

Журнал включен в «Перечень периодических научных и научно-технических изданий РФ, рекомендованных для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук»

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Известия высших учебных заведений

ПРИКЛАДНАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА

научно-технический журнал

издается с 1993 года

Выходит 6 раз в год

Том 20, № 4, 2012, Саратов

К 60-летию кафедры электроники, колебаний и волн СГУ

СО Д Е Р Ж А Н И Е

ИСТОРИЯ. PERSONALIA

<i>Храмов А. Е., Лёвин Ю. И.</i> Кафедра электроники, колебаний и волн: 2003 – 2012	3
<i>Семенов В.Н.</i> Три ректора – одна кафедра	11
<i>Андрушкевич В.С.</i> Заметки из памяти о становлении кафедры	47

ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ НЕЛИНЕЙНОЙ ТЕОРИИ КОЛЕБАНИЙ И ВОЛН

<i>Вульфсон И.И.</i> Влияние низкочастотных колебаний на нелинейные диссипативные силы	51
<i>Пономаренко В.П.</i> Нелинейные эффекты в автогенераторной системе с частотно-фазовым управлением	66

НОВОЕ В ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКЕ

<i>Блюх Ю.П.</i> Случайные резонаторы	85
<i>Кураев А.А., Колосов С.В., Сенько А.В.</i> Двухволновый гиротрон на модах шепчущей галереи нерегулярного волновода	98
<i>Богомолов Г.Д., Клеев А.И.</i> Расчет омических потерь в открытых резонаторах	112

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА И НЕЙРОНАУКА

<i>Мищенко М.А., Шалфеев В.Д., Матросов В.В.</i> Нейроноподобная динамика в системе фазовой синхронизации	122
---	-----

НАУКА – ОБРАЗОВАНИЮ

<i>Малинецкий Г.Г.</i> Миры синергетики: От прошлого к будущему	131
---	-----

СТАТЬЯ ОТОЗВАНА РЕДКОЛЛЕГИЕЙ 25.03.2022

DEPARTMENT OF EDUCATION AND SCIENCE OF RUSSIAN FEDERATION
Izvestiya VUZ
APPLIED NONLINEAR DYNAMICS
scientific-technical journal
published since 1993

Published 6 times a year

Vol. 20, № 4, 2012, Saratov

To the 60th anniversary of the Chair of electronics, oscillation and waves SSU

C O N T E N T S

HISTORY. PERSONALIA

<i>Hramov A.E., Levin Yu.I.</i> Chair of electronics, oscillation and waves: 2003–2012 . . .	3
<i>Semenov V.N.</i> Three rectors – one chair	11
<i>Andrushkevich V.S.</i> Memory notes about the chair formation	47

APPLIED PROBLEMS OF NONLINEAR OSCILLATION AND WAVE THEORY

<i>Vulfson I.I.</i> Effect of low-frequency vibrations on nonlinear dissipative forces	51
<i>Ponomarenko V.P.</i> Nonlinear effects in autooscillatory system with frequency-phase control	66

INNOVATIONS IN APPLIED PHYSICS

<i>Bliokh Y.P.</i> Accidental resonators	85
<i>Kurayev A.A., Kolosov S.V., Senko A.V.</i> Two-wave gyrotron on whispering gallery modes at the irregular waveguide	98
<i>Bogomolov G.D., Kleev A.I.</i> Ohmic loss calculation in the open resonators	112

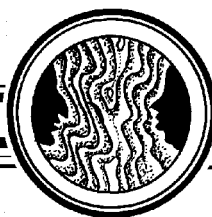
NONLINEAR DYNAMICS AND NEUROSCIENCE

<i>Mischenko M.A., Shalfeev V.D., Matrosov V.V.</i> Neuron-like dynamics in phase-locked loop	122
---	-----

SCIENCE FOR EDUCATION

<i>Malinetskii G.G.</i> Worlds of synergetics: From the past to the future	131
--	-----

RETRACTED 25.03.2022



**КАФЕДРА ЭЛЕКТРОНИКИ, КОЛЕБАНИЙ И ВОЛН
2003 – 2012**

А. Е. Храмов, Ю. И. Лёвин

События и достижения кафедры электроники, колебаний и волн за 10 лет, прошедших после юбилея кафедры, 50-летия, отмеченного в 2002 году.

Ключевые слова: Кафедра электроники, колебаний и волн СГУ, юбилей, достижения.

2003

- В издательстве «Физматлит» (Москва) вышел в свет первый том книги Д.И. Трубецкова и А.Е. Храмова «Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков»
- Проведена XII Международная зимняя школа-семинар по электронике сверхвысоких частот и радиофизике
- Научная школа Д.И. Трубецкова выиграла Президентский грант по государственной поддержке ведущих научных школ (проект НШ-1250.2003.2)
- В издательстве «Физматлит» (Москва) вышла в свет книга А.А. Короновского и А.Е. Храмова «Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения»
- А.А. Короновский и А.Е. Храмов награждены медалью РАН для молодых ученых в области общей физики и астрономии за цикл работ «Исследование сложного поведения и синхронизации в распределенных системах и системах с малым числом степеней свободы»
- В серии «Синергетика: от прошлого к будущему»* (председатель редакционной коллегии серии профессор Г.Г. Малинецкий) вышла в свет книга Д.И. Трубецкова «Введение в синергетику. Книга 1. Колебания и волны», 2-е издание (Москва, изд-во «Эдиториал УРСС»)

*О серии см. в статье Г.Г. Малинецкого «Миры синергетики» на стр. 131 выпуска.

2004

- В издательстве «Физматлит» (Москва) вышел в свет второй том книги Д.И. Трубецкова и А.Е. Храмова «Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков»
- Проведена 7-я Международная школа «Хаотические автоколебания и образование структур» (ХАОС-2004)
- В серии «Синергетика: от прошлого к будущему» вышла в свет книга Д.И. Трубецкова «Введение в синергетику. Книга 2. Хаос и структуры», 2-е издание (Москва, изд-во «Эдиториал УРСС»)

2005

- Прошла защита докторской диссертации А.Е. Храмова на тему «Сложные нелинейные процессы и управление ими в распределенных автоколебательных системах с электронными потоками» (научный консультант – член-корреспондент РАН Д.И. Трубецков)
- В серии «Синергетика: от прошлого к будущему» вышел в свет учебник Б.П. Безручко, А.А. Короновского, Д.И. Трубецкова, А.Е. Храмова «Путь в синергетику. Экскурс в десяти лекциях» (Москва, изд-во «КомКнига»)

2006

- Научная школа Д.И. Трубецкова выиграла Президентский грант по государственной поддержке ведущих научных школ, проект НШ-4167.2006.2 «Хаос, образование структур и неавтономная динамика в нелинейных системах радиофизики, медицины, физиологии и социологии (теория и эксперимент)»
- Проведена XIII Международная зимняя школа-семинар по электронике сверхвысоких частот и радиофизике
- Сотрудники кафедры совместно с Белорусским государственным университетом информатики и электроники выиграли международный грант РФФИ – БелФФИ «Нелинейная динамика процессов взаимодействия релятивистских электронных потоков с электромагнитными полями». Руководители проекта: с российской стороны – Д.И. Трубецков, с белорусской – А.А. Кураев
- Сотрудники кафедры совместно с Израильским институтом технологий «Технион» выиграли международный грант РФФИ – Министерства науки и технологий Израиля «Пространственный заряд в ионном фоне: принципы усиления и генерации СВЧ-излучения в электронно-волновых системах без внешних фокусирующих полей». Руководители проекта: с российской стороны – Д.И. Трубецков, с израильской – Дж. Фелштейнер

2007

- Проведена 8-я Международная школа «Хаотические автоколебания и образование структур» (ХАОС-2007)
- Прошла защита докторской диссертации А.А. Короновского на тему «Синхронное поведение, сложная динамика и переходные процессы в автоколебательных системах и эталонных моделях нелинейной теории колебаний» (научный консультант – член-корреспондент РАН Д.И. Трубецков)

- Вышла в свет книга Д.И. Трубецкова «Даниил Семенович Данин и его кентавристика». Лекции, вып. 3. Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж»
- М.К. Куровская награждена медалью РАН для студентов вузов в области общей физики и астрономии за цикл работ «Исследование особенностей разрушения режима хаотической фазовой синхронизации»
- Прошла защита кандидатской диссертации Е.Н. Егорова на тему «Нелинейные колебательные явления в системах, содержащих нерелятивистские электронные пучки с виртуальным катодом в тормозящем поле» (научный руководитель – А.Е. Храмов)
- А.Е. Храмов стал победителем конкурса 2007 года по государственной поддержке научных исследований молодых российских ученых – докторов наук (проект МД-1884.2007.2)
- Прошла защита кандидатской диссертации И.С. Ремпен на тему «Управление сложными нелинейными колебаниями в распределенных автоколебательных системах, содержащих электронные потоки со сверхкритическим током» (научные руководители – Д.И. Трубецков и А.Е. Храмов)
- В издательстве «Физматлит» (Москва) вышла в свет книга М.Н. Стриханова, Д.И. Трубецкова, А.А. Короновского, Ю.П. Шараевского и А.Е. Храмова «Высшая школа России с позиций нелинейной динамики: проблемы, оценки, модели»

2008

- Научная школа Д.И. Трубецкова выиграла Президентский грант по государственной поддержке ведущих научных школ, проект НШ-355.2008.2 «Автоколебания, прохождение и управление сложными сигналами (включая хаос) в распределенных системах и цепочках, в том числе в присутствии шумов»
- Сотрудники кафедры совместно с Белорусским государственным университетом информатики и электроники выиграла международный грант РФФИ – БелФФИ «Нелинейные колебательные явления диапазона сверхвысоких частот в релятивистских пучках заряженных частиц, взаимодействующих с электромагнитными полями электродинамических систем». Руководители проекта: с российской стороны – Д.И. Трубецков, с белорусской – А.А. Кураев
- Прошла защита кандидатской диссертации А.В. Стародубова на тему «Хаос и хаотическая синхронизация в сверхвысокочастотных автогенераторах на основе клистронных усилителей с обратной связью: теория и эксперимент» (научные руководители – Д.И. Трубецков и А.А. Короновский)
- Прошла защита кандидатской диссертации А.Е. Филатовой на тему «Режимы полной хаотической синхронизации и переходные процессы в некоторых сетях со сложной топологией, содержащих нелинейные динамические системы» (научные руководители – Д.И. Трубецков и А.А. Короновский)
- Прошла защита кандидатской диссертации О.И. Москаленко на тему «Хаотическая синхронизация: различные механизмы и применение для скрытой передачи информации» (научный руководитель – А.А. Короновский)
- Прошла защита кандидатской диссертации П.В. Попова на тему «Хаотическая синхронизация распределенных систем, демонстрирующих пространственно-

временной хаос: эталонные модели теории колебаний, электронно-волновые системы с обратной волной» (научный руководитель – А.Е. Храмов)

- А.Е. Храмов вошел в состав диссертационного совета по нейробиологии в Радбоутском университете (Наймеген, Голландия)

2009

- Проведена XIV Международная зимняя школа-семинар по электронике сверх-высоких частот и радиофизике
- В журнале Успехи физических наук вышла в свет статья П.С. Ланды, Д.И. Трубецкова, В.А. Гусева «Заблуждения и реальность в некоторых задачах физики: теория и эксперимент»
- И.С. Ремпен стала лауреатом конкурса Фонда Потанина среди молодых преподавателей вузов
- Вышла книга Д.И. Трубецкова «Нелинейная наука в датах и лицах». Часть I. (Саратов: ООО ИЦ «Наука»)
- Сотрудники кафедры совместно с Институтом сложных систем (Флоренция, Италия) выиграли международный грант «Синхронное поведение распределенных автоколебательных систем, демонстрирующих режимы пространственно-временного хаоса». Руководители проекта: с российской стороны – Д.И. Трубецков, с итальянской – Рикардо Меучи
- Прошла защита кандидатской диссертации М.К. Куровской на тему «Особенности поведения некоторых нелинейных систем вблизи границы режима хаотической фазовой синхронизации: разрушение/установление синхронного режима, перемежаемость» (научный руководитель – А.А. Короновский)
- В журнале Успехи физических наук вышла в свет статья А.А. Короновского, О.И. Москаленко, А.Е. Храмова «О применении хаотической синхронизации для скрытой передачи информации»
- В издательстве «Физматлит» (Москва) вышла в свет коллективная монография «Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверх-высоких частот» под редакцией А.А. Кураева, А.А. Короновского, Д.И. Трубецкова и А.Е. Храмова. Авторский коллектив включал в себя исследователей из России (Саратов и Москва), Белоруссии (Минск), Израиля и США
- Совместно с кафедрой геоэкологии геологического факультета СГУ проведена Всероссийская научная школа-конференция «Нелинейные феномены, хаос, критические явления и методы их исследования с помощью вейвлетного, кластерного и спектрального анализа в геоэкологических процессах» (Геохаос'2009)

2010

- Проведена 9-я Международная школа «Хаотические автоколебания и образование структур» (ХАОС–2010)
- Научная школа Д.И. Трубецкова выиграла Президентский грант по государственной поддержке ведущих научных школ, проект НШ-3407.2010.2 «Сети, цепочки и их элементы в виде распределенных систем в присутствии регу-

лярных воздействий и шумов: автоколебания, синхронизация, образование и взаимодействие паттернов»

- И.С. Ремпен стала лауреатом Фонда Потанина по конкурсу «Преподаватель-он-лайн»
- Сотрудники кафедры совместно с Белорусским государственным университетом информатики и электроники выиграли международный грант РФФИ – БелФФИ «Физическая и математическая оптимизация процессов взаимодействия релятивистских электронных потоков со сверхвысокочастотными электромагнитными полями». Руководители проекта: с российской стороны – Д.И. Трубецков, с белорусской – А.А. Кураев
- В серии «Синергетика: от прошлого к будущему» вышло 2-е издание книги Б.П. Безручко, А.А. Короновского, Д.И. Трубецкова, А.Е. Храмова «Путь в синергетику. Экскурс в десяти лекциях» (Москва, изд-во «КомКнига»)
- В издательстве «Книжный дом ЛИБРОКОМ» (Москва) вышло 3-е издание книг Д.И. Трубецкова «Введение в синергетику. Книга 1. Колебания и волны» и «Введение в синергетику. Книга 2. Хаос и структуры»
- Прошла защита кандидатской диссертации М.В. Ханенко на тему «Нелинейная динамика цепочек и сетей связанных генераторов сверхвысокочастотного диапазона: нелинейная нестационарная теория, синхронизация, влияние шумов» (научный руководитель – А.Е. Храмов)
- В издательстве Московского государственного университета под редакцией И.В. Ильина, Д.И. Трубецкова вышла книга «Моделирование нелинейной динамики глобальных процессов». Авторский коллектив – И.А. Алешковский, А.В. Иванов, И.В. Ильин, А.А. Короновский, Л.М. Страхова, А.Д. Трубецков, Д.И. Трубецков, А.Е. Храмов. Предисловие к книге написал ректор МГУ В.А. Садовничий
- В издательстве LAP LAMBERT Academic Publishing (Saarbrücken, Germany) вышла книга Е.Н. Егорова, С.А. Куркина, А.Е. Храмова «Низковольтный виркатор. Нелинейная динамика интенсивного электронного потока с виртуальным катодом»
- В издательстве «Физматлит» (Москва) вышло 2-е издание сборника задач А.П. Кузнецова, А.Г. Рожнева, Д.И. Трубецкова «Линейные колебания и волны», рекомендованного Министерством образования и науки РФ в качестве учебного пособия для студентов-физиков
- Вышла книга Д.И. Трубецкова «Нелинейная наука в датах и лицах». Часть 2 (Саратов: ООО ИЦ «Наука»)

2011

- Прошла защита кандидатской диссертации С.А. Куркина на тему «Нелинейные и нестационарные процессы в распределенной системе “электронный поток с виртуальным катодом во внешнем магнитном поле”» (научный руководитель – А.Е. Храмов)
- Д.И. Трубецков избран на должность профессора по кафедре прикладной математики Национального исследовательского ядерного университета («МИФИ»)
- Прошла защита кандидатской диссертации А.А. Овчинникова на тему «Синхронизация хаотических автоколебаний в присутствии шумов в эксперименте»

с радиофизическими генераторами и нейронными ансамблями головного мозга и диагностика осцилляторных паттернов» (научный руководитель – А.Е. Храмов)

- В издательстве LAP LAMBERT Academic Publishing (Saarbrücken, Germany) вышла книга А.Е. Филатовой, А.А. Короновского и А.Е. Храмова «Сети нелинейных элементов. Хаотическая синхронизация и переходные процессы»
- В издательстве LAP LAMBERT Academic Publishing (Saarbrücken, Germany) вышла книга О.И. Москаленко, А.А.Короновского и А.Е. Храмова «Хаотическая синхронизация. Фундаментальные аспекты и практические приложения в информационно-телекоммуникационных системах»

2012

- Проведена XV Международная юбилейная зимняя школа-семинар по электронике сверхвысоких частот и радиофизике
- Научная школа Д.И. Трубецкова выиграла Президентский грант по государственной поддержке ведущих научных школ, проект НШ-1430.2012.2 «Основы теории нелинейных и нестационарных фундаментальных явлений в новых вакуумных и твердотельных устройствах терагерцового диапазона и их экспериментальное моделирование на более низких частотах»
- Прошла защита кандидатской диссертации Р.А. Филатова на тему «Нелинейные колебательные процессы в электронных потоках с виртуальным катодом (влияние ионизации газа, заполняющего пространство дрейфа, встречные электронные потоки)» (научный руководитель – А.Е. Храмов)
- Сотрудники кафедры совместно с Белорусским государственным университетом информатики и электроники выиграла международный грант РФФИ – БелФФИ «Оптимизация нелинейных процессов в лазерах на свободных электронах и виркаторах». Руководители проекта: с российской стороны – А.Е. Храмов, с белорусской – А.А. Кураев
- В издательстве LAP LAMBERT Academic Publishing (Saarbrücken, Germany) вышла книга О.И. Москаленко, А.А.Короновского и А.Е. Храмова «Переменяющееся поведение на границе хаотической синхронизации. Основные свойства и закономерности»
- В серии «Синергетика: от прошлого к будущему» вышло 4-е издание книги Д.И. Трубецкова «Введение в синергетику» (М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012)
- В серии «Синергетика: от прошлого к будущему» вышла книга Д.И. Трубецкова «Наука о сложностях в лицах, датах и судьбах. Как закладывались основы синергетики. Пиршество духа и драма идей» (М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ»)
- В издательстве Саратовского университета вышла первая часть учебно-методического пособия по практикуму «Волны, структуры, самоорганизация», авторы – Д.И. Трубецков, И.С. Ремпен, А.А. Короновский, А.Е. Храмов
- В серии «Синергетика: от прошлого к будущему» вышло третье издание книги Б.П. Безручко, А.А. Короновского, Д.И. Трубецкова, А.Е. Храмова «Путь в синергетику. Экскурс в десяти лекциях» (Москва, изд-во «КомКнига»)

За прошедшие десять лет

- Каждый год проходили школы-семинары «Нелинейные дни в Саратове для молодых». Традиционно на семинарах работали школьная и студенческая секции
- Все эти годы Д.И. Трубецков, Ю.И. Лёвин, Ю.П. Шараевский, а два последних года и аспирант А.В. Титов ведут курс «Колебания, волны, синергетика» в Лицее прикладных наук
- Сотрудники кафедры участвовали в совместном с геологами семинаре «Синергетика: от прошлого к будущему»
- Сотрудниками кафедры опубликовано более 250 статей как в Российских, так и в зарубежных научных журналах, получено более 30 патентов, около 10 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ
- Сотрудники кафедры приняли участие как руководители и исполнители в 28 грантах РФФИ, 12 проектах Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», трех проектах Федеральной целевой научно-технической программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники на 2002–2006 годы», в двух проектах в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 годы», в двух проектах программы Минобрнауки РФ «Государственная поддержка региональной научно-технической политики высшей школы и развития её научно-технического потенциала» и одном проекте Программы «Федерально-региональная политика в науке и образовании»; в гранте Министерства образования РФ, Американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF), выполнили 4 мини-гранта CRDF; участвовали в работе Программы «Фундаментальные исследования и высшее образование», № REC-006 Научно-образовательный центр «Нелинейная динамика и биофизика» Саратовского государственного университета, в трех проектах Программы Минобрнауки РФ «Развитие научного потенциала высшей школы», в работе Федеральной целевой программы Минобрнауки РФ «Интеграция науки и высшего образования на 2002–2004 годы»
- Проведено 183 семинара кафедры, из них 43 заседания было посвящено представлению кандидатских и докторских диссертаций сотрудников факультета, на 19-ти заседаниях выступали приглашённые учёные, в том числе 14 из вузов ближнего и дальнего зарубежья
- Разработаны новые курсы: «Функциональная электроника» для бакалавриата «Радиофизика», «Динамическое моделирование и диагностика» для бакалавриата «Прикладная математика и физика», «Нелинейная динамика активных сред» для бакалавриата ПМФ, «Основы магнитоэлектроники», «Физика активных сред», «Численный анализ сложных систем» (специальность «Физика открытых нелинейных систем»), «История и методология науки» (магистратура «Радиофизика»), «Самоорганизация в открытых системах радиофизики и электроники» (специальность «Радиофизика и электроника»)
- Организованы и поставлены лабораторные работы «Исследование длинной линии», «Базовые логические схемы», «Основы цифровой логики», «Операционный усилитель. Параметры операционных усилителей» и «Операционный усилитель. Некоторые функциональные схемы»

- Написаны методические пособия к работам «Динамическая система», «Математические основы синергетики», «Фракталы», «Клеточные автоматы» для компьютерного практикума. Переработаны методические пособия для лабораторного практикума «Исследование пространственного заряда», «Контактная разность потенциалов», «Рябь Фарадея», «Ячейки Бенара», «Автоволны и структуры в химических системах», «Гравитационные и капиллярные волны», «Солитоны»

CHAIR OF ELECTRONICS, OSCILLATION AND WAVES

2003 – 2012

A. E. Hramov, Yu. I. Levin

Latest developments and successes achieved of the Chair of electronics, oscillation and waves of the Saratov state University are described.

Keywords: Chair of electronics, oscillation and waves SSU, anniversary, successes achieved.

Храмов Александр Евгеньевич – окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1996). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата (1999) и доктора (2006) физ.-мат. наук. Профессор, заместитель заведующего кафедрой электроники, колебаний и волн факультета нелинейных процессов СГУ. Область научных интересов – радиофизика в той ее части, которая связана с взаимодействием свободных электронов с электромагнитными полями; нелинейная динамика распределенных активных сред; методы анализа и моделирования динамических систем. Опубликовал (в соавторстве) книгу «Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков» (Т. 1, М.: Физматлит, 2003; Т. 2, М.: Физматлит, 2004), монографию «Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения» (Москва: Наука, Физматлит, 2003), двухтомную коллективную монографию «Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот» (М.: Физматлит, 2009), коллективную монографию «Моделирование нелинейной динамики глобальных процессов» (М.: Изд-во МГУ, 2010) и др.

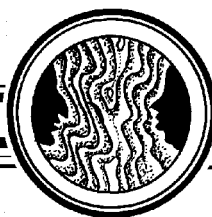


410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: aeh@nonlin.sgu.ru

Левин Юрий Иванович – родился в Саратове (1942), окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1965), защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1974). В настоящее время декан факультета нелинейных процессов СГУ, профессор, заведующий кафедрой физики открытых нелинейных систем СГУ. Автор более 100 научных статей, научно-методических пособий и руководств.



