Куликов Д.Д., Яблочников Е.И. Методологические аспекты автоматизации технологической подготовки производства. // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2004. №4. С. 35–42.
3. Яблочников Е.И. Методологические основы построения АСТПП. СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. 84 с.

АНАЛИЗ PDM-СИСТЕМ

А.Б. Ерикин

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент Б.С. Падун

В статье сделана попытка определить минимальный набор критериев для объективного сравнения и оценки PDM-систем.

Введение

В настоящее время заметно возрос интерес предприятий к системам управления технической документацией и проектными данными – PDM-системам (Product Data Management – управление данными о продукте). Многие потенциальные потребители сегодня стоят перед необходимостью выбора системы. Очевидно, что из имеющихся на рынке систем целесообразно выбрать ту, которая наиболее эффективно сможет решать задачи предприятия как в настоящий момент, так и в перспективе. В связи с этим возникает проблема определения критериев такого выбора.

Роль PDM-системы в АСТПП

В настоящее время АСТПП разбито на две функции: целевые и собственные. К целевым функциям относятся:

- анализ, группирование, прогнозирование и унификация;
- технологическое проектирование;
- изготовление СТО,

а к собственным функциям:

- организация и управление ТПП;
- информационное обеспечение;
- сопровождение АСТПП.

Единственной целевой функцией, которая сегодня определена в достаточной степени с помощью САПР, это конструкторское проектирование (часть технологического проектирования). Остальные целевые функции, включая проектирование, анализ, группирование и унификацию ТП, находятся на этапе исследования и разработки. Определение этих функций с помощью PDM не представляется возможным, за исключением лишь объединения всех используемых САПР-ов в единую информационную среду.

Если взглянуть на собственные функции, то здесь дела обстоят значительно лучше, так как с помощью PDM можно решить практически все собственные функции за исключением сопровождения АСТПП и анализа управления ТПП. Организация и управления ТПП решается с помощью технологии Workflow и организации нормативных справочников. Информационное обеспечение решается с помощью модулей интеграции, удобного интерфейса, организации БД и средств аннотирования документов, и создание запросов [1, 2].

Теперь поняв роль PDM-системы можно выработать методику оценки.

Методика оценки. Для проведения оценки и сравнения PDM были определены следующие критерии:

1) *Функциональность.* Фактически современные системы PDM состоят из следующих модулей:

- хранилище объектов и средства управления документами (Data Vault и Document Management);
- средства управления структурой изделия (Product Structure Management);
- средства поддержки классификаторов и справочников (Classification);

- средства просмотра и аннотирования документов и моделей различных форматов (View & Redlining);
- средства управления проектом и проведением изменений (Workflow и Process Management);
- средства поиска информации;
- интерфейсы к прикладным пакетам (прежде всего к САПР);
- коммуникационные интерфейсы и интерфейсы к АСУП;
- интерфейсы прикладного программирования и трансляторы.

2) *Организация хранения информации.* Существует две схемы хранения информации:

- схема раздельного хранения информации;
- схема совместного хранения информации.

При раздельном хранении информации: данные о структуре изделия, свойствах (атрибутах объектов), сведения о правах доступа и другие метаданные хранятся в базе данных (database), а собственно тела документов (файлы) – в оригинальных форматах в защищенных хранилищах на файловых серверах (Vault). Основные преимущества такого подхода: компактная база; не нужен мощный сервер для работы СУБД (поскольку тела документов хранятся отдельно); возможность хранения практически неограниченного объема информации (в том числе и на съемных носителях); отсутствие временных затрат и искажения данных при конвертировании форматов данных; возможность восстановления хотя бы части данных после аппаратных аварий.

Другая схема хранения информации заключается в помещении и самих тел документов (файлов) в базу данных. При этом для разработчиков упрощается задача реализации механизма защиты документов от несанкционированного доступа, но возникают все те проблемы, которых удастся избежать при хранении документов на выделенных серверах.

3) *Поддержка стандартов.* Поскольку предприятие должно иметь связь с внешним миром, далеко не последнюю роль при выборе системы играет уровень ее соответствия требованиям стандартов – как отечественных (ЕСКД, ЕСТД, СПДС и др.), так и международных (ISO 10303 STEP – универсальный стандарт по обмену данными, ISO 9000 – стандарты обеспечения качества, ODMA, для систем и модулей Workflow рекомендации WfMC). Практически необходимой возможностью является создание собственных пользовательских форм.