410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: levin@nonlin.sgu.ru



ТРИ РЕКТОРА – ОДНА КАФЕДРА

В. Н. Семенов

Статья посвящена трем талантливым ученым-физикам, которые в разные годы заведывали кафедрой электроники (впоследствии кафедрой электроники, колебаний и волн) и занимали пост ректора Саратовского государственного университета. Одна кафедра – три заведующих – три ректора. Организационная, педагогическая и научная деятельность персонажей статьи даны на историческом фоне жизни университета.

Ключевые слова: Ректоры Саратовского университета, история кафедры электроники.

Петр Васильевич Голубков

16 ноября 1946 – 16 октября 1950

Герои наших очерков – люди умные, волевые, талантливые. Но не так уж много среди них тех, чье главное качество характеризовалось бы словом «обаяние». Таким обаятельным человеком был восемнадцатый ректор СГУ Петр Васильевич Голубков, вызывавший, наряду с огромным уважением, искреннюю симпатию и даже любовь со стороны всех его знавших. Корни этого крылись в исключительной интеллигентности, уравновешенности, порядочности, культуре Петра Васильевича, его доброжелательности и тонком чувстве юмора, делавшими общение с ним откровенным удовольствием для его коллег, подчиненных и близких. Вся его жизнь тесно связана с Саратовом и университетом. Петр Васильевич – представитель того поколения, с кем работали многие ныне здравствующие профессора и доценты. Поэтому каждая фраза настоящего очерка будет предметом их пристального и заинтересованного внимания, что налагает на автора особую ответственность.

Петр Васильевич Голубков родился 24 января 1899 года в городе Саратове, в семье техника Управления Рязано-Уральской железной дороги. Мать его уделяла много внимания воспитанию сына. После начальной подготовки домашними учителями в 1909 году десятилетний Петя поступил в 1-ю мужскую гимназию на Гимназической улице, где проучился 8 лет, проявив способности и прилежание. Бедной



семью Голубковых не назовешь – жалованье техника «отдела вспомогательных предприятий РУЖД» было около 100 рублей в месяц (для сравнения – квалифицированный рабочий на заводе Беринга получал 40 рублей, экстраординарный профессор в университете – 144 рубля). Это обеспечивало семье из трех человек умеренный достаток.

Жили Голубковы до революции на Аничковской улице, дом 4 – ныне это Рабочая улица, недалеко от улицы Радищева. Каждое утро гимназист Петр Голубков стоял на молебне в гимназической домовой церкви и слушал: «Вознесем же, чады, благоусердныя моления наши Господу Богу. Дай нам, Господи, в учении прилежание и поспешание и укажи нам путь истинный в многотрудных жизни...». зубрил латынь и греческий, постигал премудрости алгебры и

геометрии, неплохо научился говорить и читать по-немецки. Катался на санках по Провиантскому взвозу, купался с плотов под Никольским взвозом, пускал воздушных змеев и гонял голубей.

Был он свидетелем важных событий саратовской истории: устройство трамвая, открытие памятника Александру II, учреждение университета. Конечно же, торжества открытия в Саратове первого высшего учебного заведения в декабре 1909 года не могли пройти мимо его внимания – весь город в них участвовал. Кто бы мог подумать, что худенький мальчик из младшего класса классической гимназии в форменной шинели с башлыком, фуражке с кокардой, затерявшийся в толпе первых посетителей временного университетского здания (оно находилось в двух шагах от его дома) на второй день торжеств, станет когда-то ректором главного саратовского вуза, известным ученым и профессором?! Но до этого предстояло пройти еще долгий путь.

Гимназическое образование Петр Голубков завершил весной 1917 года. В этот памятный год учрежден был в Саратовском университете физико-математический факультет, куда и пошел учиться выпускник гимназии, избравший в качестве будущей специальности экспериментальную физику.

Трудные годы учебы в университете, пришедшиеся на революцию, гражданскую войну, хозяйственную разруху в стране, длились 6 лет. Естественно, студенту Голубкову пришлось подрабатывать на жизнь и учебу – родительских средств на это не хватало. С 1918 по 1921 годы он работал в Управлении РУЖД, куда его приняли по протекции отца в качестве «агента железнодорожного учета», а в 1921 году, еще продолжая образование, устроился в родной университет – лаборантом кафедры физики. На этой должности он трудился и после окончания физмата в 1923 году – вплоть до 1925-го. Дипломная работа П. Голубкова называлась «О некоторых вопро-

сах электронной теории металлов Дебая», которую он выполнил под руководством профессора К.А. Леонтьева, сменившего на посту заведующего кафедрой профессора В.Д. Зернова в 1921 году, после отъезда последнего в Москву. Как впоследствии писал Петр Васильевич, его всегда «привлекали исследования в области генерирования электромагнитных колебаний и применение их к изучению электрических свойств вещества».

После окончания университета Петр Васильевич работал лаборантом и младшим ассистентом на кафедре физики (1923–1930), а потом и.о. доцента в Саратовском ветеринарном институте. Окончил аспирантуру СГУ (1926–1929).

В 1930 году вернулся в университет, работал доцентом, а в 1932 году, после преждевременной смерти профессора К. Леонтьева, стал заведующим кафедрой физики, которой руководил свыше 35 лет (с короткими промежутками в 1935–1937 и 1939–1941, когда уходил «на заведывание» в институт механизации сельского хозяйства и в мединститут). При этом занимал также должности декана физико-математического факультета (1942–1943) и был проректором по научной работе СГУ (1943–1946), а впоследствии и ректором.

Все это время Петр Васильевич читал курсы лекций студентам и интенсивно занимался научной работой на кафедре. Публиковаться начал в 1934 году – первая его печатная работа «Опыт применения зуммерного контура к мосту Нернста» помещена в 13-м выпуске «Ученых записок Саратовского университета». В конце 1935 года Голубкову по сумме напечатанных трудов была присуждена ученая степень кандидата физико-математических наук без защиты диссертации. Начиная с 1937 года Петр Васильевич становится научным руководителем аспирантов физмата – всего им было подготовлено до 1951 года 14 кандидатов наук.

В период Великой Отечественной войны научная деятельность кафедры была полностью подчинена нуждам оборонной промышленности. Петр Васильевич опубликовал 6 работ, касающихся новых видов вооружений и специальной аппаратуры.

5 января 1944 года П.В. Голубков на заседании Ученого совета ЛГУ, находившегося в Саратове, успешно защитил докторскую диссертацию на тему «Некоторые вопросы кинематической электронной оптики и проблемы генерирования сверхвысокочастотных колебаний». Вскоре после защиты ему присвоили ученое звание профессора (1944).

В это время начинается тот период жизни Петра Васильевича, который представляет для нас главный интерес – период его ректорства. На этот пост он заступил 16 ноября 1946 года. Это был пик профессиональной деятельности профессора Голубкова, совпавший с пиком и его общественной деятельности – в январе 1947 года его выдвинули в кандидаты, а в феврале избрали депутатом Верховного Совета РСФСР. За всю историю Саратовского университета только несколько его представителей – в их числе Петр Васильевич Голубков – входили в состав высшего законодательного органа Российской Федерации.

Период ректорства П.В. Голубкова – это время послевоенного возрождения страны, Саратова, Саратовского университета. Начиная с 1947 года многотиражка СГУ обрела свой довоенный статус – вновь стала еженедельным периодическим изданием, аккуратно освещающим события университетской жизни. Содержание послевоенных номеров выгодно отличается от политизированных выпусков тридцатых годов, где печатались речи «вождей» и постановления пленумов ЦК. Стало в газете

больше университетских материалов: художественная самодеятельность, спорт, стихи, экзаменационные сессии, научная деятельность кафедр, дела общежитий. Много юмора и шуток – карикатуры, эпиграммы, пародии. В общем, «Сталинец» наконец-то стал похож на студенческую газету, в которой, однако, чувствовалось неусыпное идеологическое руководство. Вот один из заголовков: «Большевицкая агитация – средство коммунистического воспитания масс» (о работе факультетских агитаторов).

Почти каждый год первый номер «Сталинца» открывался напутственно-поздравительным обращением ректора – что-нибудь типа «За выполнение великого плана», «Мы встречаем Новый 1948 год. Новые ответственные задачи стоят перед наукой и высшей школой...» и т.д. Статьи Голубкова отличаются спокойным деловым тоном, без верноподданнических заверений, хотя какую-то дань принятым ритуалам приходилось отдавать и ему. Но звучало это чаще общей фразой и не вызывало какой-то оскомины: «партия и правительство уделяют большое внимание вопросам образования...». Был у Петра Васильевича особый дар – облекать высказываемые мысли в нужные слова, сообразуемые со «спускаемыми установками», но без малейшего ущерба для сути и смысла – так что никаких претензий ни с одной стороны к его речам или выступлениям никогда не было. И поздравляя по случаю очередного официального праздника студентов и преподавателей СГУ, Петр Васильевич лишь вскользь касался актуальных политических проблем и призывов, сосредотачиваясь в основном на конкретных моментах университетского бытия и находя для этого простые, искренние и убедительные слова. Все это очень располагало к нему и слушавших и читавших его выступления...

Много на страницах «Сталинца» в конце 1940-х годов публиковалось стихов – и лирических, и по торжественным случаям, и в форме пожеланий и эпиграмм.

На Новый год звучали стихи про елку, про снег, про новогодние ожидания:

Приходит вечер чередой привычной.
Листок календаря последний оторвет.
И на часах кремлевских, как обычно,
Размеренный удар двенадцать бьет...

Р. Карпова

В светлом зале все сверкает,
Елка блещет и горит,
Пары в танце проплывают,
Новогодний вальс звучит...

К. Васильев

Часто помещались в новогодних выпусках и шуточные пожелания. Вот пожелание проректору АХО Карякину Ф.Ф.

Наш Карякин на собрание
Не является опять.
Говорят, температура
Поднялась под 45.
В корпуса под Новый год
Пусть ее перенесет.

Всем! Всем! Всем!
Всем студентам в этот год
Наше пожелание –
Сдать экзамен и зачет.
Но без опоздания.

Так дела свои вершить,
Чтоб со всем народом
Пятилетку завершить
За четыре года...

Особый прилив вдохновения ощущали университетские поэты в канун 1 мая и 7 ноября – праздников официальных и высокоторжественных:

Разметнув лучи свои без края,
Гордо улыбаясь с вышины,
Солнце златоглавое встречает
Праздник юности, парад весны...

С. Свердлина

Трудно измерять прошедшее годами,
Но оглянешься, и как издалика
Словно видишь все перед глазами –
Ночь Октябрьскую, собрание ЦК...

В. Сыноров

Политические мотивы проглядывают и в стихах по поводу начавшейся в послевоенные годы «холодной войны». Это было очень модно – прославлять все «наше» и хулить все «чужое», и тем самым как бы бороться «за мир во всем мире»:

Мы живем в столетье	Я шлю привет Корее,	Плечом к плечу к народу встал народ
Мировых открытий,	Где гордо над землей	На бой за мир во имя светлой жизни.
Жизнь в России светит,	Свободы знамя реет,	В двадцатом веке множество дорог,
Смерть – на Уолл-стрите.	Ведя корейцев в бой...	И все дороги – только к коммунизму!
<i>С. Ильин</i>	<i>С. Горшков</i>	<i>Р. Иванов</i>

Естественно, «половодье» стихов обрушилось на газетные полосы в связи с 70-летием «отца народов» 21 декабря 1949 года:

Перед нами солнечные дали,	Там, где в небо взметнулись горы,
Веселится молодость вокруг,	Где чуть виден вдали Казбек,
И ведет к победам мудрый Сталин,	Есть старик из селенья Гори,
Нам, студентам, самый лучший друг...	Уважаемый человек...
<i>В. Сыноров</i>	<i>В. Ястребов</i>

В этой балладе автор рассказывает о простом кавказском труженике, земляке И.В. Сталина, который ждет к себе в гости вождя и готовит к встрече трудовой подарок.

Встречаются просто лирические стихи – без всякого повода. О весне, о жизни, об университете...

Когда-нибудь, разматывая нити
Давным-давно ушедших в вечность лет,
Ты вспомнишь юность в гуле общежитий,
Ты вспомнишь, друг мой, университет...

С. Свердлина

В послевоенные годы интенсивно возрождалось в университете спортивное движение. Кафедра физкультуры получила в свое распоряжение спортивный зал – не очень вместительный, но главное – свой, где развернулась работа спортивных секций – гимнастики, бокса, борьбы, тяжелой атлетики, фехтования. Во дворе при спортзале – на углу Ленинской и Пугачевской улиц – в зимнее время заливался каток, где играла радиолы, и куда приглашались все члены коллектива СГУ. С нагрузкой работали лыжная и легкоатлетическая секции, необыкновенной популярностью пользовались спортивные игры: волейбол, футбол, баскетбол. Именно во времена ректорства Голубкова обретали традицию осенние спортивные праздники, проводимые на стадионе «Динамо», в которых участвовал почти весь университетский коллектив – несколько тысяч спортсменов, а следили за борьбой десятки тысяч зрителей-горожан. По тем временам показывали студенты неплохие результаты. Рекорд СГУ и города в прыжках в высоту установил на одном из таких праздников – под восторженные аплодисменты болельщиков – легендарный Павел Олонычев, аспирант мехмата. Он взял высоту 177.3 см. Спринтер Владимир Каргин показал на стометровке 11.2 с. Эстафету 4 × 100 м у мужчин команда СГУ выиграла со временем 48.0 с.

Первенствовал университет среди вузов Саратова в гимнастике, лыжах, в гребле, плавании, в конькобежном спорте. Волейбольная команда СГУ была одной из лучших в городе – первым был тот же Павел Олонычев, блистательный нападающий, приводивший в восторг своими сокрушительными ударами многочисленную толпу болельщиков, собиравшихся на каждый матч с участием университетской команды.

Отличались массовостью, азартом и определенным мастерством и межфакультетские соревнования – чаще побеждали здесь у мужчин физики или геологи, а у женщин – химики или математики.

Не меньшей популярностью в университете пользовалась художественная самодеятельность. Талантами всегда был богат наш вуз. Вместе с вокалистами, танцорами, музыкантами большой интерес вызывали в то время выступления сатирических групп, ставивших остроумные сценки из студенческой жизни, встречаемые с пониманием и со смехом – почти забытым в годы лишений и бедствий. В те времена зародилась традиция ежегодных факультетских смотров художественной самодеятельности – проводились они обычно в марте-апреле и отличались большой массовостью. На смотре 1949 года, например, места в конкурсе распределились следующим образом: 1 место – геологический факультет (38 участников), 2 место – химический факультет (31 участник), 3 место разделили филологический и физический факультеты (по 30 участников), 4 место – мехмат, а последнюю тройку составили исторический, биологический и географический факультеты.

В первую послевоенную пятилетку понес университет крупные кадровые потери: в апреле 1947 года скончался член-корреспондент АН СССР, доктор химических наук, профессор В. В. Челинцев; в сентябре 1948 года умер доктор геолого-минералогических наук, профессор Б.А. Можаровский; в мае 1950 года хоронили профессора Николая Ивановича Усова. Естественно, гражданскую панихиду и проводы усопших организовывал ректорат СГУ.

Петр Васильевич Голубков был последним ректором, проведшим свои служебные часы в так называемом «ректорском домике» – деревянной ветхой постройке, служившей местом служебного обитания университетских первых лиц еще со времен В.И. Разумовского. В 1949 году благодаря долгим стараниям П.В. Голубкова на этом месте было начато сооружение 5-го корпуса, будущего главного административного здания СГУ, где затем разместился кабинет ректора. Последний обживал в качестве хозяина преемник Голубкова – Роман Викторович Мерцлин.

Естественно, административные обязанности отнимали у Петра Васильевича основную часть рабочего времени. А кроме того, он много занимался общественной работой – депутат Верховного Совета РСФСР, член бюро Кировского райкома ВКП(б), член Саратовского горкома ВКП(б). Однако, несмотря на сверхзанятость, профессор П.В. Голубков не оставлял научной и учебной деятельности – по-прежнему был заведующим кафедрой, читал лекции, руководил научными исследованиями аспирантов и научных сотрудников. Можно предположить, что последнее он делал с гораздо большим удовольствием: наверняка, многотрудные и разнообразные обязанности ректора, в число которых входило и неуспешное политическое бдение (к сожалению, приходилось заниматься и этим), ему, человеку нетщеславному и политически трезвому, были в тягость. Что, например, должен был чувствовать Петр Васильевич в связи с организованной центром повальной кампанией осуждения «вейсманизма-морганизма», захватившей и СГУ в феврале 1949 года? Тогда вышло постановление бюро горкома «О состоянии политико-воспитательной работы в Саратовском госуниверситете», где ничего конкретного не говорилось, но в «назидание» и для «острастки» декларировалось, что «значительная часть студентов не охвачена никакими формами политического воспитания», что «в студенческой само-

деятельности и в спортивных секциях занято всего 10–12% студентов», что «научных кружков немного и работают они плохо» и что «есть факты аполитичности и аморального поведения». Естественно, чтобы «исправить положение», необходимо привлечь, усилить, улучшить, ужесточить и т.д. А еще была кампания «борьбы с космополитизмом» в СГУ, с пресловутыми «буржуазными диверсантами, пробравшимися в различные отрасли нашей идеологической работы», и ректору Голубкову на партсобрании приходилось призывать «шире и глубже развернуть идеологическую работу с профессорско-преподавательским составом». Все это вызвало, скорее всего, у Петра Васильевича негативное ощущение и связано было в большей мере с его ректорской должностью: весь спрос за мнимые упущения был, естественно, с первого лица университета. Потому-то оставаться на этом посту на второй срок Петр Васильевич не выразил желания.

В октябре 1950 года он оставил ректорское кресло, целиком переключившись на научную и преподавательскую деятельность. 1950–60-е годы были временем его наивысшей творческой активности как профессора и ученого. П.В. Голубков читал студентам курсы общей физики, физики электромагнитных колебаний, электроники, статистики и другие. Лектор он был блестящий, предметы знал в совершенстве, рассказывал интересно и увлекательно, демонстрировал опыты, иллюстрировал их тут же вычерчиваемыми схемами на доске. Он очень ценил самостоятельную работу студентов, когда они обнаруживали понимание сути, а не механическую зубрежку, был доброжелателен и терпим к студенческим шалостям. Петр Васильевич отличался безукоризненной вежливостью, проявляя ее в общении и с самым младшим персоналом – лаборантами, сторожами, уборщицами. Будучи ректором, очень редко пользовался автомобилем, предпочитая ходить пешком, приветливо раскланиваясь со всеми знакомыми и незнакомыми людьми, здоровавшимися с ним.

Петр Васильевич был великолепным организатором науки – заботливо опекал аспирантов и диссертантов, помогал им в проводимых исследованиях и в преодолении многочисленных формальных, бюрократических трудностей, связанных с наличием необходимых протоколов, справок, других документов, требующихся на тернистом пути подготовки диссертации к защите. Известен случай, когда, зная и ценя своего молодого ученика и начатые им исследования, Петр Васильевич организовал заседание кафедры, на котором, пренебрегая формальностями, представил робкие начинания ученика как готовую работу и тем значительно ускорил дело, получив для своего воспитанника нужный протокол и подтолкнув последнего к более решительным и целеустремленным действиям.

В начале 1950-х годов на выпускников физического факультета СГУ был огромный спрос. На распределении в кабинете ректора обычно сидело 50 представителей самых разных заводов и «почтовых ящиков», куда во все возрастающих количествах требовались специалисты для вновь открываемых отделов и лабораторий, в которых велись «оборонные» исследования. За каждого выпускника подчас шла настоящая «драка» – так стремились заполучить к себе молодых инженеров богатые по тем временам предприятия.

Именно поэтому в 1952 году в СГУ был организован так называемый спецфак, или второй физический факультет, призванный готовить специалистов для оборонной промышленности. А это значит, что прием на физический факультет СГУ возрос

вдвое, и вырос удельный вес опытных профессоров и доцентов, руководивших массовой подготовкой кадров. Значительная часть научных исследований по договорам с предприятиями Саратова и городами Союза выполнялась в отделах и лабораториях НИИМФ СГУ. Кроме того, тогда же Петром Васильевичем Голубковым была организована на физическом факультете лаборатория радиоэлектроники, где проводились исследования по созданию новых радиолокационных приборов и навигационной аппаратуры. Под личным руководством П.В. Голубкова было выполнено более 20 обширных исследований и около 300 заданий.

В 1958 году он стал директором НИИ физики и механики СГУ и проработал на этом посту около 10 лет, продолжая и преподавательскую деятельность, и руководство кафедрой общей физики. Во многом благодаря усилиям П.В. Голубкова университетская «Нимфа» – так любовно именовал свой НИИ ее директор, стала известнейшей в стране радиофизической фирмой, известной среди специалистов как «саратовская цивилизация». К этому времени авторитет Петра Васильевича как ученого вышел за пределы Саратова – он был утвержден рецензентом ВАК и избран членом сектора электроники Совета по радиофизике и радиотехнике Академии наук СССР. У него были обширные профессиональные связи в научной среде столицы, в министерствах и ведомствах, и, заботясь о преемственности дел, Петр Васильевич, отбывая в командировку в Москву, часто брал с собой своих последователей и учеников – научить решать вопросы с нужными людьми самостоятельно, без его протекции и помощи.

При всех своих регалиях и заслугах Петр Васильевич оставался удивительно простым и скромным человеком. Высокий, худощавый, подвижный, одетый скромно, но аккуратно (на кафедре его чаще видели в белом халате), он слыл редким бессребреником, не требуя себе ни наград, ни чинов, ни каких-то особых условий и привилегий. Жил он с семьей в старом доме на улице Сакко и Ванцетти, 47 и, когда выделили ему двухкомнатную квартиру в новом «хрущевском» доме, после недолгих размышлений от нее отказался, мотивируя это тем, что его старая громоздкая мебель просто «не пройдет» в узкие двери и коридорчики. В 1961 году в нашей стране была денежная реформа. Уже после смерти Петра Васильевича в его столе нашли пачки старых денег – очень крупную сумму – он забыл их обменять своевременно на новые. Такое место занимали в его жизни деньги.

Все эти качества чрезвычайно располагали к Петру Васильевичу его окружение, вызывая искреннюю симпатию. Причем обаяние его нисколько не страдало от всем известного небольшого и извинительного «грешка» Петра Васильевича. В очень умеренном количестве употреблял он вино и пиво, причем мог это делать и на рабочем месте.

На должности заведующего кафедрой Петр Васильевич проработал до 1969 года. В канун своего семидесятилетия он подал в отставку с этого поста, но продолжал работать на кафедре профессором-консультантом.

Семья П.В. Голубкова состояла из его жены Нелли Эдуардовны и сына Евгения (1935 года рождения). Долгое время в доме вместе с ним проживали его мать Мария Петровна и теща Е.С. Геритц. Евгений, окончив в Саратове среднюю школу, уехал в Москву, где окончил Московский авиационный институт. Там же, в столице, он остался работать.

В 1971 году Петр Васильевич перенес небольшой инсульт, слегка нарушивший его речь и координацию. Это вынудило его почти полностью прекратить работу. В марте 1973 года он поехал в Москву навестить сына и там скоропостижно скончался. Тело его было кремировано, а урна с прахом доставлена в Саратов для захоронения. Гражданская панихида памяти Петра Васильевича при огромном стечении народа прошла в Горьковской аудитории 3-го корпуса – там, где много лет читал он студентам свои увлекательные лекции. Похоронен Петр Васильевич на Воскресенском кладбище в Саратове. На его могиле слова: «П.В. Голубков, физик».

Имя Петра Васильевича Голубкова золотыми буквами вписано в историю Саратовского университета. На старейшей университетской кафедре общей физики наследие Петра Васильевича не предано забвению, оно бережно хранится усилиями его воспитанников и преемников. К 100-летию П.В. Голубкова, в 1999 году, на фасаде 3-го корпуса близ центрального входа была повешена мемориальная доска, увековечившая память о восемнадцатом ректоре СГУ.

Владимир Николаевич Шевчик

декабрь 1970 – июль 1977

Каждая из фигур в ректорском списке примечательна по-своему – ведь деятельность первого должностного лица многогранна, ректор должен выступать в нескольких качествах: ученого, профессора, организатора, администратора. И тот или иной ректор в чем-то преуспел больше, чем-то меньше. Универсальных же в личностей среди ректоров, пожалуй, не было, да и быть не могло: слишком много для этого нужно знать и уметь. Самой сильной стороной двадцать первого ректора СГУ можно назвать его квалификацию ученого. Его научные достижения весомы и широко признаны – не только среди ученых-физиков нашей страны, но и во всем мире. Владимир Николаевич – крупный международный научный авторитет. Судьба его сложилась драматически – он испытал взлет и падение, пережил счастливую пору всеобщего признания и успеха и глубокую человеческую трагедию, являл пример высочайшего интеллекта, нравственного, духовного совершенства и не смог противостоять банальному, погубившему его пристрастию.



Владимир Николаевич Шевчик родился 1 июля 1923 года в семье рабочего в Саратове. Один из его предков был родом из Чехословакии – этим объясняется его несколько нетипичная для наших мест фамилия. Отец его Николай Порфирьевич был простым строительным рабочим, но проявлял нестандартное мышление – был склонен задумываться над серьезными вопросами мироздания и процессов общественного развития и оригинально их трактовал. В последние годы жизни он даже устроился на работу ночным сторожем – дабы иметь время и возможность обстоятельно «разобраться в мировых проблемах» – так он говорил об этом сам. Он умер в 1967 году, а мать Евдокия Родионовна, простая женщина, домохозяйка, ушла из жизни еще раньше, в 1961 году. Семья Шевчиков долгое время жила на Первомайской улице, в квартале между Вольской и М. Горького, в коммунальной квартире старого дома. Так что привычки у Владимира Николаевича к жизненным удобствам и комфорту с детства не было.

После окончания саратовской средней школы № 14 Владимир Николаевич в 1941 году поступил на физический факультет Саратовского университета. В армии он служить не мог, так как в детстве получил травму глаза. В трудное военное и послевоенное время учеба его в СГУ затянулась, были в обучении вынужденные перерывы, и закончил Шевчик университет только в 1947 году. Трудовая биография его необычно проста и заключена в восьми строках записей в трудовой книжке:

- VI.47 – XI.47 – научный сотрудник НИИМФ при Саратовском госуниверситете;
- XI.47 – XI.50 – аспирант СГУ;
- XI.50 – V.54 – старший преподаватель СГУ;
- V.54 – V.58 – доцент СГУ;
- V.58 – XI.67 – зав. кафедрой электроники СГУ;
- XI.67 – XII.70 – директор НИИМФ СГУ, профессор СГУ;
- XII.70 – VII.77 – ректор СГУ;
- VII.77 – II.80 – директор НИИМФ СГУ.

Вся его жизнь, начиная со студенческих лет, прошла в университете. Пожалуй, не было в нашем вузе ни одного ректора, сравнимого с Шевчиком по степени его «верности» СГУ.

Учился в университете Владимир Николаевич блестяще. Опытный педагог и заботливый наставник молодежи, профессор П.В. Голубков, конечно же, обратил внимание на необычного студента, поражавшего всех преподавателей своей работоспособностью, настырностью, острым умом, быстро нарастаемым багажом знаний. Естественно, после окончания физфака Шевчик был оставлен в университете и поступил в аспирантуру, закончив которую, через год, в 1951-м, защитил кандидатскую диссертацию. Областью научного интереса В.Н. Шевчика была электроника сверхвысоких частот, и обе диссертации его были «закрытыми». Шевчиком были исследованы и определены принципы разработки так называемой «лампы с обратной волной», бывшей, в сущности, перестраиваемым широкополосным генератором, нашедшим широкое применение в специальной радиолокационной аппаратуре. Чтобы не возвращаться к вехам научной карьеры Владимира Николаевича, скажем, что в 1954 году ему было присвоено звание доцента, в 1963 году он защитил докторскую диссертацию, а в 1965-м стал профессором.

1950–60-е годы – это «золотое» время В.Н. Шевчика, пора научного становления и плодотворной деятельности, сделавшей его имя вхожим в десятку или даже

в пятерку выдающихся специалистов-электронщиков того времени в нашей стране. Успешно в этот период вел Владимир Николаевич педагогическую деятельность, читал лекции и проводил семинары. Он преподавал курс «Электроника сверхвысоких частот» студентам-физикам 4 курса и «СВЧ-приборы» выпускникам физического факультета. Он обладал счастливым даром доходчиво объяснять самые сложные вещи «на пальцах», так что и глубоко спрятанная истина становилась очевидной для его учеников и коллег. Преподавателем он был в меру требовательным, не «зверствовал» на экзаменах и зачетах, но не был и излишне либеральным, оценивая усвоенные знания достаточно строго и объективно. Очень не любил проявления какой-то халтуры, недобросовестности и попыток «навешать лапшу на уши».

Перечень научных трудов В.Н. Шевчика содержит 145 статей, авторских свидетельств, монографий. Перечислить их нет возможности, упомянем самые крупные и особо значимые из них. В 1959 году Владимир Николаевич выпустил монографию «Основы электроники сверхвысоких частот» (306 стр.). Эта фундаментальная работа сохраняет свое значение до сих пор. Она была переведена и издана в Англии, Китае, Чехословакии. В 1962 году в издательстве СГУ вышла еще одна солидная работа «Волновые и колебательные явления в электронных потоках на сверхвысоких частотах» (336 стр.), написанная в соавторстве с Г.Н. Шведовым и А.Н. Соболевой. Это была своеобразная «энциклопедия» электроники СВЧ, вызвавшая огромный интерес специалистов во всем мире. Перевод ее вышел в издательстве «Пергамэн Пресс» в Англии.

Крупной работой была также книга «Взаимодействие электронных пучков с электронными волнами», вышедшая в 1962 году. А самой объемной монографией, написанной в соавторстве с Д.И. Трубецковым, явилось пространное исследование «Аналитические методы расчета в электронике СВЧ». Издано оно было в издательстве «Советское радио» и содержало 584 страницы (!).

Владимир Николаевич обладал колоссальной работоспособностью. По своей натуре он был «жаворонком» – предпочитал рано ложиться и рано вставать, тут же приступая к работе. Самые продуктивные были у него утренние часы. Он говорил, что с 5 до 8 утра он нередко делал намного больше и качественней, чем за весь последующий день.

При этом, невзирая на столь раннее начало рабочего дня, он мог задержаться допоздна, иногда забывая обедать – до такой степени был погружен в работу. Не все коллеги выдерживали такие нагрузки, некоторые от него уходили из-за высоких требований, из-за напряженного ритма и большого объема работы. У Владимира Николаевича было обостренное чувство нового – он «фонтанировал» новыми идеями, оригинальными решениями, потрясая коллег. Он не терпел какой-либо половинчатости, «эрзацев» в работе – во всем придерживался самых высоких мерок, не щадя ни себя, ни своих подчиненных, добиваясь максимального напряжения интеллектуальных, духовных и физических сил всего коллектива. В этом смысле В.Н. Шевчик был настоящим лидером – его уважали, с ним считались, его побаивались, ибо нерадивым и бестолковым делать около него было нечего. К ним он моментально терял интерес, сосредотачивая его лишь на перспективных и оригинально мыслящих специалистах. Если у кого-то хватало сил и терпения стать учеником Шевчика, то со временем этот человек становился крупной фигурой в науке, воспринимая от своего шефа и его знания, и его мерки, и его напористость и работоспособность.

В отношении всего, что касалось работы, В.Н. Шевчик был довольно жесткий человек. К стратегической цели он шел несокрушимо, не считаясь с сопротивлением и эмоциями оппонентов, проявляя качества «супермена»: хладнокровного, прагматичного, уверенного, умного и умелого руководителя, знавшего цену труду и цену вождественной победы. Владимир Николаевич очень много работал со своими учениками – студентами, молодыми сотрудниками кафедры и с уже сложившимися специалистами из многих гражданских и оборонных НИИ, КБ и заводов. Например, в 1960 году только дипломников у В.Н. Шевчика было 5 человек. Впоследствии все они стали кандидатами физико-математических наук, а трое из них – А.А. Кураев, Н.И. Синицин и Д.И. Трубецков – защитили докторские диссертации и стали академиками РАЕН.

Владимир Николаевич был, в основном, теоретиком, но любил эксперимент, которым часто занимался вместе со своими учениками очень увлеченно, забывая о времени. И не раз приходилось ему и его молодым коллегам покидать территорию СГУ, перелезая через забор. В те времена он был отменный – без дыр и прорех, а входные калитки в университетский городок ночью запирались на замок.

Он в совершенстве знал немецкий язык, чуть похуже – английский, мог говорить и читать по-французски. Как специалист высочайшей квалификации по электронике он побывал в Канаде, Японии, Китае, где знакомился с тамошними достижениями и консультировал коллег – ученых с мировыми именами.

И даже физически Владимир Николаевич в 1950–60-е годы являл пример здоровья и гармонии. Он был среднего роста, плотного атлетического телосложения, очень крепкий и выносливый. В шуточных импровизированных соревнованиях в его коллективе никто не мог бы победить Шевчика в известном единоборстве, теперь называемом армреслинг. Внешний облик Владимира Николаевича также многие находили достаточно привлекательным. Несколько портил его лицо травмированный глаз, но за очками его почти не было видно. У него были крупные правильные черты лица, слегка волнистые густые волосы, белозубая улыбка, одет он был всегда в хорошего покроя добротную одежду – «настоящий мужчина»! Таким он и смотрится на фотографии рубежа 1960–70-х годов.

Этот человек обладал тонким духовным миром. У него был абсолютный музыкальный слух, он знал и любил классическую оперную и симфоническую музыку, зачитывался произведениями Достоевского и других русских классиков, всегда предпочитая прозу стихам. Очень любил природу и тонко ее чувствовал: его приводили в радостное волнение и пахучая травяная степь, и засыпающая река с месяцем в неподвижной воде, и лес в золотой осенней бахrome, и заснеженная елка на зимней опушке. В эти минуты «физик» становился настоящим «лириком», полной противоположностью напористому и слегка бесцеремонному «производственному» Шевчику, удивляя знакомых своей хрупкой, взволнованной, почти детской душой. Даже не верилось, что этот же человек в иной обстановке уверенно и назидательно консультирует «акул военно-промышленного комплекса», могущественных директоров и ведущих специалистов закрытых НИИ, демонстрируя точность, рациональность, математическую сухость мышления.

Он был депутатом городского Совета с 1965 года, членом Саратовского обкома КПСС с 1971 года, имел правительственные награды – орден «Знак Почета» (1967) и орден Трудового Красного Знамени (1971).

Если ко всему сказанному добавить, что у Владимира Николаевича была жена редкой красоты и обаяния – Надежда Петровна, сотрудница кафедры общей физики, то, пожалуй, можно поверить, что в иные минуты своей жизни В.Н. Шевчик чувствовал себя счастливым – все в его жизни до определенной поры ладилось и удавалось. И квартиру новую трехкомнатную он получил в только что построенном доме в центре города. Может быть, только одно его огорчало – не было у него с Надеждой Петровной детей, но на то была, похоже, Божья воля. А все остальное – и материальный достаток, и здоровье, и хороших друзей, и веселый интересный досуг (неоднократно выезжал за границу в туристические поездки), и увлекательную работу – Владимир Николаевич имел. А главное – по своим же бескомпромиссным меркам – Шевчик оценивал себя и свою деятельность как ученого, завкафедрой, директора НИИМФ достаточно высоко, а это был высший суд – суд его беспокойной и чувствительной совести, дававший ему ощущение уверенности и даже определенного превосходства над своим окружением.

Когда В.Г. Лебедев надолго заболел в конце 1969 года, Владимира Николаевича начали готовить на место ректора – ибо не менее, а более высоко оценивала Шевчика как деятеля науки и образования университетская общественность. Первым шагом в такой подготовке, согласно существовавшим тогда установкам, был прием претендента на высокую должность в члены КПСС (сначала в кандидаты, потом переводили в члены – такая была процедура). Затем обсуждения – на парткоме СГУ, в райкоме, в обкоме, в министерстве... Бумаги – характеристики, перечень работ, послужной список... Согласование в ЦК. Все эти этапы Владимир Николаевич благополучно миновал и в декабре 1970 года был назначен ректором Саратовского университета. Это был в чем-то роковой рубеж в его жизни, отделивший счастливую пору его расцвета – творческой активности, душевного и физического здоровья, от времени сначала медленного, а потом все более стремительного упадка – и как следствие этого – преждевременной кончины. Эволюция личности В.Н. Шевчика в пору его работы в университете – от 1950-х к 60-м и 70-м годам – шла в чем-то адекватно эволюции советского общества – от послевоенного возрождения к хрущевской «оттепели» и к эпохе застоя, порождая соблазн жестко связать личную и общественную драму, но мы этого делать не будем, ибо полагаем, что причин драматической трансформации этого человека было несколько, и неизвестно, какая из них была основной.

1971 год, как мы помним, был годом XXIV съезда КПСС. И первый же номер университетской газеты открывается броским заголовком: «Лучшие кафедры – съезду партии» и заметкой доцента И.Н. Чихичина, где он декларирует «решимость коллектива кафедры научного коммунизма достойно встретить» очередной форум правящей структуры.

Вскоре «Ленинский путь» напечатал «примерную тематику» студенческих работ для участия в IV Всесоюзном конкурсе «по кафедрам истории КПСС, философии, научного коммунизма, политической экономии, истории СССР советского периода, новой истории зарубежных стран, педагогики и психологии». Взглянув на этот перечень, сразу понимаешь, что «оттепель» прошла, и «холодное дыхание» очередного этапа «борьбы за счастье человечества» вновь разливается по просторам Отечества. «Мировое коммунистическое движение – самая влиятельная сила современности», «Авангардная роль КПСС в решении экономических задач 9-й пятилетки», «Ленин о союзе философии и естествознания», «Партия скажет “надо” –

комсомол ответит “есть”» – эти и другие темы докладов свидетельствуют о взятом курсе «на укрепление авторитета» правящей партии, пошатнувшегося в результате хрущевских новаций.

Следствием этого курса стало заметное «поскучнение» университетской газеты. Больше печатались серьезные материалы – о сессиях, экзаменах, о коммунистических традициях («Наследники великого почина» – об апрельском субботнике), о выборах, о студенческих строительных отрядах. Последние были в ту пору в нашем вузе довольно многочисленны. В 1972 году, например, в разных районах РСФСР (более всего в Саратовской области) работали 7 строительных отрядов СГУ: «Вектор», «Импульс», «Эврика», «Горизонт», «Эксперимент», «Аэлита», «Сокол», «Центр». Строили они в основном коровники, курятники, хранилища, заводы и фабрики местного значения, помогая районным властям решать строительные проблемы и обеспечивая себя скромным заработком. Комсомольские власти строго следили за тем, чтобы последние были действительно скромными, и задуманные отряды не превращались бы в «артели шабашников». Соответствовало заработкам и качество строительства... Тема ССО была настолько популярна в те годы, что ей даже посвящались стихи, столь редкие в тот период на страницах «Ленинского пути»:

Лето. Отряд. Километры столбов,
Степь разрезавших на две части.
И ветер на гитаре проводов
Что-то поет едва слышно о счастье...

Как стихийное бедствие – споры,
В них студенты – немного фанатики.
Сразу все, обо всем, без разбора –
О мирах, о любви, о романтике...

С. Штанько

Очень познавательными в университете в те годы были торжественные мероприятия посвящения в студенты. Проводились они осенью в большом помещении (чаще всего в Театре оперы и балета) и обставлялись торжественно. Одним из ее элементов была «Торжественная клятва», произносимая первокурсниками. Текст ее очень хорошо отражал господствующие в обществе тенденции и сейчас читается с интересом и удивлением. В 1972 году слова «Клятвы» были таковы.

«Вступая в ряды советского студенчества в год 50-летия СССР, торжественно клянемся:

– Вечно хранить в наших сердцах огонь ленинизма, огонь борьбы, огонь революции! Клянемся! (хором);

– Клянемся Коммунистической партии и советскому народу оправдать гордое звание советского студента! Клянемся! (хором);

– Приложить все силы для овладения богатством знаний и выполнения решений XXIV съезда КПСС! Клянемся! (хором);

– Беречь и умножать славу родного университета, развивать его лучшие традиции! Клянемся! (хором);

– Вдохновенным трудом, кипучей энергией молодости, комсомольской честью, каждым ударом своего сердца, каждым прожитым днем, всей своей жизнью – клянемся утверждать на земле Коммунизм! Клянемся! (хором)».

Из всего этого высокопарного нагромождения, пожалуй, лишь пункт о традициях и славе родного университета не вызывает возражений и теперь. А тогда пропаганда правящей партии работала вовсю и многих убеждала в правоте своего дела. Так что среди хором произносивших «клянемся» было немало таких, кто верил и душою не кривил...

Год 1973-й был назван «решающим» в 9-й пятилетке. Начался он с сощобязательств СГУ (опубликованы 12 января). Прошел обмен партийных билетов, призванный «оживить партийную работу в первичных организациях». Вокруг этой кампании было много шума, собраний, лозунгов и призывов. А вскоре затеяли и обмен комсомольских билетов. Новое оживление, вызвавшее даже прилив поэтического вдохновения:

Серп и молот, штык и винтовку
Доверяет юности народ.
С красной комсомольскою путевкой
Молодость в бессмертие идет...

А. Родин

На страницах «Ленинского пути» продолжали превалировать заметки и статьи о войне, о ветеранах труда, о колхозной страде. Последняя в 1973-м была особенно напряженной – область выдала тогда рекордный урожай – 311 миллионов пудов зерна. В течение 22 последующих лет этот показатель не был превзойден.

Серьезный настрой был продолжен и в 1974-м – «определяющем» году 9-й пятилетки (а 1975 год станет «завершающим»). Новогодний номер от 11 января открывается пространной публикацией «О работе комсомольских организаций в связи с обращением ЦК КПСС к партии и советскому народу» (раньше в новогодних выпусках печатались стихи и карикатуры). А вскоре были опубликованы кое-какие интересные статистические сведения об университете.

В середине 1970-х годов в СГУ обучалось около 10 тысяч студентов. Более половины из них – на дневном, остальные – на вечернем и заочном отделениях. В нашем вузе работало 750 преподавателей – из них 54 профессора и 342 доцента. Стипендию получали 4041 студент, или 75% всего состава. Именные стипендии получали: имени Ленина – 7 человек, имени Маркса – 1, имени Пушкина – 1, имени Белинского – 1, имени Толстого – 1, имени Чернышевского – 3. Среди студентов СГУ было 113 человек членов КПСС.

В 1975 году был сдан в эксплуатацию новый 9-й корпус университета. Вместе с ранее сданным 8-м они образовали своего рода архитектурный «анахронизм» в университетском городке, облик которого сформировал в основном К.Л. Мюфке. В ректорство В.Н. Шевчика было открыто студенческое кафе на улице Степана Разина, и проблема питания студентов в учебное время была во многом решена.

По-прежнему публикуются политические стихи:

В Кремле намечен этот путь,
И никому на свете
Тебя не сбить и не свернуть
С дороги пятилетий...

Некую «политизированность» можно усмотреть и в опубликованном «Положении о фестивале самодеятельного художественного творчества студентов СГУ». Было предложено 4 тематических конкурса, в рамках которых участники фестиваля должны были проявлять свои таланты как певцы, танцоры, драматические артисты, музыканты, художники, поэты: 1-й конкурс – «Я патриот. Я воздух русский и землю русскую люблю»; 2-й – «И песня и стих – это бомба и знамя и голос певца поднимает класс»; 3-й – «Комсомольская юность моя»; 4-й – «Широка страна моя родная».

Клуб культуры СГУ работал в то время интенсивно. В числе функционирующих при клубе художественных коллективов – хоровая капелла, класс вокала, драматический коллектив, студенческий театр эстрадных миниатюр, ансамбль баянистов, танцевальный коллектив, эстрадная студия, ансамбль пантомимы, студенческий кукольный театр, ансамбль современного бального танца, театр чтеца, ансамбль народной песни. Это был расцвет деятельности директора клуба Марка Пинхасика, сумевшего в тех непростых условиях сделать клуб местом подлинного паломничества студентов, увлеченно занимавшихся в кружках и студиях под руководством опытных и талантливых руководителей (А. Михайлов, Ф. Аронс, Т. Уманская, А. Авдонин и другие). Многие коллективы университетской самодеятельности стали в ту пору знаменитыми не только в Саратове, но и за его пределами, совершая гастроли по градам и весям Советского Союза.

В 1975 году к 30-летию Победы, наконец-то, открылась в СГУ, в пятом корпусе, комната Боевой славы, где были выставлены экспонаты, фотографии, документы, иллюстрирующие участие студентов и преподавателей университета в Великой Отечественной войне, рассказывающие об обстоятельствах университетской жизни и деятельности в трудное военное время. Много сделал для своевременного открытия музея и оформления комнаты Владимир Николаевич. Основным бескорыстным энтузиастом этого выступил доцент физфака Лев Яковлевич Майофис, вложивший в экспозицию и силы, и здоровье, и душу, благодаря чему очень важная страница истории СГУ получила достойное воплощение: Музей боевой славы стал с этих пор на последующие 20 лет местом активного посещения студентов, преподавателей и гостей университета.

В.Н. Шевчик был одним из делегатов XXV съезда партии от университетской партийной организации и от Саратова. Это было, очевидно, памятное событие в жизни Владимира Николаевича: не каждому дано было увидеть лично парадную помпезность всесоюзных партийных форумов. Естественно, на такие мероприятия могли попасть только «верные сыны партии», преданные режиму, им возвращенные и обласканные. Конечно, в университете состоялись митинги и собрания в честь съезда с резолюциями «поддерживаем-одобряем» в адрес речи генерального секретаря.

Еще больше славословия в этот адрес на страницах «Ленинского пути» можно прочесть в канун 70-летия Л.И. Брежнева, широко отмеченного «в нашей стране и в мировом коммунистическом движении» в декабре 1976 года.

В 1977 году в университетской многотиражке опубликован текст «нового» гимна Советского Союза. В гимне прежним автором С. Михалковым были слегка подправлены отдельные строки и выражены новые политические приоритеты: взамен культа личности – культ партии, вместо «нас вырастил Сталин на верность народам» вставлено «партия Ленина – сила народная». В целом же и содержание, и форма остались прежними – мобилизующими на отпор врагам и на бесконечную «борьбу за счастье человечества».