4) *Интеграция PDM с прикладными системами.* Уровни интеграции с приложениями:

- возможность хранения в системе документов (файлов), созданных в других приложениях, или ссылок на них. Это минимальный уровень интеграции, поддерживаемый большинством систем;
- обмен данными между полями документа (например, штампом чертежа) и атрибутивной информацией, хранящейся в базе данных системы PDM. Это позволяет избежать повторного ввода информации пользователем;
- передача информации о параметрах модели в систему PDM с синхронизацией данных в автоматическом или ручном режиме;
- корректная работа с компонентными (многофайловыми) документами и с документами, содержащими ссылки на другие документы (XREF-файлы и т.д.).

5) *Легкость адаптации и простота освоения системы персоналом заказчика.* Для систем PDM необходимо различать:

- простоту в администрировании при настройке системы;
- удобство работы конечных пользователей с уже настроенной системой.

В первом случае предпочтение должно отдаваться системам, включающим визуальные средства настройки и не требующим программирования. Второе, на что надо обратить внимание, насколько удобна работа с уже настроенной системой.

6) *Возможность настройки системы под требования заказчика.* В комплекте поставки желательно наличие готовых шаблонов настроек для различных предметных областей. Несмотря на то, что заказчика в первую очередь интересует возможность настройки системы на его предметную область, но поставка шаблонов настроек для нескольких различных предметных областей косвенным образом свидетельствует о гибкости системы.

7) *Полнота русификации.* Поскольку система будет использоваться практически всеми сотрудниками предприятия, необходимо, чтобы она была полностью локализована (представьте, как среагирует на английский интерфейс главный инженер, изучавший в школе и институте немецкий!). При этом локализация должна включать не только русскоязычный интерфейс и справочную систему, но и полный пакет документации на русском языке. В системе обязательно должны быть реализованы корректные поиск (в идеале — с учетом морфологии) и сортировка слов на русском языке. Также должно обеспечиваться правильное отображение букв кириллицы в документах различных форматов в разных кодировках (чертежи AutoCAD многочисленных версий, текстовые документы MS Word и т.д.) и поддерживаться работа с документами, имеющими длинные имена файлов на русском языке.

8) *Уровень системы.* По функциональным возможностям и максимально допустимому количеству одновременно работающих пользователей системы PDM можно разделить на следующие типы:

- системы масштаба подразделения (приблизительно до 30 – 50 одновременно работающих пользователей);
- системы масштаба предприятия (приблизительно от 100 до 5000 одновременно работающих пользователей);
- системы масштаба корпорации (приблизительно от 100 до десятков тысяч одновременно работающих пользователей, с обязательной поддержкой территориально-распределенного режима работы).

9) *Разграничение прав доступа к информации и защита документов в системе.* Надежная защита данных является обязательным требованием к системе. Защищаются как объекты (документы, изделия и т.п.), так и связанные с ними метаданные. Права доступа в серьезной системе должны разграничиваться для отдельных пользователей, групп пользователей и функциональных ролей.

Наиболее полная реализация защиты достигается при отдельной защите информации на уровне объектов, их атрибутов и на уровне документов. При этом реализация защиты файлов может быть выполнена как средствами самой сетевой операционной системы (что очень неудобно), так и с помощью специальных программных и аппаратных средств разграничения доступа.

10) *Стоимость приобретения, внедрения и сопровождения.* При сравнении стоимости пакетов лицензий различных систем необходимо учитывать следующие обстоятельства:

- тип лицензий, предлагаемых заказчику;
- схему лицензирования при приобретении дополнительных лицензий (действуют ли накопительные скидки или, наоборот, дополнительные лицензии стоят значительно дороже, чем приобретенные в стартовом пакете);
- стоимость дополнительного аппаратного обеспечения, системных средств и других программных модулей, которые окажутся необходимыми для реализации полных функциональных возможностей системы;

- затраты на настройку системы, организацию взаимодействия с уже существующими на предприятии системами и на обучение персонала.

11) *Архитектура системы.* Архитектура системы бывает двух типов (в соответствии с используемыми ими СУБД и принципами работы):

- файл-серверные (большинство систем для рабочих групп);
- клиент-серверные (2 и 3 уровневые).

Наряду с этим можно выделить так называемые Web-ориентированные системы, но они, как правило, тоже используют какую-либо СУБД.

Целесообразность использования систем, разработанных в файл-серверной архитектуре, ограничивается «сверху» 20-30 одновременно работающими сотрудниками. При большем количестве одновременно работающих сотрудников возможно резкое снижение производительности. Кроме того, такие системы не обеспечивают необходимой отказоустойчивости и защиты данных от несанкционированного доступа.