Вот в такой общественно-политической обстановке проходило ректорство В.Н. Шевчика, постоянно ощущавшего на себе все отголоски большой политики и принимавшего существовавшие «правила игры», то есть нормы поведения руко-

водящих работников. А они, как известно, не отличались высокой нравственностью и в особых условиях, для предрасположенных людей, становились источником моральных недугов, принимавших со временем тяжелые формы. К сожалению, такая предрасположенность имелась в сложной личности Владимира Николаевича, обстоятельства пребывания на посту ректора которого сложились так, что создались и условия для развития драмы.

В практике того времени, как мы все хорошо помним, были шумные «производственные застолья» по поводу «красных дней календаря» – 7 ноября, 1 мая, 9 мая, Нового года, 23 февраля, 8 марта и других. Накрывались столы в кабинетах и лабораториях, уставлялись бутылками и снедью, звучали здравицы, гремела музыка. Мероприятия эти освящались присутствием начальников разных уровней и носили как бы полуофициальный характер – ведь звучали здесь тосты «за очередную годовщину Октября», или «за праздник Великой Победы», или «за наших дорогих женщин».

Проводились такие «мероприятия» и на кафедре электроники, в НИИМФе в бытность Шевчика, который был активным участником застолий. Уже тогда Владимир Николаевич пил много и с удовольствием. Но каких-либо побочных последствий не допускал, сохраняя высокую работоспособность. Будучи ответственным и подотчетным работником, он вынужден был постоянно решать очередные насущные проблемы, отчитываться, общаться с подчиненными и вышестоящим начальством. С вступлением в ректорскую должность многое изменилось в жизни Владимира Николаевича. Увеличилось количество «соблазнов» – банкеты, конференции, официальные мероприятия, торжественные заседания стали более частыми явлениями и сопровождалась и заканчивались выпивкой. А «тормоза» значительно ослабли – теперь никто не контролировал Шевчика, когда он приходит и уходит с работы, куда отправился и что собирается делать. Совершенно неожиданно обнаружилась у Владимира Николаевича еще одна слабость: он с удовольствием внимал откровенным подхалимам. «Люблю подхалимов, хотя противно», – признавался он близким друзьям, указывавшим Шевчику на неосмотрительность его сближений с недалекими льстецами, преследующими исключительно корыстные цели. Они умело использовали равнодушие Владимира Николаевича к спиртному, вовлекая его в очередной «душевный разговор». Часто провоцировало Шевчика и партийное начальство, искавшее повода посидеть в компании уважаемого человека, признанного ученого и профессора, поговорить с ним «за жизнь». А признанный ученый вел себя в этом буквально «как дитя» – отказать не мог: хрупкая и незащищенная душа его ничего не могла противопоставить бесцеремонному начальственному напору.

И роковое пристрастие становилось уже не невинным увлечением, малой прихотью, незаметной для окружающих, а перерастало в драму. Заложное в Шевчике природой противоречие – мощь его натуры и душевная хрупкость – начинало принимать фатальный характер. Постепенно он отошел от научной деятельности. Поддерживать свой высокий уровень ученого и исследователя уже не мог, а никаких «эрзацев» и суррогатов не признавал. Изменилась и манера поведения Шевчика: он утратил былую уверенность в себе, выглядел иногда беспомощным, растеряв-

шим бойцовский качества и интеллектуальный багаж. Случалось, на официальных мероприятиях, присутствуя как первое лицо университета, во время выступления он волновался, покрывался пятнами, говорил сбивчиво и путано, теряя основную мысль. На несколько дней мог «исчезнуть» из поля зрения коллег и сослуживцев. В нетрезвом состоянии он был агрессивен и терял все свое обаяние умного, высокообразованного человека. Алкоголь буквально убивал его. Замечали это на работе и в семье. Надежда Петровна, любившая застолье и гостей, теперь уже с тревогой взирала на постоянное похмелье мужа, не зная, что предпринять для его спасения. Появились обиды, отчуждение, ревность, бытовой дискомфорт, окончившиеся официальным разрывом. К сожалению, это не отрезвило Владимира Николаевича, а, пожалуй, ускорило его падение. Он продолжал любить жену, страдать и стремился притупить страдания все тем же... В конце концов, ранней весной 1977 года Шевчика, – на грани физического и духового кризиса – чуть ли не насильно поместили в больницу, где он прошел длительный курс лечения, в том числе психотерапии. Как и семь лет назад, достаточно продолжительное время в период болезни Шевчика исполнял ректорские обязанности П.А. Бугаенко, проректор по научной работе. В общей сложности он руководил нашим вузом около полутора лет – иные назначенцы и утвержденные ректоры пребывали у руля университетской власти значительно меньше. Может быть, стоило посвятить Павлу Андреевичу отдельный очерк, но заложенный нами принцип в формирование данной книги не позволяет этого сделать.

После окончания курса лечения в июле 1977 года Владимир Николаевич ушел с поста ректора, оставшись на должности директора НИИМФ. На какое-то недолгое время жизнь его обрела относительную стабильность – он держался, работал, даже обзавелся новой молодой женой. Жанна Владимировна, врач по профессии, всячески опекала его и старалась сделать его жизнь максимально комфортной. Но душевный надлом и непреклонное пристрастие к спиртному все же делали свое дело. Владимир Николаевич тяжело заболел: врачи обнаружили у него цирроз печени. Шевчика поместили в городскую больницу, усиленно лечили. Последние самые тяжелые недели около его постели постоянно дежурили сменявшие друг друга ученики и близкие друзья. 12 февраля 1980 года Владимир Николаевич скончался. Похоронен он на Елшанском кладбище.

Очерк о двадцать первом ректоре Саратовского университета, как мы видим, получился существенно отличным от других. Объясняется это, в первую очередь, необычной судьбой и сложной личностью его героя, разобраться в которой до конца, видимо, не дано никому. Автор очерка сознательно пошел на некоторую жесткость изложения, ничего не приукрашивая и не затушевывая, дабы избежать недомолвок и двусмысленности, ибо испытывает к этому человеку огромное уважение и руководствуется в изображении жизни и деятельности В.Н. Шевчика его же собственными высокими мерками. Уверен, что сам Владимир Николаевич не потерпел бы никакой фальши и неискренности в самооценке и предпочел бы горькую правду «тактичным» недомолвкам или откровенной лжи. А правда состоит в том, что Владимир Николаевич был выдающимся, блестящим ученым – с международной известностью, личностью с огромным интеллектуальным потенциалом и доброй светлой душой.

Дмитрий Иванович Трубецков

28 ноября 1994 – 1 ноября 2003

22 ноября 1994 года на бурном заседании Большого ученого совета СГУ в Мичуринской аудитории 5-го корпуса был избран 23-й по счету ректор университета Дмитрий Иванович Трубецков. С небольшим преимуществом (59 голосов против 47) он «победил» своего оппонента В.И. Бегинина, долгие годы работавшего в СГУ сначала секретарем парткома, а потом первым проректором. Противостояние претендентов на пост руководителя университета было драматическим. Сначала их было трое, и лишь в последний момент проректор по научной части Д.А. Усанов снял свою кандидатуру, призвав сторонников отдать голоса в пользу Д.И. Трубецкова.

Родился Дима Трубецков 14 июня 1938 года в Саратове. Счастливым детство его не назовешь. Родители его, оказавшиеся в 1941 году в районе военных действий, попали в плен и надолго были разлучены с сыном. Он воспитывался у деда, Ивана Алексеевича Трубецкова, шофера по профессии, фактически усыновившего мальчика.

Учился Дима в 19-й мужской средней школе, слывшей лучшей в городе, и на протяжении всех десяти лет был круглым отличником. При этом пользовался уважением и среди преподавателей за блестящие способности, примерное поведение и серьезное отношение к учебе, и среди одноклассников за свою скромность, доброжелательность, готовность всегда помочь решить сложную задачу или просто дать списать выполненное задание. К нему хорошо относились и «успешные» ученики, и откровенные двоечники и «волынщики», видя в нем надежного и верного товарища, отнюдь не «заснайку», всегда приветливого и ровного в общении с окружением.

Окончив в 1955 году школу с золотой медалью, Дмитрий в том же году поступил на физический факультет Саратовского университета без вступительных экзаменов и собеседований – как было принято в те годы в отношении медалистов. Так началось стремительное восхождение первокурсника к вершинам науки. В течение всего пятилетнего срока обучения в университете Дима Трубецков учился опять-таки только на «отлично» и во всем остальном был примерным студентом, не уклонялся от практикуемой в те времена общественной работы: шефской помощи колхозам и совхозам, комсомольских поручений, участия в научных кружках, выпусках стенной газеты и т.п. За участие в сельскохозяйственных работах он был награжден орденом «Знак Почета» и медалью «За освоение целинных земель».



В 1960 году, с отличием окончив университет, Дмитрий поступил в аспирантуру. Первым его научным руководителем был профессор В.Н. Шевчик. Через пять лет Д.И. Трубецков защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук – в возрасте 27 лет.

Последовательно пройдя этапы работы в качестве ассистента кафедры электроники, потом старшего преподавателя, доцента, читая студентам общие и специальные курсы, Дмитрий Иванович продолжал научную работу и в 1978 году защитил докторскую диссертацию «Нелинейные и нестационарные явления при взаимодействии электронного потока в скрещенных полях с электромагнитными волнами». Вскоре после защиты он получил профессорское звание, а в 1980 году был утвержден заведующим кафедрой.

Научная и учебная работа Д.И. Трубецкова успешно продолжалась в течение всего доректорского периода его пребывания в Саратовском университете. В 1991 году его избрали членом-корреспондентом Российской Академии наук (правопреемника Академии наук СССР), а годом спустя он стал действительным членом Международной академии наук высшей школы. Перу Дмитрия Ивановича уже в то время принадлежала масса печатных работ, в том числе 11 монографий и учебных пособий. Среди них особо выдающиеся – «Аналитические методы расчета в электронике СВЧ» (1970, совместно с В.Н. Шевчиком) и «Введение в теорию колебаний и волн» (1984, переиздание 1992, совместно с М.И. Рабиновичем). Последняя переведена на английский язык и издана в 1989 году в Голландии.

Вместе с А.М. Богомоловым Дмитрий Иванович стоял у истоков организации Колледжа (теперь Лицея) прикладных наук при Саратовском университете, открытого в 1992 году, и до нынешнего времени является его научным руководителем. Кроме того, в том же 1992-м Д.И. Трубецков стал одним из учредителей российского научно-технического журнала «Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика» и до сих пор занимает общественную должность заместителя главного редактора. Журнал издается в Саратове, что является прямым свидетельством авторитета нашего города в сфере указанного направления науки.

Несмотря на свою увлеченность профессиональными научными, сугубо техническими вопросами, Дмитрий Иванович всегда интересовался гуманитарными сферами – литературой, живописью, поэзией. Особенно любил и любит современных поэтов А. Кушнера, В. Соколова, А. Межирова, Д. Самойлова, А. Галича, Н. Коржавина.

Отличительной чертой Дмитрия Ивановича, уже зрелого и маститого ученого и профессора, является редкостная простота и доброжелательность к людям, его открытость и коммуникабельность. Тем не менее, как ученому и деятелю образования ему присущи целеустремленность и принципиальность, организаторские способности и бойцовские качества, умение своего добиваться и отстаивать свою точку зрения. И еще он обладает редкостным педагогическим даром, что ярко проявляется в общении со своими учениками – студентами и школьниками.

Ректорство Д.И. Трубецкова пришлось на тяжелейшее время, «смутные» 1990-е годы и начало нового тысячелетия, характеризующиеся всеобщим политическим и экономическим кризисом в стране, когда речь шла буквально о выживании науки и высшего образования, и не только их. Отголоски этого кризиса ощущаются и в сегодняшнее время.

События, произошедшие в нашей Alma mater за время «правления» ректора Трубецкова, прослежены нами по публикациям в вузовской многотиражке «Саратовский Университет», в которых отражаются и тенденции развития страны, и приметы времени, и сугубо местные, «местечковые» явления. Отметим, что несколько лет газета вообще не выходила в свет, и издание ее было возобновлено во второй год ректорства Д.И. Трубецкова.

Январский выпуск 1995 года открывается большой статьей руководителя вуза «Университет на стыке веков». В ней, в частности, говорится:

«Главное в работе научно-учебных структур: 1) Найти своего абитуриента, не потерять его в студенческие годы, а самых талантливых ввести в науку. 2) Готовить со школьной скамьи смену себе – будущую научную элиту, элиту общества».

«...Хотя в высшем образовании России, по-видимому, самой массовой формой останется пятилетняя форма обучения, частичный переход на двухступенчатую систему образования неизбежен. Но не быть высокому уровню образования без науки».

«В последнее время появилось много разных университетов и даже академий. Но университет в Саратове – один, наша Alma mater. Университет – наша жизнь, наше государство, наша честь, наша слава, наша боль, наши поражения и победы. Постараемся сделать университет процветающим».

В этом же выпуске сообщается о саратовских стипендиатах – студентах Саратовского университета, что можно считать приметой времени. Ранее о никаких поощрениях талантливых студентов провинциальных вузов со стороны Запада слышно не было. Указывается, что среди биологов стали лауреатами 3 человека, среди географов – 1, геологов – 1, студентов мехмата – 3, химиков – 3, физиков – 5.

На третьей полосе второго выпуска напечатана интересная статья В.А. Артисевич «Библиотеки и университеты» – своеобразное обозрение библиотечного дела от петровских времен до конца XX века. Отмечено, в том числе, что библиотеке Саратовского университета с начала 1990-х годов из федерального бюджета выделяются деньги только на зарплату (опять же нищенскую), в связи с чем стали невозможным приобретение новых книг и подписка на периодические издания.

В третьем выпуске читатель информируется об открытии в университете американского образовательного центра, что стало следствием визита в наш город американского ученого-историка Д. Рейли, профессора русской истории в университете города Чапел Хилл (штат Северная Каролина).

Здесь же публикуется стихотворение главного редактора многотиражки Л. Тобольского на смерть известного в новой России телеведущего Влада Листьева. Автор как бы взывает к «темным силам», причастным к преступлению:

Вам бельмом на глазу неистовые,
Вам послушные по душе.
Проповедник, певец, журналист ли –
Кто «не свой» – на прицеле уже.

В четвертом выпуске приводятся сведения о конкурсе и проходных баллах при поступлении в СГУ образца 1993 года. Сведения, честно говоря, удручающие низкими показателями. Самый высокий конкурс был по специальности «Психология» – 3.8 человека на место (проходной балл 13). Далее по специальности «Английский

язык и литература» – 3.3 человек на место (проходной балл 14). На исторический факультет – 2.8 (проходной балл 13). Самый низкий конкурс зафиксирован на химическом факультете – 1.5 человека (проходной балл 9).

Беспрецедентным оказался пятый выпуск «Саратовского университета» – он целиком вышел на английском языке. В нем рассказывалось о факультетах и специальностях, получаемых после окончания СГУ, а также о правилах приема. Надо полагать, что выпуск был предназначен для иностранных абитуриентов, но каким образом можно было прочесть напечатанные сведения «за бугром» – об этом ничего не говорится. Отметим, что англоязычным выпуском оказался и восьмой выпуск «Саратовского университета», рассказывающий о том же самом.

Шестой выпуск открывается большой передовицей и.о. главного редактора Л. Проворновой «Не ведаем, что творим». В ней рассказывается о нехватке государственных средств на образование и науку. В этом же выпуске публикуется интервью с профессором истории из Германии Дитером Хоффманом под заголовком «Меня всегда влекла Россия».

В последующих номерах «Саратовского университета» интересными, отражающими приметы времени нам показались следующие публикации.

Презентация книги американского ученого-советолога Д. Рейли, переведенной на русский язык, «Политические судьбы российской губернии: 1917 год в Саратове».

Отчет о встрече студентов и преподавателей СГУ с писателем А.И. Солженицыным. Несколько покорило тон статьи, подписанной Л. Исаевым – этакий небрежно-покровительственный, если не сказать – нахальный: «Вы в конце встречи посоветовали смотреть по понедельникам ваши проповеди. О земстве, о покаянии – мы это уже слышали. Вопрос – куда идти каяться? А справки будут выдавать?». Все это напомнило известную басню Крылова о Моське, лающей на Слона.

Серия очерков главного редактора «Саратовского университета» Л. Тобольского «На юге ФРГ – тишина», где рассказывается о посещении передовой европейской страны, еще недавно числящейся в «заклятых врагах» нашей державы. Да, времена меняются!

О том же подумалось после прочтения статьи И. Кабановой, вернувшейся из Шотландии «В Эдинбургском университете».

В 1996 году впервые за долгие годы (а может, и впервые в истории СГУ) во втором выпуске многотиражки напечатан отчет о деятельности ректора СГУ за предыдущий год. Лишнее свидетельство открытости и демократичности нового руководителя университета, представившего общественности вуза данные о своей деятельности по всем разделам – образование, наука, финансирование, хозяйственная деятельность, кадры, научная библиотека, колледж. Заключает отчет настораживающая фраза, которую можно считать определенной новацией «Главное в деятельности ректората – поиск получения внебюджетных средств».

Также беспрецедентной можно считать публикацию «На ученом совете СГУ мэр, банкир и чиновник отвечают на вопросы». В ней приводится отчет о встрече руководства вуза с главой городской администрации, представителем Областного правительства и управляющим банком «Экспресс-Волга».

Взаимодействие университета с местными административно-управленческими структурами прослеживается и в дальнейших публикациях. В пятом выпуске многотиражки сообщается, что губернатор Д.Ф. Аяцков распорядился выделить бедству-

ющей университетской библиотеке 75 миллионов рублей. Но цифра эта особо не впечатляет – в то время бушевала в стране бешеная инфляция, и означенную сумму не стоит особо преувеличивать. Видимо, однако, за столь беспрецедентную акцию губернатор Дмитрий Федорович был избран в члены Ученого Совета СГУ, о чем сообщается в шестом выпуске «Саратовского университета» за 1996 год. Торжественная церемония вручения диплома члена Ученого Совета прошла в Мичуринской аудитории пятого корпуса.

В статье «Кто поступил в наш университет» приводятся итоги очередного набора. План приема на очное отделение был равен 1000 человек, на вечернее – 100, на заочное – 200. На очное отделение было подано 2094 заявления, то есть конкурс в среднем составил 2.1 человека на место. Самый большой был на отделение «История» – 4.27, на отделение «Психология» – 3.17, самый низкий – на отделения «Геофизика» и «Гидрогеология» – 1.5. Цифры, что и говорить, удручающие – особенно в отношении родной геофизики.

Положительно воспринимается сообщение о намерении возобновить Рамзаевский конкурс студенческих работ, который был практикой поощрения талантливых студентов в СГУ на протяжении 1966–1991 годов. Сообщается, что премиальный фонд конкурса будет финансироваться Саратовским благотворительным фондом поддержки образования.

В целом, можно отметить некое «поскучнение» университетской газеты, в доперестроечное время изобиловавшей перлами юмора. Лишь изредка на четвертой полосе появляются под рубрикой «Что наша жизнь!» краткие остроумные измышления главного редактора Льва Тобольского (в разделе «Объявления»: «Куплю топор. Раскольников», «Побуду с бабушкой. Герман», «Посижу с мальчиком. Борис Годунов» и т.д.).

В 1997 году нас привлекли на страницах «Саратовского университета» публикации, проливающие свет на очередные нововведения и события, отражающие меняющийся дух времени.

Так например, с 1 сентября СГУ простился с военной кафедрой, и отныне все выпускники мужского пола по окончании учебы в вузе, должны будут проходить срочную службу. К нынешнему времени военная кафедра сохранилась в Саратове только в политехническом университете. А в медицинском функционирует военный факультет.

Знаковое сообщение в апрельском выпуске газеты: «Долг Правительства по зарплате с февраля 1995 года составил 7 миллиардов 667 миллионов рублей». Даже с поправкой на инфляцию нам показалась эта цифра очень большой.

В очередном отчете ректора за предыдущий год указывается, что всего в СГУ на очном отделении учится 6451 студент. Самые большие факультеты – филфак (1255), мехмат (1119), исторический (872). Средний конкурс при поступлении в СГУ в 1996 году составил опять всего два с небольшим человека на место.

Установлены деловые контакты и обмен студентами с Боннским, Геттингенским, а также с Израильскими университетами. Крепнут побратимские связи с университетом Чапел Хилл (Северная Каролина, США).

В августовском номере сообщается о присуждении ректору СГУ Д.И. Трубецкову звания «Заслуженный деятель науки РФ», о награждении директора НБ СГУ В.А. Артисевич орденом Почета. Там же читатели извещаются о начале стро-

ительства десятого корпуса на территории университетского городка. Первый камень в основание будущего административного строения СГУ заложил губернатор Д.Ф. Аяцков.

Примечательны также заголовки следующих публикаций в 1997 году: «Через Интернет в Будущее» (А. Сытник), «Светское образование и религия» (А. Роках) «Интеллигенция и религия» (тот же автор).

Январский выпуск 1998 года открывает заметка «Быть газете в Интернете». Там же Вера Александровна Артисевич выражает недовольство проектом 10-го корпуса. Для соблюдения симметрии и гармонии в университетском городке она выражает пожелание, чтобы новый административный корпус был таким же, как здание научной библиотеки СГУ.

В 3-м выпуске приводится отчет ректора СГУ за 1997 год. Сообщается, что 10-й корпус был заложен 25 июня 1997 года. Приводятся показатели, характеризующие многостороннюю деятельность университета. Помимо общепринятых разделов (учебный процесс, подготовка научных кадров, хозяйственная деятельность и т.п.), сообщается о выдающемся спортивном достижении: университетский работник, заведующий кафедрой физкультуры Чинилов В.Н. стал чемпионом мира по борьбе среди ветеранов. Упоминается также клуб культуры, который под руководством Марка Пинхасика «прекрасно работал, особенно на церемонии закладки 10-го корпуса».

В 1998 году звания «Соросовский профессор» и «Соросовский доцент» удостоились 17 работников СГУ. Университетский центр Интернет начал свою работу.

В 7-м выпуске «Саратовского университета» за 1998 год помещено замечательное стихотворение Льва Тобольского, иллюстрирующее состояние российского телевидения, что отражало обстановку в стране в памятные «смутные» 1990-е. Стихотворение называется «Вести». Приводим его полностью.

Под вечер семья собирается вместе.
Семья отдыхает от дел и забот.
Подходит черед новостей и известий,
Вестей и прогнозов подходит черед.

Что нового в мире, в стране и в столице?
Чем днем уходящим Россия жила?
Мелькают сюжеты, события, лица.
Привычная хроника – наши дела.

Разборка. Пикет. Забастовка и митинг,
Солдат убежал, расстреляв караул.
Украл. Обманул. Растрянжирил. Похитил.
Убил. Прихватил. За кордон драпанул.

Пожар. Наводнение. Драка в ГосДуме.
На шахте завал. На границе захват.
Банкир арестован. Под следствием. Умер.
А если не умер – в заложники взят.

Правительство – в шею. В отставку премьера.
Устал от реформ реформатор-премьер.
Уводят в тюрьму уголовника мэра,
А там уже есть губернатор и мэр.

Подводная лодка. Наркотик. Гранаты.
Подложен заряд бизнесмену под дверь.
Наверное, так и давали когда-то
Вечерние сводки военных потерь.

Не новости – триллер! Вестерн, а не вести.
Не хроника дня, а крутой боевик.
Семья не расходится, каждый на месте
И как к амбразуре к экрану приник.

Закончилось время вестей и пророчеств.
Устала страна, засыпает страна.
Гуд лак, россияне, спокойной вам ночи!
О'кей, россияне, приятного сна!

Ныне слегка подзабытая действительность показывает, в какой обстановке жилось и работалось 23-му ректору нашего университета, ибо все эти безобразия весьма четко проецировались и на жизнь главного саратовского вуза, что вносило в его

деятельность немалые трудности. И основной заслугой руководства университета в этот тяжелейший период можно считать регулярную выплату зарплаты и стипендий.

Наступал 1999-й – год 90-летия Саратовского университета. К этому времени атмосфера в обществе несколько смягчилась, свидетельство чему – лирические стихи в новогоднем выпуске многотиражки – так, как это бывало в прежние стабильные и благополучные времена.

Падают снежинки в темени ночной,
Все следы-тропинки скрыты пеленой.
Черный-темно-синий, серый, голубой,
Серебром покрытый мир передо мной.

Даша Алексеева

Я смотрю на фотографии тех лет.
Я с портфелем, мой любимый детский сад,
Я с собакою, которой больше нет.
Если б можно было все вернуть назад!

Светлана Долганова

А вот стихи из разряда обличительных:

Вельможи рвут друг другу глотки
За право больше воровать.
Ларьки полны дешевой водки
И всем на Родину плевать.

Дмитрий Ляляев

Заполнен эфир дебилизмом, уродством и ложью,
И в русское гетто врываются страх и тоска.
Бандитский режим показал свою морду бульдожью,
Отбросив повадки задорного друга-щенка.

Дмитрий Ляляев

Можно говорить и об этих строках как о характерной примете изменившейся обстановки. Согласимся, что еще лет 10 назад за подобные вирши можно было угодить в кэзэбэшный застеноч.

Из отчета ректора «О работе СГУ в 1998 году».

В неофициальном рейтинге вузов по итогам чемпионата мира по программированию 1996–1997 годов. СГУ занял 10-е место из 67 команд.

СГУ получил в свое распоряжение корпус бывшего вертолетного училища (старые казармы), где разместились исторический и филологический факультеты.

В 1998 году принято на дневное отделение на 100 человек меньше, чем в предыдущий год. Всего в СГУ 14134 студента. Самый большой факультет – филологический (1169), далее мехмат (1155), далее исторический (916). Открыта новая специальность – «Журналистика». Завершается лицензирование специальности «Вычислительные машины, комплексы и системы».

Проведены КВН среди факультетов. Проведена спартакиада.

В аспирантуре обучаются 511 человек, в докторантуре – 50.

В плане финансирования: долг за 1998 год в ближайшем будущем возвращен не будет.

В спортивно-оздоровительном лагере проведены три смены по 10 дней.

В издательстве СГУ выпущено 126 наименований книг общим тиражом 46.2 тысяч.

В НБ СГУ деньги на зарплату поступают нерегулярно. Библиотека вынуждена оказывать платные услуги физическим и юридическим лицам. Обслужено более 50 тысяч читателей (80% – члены коллектива СГУ).

В февральском выпуске 1999 года многотиражки помещен некролог на смерть Веры Александровны Артисевич (скончалась 6 февраля на 92-м году жизни). Публикуется телеграмма соболезнования зам. министра культуры РФ В.В. Егорычева. Строки из некролога:

«Легенда – понятие многозначное. Но из всех известных значений мы остановимся на одном: человек-легенда, другими словами, человек выдающихся способностей и возможностей, вызывающий у современников и потомков искреннее удивление и восхищение. Всякий, кому выпало счастье общения с Верой Александровной, хорошо знает, что в этом высоком словосочетании БИБЛИОТЕЧНАЯ ЛЕГЕНДА нет и капли преувеличения».

Отметим, что новым директором научной библиотеки вскоре была назначена Ирина Владимировна Лебедева, верный помощник и единомышленник Веры Александровны, последние 15 лет до этого работавшая ее заместителем, выпускница филологического факультета СГУ 1972 года.

В 1998 году получили почетные звания и награды многие работники СГУ. И.В. Порох – заслуженный деятель науки РФ. В.И. Березин – заслуженный работник высшего образования. И.Д. Парфенов – грамота губернатора. Д.А. Усанов – заслуженный деятель науки РФ. М.А. Пинхасик – заслуженный работник культуры РФ. Г.И. Лотоцкий – почетная грамота Министерства общего и профессионального образования. А всего было отмечено 23 человека.

С присоединением к СГУ пединститута с его физкультурным факультетом в составе спортсменов вуза появились знаменитости, о чем сообщается в апрельском выпуске «Саратовского университета»: «СГУ гордится звездами из числа студентов-педагогов. Это Люба Абросимова – мастер спорта международного класса по прыжкам в воду, неоднократная чемпионка России, Европы и Мира. Это также Андрей Брыгин – рекордсмен России по прыжкам в длину. 18 февраля 1999 года он стал чемпионом страны с результатом 8 метров 16 сантиметров». Вполне гроссмейстерский уровень!

В 1999 году в СГУ был объявлен прием на дневное отделение на следующие факультеты: биологический, географический, геологический, гуманитарных и социальных наук, исторический, высший колледж прикладных наук, механико-математический, физический и химический. Плюс вечерняя, заочная форма обучения и подготовительный факультет. Как водится, деканы факультетов поместили в майском выпуске рекламные статьи о своих учебных подразделениях. А в сентябре в газете были опубликованы данные об итогах набора–99. Всего было подано 2797 заявлений на 1250 мест. Конкурс составил 2.23 человека на место. Тем не менее на дневное отделение было зачислено 1750 человек (бюджетники – 1325, полные платные – 303, частично платные – 128). В пединститут на 330 мест подано заявлений 1217, зачислено 359 человек.

Наибольший конкурс был по специальности «Социально-культурный сервис и туризм» – 4.1; «Информационные системы» – 3.64; «Психология» – 3.61; Химический факультет – 2.24 (прогресс – годом раньше было 1.30).

Под рубрикой «Навстречу юбилею» опубликована интересная статья архитектора и краеведа Б.Н. Донецкого. В ней приводятся новые данные об авторах проекта университетского комплекса. Как показали новейшие исследования, проекты 1-го, 2-го и 3-го корпусов готовил на базе разработок К.Л. Мюфке архитектор министерства народного просвещения Лев Петрович Шишко. А Карл Людвигович является автором проекта четвертого корпуса, а также трех корпусов в клиническом городке СГМУ. Но Мюфке разрабатывал декоративно-художественное оформление всех корпусов и является все же основным автором университетского комплекса. Однако

справедливость требует увековечивания имени и его коллеги Л.П. Шишко, но пока это не сделано.

28 сентября общеуниверситетская конференция проголосовала за продление полномочий Д.И. Трубецкого на посту ректора. «Примите наши поздравления, Дмитрий Иванович!». Хотя в адрес ректора и было высказано пожелание «стать больше ректором-администратором, чем педагогом».

Октябрьский выпуск «Саратовского университета» впервые целиком выполнен в цвете. Это можно расценить как показатель улучшающегося экономического состояния вуза. Он назван в передовой статье лидером среди вузов Поволжья. Указывается, что в составе СГУ действуют 10 факультетов, педагогический институт, Балашовский филиал его, колледж радиозлектроники, политехникум. В объединенной структуре – около 20000 студентов. Приводится краткая летопись СГУ, а деканы по традиции хвалят в отдельных заметках свои подразделения.

А в ноябрьском выпуске опубликованы поздравления Саратовскому университету по случаю его 90-летия от лица Президента РФ В.В. Путина, губернатора Д.Ф. Аяцкова и ректора МГУ В.А. Садовниченко. Напечатан также приказ Министра образования РФ о награждении почетными званиями и грамотами большой группы университетских работников, в том числе директора НБ СГУ Лебедевой И.В., многих профессоров, доцентов, служащих, всего более 50 человек. Отметим также, что в канун юбилея вуза вышло в свет первое издание книги «Ректоры Саратовского университета» В.Н. Семенова, сразу привлекшее внимание университетской общественности.

Отчет о торжественном открытии 10-го корпуса и заседании представителей университетской общественности в большом актовом зале, посвященном 90-летию СГУ, приводится в январском выпуске «Саратовского университета» 2000 года. Редактор многотиражки Л. Проворнова называет новый корпус «шедевром современной архитектуры». Особая благодарность в заметке выражается проектировщикам, строителям и, конечно же, губернатору области Д.Ф. Аяцкову, «без поддержки которого невозможно было бы осуществить эту безумную (по нынешним временам) затею». Ректор Д.И. Трубецков вручил Дмитрию Федоровичу в честь окончания строительства памятную медаль. Особенно понравился руководству СГУ и гостям зал для заседаний ученого совета – «шикарные кресла», удобная планировка, естественное освещение через прозрачный потолок-купол. В корпусе также был открыт Музей истории СГУ, расположились просторные кабинеты для ректора и проректоров и, самое главное, вместительный, современно оборудованный актовый зал на 700 человек, о котором общественность вуза давно мечтала.

За большой личный вклад в строительство и обустройство нового административно-учебного корпуса губернатор наградил Почетным знаком «За любовь к родной земле» архитекторов Ю.К. Бурмистрова и А.И. Танюхина, генерального директора ЗАО «Сартехстрой» А.А. Березовского, проректора СГУ И.А. Казаринова и других.

После официальной части, вместившей большой доклад об истории СГУ, многочисленных поздравлений от различных организаций и лиц, состоялся праздничный концерт, подготовленный клубом культуры СГУ, вел который счастливый директор клуба Марк Пинхасик, расставшийся, наконец-то, с тесным и мрачным помещением в седьмом корпусе.

В 2000 году в университетской многотиражке осуществлена серия публикаций доцента исторического факультета Е.Н. Ардабацкого в новой рубрике «Заветы русской старины». В довольно пространных заметках автор рассказывает о религиозных православных праздниках, широко отмечаемых испокон веков в России – «Пасхальные традиции», «Троицын день», «Бабье лето», «Покров – первое зазимье» и другие. Наконец-то, историки повернулись лицом к вечно востребованным темам, отставив в сторону замусоленные партийно-политические. Забегая вперед, скажем, что в следующем году эта традиция продолжилась в виде таких же пространных публикаций «Крещение – Великое водосвятие» и «Широкая масленица»

Вот еще заголовки некоторых статей, опубликованных в «Саратовском университете» в 2000 году.

- «Новые специальности в СГУ – факультет нелинейных процессов».
- «С праздником, дорогие ветераны! Великой Победе 55 лет!».
- «Плодотворна ли религия для ученого?» – полемические заметки А.Г. Рокаха.
- «Будем бдительны! В связи со сложившейся обстановкой на Северном Кавказе, а также участвовавшими случаями террористических актов в ряде регионов России, штаб по ГО и ЧС СГУ обращается к сотрудникам и студентам СГУ с просьбой о принятии мер личной и общественной безопасности».
- «Возрождение «Известий». Приказ № 412 от 24.11.2000 о продолжении издания «Известий» под названием «Известия Саратовского государственного университета. Новая серия». Главный редактор – Д.И. Трубецков, ответственный секретарь А.В. Иванов, члены редколлегии А.И. Аврус, Л.Ю. Коссович, В.С. Мирзаханов, И.Р. Плеве, И.В. Лебедева, Г.И. Худяков, Г.В. Шляхтин и другие, всего 21 человек. Редколлегия считает целесообразным сохранить по возможности особенности содержания, структуры и оформления первоначальных «Известий», издаваемых Императорским Николаевским университетом в 1910–1917 гг.».
- «Особенности студенческого питания. Почему-то студенческое кафе в 10 корпусе все меньше становится похожим на место общественного питания, а скорее напоминает библиотеку, а на одном столике даже играют в карты. Это нереально за 30 минут выстоять в очереди, купить что нужно, а потом бегать в поисках стульев и свободного места».
- «Это невероятно, но очевидно. К нам приехал Сергей Петрович Капица, профессор ИФП РАН, знаменитый телеведущий».
- «Тринадцатый факультет появился летом в университете – социологический. Пока он состоит из трех кафедр – теории и истории социологии, прикладной социологии, социологии массовых коммуникаций».
- «В новый век СГУ вступает, выбрав самых лучших. Мисс СГУ – Катя Крутова. Мистер СГУ – Иван Кравцов».

На первой странице январского выпуска «Саратовского университета» 2001 года опубликован новый текст «Гимна России» (музыка А. Александрова, слова С. Михалкова). И обещание губернатора Д.Ф. Аяцкова дать премию первому, кто выучит новый гимн и исполнит его на главной площади города.

В этом же выпуске сообщается о возрождении шахмат в СГУ (на основе новых информационных технологий). В декабре 2000 года в центре Интернет СГУ состоялся Интернет-турнир по блицу. Газета поздравляет шахматистов, занявших первые и призовые места.

«Стипендия стала больше» – с 1 января она возросла до 200 рублей. За особые успехи студенты могут получать специальные стипендии: Президента России – 400, Правительства РФ – 300, Правительства Саратовской области – 400, Ученого совета СГУ – 400 рублей.

На проходившем в начале февраля студенческом чемпионате России по фехтованию среди 17 вузов в неофициальном командном зачете СГУ занял третье место, уступив лишь Российской Академии спорта и Московскому институту физкультуры.

«Ах, вернисаж! Ах, вернисаж!» – на выставке картин преподавателей и студентов СГУ. Комментарий: настоящее высшее образование должно сопровождаться искусством – поэзией, музыкой, живописью. В этом – момент истины и просветления. Наиболее интересными признаны картины В.А. Твердохлебова, И.Н. Сокулиной, Т.Е. Вадивасовой, Е.Н. Ардабацкого, И.Д. Молоденковой (это профессора и доценты), а также студенток Елены Медведевой и Марины Мариной.

В майском выпуске газеты СГУ объявляет прием заявлений на обучение на 13 факультетах: биологическом, географическом, геологическом, гуманитарных и социальных наук, историческом, факультете компьютерных наук и информационных технологий (КНИТ), механико-математическом, нелинейных процессов, социологическом, физическом, филологическом, философском и химическом. Вот так! Еще не так давно в вузе функционировало «всего» 8 факультетов. Выводы напрашиваются?

По традиции деканы рассказывают о своих учебных подразделениях, рисуя благие перспективы в связи с обретением именно рекламируемой специальности. Во вступительной статье ректора Д.И. Трубецкого говорится, что «СГУ всегда рад тем, кто приходит в его стены, рад, что по-прежнему звучат в коридорах и аудиториях молодые голоса, рад внимательным глазам, рад каверзным вопросам, рад тем, кто сохраняет и продолжает его славу. “Здравствуй, племя, младое, незнакомое!”».

По окончании вступительных экзаменов ответственный секретарь приемной комиссии сообщает, что в 2001 году средний конкурс в СГУ составил 3.5 человека на место. Это рекорд последних лет! Всего на дневное отделение было принято более 1300 человек на бюджетные места и до 700 человек на коммерческие. Самый высокий конкурс был на специальность «Социально-культурный сервис и туризм» – 5.6 человека на место. Отмечается нововведение в условиях приема – экзамены в форме тестов.

Студенческий клуб СГУ объявил об открытии 40-го юбилейного сезона. На пресс-конференции М.А. Пинхасика с участием ректора Д.И. Трубецкого, проректора Л.М. Страховой, председателя худсовета В.А. Митрохина обрисовались новые возможности студенческой самодеятельности в связи с приобретением современной концертной аппаратуры и получением прекрасного актового зала, оборудованного по последнему слову техники.

Ноябрьский выпуск «Саратовского университета» вышел в цветном исполнении, напечатанный на мелованной бумаге, и был целиком посвящен юбилею студенческого клуба. Поздравления клубу от лица ректора и ветеранов университетской самодеятельности, портрет Марка Пинхасика, краткая летопись клуба, составленная

А.И. Аврусом. Продолжение клубной темы в еще одном, следующем выпуске газеты. «Клубу – миллион, его директору – бриллианты». Сообщается о щедром подарке губернатора Д.Ф. Аяцкова: большая сумма выделена на приобретение музыкальной аппаратуры, а Марк Абрамович награжден Почетным знаком губернатора, украшенном 12 бриллиантами – за верность университету и искусству, за воспитание молодежи.

В декабрьском выпуске публикуется Указ Президента В.В. Путина о награждении декана филологического факультета, профессора В.В. Прозорова Орденом Почета – за многолетнюю плодотворную работу и большой вклад в укрепление дружбы и сотрудничества между народами.

2002 год открылся пространным поздравлением директору клуба СГУ Марку Абрамовичу Пинхасику в связи с его 60-летием. В юбилейной заметке приводятся слова ректора Д.И. Трубецкого: «Весь бывший советский народ и все прогрессивное человечество отмечают великую дату – юбилей Марка Пинхасика». Задним числом присоединяясь к осанне в честь юбиляра, хочется почему-то разбавить поздравительный елей небольшой ложечкой дегтя: больно уж заматерел к этому времени легендарный начальник университетской самодеятельности, превратившись из простого и улыбочивого подвижника в самоуверенного и беспардонного предпринимателя, хоть и увенчанного грамотами и наградами.

В мартовском выпуске «Саратовского университета» сообщается о беспрецедентном успехе команды фехтовальщиков СГУ, удачно выступившей в Москве на открытом первенстве вузов России. В соревнованиях на шпагах среди 70 участников (из них 30 мастеров спорта) чемпионом стал студент 2-го курса физического факультета Игорь Турчин. А в командном зачете сборная СГУ заняла 2-е место.

Спортивную тему продолжил опубликованный здесь же календарь соревнований: в 2002 году в СГУ предполагалось проведение соревнований по самбо, армрестлингу (это новация!), шахматам, гиревому спорту (раньше фигурировала штанга!), настольному теннису, волейболу, минифутболу, легкой атлетике. Сообщалось, что соревнования по лыжам уже состоялись. Что ж, в целом неплохо. Признаки возрождения налицо!

«Триумф университетских программистов: Илья Эльтерман, Андрей Лазарев, Михаил Мирзаянов завоевали звание чемпионов Европы по программированию». Руководитель команды – доцент А.Г. Федорова. В соревнованиях приняло участие 64 команды.

«Переживание возвышенного» – встреча студентов с доцентом пединститута СГУ, поэтессой Светланой Кековой.

Как все на свете, Господь нас с тобой спасет.
Потому что дети летят с голубых высот.
Потому что гладят землю, целуют ее горбы
И о наши беды себе разбивают лбы?

С. Кекова

«Поэтический дар Светланы Кековой могуч и оригинален и профессиональные знания укрепляют его».

Студенческая весна–2002. Взгляд из зрительного зала. Проведенный конкурс художественной самодеятельности отмечен успехами химиков, физиков, филологов, мехмата и историков.

«Нам жизнь подарили герои войны!» – митинг у обелиска погибших студентов и преподавателей СГУ на фронтах Великой Отечественной.

Итоги спортивных соревнований по 10 видам спорта: первое место – мехмат, второе – географы (вот уж неожиданность!), третье – химики. Приводятся результаты. В беге на стометровке победил историк М. Никитин со временем 12.0 сек. Уже кое-что по нынешним временам.

«Смысл жизни личности в эпоху посткнижной культуры». Размышления о массовом наступлении компьютерных технологий.

Сентябрьский выпуск «Саратовского университета» явился перед читателями в принципиально новом оформлении и объеме – на 8 полосах! Главный редактор Е. Музалевский в передовице говорит об увеличившейся структуре старейшего саратовского вуза, в котором, включая его филиалы и институты, теперь работают 25 факультетов и 4 колледжа.

«Мюфке бы понравилось!». Обсуждаем проект 11 корпуса СГУ (архитектор Ю. Бурмистров).

«На вопросы студентов отвечал ректор». 11 ноября состоялась встреча Д.И. Трубецкова со студентами вуза. Более всего было уделено внимания материальным проблемам: размер стипендии, размер платы на коммерческом отделении и т.д.

Вот еще некоторые заголовки статей в «Саратовском университете» 2002 года: «Электронная периодика в научной библиотеке СГУ», «Колыбель президентов» (о Гарвардском университете), «Концепция информатизации СГУ», «Ученые СГУ не подписали декларации о намерениях по достройке и вводу второй очереди Балаковской АЭС, ибо гарантии безопасности ее нет».

В декабрьском выпуске стихотворное поздравление с наступающим Новым годом – годом Козы или Овцы.

Желаю исполненья всех желаний,
Начала новых дел, их окончаний!
Желаю счастья, мудрости творца –
Какая разница – Коза или Овца!
Какая разница – Коза или Овца?
Поднимем чарку доброго винца!

И новый 2003 год наступил. И стал он в чем-то поворотным.

22 апреля Ученый Совет СГУ большинством голосов (47 против 26, при одном недействительном бюллетене) принял решение о пролонгации полномочий ректора в связи с исполнением Д.И. Трубецкову в июне 2003 года 65 лет. Это решение вскоре было оспорено группой членов Ученого Совета, проголосовавших открыто за это решение, но потом усмотревших в процедуре проведения заседания и подсчета голосов некоторые (явно надуманные) нарушения. Соответствующее протестное письмо было направлено Министру образования РФ В.М. Филиппову. В разгоревшийся конфликт вмешалась областная администрация во главе с губернатором Д.Ф. Аяцковым, принявшим сторону «оппозиции», как они себя называли. Завязалась длительная и напряженная переписка между Саратовом и Москвой. Странники действующего ректора 14 мая направили в адрес Министра свое письмо в защиту принятого решения, в котором обосновывали его правомочность, а также подчеркивали целесообраз-

ность продления полномочий Д.И. Трубецкова. Под письмом подписались 50 ведущих сотрудников университета – академиков, член-корроров, профессоров, доцентов и администраторов (подписей оппозиции было около 30). В защиту Д.И. Трубецкова в тот же адрес направили аргументированные послания ректор МГУ им. Ломоносова, президент Российского Союза ректоров, академик В.А. Садовничий, а также Председатель Совета ректоров Приволжского Федерального округа, ректор Нижегородского государственного университета им. Лобачевского профессор А.Ф. Хохлов, полномочный представитель Президента в Приволжском Федеральном округе С.В. Кириенко. И наконец, еще одно письмо аналогичного содержания было направлено в тот же адрес от имени интеллигенции города – сотрудников Саратовской государственной консерватории, Саратовского академического театра оперы и балета, академического театра драмы, государственного художественного музея им. Радищева, Саратовской областной филармонии имени А.Г. Шнитке и других местных культурных учреждений. Казалось бы? При такой мощной и всесторонней поддержке? Увы!

Противная сторона под знаменем областной администрации, в свою очередь, развязала грязную кампанию дискредитации ректора Трубецкова в прикормленной саратовской прессе, используя далеко не парламентские выражения (похожие на площадную брань) – их было просто стыдно читать. Предпринимались и закулисные ходы по линии обширных губернаторских связей в столице с целью давления на Министерство образования.

Сейчас трудно сказать, какой фактор был определяющим при принятии негативного решения относительно дальнейшего пребывания на посту ректора Д.И. Трубецкова. Но оно было принято – вместе с указанием провести выборы нового ректора Саратовского университета в срок до 1 ноября 2003 года.

Дмитрий Иванович руководил Саратовским университетом в течение 9 лет. По продолжительности своего пребывания на ректорской должности он уступил только двум своим предшественникам из 23 – профессорам А.М. Богомолу (17 лет) и Р.В. Мерцлину (15 лет). Отметим и тот факт, что в «дотрубецковскую» советскую эпоху ректоров не выбирали, а назначали и никакие инициативы снизу об изменении статуса назначенного руководителя вуза категорически не приветствовались.