Для систем масштаба предприятия более подходят СУБД, построенные в клиент-серверной архитектуре.

12) *Наличие реальной технической поддержки в регионах.* Одним из обязательных условий успешного внедрения является тесное взаимодействие пользователя с поставщиком системы. Это ускорит решение проблем, которые неизбежно возникнут на начальном этапе внедрения.

13) *Территориально распределенный режим работы.* Территориально распределенный режим может быть реализован следующими способами:

- собственно работа в сетевом режиме в рамках WAN (Wide Area Network);
- работа в режиме удаленного доступа (обычно используется для подключения небольшого количества удаленных пользователей), например с использованием RAS (Remote Access Server);
- работа через сеть Internet (или Intranet) с тонким клиентом;
- работа через защищенные частные сети (VPN);
- работа мобильных пользователей;
- работа с репликацией данных при использовании одного из описанных выше способов связи или даже при обмене информацией в режиме off-line (на съемных носителях, по электронной почте и т.п.).

Практически любая из указанных схем позволяет работать с территориально распределенными базами данных (в зависимости от используемой СУБД).

Очевидно, что работа в режиме постоянного подключения (например, через сеть Internet) требует наличия высокопроизводительного канала связи для обмена информацией. К сожалению, в наших условиях это возможно далеко не всегда. Поэтому в ряде случаев практически единственно возможной является работа с использованием репликации данных [3, 4].

	SmartTeam	PartyPlus (Lotsia PDM)	ЛОЦМАН
Уровень системы	масштаб корпорации	масштаб корпорации	масштаб корпорации
Архитектура системы	Клиент-сервер	Клиент-сервер	Клиент-сервер
Организация хранения информации	Раздельное	Раздельное	Раздельное
Разграничение прав доступа к информации и защита документов в системе	Windows NT, 98, 2000, XP	Windows NT, 95, 98, 2000, XP	Windows NT, 95, 98, 2000, XP

Таблица 1. Сравнительный анализ PDM-систем

Полнота русификации	Интерфейс Справка Описание	Полное	Полное
Наличие реальной технической поддержки в регионах	На территории России	На территории России	На территории России
Поддержка стандартов	WS-I Basic Profile, CMI, STEP AP203 STEP AP214, CORBA, XML 1.0, MIME 1.3, ISO 9241 (Usability), WSDL 1.1, SOAP with Attachments (SwA) 1.1, HTTP 1.1, HTML 1.1, J2EE 1.3, J2SE 1.4, JCA, JAXB, PLM XML, JT Open, Javascript, Microsoft .NET, DOORS Возможность добавления	ISO 10303 ЕСКД, ЕСТД, СПДС ODMA 2.0 WfMC	ISO 10303 ЕСКД, ЕСТД, СПДС ODMA 2.0 WfMC
Возможность настройки системы под требования заказчика	Присутствует	Присутствует	Присутствует
Легкость адаптации и простота освоения системы персоналом заказчика	Необходимы знания интерфейса Windows	Необходимы знания интерфейса Windows	Необходимы знания интерфейса Windows
Стоимость приобретения, внедрения и сопровождения	Около 3000\$ за рабочее место	Сервер Lotsia PDM PLUS (без учета стоимости SQL Server) – 999\$ Клиент Lotsia PDM PLUS (300+ Users) – 239\$ Клиент Lotsia PDM PLUS (Unlimited) - договорная Модуль репликации базы данных (требуется наличие не менее 2-х лицензий на Lotsia PDM PLUS Server) – 2950; Интерфейс к САПР 70\$-90\$ Клиент DBprint (unlimited) – 1500\$, обновление 300\$	Комплект «Единое информационное пространство для машиностроения», сервер + 5 клиентских лицензий. Включает ЛОЦМАН:PLM, Корпоративный справочник Материалы и Сортаменты, Корпоративный справочник Стандартные изделия – 4980\$ Комплект «Единое информационное пространство для машиностроения», клиентская лицензия – 690\$
Интеграция PDM с прикладными системами	Все способы	Все способы	Все способы
Территориально распределенный режим работы	Поддержка всех методов	Поддержка всех методов	Поддержка всех методов

Таблица 1. Сравнительный анализ PDM-систем (продолжение)