Все предшественники Д.И. Трубецкова на посту ректора в обозримые послевоенные времена были яркими личностями, выдающимися учеными, талантливыми педагогами и умелыми администраторами. Но все-таки у каждого из них была своя, наиболее сильная сторона, природная предрасположенность к тому или иному виду многогранной деятельности координатора сложной университетской структуры. В этом плане о Д.И. Трубецкове можно сказать, что он совместил в себе все наиболее значимые для руководителя дарования предыдущих ректоров. В нем соединились научная мощь В.Н. Шевчика, педагогическая мудрость Р.В. Мерцлина, административный талант А.М. Богомолова и даже человеческое обаяние П.В. Голубкова. И все это – при его абсолютной демократичности, удивительной скромности и простоте, всегдашней вежливости и приветливости.

Дмитрий Иванович – крупный ученый с международным авторитетом. Им опубликовано более двадцати монографий и свыше трехсот статей в солидных научных изданиях в нашей стране и за рубежом. Его фундаментальная работа (напи-

санная в соавторстве с М.И. Рабиновичем) «Введение в теорию колебаний и волн» объемом в 560 страниц выдержала в 2000 году уже третье издание и, как указывалось, переведена на английский язык.

Д.И. Трубецков является основателем и долговременным научным руководителем самостоятельной научной школы нелинейной динамики. Она четыре раза в результате конкурсов признавалась ведущей научной школой России. Прямым следствием этого стала организация в СГУ факультета нелинейных процессов (единственного в стране). Обычному человеку трудно понять суть проблем, находящихся в поле зрения школы. В самых общих словах можно констатировать, что ее учеными рассматриваются «вопросы теории нестационарных и нелинейных явлений в электронных потоках, взаимодействующих с электромагнитными волнами». За последние пятнадцать лет направление исследований значительно расширилось и ныне состоит «в теоретическом и экспериментальном исследовании нелинейных и нестационарных явлений и закономерностей сложной динамики, включая динамический хаос и образование структур в различных активных автоколебательных распределенных и сосредоточенных системах, в том числе радиофизической природы, в моделях экологии, биологии, медицины и социальных наук». Нелинейная динамика это новое междисциплинарное научное направление, цель которого – выявление общих методов и общих закономерностей в самых разных областях естествознания, а также социологии и даже лингвистике и в различных специальных дисциплинах. Фактически, речь идет о современной картине мира и о месте человека в ней на основе современной науки о колебаниях и волнах.

Научная школа Трубецкова только за последние пять лет удостоилась многочисленных престижных грантов, перечислить которые здесь нет никакой возможности, и получила широкое международное признание. Среди воспитанников школы, сформировавшихся в ученых под руководством Д.И. Трубецкова, к настоящему времени 34 кандидата и 10 докторов наук.

Другое детище Дмитрия Ивановича – это научно-образовательный институт «Открытые системы», в состав которого входят, помимо ФНП, Лицей прикладных наук (для учеников 8–11 классов, отбираемых на конкурсной основе), редакционно-издательский отдел, издающий журнал «Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика», отделение «Физика открытых нелинейных систем» в НИИ естествознания СГУ. Создание научно-образовательного института позволило открыть новую специальность «Физика открытых нелинейных систем».

Важным для себя Дмитрий Иванович считает также проведение ежегодных школ-семинаров «Нелинейные дни в Саратове для молодых», в которых участвуют с докладами старшеклассники, студенты, аспиранты, молодые научные работники, которым в процессе проведения семинаров также читают лекции видные ученые России.

Как ректор Д.И. Трубецков на протяжении всех девяти отпущенных ему лет не без труда, но и не без успеха вел в нужном направлении университетский корабль в бурной стихии постперестроечных политических, социально-экономических и общественных преобразований, проявляя мудрость, терпение и мужество. Многие из полезных свершений периода 1994–2003 года указаны в ранее представленном обзор-

ре университетских событий, а все их упомянуть, естественно, невозможно. Университет не только выжил, но и достиг немалых успехов в научной, образовательной и хозяйственной деятельности. Еще раз выделим самое главное.

1. Переход от безденежья 1994–1995 годов к финансовой стабилизации и увеличению заработной платы. Увеличение бюджета университета.

2. Если в начале 1990-х компьютер был экзотикой, то уже в 1995 году СГУ был подключен к системе Интернет, а в 1998 году был открыт одноименный университетский центр. В 2003 году у студентов был уже свободный доступ к компьютерам, и речь шла лишь о постоянной модернизации компьютерных классов.

3. Открыты новые факультеты: социальных и гуманитарных наук, философский, социологический, компьютерных наук и информационных технологий, нелинейных процессов. Открыты новые специальности: геоэкология, социально-культурный сервис и туризм, политология, философия, культурология, национальная экономика, прикладная информатика в экономике, журналистика, юриспруденция, вычислительные машины, комплексы и системы, регионоведение, экология, прикладная информатика в юриспруденции, компьютерная безопасность, физика нелинейных систем, география с немецким языком, управление качеством и другие.

4. Создана разветвленная система международных связей в ранее закрытом городе. Выделим здесь создание научно-образовательного центра «Нелинейная динамика и биофизика» в рамках российско-американской программы «Высшее образование и фундаментальные исследования» и Международного института общественных наук. Только шесть университетов в России выиграли гранты для создания таких структур.

Широкое признание Д.И. Трубецков получил и на ниве общественной и общественно-научной деятельности – он стал Почетным гражданином Саратова, заместителем Председателя совета ректоров в Приволжском федеральном округе, Председателем совета ректоров Саратовской области, был избран в Правление ректоров РФ, удостоен приема в члены Международной академии высшей школы, стал действительным членом Российской Академии естественных наук. О том, что он является также членом-корреспондентом Российской Академии наук с 1991 года, мы сообщали выше. В 2000 году ему была присуждена премия Президента РФ в области образования, в 2002 году он был объявлен лучшим руководителем года. Четырежды был удостоен звания «Соросовский профессор».

Неоднократно ему пришлось общаться с «великими мира сего» – учеными-Нобелевскими лауреатами, с тремя министрами образования РФ, с премьер-министром М.М. Касьяновым, с двумя послами США в Российской Федерации, с видными американскими деятелями образования, с губернаторами штатов, почти со всеми послами стран ЕС, послами ЮАР и других африканских стран, с двумя консулами Германии в Саратове, с заместителем министра образования Ирана, с послом Китайской Народной Республики в России, с ведущими специалистами по электронике из разных стран мира. Он встречался и полезно беседовал с видными политическими деятелями и деятелями культуры и науки: Е.М. Примаковым, В.И. Матвиенко, Р. Абдулатиповым, М.С. Горбачевым, А.И. Солженицыным, Б. Немцовым, И. Хакамадой, Ахматом Кадыровым, Борисом Ельциным, С.П. Капицей, С. Шойгу, Генри Резником и другими.

Приведем также цитату из книги «Саратовцы – академики и члены-корреспонденты Российской Академии наук» (Коллектив авторов, Саратов: «Сателлит», 2005).

«Д.И. Трубецков – прекрасный лектор, умеющий просто и доходчиво, сохраняя высокий научный уровень, донести до слушателей содержание самых сложных проблем. Он обладает способностью сделать понятными важнейшие проблемы современного естествознания для гуманитария. Несколько книг написаны Дмитрием Ивановичем для этой цели. Сам он – большой любитель и знаток поэзии, хорошо рисует и эти свои качества передал сыну». Добавим к этому и неплохое поэтическое дарование Дмитрия Ивановича, регулярно к различным юбилейным датам и обязательно к годовым праздникам выдающего теплые лирические стихи, исполненные искрометного юмора.

В послеректорский период Д.И. Трубецков целиком сосредоточился на научной и педагогической деятельности. Ныне он заведует кафедрой электроники, колебаний и волн Саратовского университета. Читает лекции, ведет семинары. По совместительству также является главным научным сотрудником Саратовского филиала Института радиоэлектроники РАН. В 2004–2007 годах им уже написано и издано 6 солидных по объему книг («Введение в синергетику», т. 1, 224 стр., т. 2, 240 стр.; «Лекции по СВЧ электронике» (совместно с А. Храмовым), т. 1, 496 стр., т. 2, 648 стр.; «Путь в синергетику» (в соавторстве), 304 стр. и т.д.). Остается только удивляться, как это у Дмитрия Ивановича хватает на все время. Но в любом случае хочется ему пожелать сохранения своей высокой работоспособности (а это и значит отличной физической формы), новых научных открытий и свершений, успехов на педагогической стезе, счастья и гармонии в семейной жизни.

А семья у Дмитрия Ивановича небольшая, но дружная. Супруга – Софья Васильевна, в девичестве Васильева, физик по образованию, дочь известного саратовского ученого, доктора геолого-минералогических наук, бывшего заведующего и профессора кафедры минералогии и петрографии СГУ. Сын – Алексей Дмитриевич, доктор медицинских наук, профессор, зам. директора по науке института сельской гигиены, член Союза художников России. Есть в семье также представители третьего поколения Трубецковых.

Очерк о двадцать третьем ректоре СГУ получился, очевидно, самым объемным из всех, размещенных в настоящей статье. Этот факт есть отражение бурных событий в стране и в Саратовском университете, пришедшихся на время ректорства Дмитрия Ивановича, а также неординарности и неисчерпаемости его личности, всесторонне осветить которую возможно лишь в отдельной многостраничной монографии. В заключение мы позволим себе привести отрывок из одного документа, очень коротко и точно обрисовывающего профессиональную и человеческую суть героя настоящего очерка.

«Д.И. Трубецков – первый ректор, избранный всем коллективом СГУ в ходе демократической выборной процедуры. Никогда до того на ежегодных докладах Большому Ученому совету (таковых попросту не было) не собиралось такой многочисленной аудитории, которая могла бы услышать все об университетских делах – научных, учебных, хозяйственных. И каждый раз после такого отчета ученый совет утверждал его единогласно.

Д.И. Трубецков – первый ректор академического ранга за последние пятьдесят лет, глава официально признанной научной школы, четырежды Соросовский профессор, крупный ученый, известный далеко за пределами университета, за пределами города и области своей неутомимой просветительской деятельностью, блестящими лекциями по проблемам науки, образования, отечественной культуры, выступлениями по телевидению и радио, частыми встречами со школьниками и студентами.

Д.И. Трубецков более 50 лет отдал родному университету, служа ему верой и правдой, приумножая его научную славу, а на посту ректора – расширяя его строительством новых корпусов и возвращая прежний блеск старым университетским зданиям. Он строитель университета в прямом и переносном смысле – создатель Большого университета с педагогическими институтами, колледжами, лицеями, с новыми факультетами, открытие которых вызвано требованиями времени. И при этом сохранено главное – дух классического университета».

Лучше, пожалуй, не скажешь!

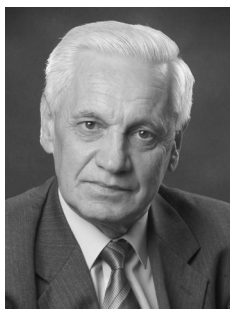
Поступила в редакцию 3.04.2012

THREE RECTORS – ONE CHAIR

V. N. Semenov

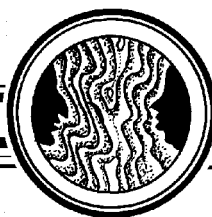
The paper is devoted to the three talented physicists, who headed the chair of electronics (later – the chair of electronics, oscillations and waves) in different years and had the position of the rector of Saratov State University. One chair – three heads – three rectors. Organizing, pedagogical and scientific activity of the protagonists of the paper is given on the historic background of the life of the University.

Keywords: The rectors of Saratov State University, history of the University chair of electronics.



Семенов Виктор Николаевич – родился в Саратове (1937). Окончил 19-ю среднюю школу (1954). Окончил геологический факультет СГУ (1960). Работал в Волгограде инженером геофизической партии, затем в тресте «Саратовнефтегеофизика», с 1986 года в НВ НИИГТ редактором регионального научно-технического геолого-геофизического журнала «Недра Поволжья и Прикаспия». С 1974 года активно занимается краеведением. Автор более 20 книг по истории Саратова и Саратовской области. Председатель Саратовского историко-краеведческого общества.

410600 Саратов, ул. Московская, 70
Нижне-Волжский научно-исследовательский
институт геологии и геофизики
E-mail: bard@nvniigg.san.ru



ЗАМЕТКИ ИЗ ПАМЯТИ О СТАНОВЛЕНИИ КАФЕДРЫ

В. С. Андрушкевич

Начало 1950-х. В Саратовском государственном университете организуется кафедра электроники (первоначальное название кафедры электроники, колебаний и волн). О первых годах работы кафедры, о «темах», о знаменитом «подвале», а главное, о людях – коллегах, ученых и друзьях – пишет выпускник кафедры электроники СГУ 1954 года.

Ключевые слова: Кафедра электроники, сотрудники, научный семинар, эксперименты.

Физический факультет я заканчивал в 1954 году. Нужно было выбирать тему дипломной работы. Из всех представленных тем я остановился на самой загадочной и самой непонятной. Звучала она так: «Исследование сверхтонких структур водородоподобных атомов радиоспектроскопическими методами». Руководителем дипломной работы был Альберт Михайлович Алесковский. Я представления не имел, что кроме названия темы абсолютно ничего для ее выполнения не было. И предстояло заново собрать установку и повторить уникальный эксперимент, выполненный американцами. Этот эксперимент явился основным толчком для рождения квантовой электродинамики. Если бы я это знал заранее, то никогда не занялся бы этой темой. Но делать было нечего. Я стал читать статьи по квантовой электродинамике. Кроме того, занялся изготовлением счетчика фотонов, излучаемых разрядом в водороде. Председателем комиссии по защите дипломных работ был В.Н. Шевчик. Я пытался было обойтись обзором достижений квантовой электродинамики, но Владимир Николаевич спросил, что я сделал сам. Я ответил, что сделал счетчик фотонов. На этом моя защита закончилась. А.М. Алесковский предложил перед сборкой установки основательно заняться теорией газового разряда. Это продолжалось около полугода. К этому времени в НИИМФе СГУ стали заключать хозяйственные темы.

А.М. Алесковский предложил тему по разработке монометра с измерением давления от 10^{-2} до 10^{+2} мм рт. ст. Нужно отметить, что к нам в комнату частенько и надолго заглядывал Борис Михайлович Заморозков. Это был добрейшей души человек, который очень надеялся на успехи Алесковского. Для усиления технической стороны был привлечен Леонид Иванович Шмытов. Альберт Михайлович Алесковский предложил, по существу, классическую замкнутую схему, когда при изменении давления в мембранном датчике изменялась емкость, что отражалось на частоте задающего генератора. И в замкнутой цепи с отрицательной обратной связью это

должно было отразиться и на выходной цепи. Мы все с нетерпением ждали запуска установки. И все были удивлены, что вместо медленного перемещения стрелки на выходе с изменением давления возникло низкочастотное самовозбуждение со страшным грохотом стальных фланцев. Альберт Михайлович, Борис Михайлович и все были очень сильно удивлены. Замерив частоту самовозбуждения установки, Альберт Михайлович изменил частоту колебания. Установка стала возбуждаться на слегка измененной частоте, но с таким же грохотом. Мы привлекли еще двух человек, чтобы разобраться в ситуации. Устраивали семинары по теории устойчивости таких систем.

Положительных сдвигов не было, а конец темы приближался. Однажды ко мне подошел Л.И. Шмытов и попросил, чтобы ему дали возможность одному поработать с установкой в субботу и воскресенье. В понедельник мы пришли и замерили: Шмытов демонстрировал полную работоспособность установки (и даже в большем диапазоне изменения давления, чем по техническому заданию).

Подробным рассказом я хотел подчеркнуть, что в научных исследованиях играют роль не только знания, эрудированность и уверенность в том, что «все задачи по плечу», но в большой степени интуиция, которую и проявил Л.И. Шмытов (он закончил 2 курса МФТИ), предположив, что замкнутая система неустойчива и будет генерировать на разных частотах.

После окончания темы по измерению давления Алесковский неожиданно предложил мне поехать в МГУ изучать установки по газовому разряду и ядерной физике, чтобы на основе этого организовать новую лабораторию. К этому времени относится реорганизация кафедры общей физики, руководимой профессором П.В. Голубковым. Организуется кафедра электроники, которую должен был возглавить Б.М. Заморозков. По моим догадкам, основу программы новой лаборатории должны были составить привезенные мной материалы. В МГУ я, как каторжанин, проделал все учебные лабораторные работы, обрабатывал результаты экспериментов и сопоставлял их с теоретическими данными. Всего накопилось две толстых общих тетради. Когда же я принес эти тетради и показал их Алесковскому, то он сказал: «И это все?» Я не представляю, что можно было сделать больше за месячную командировку!

Мы продолжили заниматься теорией газового разряда. Поскольку установка предполагалась импульсной, то Алесковский и предложил мне и занялся сам установками и теорией импульсных схем. Меня все время смущало, что А.М. Алесковский, не закончив одной исследовательской схемы, переключался на другую. Это был эрудированный, талантливый исследователь, но будучи уже в зрелом возрасте, даже не защитил кандидатской диссертации. Однажды он подходит ко мне и говорит: «Все, чем мы занимались – не то, а нужно заняться бионикой, точнее биофизикой». Я сказал ему, что так мотаться не могу, и ухожу из его лаборатории. В это время в НИИМФе СГУ формировалась тема «Заградитель» по созданию генераторов миллиметрового диапазона и я включился в группу, которая занималась этой темой. С А.М. Алесковским я проработал 5 лет. За это время я познакомился с рядом областей теоретической и экспериментальной физики, но основательно не освоил ни одну из них. Тем не менее я благодарен Алесковскому за то, что разнообразие вопросов, с которыми я соприкасался, позволило в дальнейшем быстро вникать в сущность поставленных задач. Несмотря на мой уход, А.М. Алесковский продолжал относиться ко мне с дружеским вниманием. Он был трудоголиком и скончался за письменным столом, принимая экзамены.

В 1958 году Б.М. Заморозков возглавил теоретический отдел предприятия, именуемого ныне «Алмаз».

Заведующим кафедрой электроники стал В.Н. Шевчик. Он начал формировать состав кафедры. В частности, он предложил мне остаться на кафедре электроники, на которую был принят еще Б.М. Заморозковым. Я не буду перечислять состав кафедры. Он отражен в книге «Кафедра электроники, колебаний и волн. Прошлое, настоящее, будущее» (Саратов: Изд-во ГосУНЦ Колледж, 2002). Состав кафедры часто менялся. Из первоначального состава старейшим сотрудником (из живых) остался ваш покорный слуга.

Мне хотелось остановиться на характерных особенностях нашей кафедры. Во-первых, это научные семинары кафедры, которые пользовались популярностью не только в Саратове, но буквально по всей стране.

В те времена на кафедре практически все курили, дым «стоял столбом». В.Н. Шевчик никак не возражал, а только открывал окно, около которого сидел. Но главное – это атмосфера проведения семинара. Докладчика постоянно могли прерывать и возвращаться к высказанному им положению. Редко можно было увидеть докладчика с непокрытым потом лицом. Атмосфера была «дотошливой», но дружелюбной. Сама комната семинара была забита до отказа. Широкие двери входа в комнату, а также двери в другие комнаты были открыты. Считалось, кто прошел «чистилище» семинара, мог рассчитывать на дальнейший успех в работе. На семинар регулярно приходили не только ведущие сотрудники отделов предприятий, но и подавляющее число заведующих других кафедр СГУ. Важно подчеркнуть, что авторитетов на семинаре кафедры не было, кроме, пожалуй, единственного авторитета по имени «Истина».

В.Н. Шевчик неуклонно поддерживал демократический дух работы кафедры. Этот дух семинаров поддерживался и на выездных школах-семинарах в «Волжских даях».

Еще хотелось бы подчеркнуть и описать атмосферу работы в подвале 5-го корпуса при выполнении правительственных тем. С внешней стороны казалось, что люди в подвале все немного... чокнулись: приходили рано утром, наспех перекусывали, а уходили ночью за несколько минут до 24 часов, так как в 24 все калитки университетского городка запирались. Часть же людей перелезали через ограду университета и после 24 часов, но встречались с новыми трудностями: трамваи уже не ходили.

Я хочу описать случай, происшедший со мной. Ребята в нашей группе заметили, что я регулярно в университет хожу с большим желтым портфелем. Они взяли большой силикатный кирпич, завернули его, обвязали ленточками и положили в мой портфель. Я не обратил внимание на этот сверток и две недели таскал его, пока ребята не раскрыли секрет... сами.

Однажды я задержался на работе и, когда выбрался из ограды, то увидел, что транспорт уже не ходит. Я пошел пешком (это от университета до 4 дачной). Было очень душно, и очень хотелось пить. Я вспомнил, что на 3 дачной (в буфете дворца Россия) до поздней ночи торговали лимонадом. Я пошел туда и попросил бутылку лимонада. Открыл лимонад, налил в стакан и жадно хлебнул. И тут я понял, что пью не лимонад, а подслащенную водку. Я бросился к продавщице и потребовал объяснить, чем она поит покупателей. Она схватила за голову и стала извиняться, что произошла ошибка и перепутали ящики. Я, еще не осознав, что произошло, пошел к дому. Когда же утром придя на работу я рассказал о происшедшем в группе, то на меня все накинудись как на чокнутого. Ведь представился легальный случай хоть немного щипнуть жуликов, а я не только допил стакан, но и вернул еще початую бутылку. ... А мог бы спокойно загрузить за копейки целый портфель и отдать содержимое в распоряжение группы.

Можно было привести еще массу примеров курьезных ситуаций. Иногда эти ситуации оказывались тревожными. Помню, войдя в 5 корпус, я услышал голоса, которые констатировали, что в корпусе дым, но никто не может указать источник дыма. И тут открывается дверь, входит В.Н. Артемьев и спокойно заявляет, что знает, откуда сочится дым. Оказывается, ему нужно было нагреть какую-то деталь и, чтобы она долго оставалась горячей после отключения термопечи, он завернул деталь в голенище валенка. Уходя с работы, он выключил термопечь, а валенок продолжал тлеть и дымить всю ночь.

Можно было бы привести еще множество курьезных случаев, но главным было, конечно, не курьезы, а стиль работы групп.

Я работал в группе по созданию мощного миллиметрового генератора обратной волны, именуемого «клинотроном». Нужно было создать источник питания с током 0.4 А и регулируемым напряжением от 1 до 7 кВ. Эту задачу поручили мне и инженеру Л. Парфенову. Мы построили два варианта: в первом нужно было регулировать мощную проходную лампу. Второй вариант с автоматической стабилизацией был изготовлен в двух экземплярах: один для нас, другой для НИИ «Орион» (Киев) с напряжением на выходе 20 кВ.

Каждую неделю в нашей группе проводилась планерка. Руководил ею П.В. Голубков. Поскольку П.В. Голубков был директором НИИМФа СГУ и заведующим кафедрой общей физики, то в помощь ему для руководства группой был утвержден доцент Ш.Е. Цимринг. Тесно с нашей группой работала группа под руководством М.А. Григорьева. Среди мастеров нашей группы выделялся Л.И. Шмытов. Вскоре после начала работ в группе в нее вошел Ю.Г. Гамаюнов. Я касаюсь лишь одной группы, которая именовалась «Заградитель». В ней кроме отмеченных участвовали В.А. Давыдов, Л.И. Шмытов, В.Д. Ахтырко, А.И. Тореев. Главное – был общий рабочий дух. Люди с радостью шли на работу, а с работы их было трудно выпроводить. Это касалось не только нашей группы, но и других. Сейчас – грустная атмосфера. Вечером окна потушены...