Функциональность			
Хранилище объектов и средства управления документами	Oracle, DB2, Inprise (бывший Borland) Interbase и Microsoft SQL Server	Oracle, MS SQL Server	Microsoft SQL Server и Oracle
Средства поддержки классификаторов и справочников	Присутствуют	Присутствуют	Присутствуют Справочник Материалы и Сортаменты Справочник Стандартные изделия
Средства просмотра и аннотирования документов и моделей различных форматов	AutoVue	AutoVue	AutoVue
Средства управления проектом и проведением изменений	Workflow	Workflow	Workflow
Интерфейсы к прикладным пакетам	CATIA V4, V5, SolidWorks, Pro/ENGINEER, AutoCAD, Mechanical Desktop, Inventor, Solid Edge, MicroStation, UGS NX, I-deas NX, MS Office & Project, ERP адаптеры для SAP R/3, ведущих ERP, SCM, CRM систем	Autodesk AutoCAD, Mechanical Desktop, Inventor, SolidWorks, Bentley MicroStation, TriForma, PlantSpace, GeoGraphics, ТехноПро, Компас, Автопроект, Гемма 3D, MS Office, встроенная ERP-система	Pro/ENGINEER Wildfire, CATIA V5, MS Office, КОМПАС, Unigraphics, SolidWorks, SolidEdge, Inventor, AutoCAD, 1С-Предприятие 7.7, "КРИПТОН® Подпись" Версия 1.0, MRP/ERP-системами
Интерфейсы прикладного программирования и трансляторы	API и импорт/экспорт	API и импорт/экспорт	API и импорт/экспорт

Таблица 1. Сравнительный анализ PDM-систем (продолжение)

Сравнительный анализ PDM-систем. Сравнение PDM-систем представлено в таблице (см. табл. 1). Как видно из таблицы все системы примерно одинаковы, единственное их отличие заключается в количестве интегрируемых приложений.

Заключение

С помощью полученных в данной статье критериев оценки можно увидеть общую структуру PDM-системы, выявить ее слабые и сильные стороны, а также сравнить ее с другими PDM-системами. Как показывает сравнительная таблица (см. табл. 1) PDM-системы решают большинство собственных функций ТПП, единственное ограничение, которое в свою очередь решается с помощью API и файлов импорта/экспорта, это интеграция с имеющимися сегодня САПР'ми и АСУП'ми.

Литература

1. Майоров С.А., Орловский Г.В., Халкипов С.Н. Гибкое автоматическое производство // Л.: Машиностроение, 1985 С. 76–101.
2. Зильбербург Л.И., Молочник В.И., Яблочников Е.И. Реинжиниринг и автоматизация технологической подготовки производства в машиностроении // С-Пб.: ПОЛИТЕХНИКА, 2004. 152 с.
3. САПР и графика // Компьютер ПРЕСС, №1 2002 С. 84–87.
4. САПР и графика // Компьютер ПРЕСС, №2 2002 С. 80–83.

1. Механика деформируемого твердого тела (от макро- до микро-)	3
Кудрявцев М.В. (Мурманский государственный технический университет). Оптический мониторинг крутильных колебаний валов.....	3
Бураков В.С., Кerpелева С.Ю. Динамические характеристики и наношероховатость трущихся поверхностей	8
Ларин А.С. Акустические поля источников типа вертикальной гармонической силы	13
Резников С.С. Численный анализ основных уравнений статики спирально-анизотропных стержней	17
Аветисян А.А., Дайнеко В.Ю. Исследование направляющих поступательного движения с упругим трением на примере двойного упругого параллелограмма.....	24
Сапожков М.А. Трибологическая пара как объект автоматического управления..	30
Логовская Е.В., Носова А.В. Динамика волнового твердотельного гироскопа	34
Лобачева А.М. Колебания стержней при кинематическом возбуждении.....	39
2. Измерения, метрология, точность	46
Казначеева А.О. Коррекция неоднородности изображения с помощью вейвлет-преобразований	46
Зажигин Н.Н., Римских М.В., Шемплинер В.В., Юзликеев Я.В. Новые алгоритмы повышения точности восстановления искаженных изображений	49
Захаров Д.Д. Применение метода итераций для повышения точности определения индикатрисы рассеяния рентгеновских лучей.....	55
Воронцов Е.А., Демин Д.А., Коваленко П.П., Липатов П.А. Магический шестиугольник кратномасштабного преобразования	63
Ефименко А.В., Монахов Ю.С., Петров А.А. Перспективные конструкции оптико-механических дефлекторов для управления лазерным лучом	68
Воронцов Е.А., Черноусов А.С. Классификация методов и средств определения остроты зрения	75
Елунин М.Н. (Самарский государственный архитектурно-строительный университет). Формирование порядковых шкал в слабоформализованных задачах	83
Лукина В.А. Оптимизация рентгенооптической схемы портативного рентгенофлуоресцентного анализатора	92
3. Процессы управления	97
Ворошилов В.В. (Самарский государственный архитектурно-строительный университет). Разработка ранжирующих алгоритмов для решения слабоформализуемых задач.....	97
Кальянова А.И. Идентификация объектов	108
Аржаник А.В. Синтез нечетких алгоритмов управления движением двухприводного мобильного робота	113
Алексеев Р.А. Разработка алгоритма ходьбы двуногого робота	123
Слита О.В. Проблема параметрической инвариантности выхода дискретной систе-	

мы относительно неопределенности задания матриц модельного представления объекта.....	133
Дударенко Н.А. Спектральный анализ сложных дискретных систем при стохастических экзогенных воздействиях с применением в задачах контроля вырождения.....	140
Осипцева О.С. Анализ цифрового дистанционного управления непрерывным объектом при наличии помех в канальной среде методами теории чувствительности	150
4. Механизмы в приборостроении	157
Нгуен Ч.К. (Санкт-Петербургский государственный морской технический университет). Влияние люфта и сухого трения на устойчивость мехатронного привода (аналитическое исследование).....	157
Никитин А.Ю. (Санкт-Петербургский государственный морской технический университет). Исследование устойчивости многосвязных динамических систем	163
Петрищев М.С., Чан Нгок Чау. Синтез точности градиентных систем.....	168
Сергушин П.А. Магнитовариометр как средство измерения магнитных полей.....	173
Бузунов Р.А., Петрищев М.С., Сизова А.А. Связанные маятники при диссипации энергии.....	176
Король Д.В., Петрищев М.С. Микромеханические резонансные датчики.....	181
Кудрявцева И.М. Сильфон как объект автоматического управления	185
Фролов Д.А. Рекомендации по выбору параметров исходного контура для нарезания зубчатых колес с несимметричным профилем	192
Млокосевич С.Ю. Измерение переменной составляющей радиуса вдоль оси крупногабаритных цилиндрических деталей в цеховых условиях	196
Горбунов С.А. Расчет основных параметров конусно-клинового зубчатого венца	201
Абрамчук М.В. Рекомендации по организации контроля бокового зазора в зубчатых передачах.....	206
Абдурахманов И.А., Король Д.В., Пустошкин И.В., Сергушин П.А., Ткачев А.Л. О разбиении передаточных чисел по ступеням зубчатой передачи	211
Гладышев Г.А. Построение таблиц передаточных чисел для планетарного передаточного механизма.....	217
5. Технологические проблемы	223
Фомина Ю.Н. Средства визуального моделирования технической подготовки производства	223
Сабадаш В.О. (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет). Моделирование тепловых микропреобразователей	233
Трушков К.В. Расчет тепловых режимов приборов питания.....	238
Сушко В.Ю. Влияние вспучивающегося покрытия на тепловой режим многослойной защиты при воздействии высокой температуры	243
Варакин М.С. Применение Web-технологий в технологической подготовке производства	250
Голубев А.В. Предпосылки создания хранилища технологической информации ..	254
Шаймарданов Р.М. Интеграция промышленного предприятия на базе PDM-системы. Проблемы и решения.....	257

Колобов Д.Ю., Кузнецова М.В., Савченко В.П., Соломатина А.А. Моделирование деятельности инструментального производства с применением программной системы Adonis	262
Богданов В.В. Проектирование технологических процессов с использованием Web-технологий	267
Ерикин А.Б. Анализ PDM-систем	273

Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. Выпуск 28. I сессия научной школы «Задачи механики и проблемы точности в приборостроении» / Главный редактор д.т.н., профессор В.Н. Васильев – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. 282 с.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК СПбГУ ИТМО
Выпуск 28

I СЕССИЯ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ
«Задачи механики и проблемы точности в приборостроении»

Главный редактор
д.т.н., профессор В.Н. Васильев
Научный редактор выпуска
д.т.н., профессор В.М. Мусалимов
Дизайн обложки М.А. Петров
Редакционно-издательский отдел СПбГУ ИТМО
Зав. РИО Н.Ф. Гусарова
Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99.
Подписано в печать 04.05.2006
Заказ 958. Тираж 100 экз.