Саратовский госуниверситет

Поступила в редакцию

29.05.2012

MEMORY NOTES ABOUT THE CHAIR FORMATION

V. S. Andrushkevich

The early fifties. The Chair of electronics is making at Saratov State University. The graduating student of 1954 writes this paper about the first years of the Chair formation, its scientific subjects, famous «basement» and, above all, about people – colleagues, scientists, friends.

Keywords: Chair of electronics, collaborators, scientific seminar, experiments.



Андрушкевич Владимир Степанович – родился в Саратове (1929), окончил Саратовский государственный университет (1954). После окончания университета работал в СГУ. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата (1964) и доктора физико-математических наук (1987) в области вакуумной и плазменной электроники. Опубликовал более 100 работ по указанным направлениям.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского



ВЛИЯНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ НА НЕЛИНЕЙНЫЕ ДИССИПАТИВНЫЕ СИЛЫ

И. И. Вульфсон

Исследуется влияние медленных движений на эффективные значения параметров диссипативных сил в уравнениях быстрых движений колебательной системы. Ранее было показано, что диссипативные характеристики, полученные экспериментально при гармонических колебаниях, могут существенно изменяться при полигармоническом возбуждении. В данной статье эта проблема рассматривается более подробно применительно к определению резонансных амплитуд и пороговых условий параметрических и субгармонических резонансов.

Ключевые слова: Медленные и быстрые движения, колебания, нелинейные диссипативные силы, динамическая устойчивость, параметрический резонанс, субгармонический резонанс.

1. Предварительные замечания

При исследовании нелинейных колебаний широко применяются методы, использующие разделение движений на быстрые и медленные [1–5]. С помощью этих методов удается описать, а иногда и обнаружить ряд существенных динамических эффектов. В частности, взаимовлияние быстрых и медленных движений во многих случаях определяет реальный уровень диссипации в колебательной системе.

Роль диссипативных факторов при формировании колебательных режимов чрезвычайно велика. В частности, от уровня диссипации зависят амплитуда резонансных колебаний, интенсивность затухания свободных колебаний, условия динамической устойчивости при параметрическом возбуждении, возникновение субгармонических режимов, автоколебаний и др. Между тем, учет именно этих сил нередко оказывается наиболее уязвимым местом в динамических исследованиях и инженерных расчетах колебательных систем. Последнее, в первую очередь, связано с тем, что большое число диссипативных факторов, а также сложность и многообразие энергетических потерь при колебаниях существенно затрудняет корректное математическое описание диссипативных сил [6–10]. При этом мы обычно располагаем ограниченной исходной информацией, заимствованной из экспериментальных материалов в форме некоторых интегральных диссипативных характеристик, таких как коэффициент

рассеяния ψ или логарифмический декремент ϑ , которые получены при гармонических колебаниях некоторых эталонных моделей. Однако, «настраивая» для определения этих параметров реальную механическую систему на гармонический режим, мы по существу экспериментальным методом осуществляем гармоническую линеаризацию диссипативных сил. Поэтому полученная таким образом информация о диссипативных свойствах системы является далеко не полной и отражает их лишь в той мере, в какой гармонически линеаризованная диссипативная сила соответствует действительному сопротивлению. Естественно, что при многочастотных колебаниях это соответствие нарушается, причем при определенных условиях – существенным образом.

Аналитическое исследование проблемы учета нелинейных диссипативных сил при многочастотном возмущении основано на предложенной И.И. Блехманом идее разделения движений на быстрые и медленные [4]. При реализации этой идеи возможно несколько подходов. Один подход, разработанный И.И. Блехманом применительно к задачам вибрационной реологии, позволяет определять так называемые вибрационные силы, отражающие влияние высокочастотных составляющих возбуждения на медленные процессы.

Для систем с одной степенью свободы возникающая при колебаниях сила сопротивления независимо от ее природы может быть описана следующим образом:

$$R = - |R(q, \dot{q})| \operatorname{sgn} \dot{q}, \quad (1)$$

где q – обобщенная координата.

В одних случаях модуль силы не зависит от обобщенной скорости (позиционные силы трения), в других – модуль силы не зависит от обобщенной координаты («вязкое» трение); в частном случае модуль силы может сохранять постоянное значение («сухое» или кулоново трение). При $R = -f(q)\dot{q}$ диссипативную силу называют позиционно-вязкой [4].

При другом подходе движение системы рассматривается как совокупность двух движений, а именно, – существенно зависящих от диссипации (например, резонансных) и практически не зависящих от диссипации (например, нерезонансных). Этот подход, базирующийся на методах гармонической или статистической линеаризации, был использован применительно к системам с сухим трением [11] и с позиционными гистерезисными силами сопротивления [12,13].

По характеру влияния диссипативных сил колебательные режимы можно разделить на две группы. К первой группе отнесем режимы, амплитудный уровень которых зависит от диссипации, такие как свободные колебания и вынужденные резонансные колебания; ко второй – режимы, существование которых возможно только при преодолении некоторого энергетического барьера, определяемого диссипацией. Такой эффект, в частности, наблюдается при возбуждении параметрического и субгармонического резонансов, а также в автоколебаниях при жестком возбуждении. При этом «чужие» колебания могут быть как высокочастотными (быстрое движение), так и низкочастотными (медленное движение). Во всех перечисленных случаях возникающие режимы, по существу, можно рассматривать как «свободные» колебания, поддерживаемые внешним источником энергии, компенсирующим работу диссипативных сил.

В статье получили дальнейшее развитие исследования, изложенные в работах [12–17], которые посвящены коррекции диссипативных характеристик при учете сопутствующих медленных или быстрых движений. При этом применительно к рассматриваемой проблеме особое внимание обращено на малоизученное влияние медленных движений на быстрые.

Заметим, что в статье не ставится задача обзора многочисленных библиографических источников, освещающих различные аспекты проблемы рассеяния энергии в элементах механических систем.

2. Эквивалентная линеаризация диссипативных сил при гармонических режимах

Рассмотрим дифференциальное уравнение

$$m\ddot{q} + |R(q, \dot{q})| \operatorname{sgn} \dot{q} + cq = Q(t), \quad (2)$$

где m – масса, c – коэффициент жесткости, $Q(t)$ – вынуждающая сила.

Нелинейность дифференциального уравнения (2) связана только с диссипативной силой (1). Для большинства реальных инженерных задач эта сила обычно играет существенную роль только в качестве диссипативного фактора и пренебрежимо мало влияет на частоту свободных колебаний. Если $Q(t) = Q_0 \sin \omega t$, то при установившихся вынужденных колебаниях $q = A \sin(\omega t - \gamma)$ абсолютное значение рассеянной за один цикл энергия определяется как

$$\Delta E_- = \int_0^\tau |R\dot{q}| dt = A \int_0^{2\pi} |R(A \sin \varphi, A\omega \cos \varphi) \cos \varphi| d\varphi. \quad (3)$$

Здесь $\varphi = \omega t - \gamma$, $\tau = 2\pi/\omega$. (Здесь и ниже изменение полной энергии за период колебаний представлено как $\Delta E = \Delta E_+ - \Delta E_-$, где индексы «+» и «-» отвечают подведенной и рассеянной энергии.)

С другой стороны, для «линейной» силы эквивалентного сопротивления имеем $R_b = -b\dot{q}$, при этом $\Delta E_- = \pi b \omega A^2$. Тогда при учете (3) баланс рассеянной энергии имеет место при $b = \Delta E_- / (\pi \omega A^2) = \psi c / (2\pi \omega)$. Этот результат, естественно, одновременно совпадает с коэффициентом, полученным методом гармонической линеаризации. При кулоновом трении $R = -P \operatorname{sgn} \dot{q}$ аналогичным способом получаем $\Delta E_- = 4PA$, $\psi = 8P/(cA)$, $b = 4P/(\pi A \omega)$. Ниже ограничимся анализом частотонезависимого сопротивления, при котором ψ не зависит от частоты. Именно этот случай наиболее характерен для конструкционного демпфирования механических систем.

Можно показать, что при некоторых допущениях, используя аналогичный прием применительно к системам со многими степенями свободы, диссипативные силы могут быть представлены следующим образом: $\mathbf{R} = -\mathbf{b}\dot{\mathbf{q}}$, где $\mathbf{b} = (\boldsymbol{\alpha}^T)^{-1} \mathbf{b}^* \boldsymbol{\alpha}^{-1}$, $\boldsymbol{\alpha}$ – квадратная матрица коэффициентов форм, в которой каждый столбец отвечает фиксированной собственной частоте, $\mathbf{b}^* = \operatorname{diag}\{b_1^*, \dots, b_H^*\}$, $b_r^* = \psi_r c_r^* / (2\pi \omega)$, c_r^* – элементы диагональной матрицы $\mathbf{c}^* = (\boldsymbol{\alpha}^T)^{-1} \mathbf{c} \boldsymbol{\alpha}^{-1}$ [17]. По существу, к этому результату сводится и метод Е.С. Сорокина [8]. Следует, однако, иметь в виду, что изложенный выше подход базируется на предположении о гармоническом характере

колебаний и отсутствии диссипативных связей между различными формами колебаний, когда не происходит обусловленная диссипацией перекачка энергии из одной формы в другую.

3. Коэффициенты диссипации при бигармонических колебаниях. Резонансные режимы

Принимая в дифференциальном уравнении (2) $Q(t) = F_1 \sin \Omega t + F_2 \sin \omega t$,

$$\ddot{q} + \Lambda(q, \dot{q}) + k^2 q = f_1 \sin \Omega t + f_2 \sin \omega t, \quad (4)$$

где $\Lambda = R/m$, $k^2 = c/m$, $f_i = F_i/m$, ($i = 1, 2$).

Пусть $\Omega = k$, а $\omega \ll k$. В соответствии с приемом разделения «быстрых» и «медленных» движений имеем $q = q_k + q_\omega$. Далее вместо (4) запишем

$$\begin{aligned} \ddot{q}_k + \Lambda_k(q, \dot{q}) + k^2 q_k &= f_1 \sin \Omega t, \\ \ddot{q}_\omega + k^2 q_\omega &= f_2 \sin \omega t, \quad q_0 = F_0/c. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь Λ_k – отнесенная к единичной массе диссипативная сила, приведенная к частоте k .

Первое уравнение, которое определим как модифицированное, связано со вторым только посредством нелинейной диссипативной силы. Во втором уравнении диссипативная составляющая опущена, так как при достаточном удалении от резонансных режимов ее влияние на амплитуду вынужденных колебаний пренебрежимо мало. Решение уравнений (5) имеет вид $q_k = A \sin(\Omega t - \gamma_1)$, $q_\omega \approx a \sin(\omega t - \gamma_2)$, где

$$A = \frac{\pi f_1}{\vartheta k^2}, \quad a \approx \frac{f_2}{|k^2 - \omega^2|}. \quad (6)$$

Здесь ϑ – эффективное значение логарифмического декремента, подлежащее определению.

Диссипативной составляющей Λ_k соответствует рассеянная за период $2\pi/k$ энергия ΔE_-^k , равная

$$\Delta E_-^k = \int_0^{4A} R dq_k = mA \int_0^{2\pi} |\Lambda(q_\omega + A \sin \varphi)| \cos \varphi \operatorname{sgn}(\dot{q}_\omega + Ak \cos \varphi) d\varphi. \quad (7)$$

При этом

$$\vartheta = -0.5 \ln(1 - \psi) = -0.5 \ln\left(1 - \frac{2\Delta E_-^k}{cA^2}\right) \approx \frac{\Delta E_-^k}{cA^2}. \quad (8)$$

Далее, используя (7), (8) и принимая $|\Lambda| = [\Lambda_{\max}(q_\omega)][\lambda(A \sin \varphi)]$, получаем

$$\vartheta = \frac{\Lambda_{\max}(q_\omega)}{k^2 A} \int_0^{2\pi} \lambda(A \sin \varphi) \cos \varphi \operatorname{sgn}(\dot{q}_\omega + Ak \cos \varphi) d\varphi, \quad (9)$$

где $\lambda = |\Lambda/\Lambda_{\max}|$. В выражении (9) за знак интеграла вынесены медленно меняющиеся составляющие. Значение Λ_{\max} определяется следующим образом:

$\Lambda_{\max} = 0.25k^2 A \vartheta_0/h$, где $h = S/(4\Lambda_{\max}A)$ – коэффициент заполнения петли гистерезиса, S – площадь петли.

В частном случае при $\dot{q}_\omega \ll Ak$ согласно (6)–(9) имеем $\vartheta \approx \vartheta_0$, где ϑ_0 – экспериментально определенное значение логарифмического декремента при гармоническом режиме. Используя это предельное значение, окончательно получаем

$$\vartheta = \vartheta_0 \Phi, \quad (10)$$

где

$$\Phi = \frac{\int_0^{2\pi} \lambda(A \sin \varphi) \cos \varphi \operatorname{sgn}(\dot{q}_\omega + Ak \cos \varphi) d\varphi}{\int_0^{2\pi} \lambda(A \sin \varphi) \cos \varphi d\varphi}. \quad (11)$$

Функция Φ показывает степень уменьшения логарифмического декремента при бигармонических колебаниях по сравнению с гармоническими.

В таблице полученные результаты конкретизированы для ряда наиболее распространенных форм петель гистерезиса – прямоугольной, эллиптической и треугольной (рессорная характеристика). Дадим некоторые пояснения приведенных в таблице зависимостей на примере анализа прямоугольной петли гистерезиса. В этом случае в формуле (11) следует принять $h = 1$, $\lambda = 1$. Тогда

$$\begin{aligned} \Phi &= 0.25 \int_0^{2\pi} \cos \varphi \operatorname{sgn}(a\omega \cos \theta + Ak \cos \varphi) d\varphi = \\ &= \begin{cases} \sqrt{1 - z^{-2} \cos^2 \theta} & \text{для } z \geq |\cos \theta|, \\ 0 & \text{для } z \leq |\cos \theta|, \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

где $z = (\dot{q}_k)_{\max}/(\dot{q}_\omega)_{\max}$, $\theta = \omega t - \gamma_2$.

Таблица

Диссипативные характеристики бигармонических колебаний при $\omega \ll k$

z	$z \leq 1$	$z \geq 1$
Прямоугольная форма петли гистерезиса $h = 1, \lambda = 1$	$\Phi_k = \frac{E(z) - (1 - z^2)K(z)}{z \arcsin z}$ $\Phi_\omega = \Phi_k (1 - \frac{2}{\pi} \arccos z)$	$\Phi_\omega = \frac{2}{\pi} E\left(\frac{1}{z}\right)$
Эллиптическая форма петли гистерезиса $h = \pi/4, \lambda = \cos \varphi $	$\Phi_k = \frac{1}{\arcsin z} \left\{ \arcsin z - \frac{2}{\pi} G_1(z) + \frac{1}{\pi z} \left[1 + \frac{z^2 - 1}{2z} \ln \frac{1+z}{1-z} \right] \right\}$, где $G_1(z) = z \int_0^{\pi/2} \frac{u \cos u}{\sqrt{1 - z^2 \sin^2 u}} du$ $\Phi_\omega = \Phi_k (1 - \frac{2}{\pi} \arccos z)$	$\Phi_k = 1 - \frac{1}{2z^2} + \frac{\sqrt{1 - z^2}}{2z(\pi/2 - \arccos z)}$ $\Phi_\omega = \Phi_k (1 - \frac{2}{\pi} \arccos z)$
Треугольная форма петли гистерезиса $h = 0.5, \lambda = \sin \varphi $	$\Phi_k = 1 - \frac{1}{2z^2} + \frac{\sqrt{1 - z^2}}{2z(\pi/2 - \arccos z)}$ $\Phi_\omega = \Phi_k (1 - \frac{2}{\pi} \arccos z)$	$\Phi_\omega = 1 - \frac{1}{2z^2}$

Примечание: $K(z)$, $E(z)$ – полные эллиптические интегралы первого и второго рода.

При $z < 1$, как это следует из зависимостей (10) и (12), на некотором отрезке времени приведенное к частоте $\Omega = k$ значение логарифмического декремента ϑ обращается в нуль. На этих участках колебания с собственной частотой не влияют на знак суммарной скорости $\dot{q} = \dot{q}_k + \dot{q}_\omega$; при этом за период $2\pi/k$ не происходит замыкание контура петли гистерезиса. На остальных участках приведенное значение логарифмического декремента оказывается функцией z и θ . Произведем усреднение функции Φ на этих участках

$$\begin{aligned} \Phi(z) = \Phi_k(z) &= \frac{1}{\arcsin z} \int_{\arccos z}^{\pi/2} \sqrt{1 - \frac{\cos^2 \theta}{z^2}} d\theta = \\ &= \frac{1}{z \arcsin z} [E(z) - (1 - z^2)K(z)]. \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь $K(z)$ и $E(z)$ – полные эллиптические интегралы первого и второго рода при модуле z .

Можно показать, что $\Phi_k(1) = 2/\pi$, $\Phi_k(0) = \pi/4$. Поскольку на некоторых участках $\vartheta = 0$, амплитуда A в установившихся режимах будет медленно пульсировать около некоторого среднего значения, возрастая при $\vartheta = 0$ и убывая при $\vartheta \neq 0$. Представляет интерес усредненное значение ϑ_ω за период $2\pi/\omega$, отвечающее установившемуся значению резонансной амплитуды A ,

$$\vartheta_\omega = \vartheta_0 \Phi_\omega, \quad (14)$$

где $\Phi_\omega = \Phi_k(1 - (2/\pi) \arccos z)$, индексом ω отмечено усреднение на периоде $2\pi/\omega$.

При $z \gg 1$ исчезает зона, в которой $\Phi = 0$ и $\vartheta = 0$. В этом случае

$$\Phi = \Phi_\omega = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - \frac{\cos^2 \theta}{z^2}} = \frac{2}{\pi} E\left(\frac{1}{z}\right).$$

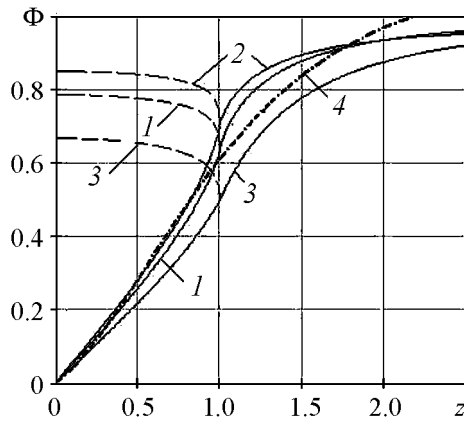


Рис. 1. Графики $\Phi(z)$ при типовых петлях гистерезиса: 1 – прямоугольная, 2 – эллиптическая, 3 – треугольная (рессорная характеристика); штриховая линия – Φ_k , сплошная линия – Φ_ω ; 4 – график, построенный по аппроксимирующей зависимости

Здесь $E(1/z)$ – полный эллиптический интеграл второго рода при модуле $1/z$.

При $z \rightarrow \infty$ имеем $\Phi \rightarrow 1$, следовательно, $\vartheta_\omega \rightarrow \vartheta_0$.

Среди наиболее важных реализаций прямоугольной петли гистерезиса следует выделить случаи $\vartheta_0 = \text{const}$ (петля Корчинского) [10] и сухое трение. В последнем случае

$$P = P_0 \Phi(z). \quad (15)$$

Здесь P_0 – сила сухого трения, P – эффективное значение этой силы при би-гармонических колебаниях.

На рис. 1 приведены графики Φ_k (штриховая линия) и Φ_ω (сплошная линия) для прямоугольной, эллиптической

и треугольной петлей гистерезиса (соответственно кривые 1, 2, 3). Кривая 4 построена по аппроксимирующей зависимости $\Phi_\omega = z(0.4 + 0.75z)/(1.2 + 0.68z^2)$, позволяющей производить оценки при отсутствии информации о форме петли гистерезиса. Можно показать, что функция Φ_ω при малых z близка к линейной. В частности, для прямоугольной петли гистерезиса $\Phi_\omega \approx 0.5z$, для эллиптической – $\Phi_\omega \approx 16z/(3\pi^2)$, для треугольной – $\Phi_\omega \approx 3z/(2\pi)$. В зоне $\Phi_\omega \ll 1$ эффективные значения диссипативных коэффициентов существенно уменьшаются по сравнению с исходными экспериментальными результатами, полученными при гармоническом режиме.

Снижение диссипации связано с сокращением эффективной площади петли гистерезиса на основной частоте Ω из-за колебаний с частотой ω . Аналогичный эффект наблюдался и при учете влияния быстрых движений на медленные. На рис. 2 это иллюстрируется графиками $R(q)$, полученными при компьютерном моделировании для эллиптической и треугольной петлей гистерезиса [16]. При обратном воздействии – медленных движений на быстрые – исходный контур петли не искажается, однако на каждом периоде $\tau = 2\pi/\omega$ возникают зоны, на которых, как уже отмечалось, не происходит замыкание контура; при этом $\Delta E_- = 0$.

Согласно (6), (14) резонансная амплитуда определяется из следующего уравнения:

$$A = \pi A_* / [\vartheta_0(A) \Phi_\omega(z(A)/v)], \quad (16)$$

где $A_* = f_1/k^2$ – статическая амплитуда ($\omega = 0$).

Введем в рассмотрение параметры A_0 , $\kappa_0 = A_0/A_*$, $z_0 = A_0k/(a\omega)$, отвечающие гармоническому режиму. При этом уравнение (16) приводится к виду $\xi \Phi_\omega(z) = 1$, где $\xi = A/A_0 = \Phi_\omega^{-1}$, $z = Ak/(a\omega) = \xi(z_0)$. График функции $\xi(z_0)$, устанавливающий рост резонансных амплитуд при бигармонических колебаниях по сравнению с гармоническими, приведен на рис. 3. Как показывает анализ, форма петли гистерезиса пренебрежимо мало влияет на функцию $\xi(z_0)$.

На рис. 4 приведены результаты численного моделирования резонансного режима при $\vartheta_0 = \text{const}$ для трех вариантов представления функции $\Lambda(q, \dot{q})$, пропорциональной нелинейной диссипативной силе (см. (4)).

В первом варианте (кривые 1) $\Lambda = 2\delta_0 k \dot{q}$, где $\delta_0 = \vartheta_0/(2\pi)$, что соответствует гармонической линейризации диссипативных сил без учета влияния медленного движения.

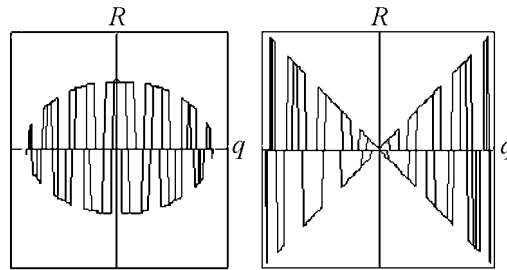


Рис. 2. Искажения петли гистерезиса при $\omega > k$

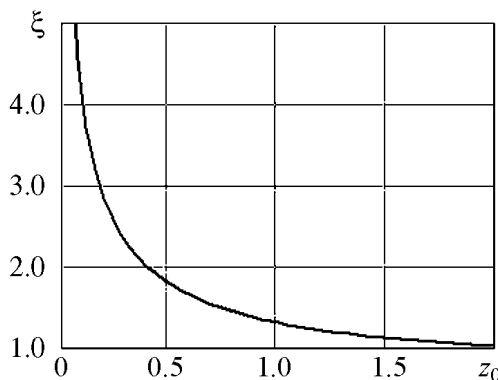


Рис. 3. График $\xi(z_0)$

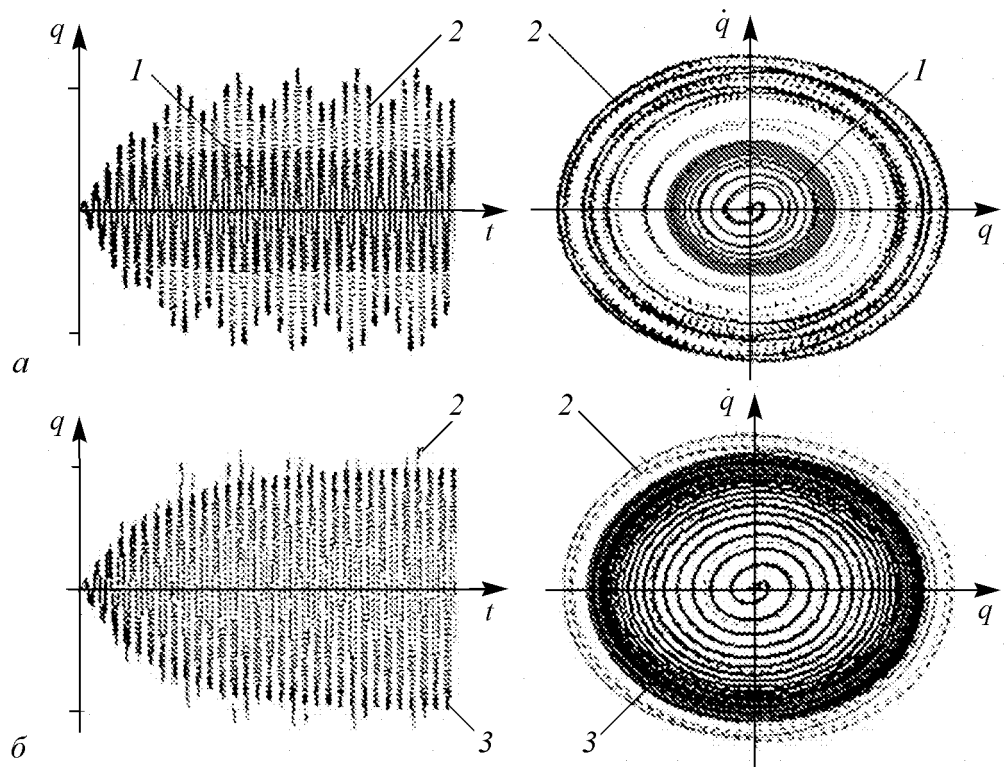


Рис. 4. К анализу влияния медленных движений на резонансную амплитуду: 1 – гармоническая линейаризация (вариант 1); 2 – нелинейное представление диссипативной силы (вариант 2); 3 – коррекция диссипативной силы при разделении быстрых и медленных движений (вариант 3)

Во втором варианте (кривые 2) учтен нелинейный характер диссипации $\Lambda = 2\delta_0 k \eta (|\dot{q}| - a\omega)$, где η – единичная функция. Сопоставление результатов численного эксперимента для этих вариантов (рис. 4, а) свидетельствует о примерно двукратном увеличении резонансной амплитуды при нелинейном представлении диссипативной силы. Следовательно, традиционный способ учета нелинейной диссипативной силы, основанный на гармонической линейаризации, в данном случае может привести к значительным ошибкам.

В третьем варианте (рис. 4, б, кривые 3) использовано модифицированное дифференциальное уравнение (см. (5)) и приведенная выше коррекция диссипативной силы $\Lambda = 2\delta_0 k \dot{q}_k / \xi(z_0)$. Хорошее совпадение кривых 2 и 3 свидетельствуют об эффективности приведенного способа определения резонансных амплитуд при учете позиционных сил сопротивления и бигармонического возбуждения.

Некоторые результаты экспериментальных исследований рассматриваемой задачи приведены в работах [15,16].

4. Влияние многочастотных колебаний на условия динамической устойчивости при главном параметрическом резонансе

Если исключить из рассмотрения влияние медленного движения, параметрические колебания системы с одной степенью свободы, как известно, описываются

линейным однородным дифференциальным уравнением

$$a\ddot{q} + b\dot{q} + c_0(1 - \varepsilon \sin \Omega t)q = 0,$$

которое перепишем так:

$$a\ddot{q} + c_0q = -b\dot{q} + \varepsilon c_0q \sin \Omega t.$$

Умножив обе части равенства на $\dot{q}dt$, получаем

$$d(T + \Pi) = -b\dot{q}^2 dt + \varepsilon c_0 q \dot{q} \sin \Omega t dt,$$

где T , Π – кинетическая и потенциальная энергии. Тогда, изменение полной энергии системы за период колебаний $\tau = 2\pi/k$ равно $\Delta E = \Delta E_+ - \Delta E_-$. Здесь

$$\Delta E_+ = \varepsilon c_0 \int_0^\tau q \dot{q} \cos \Omega t dt, \quad \Delta E_- = b \int_0^\tau \dot{q}^2 dt$$

– подведенная энергия и абсолютное значение рассеянной энергии. Примем $q \approx A \sin(kt + \alpha)$, где A – усредненное значение амплитуды на периоде τ , и $\Omega = \Omega_* = 2k$, что отвечает главному параметрическому резонансу. Тогда, после интегрирования получаем

$$\Delta E_- = 0.25\vartheta_0 c_0 A^2, \quad \Delta E_+ = 0.5\varepsilon c_0 \pi A^2 \cos 2\alpha.$$

Максимуму подведенной энергии отвечает фазовый сдвиг $\alpha = 0$. Отсюда $\Delta E = 0.5\pi c_0 \varepsilon A^2 - \vartheta_0 c_0 A^2$. При $\Delta E < 0$ колебания затухают. Таким образом, условие подавления главного параметрического резонанса имеет вид $\varepsilon < \varepsilon_* = 2\vartheta_0/\pi = 4\delta_0$. Отсюда следует, что определенный уровень диссипативных сил служит своеобразным энергетическим барьером, препятствующим параметрическому возбуждению. Отношение $\varepsilon_*/\varepsilon$ определяет запас устойчивости системы.

Далее рассмотрим дифференциальное уравнение при одновременном воздействии параметрического и силового возбуждения:

$$\ddot{q} + |\Lambda(q)| \operatorname{sgn} \dot{q} + k^2 q (1 - \varepsilon \sin \Omega t) = w \sin \omega t, \quad (17)$$

где ε , Ω – глубина пульсации и частота параметрического возбуждения.

Примем, что $\omega \ll k$, $\Omega = 2k$. Последнее условие, как уже отмечалось, отвечает зоне главного параметрического резонанса. Снова применим прием разделения быстрых и медленных движений, после чего для анализа параметрических колебаний можно воспользоваться модифицированным уравнением при изложенной выше коррекции диссипативных сил.

$$\ddot{q}_1 + 2\delta k \dot{q}_1 + k^2 q_1 (1 - \varepsilon \sin \Omega t) = 0,$$

где $\delta = \vartheta_0 \Phi(z)/(2\pi)$, $z = Ak/(a\omega)$, A и a – амплитуды параметрических и вынужденных колебаний.

Полученное выше условие подавления главного параметрического резонанса теперь имеет вид $\vartheta > 0.5\pi\varepsilon$. При учете (10) представим это условие как

$$\sigma_0 > \sigma_* = \Phi^{-1}(z), \quad (18)$$

где $\sigma_0 = 2\vartheta_0/(\pi\varepsilon)$. При нарушении условия (18) амплитуда A , а следовательно, и параметр z растут, что, в свою очередь, приводит к уменьшению σ_* . Поэтому вместо неограниченного возрастания амплитуды, свойственного параметрическому резонансу в линейной системе, условие (18) может оказаться выполненным. При этом как быстрые, так и медленные движения могут привести к устойчивому периодическому режиму

Для более наглядной иллюстрации поведения системы при совместном параметрическом и силовом возбуждении воспользуемся отображением характерных состояний системы на плоскости параметров $(\sigma_0 - z)$ (рис. 5). Для каждого из выявленных режимов приведены результаты численного моделирования. Рассмотрим два случая.

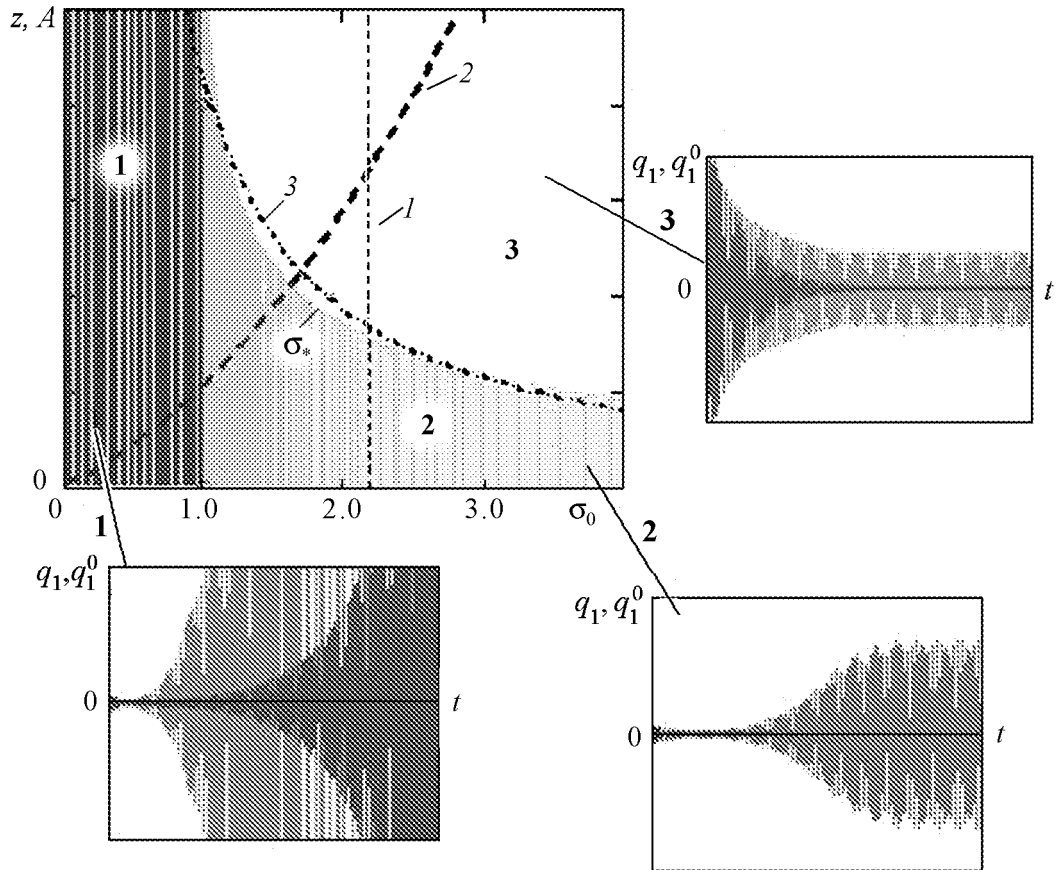


Рис. 5. К анализу условий устойчивости при параметрическом резонансе: область 1 – неустойчивые колебания; область 2 – устойчивые колебания при $w = 0$ и неустойчивые – при $w \neq 0$, $\sigma_0 < \sigma_*$; область 3 – устойчивые колебания. Кривые: 1 – $\vartheta_0 = \text{const}$; 2 – $\vartheta_0(A)$ – возрастающая функция; 3 – $\vartheta_0(A)$ – убывающая функция

Случай 1 ($w = 0$). В этом случае вынужденные колебания отсутствуют, поэтому $z = \infty$ и $\Phi = 1$, а следовательно, условие динамической устойчивости имеет вид $\sigma_0 > 1$.

Случай 2 ($w \neq 0$). Поскольку теперь $\Phi(z) < 1$, область динамической неустойчивости расширяется. Поэтому условия, обеспечивающие динамическую устойчивость при отсутствии низкочастотного возбуждения, теперь могут оказаться нарушенными.

В области **1** ($\sigma_0 < 1$) система всегда динамически неустойчива, не зависимо от воздействия дополнительного возбуждения, которое в данном случае проявляется лишь в росте интенсивности нарастания амплитуды. Это наглядно видно на совмещенном графике $q_1(t)$ и $q_1^0(t)$ (q_1^0 соответствует случаю 1, которому на графиках отвечает более темный оттенок кривых). В области **2** система устойчива при $w = 0$ и $\sigma_0 > 1$ (случай 1) и неустойчива при $w \neq 0$ и $\sigma_0 < \sigma_*$. Наконец, в области **3** ($\sigma_0 > \sigma_*$) условия динамической устойчивости соблюдаются не зависимо от дополнительного возмущения.

На плоскости параметров штриховыми линиями показаны три характерных случая изменения логарифмического декремента в зависимости от амплитуды. Если $\vartheta_0 = \text{const}$ (прямая 1), то в области **2** амплитуда растет, а в области **3** – убывает. Следовательно, амплитуда установившегося режима соответствует границе асимптотической устойчивости σ_* . На графиках $q_1(t)$ и $q_1^0(t)$ видно, что при $w \neq 0$ колебания выходят на установившийся режим, а при $w = 0$ колебания быстро затухают. Аналогичный характер поведения системы имеет место при возрастающей функции $\vartheta_0(A)$ (кривая 2).

При убывающем характере изменения $\vartheta_0(A)$ возможны два случая. Если кривая 3 дважды пересекает кривую σ_* , то верхняя точка пересечения соответствует неустойчивому режиму, а нижняя – устойчивому. При отсутствии нижней точки пересечения, как это, например, имеет место при кулоновом трении, колебания при $\sigma_0 > \sigma_*$ полностью затухают ($A \rightarrow 0$).

5. Влияние дополнительного движения на условия возникновения субгармонических резонансов

В нелинейных системах могут возникнуть субгармонические колебания, частота которых меньше частоты вынуждающей силы. Поскольку в нелинейной системе свободные колебания не являются гармоническими, вынуждающая сила способна совершать работу и в том случае, когда ее частота совпадает с частотой одной из гармоник свободных колебаний. Однако реализация подобного режима возможна лишь при условии, что работа вынуждающей силы на этой гармонике компенсирует работу диссипативных сил. Таким образом, в отличие от резонансных режимов, амплитуда которых определяется уровнем диссипации, в данном случае диссипативные силы устанавливают некоторый энергетический барьер, при преодолении которого возможно возникновение субгармонического резонанса. Аналогичную «барьерную» роль диссипация исполняет при параметрическом резонансе (см. выше), а также при «жестком» возбуждении автоколебаний. В подобных случаях изменение эффективных значений параметров диссипации за счет быстрых или медленных до-

полнительных движений может существенно сказаться не только на количественных характеристиках исследуемых режимов, но и на условиях их существования.

Рассмотрим дифференциальное уравнение, описывающее нелинейные вынужденные колебания в системе с одной степенью свободы при бигармоническом возбуждении и позиционной силе трения,

$$\ddot{q} + |R(q)| \operatorname{sgn} \dot{q} + P(q) = w_1 \sin(\Omega t + \varphi) + a\Omega_1^2 \sin \Omega_1 t. \quad (19)$$

Здесь составляющая с частотой Ω отвечает основному режиму, а кинематическое возбуждение с частотой Ω_1 – дополнительному (все силы отнесены к единице массы). Для изучения субгармонических колебаний при учете дополнительного возбуждения, не сужая общности в подходе к проблеме, примем $|R(q)| = \zeta |P(q)|$, что отвечает так называемой рессорной характеристике сил сопротивления, встречающейся во многих инженерных приложениях. Кроме того, конкретизируем функцию $P(q)$, пропорциональную нелинейной восстанавливающей силе $P(q) = k_0^2(1 + \alpha q^2)q$, где k_0 – частота свободных колебаний при $\alpha = 0$. Принятая функция $P(q)$ отвечает уравнению Дуффинга, анализу которого посвящена обширная литература. В рамках данной статьи принятая упругая характеристика лишь исполняет роль математической модели, на примере которой иллюстрируются возможности развиваемого здесь подхода к решению поставленной задачи.

После перехода к безразмерному времени $\tau = k_0 t$ представим уравнение (19) в виде

$$q'' + \zeta(1 + \alpha q^2) |q| \operatorname{sgn} q' + (1 + \alpha q^2)q = f \sin(\omega \tau + \varphi) + a\omega_1^2 \sin \omega_1 \tau, \quad (20)$$

где $f = w_1/k_0^2$, $\omega = \Omega/k_0$, $\omega_1 = \Omega_1/k_0$, $(\prime) = d/d\tau$. На основании уравнения (20) исследуем условия возбуждения субгармонического резонанса порядка $1/3$. Субгармонические колебания могут быть с достаточной точностью представлены как свободные колебания без трения [18–20]

$$q \approx A \sin \omega_0 \tau + A_3 \sin 3\omega_0 \tau, \quad (21)$$

где $\omega_0 = 1 + 0.75\alpha A^2$, $\omega_1 = 3\omega_0$, $A_3 = \alpha A^3/(32 + 21\alpha A^2)$.

Сначала рассмотрим случай $a = 0$. При этом в нашем случае энергия единичной массы (в безразмерной форме), расходуемая за период $2\pi/\omega_0$, равна $\Delta E_- = 2\zeta_0(A^2 + 0.5\alpha A^4)$, а подводенная энергия, равная работе вынуждающей силы, определяется как $\Delta E_+ = 3\pi f_1 A^3 \alpha \sin \varphi / (32 + 21A^2)$. На основании энергетического баланса $\Delta E_- = \Delta E_+$ условие существования субгармонического резонанса определяется как $|\sin \varphi| \leq 1$. Отсюда

$$\zeta_0 \leq \zeta_*(\omega_0) = 1.5\pi \alpha f A(\omega_0) [1 + 0.5\alpha A^2(\omega_0)]^{-1} [32 + 21\alpha A^2(\omega_0)]^{-1}, \quad (22)$$

где $A(\omega_0) = 2\sqrt{(\omega_0^2 - 9)/27}$. Как было показано выше, эффективный уровень диссипации при дополнительном низкочастотном возбуждении понижается согласно зависимости $\zeta = \zeta_0 \Phi(z)$.

Для иллюстрации области существования субгармонических резонансов воспользуемся плоскостью параметров $(\omega - A)$ [18]. На рис. 6 приведено семейство

кривых, полученных на основании (21), (22) при варьировании параметра z . Возможность возбуждения резонансов при фиксированном значении z на графиках ограничена двумя точками пересечения с кривой $3\omega_0$ (например, точки N и K на кривой 2). Кривая 1 отвечает случаю, когда $\Phi(z) \approx 1$, то есть дополнительное возбуждение практически не проявляется. В рассматриваемом случае кривые 1 и $3\omega_0$ не пересекаются, что свидетельствует об отсутствии субгармонических резонансов. При уменьшении параметра z зона возбуждения растет.

Верхняя граница возбуждения (точка N) в основном зависит от роста уровня диссипации, в то время как на нижней границе (точка K) резко уменьшается работа вынуждающей силы на третьей гармонике, амплитуда которой при близости к линейной системе стремится к нулю.

Далее сопоставим результаты численного моделирования для ряда режимов субгармонических колебаний при сопутствующих медленных движениях (рис. 7). На основании уравнения (20) при $f_1 = 5$, $\alpha = 0.5$, $\omega_1 = 6$ и отсутствии низкочастотного возбуждения ($a = 0$) субгармонический резонанс возбуждается при $\zeta = \zeta_0 \leq 0.069$. Это подтверждается срывом субгармонических колебаний, наблюдаемом на графиках $q(\tau)$ при нарушении данного условия (рис. 7, a , b).

Третий фрагмент (рис. 7, $в$) отличается тем, что $a \neq 0$, то есть введено дополнительное низкочастотное возмущение ($\omega_2 = 0.3$, $v = a\omega_2 = 21$). Графики, приведенные на рис. 7, a , $в$, практически совпадают, несмотря на то, что параметр ζ_0 существенно превышает критическое значение ζ_* . При этом имеет место незначительная амплитудная модуляция при том же среднем значении амплитуды $A = 2.8$.

Заключение

В статье исследовано влияние медленных движений на изменение эффективных характеристик нелинейных диссипативных сил при высокочастотных колебательных режимах. Результаты исследования использованы для определения резо-

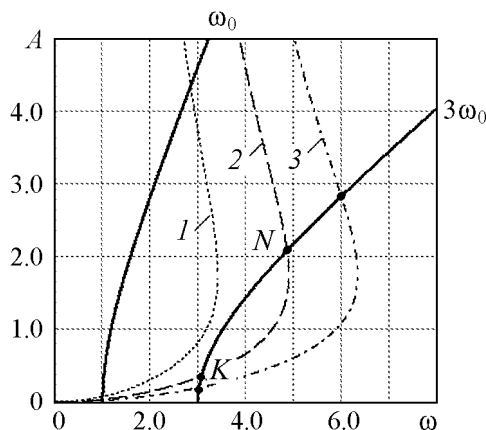


Рис. 6. К определению условий существования субгармонических колебаний при бигармонических колебаниях: 1 - $z = 3$; 2 - $z = 0.8$; 3 - $z = 0.5$

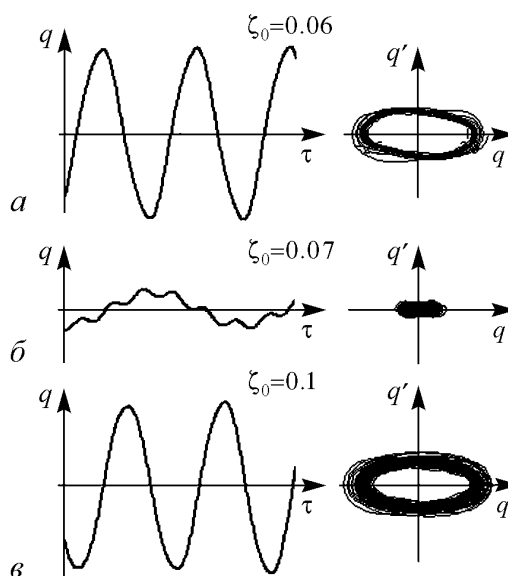


Рис. 7. Компьютерное моделирование субгармонических режимов: a , b - гармоническое возбуждение; $в$ - бигармоническое возбуждение

нансных амплитуд, а также пороговых условий возбуждения параметрических и субгармонических колебаний. Установлено, что медленные движения, равно как и быстрые, могут при определённых условиях изменить диссипативные характеристики колебательных процессов и существенно увеличить резонансные амплитуды возбуждаемых «быстрых» колебаний, а в ряде случаев – изменить условия существования колебательных режимов.

Библиографический список

1. *Van der Pol B.* Selected scientific papers. North-Holland Publ.Co., Amsterdam, 1960.
2. *Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А.* Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. М.: Наука, 1974.
3. *Волосов В.М. Моргунов Б.И.* Метод усреднения в теории нелинейных колебательных систем. М.: Изд-во МГУ, 1971.
4. *Блехман И.И.* Вибрационная механика. М.: Наука, 1994. 400 с.
5. *Ланда П.С.* Изменение эффективных параметров усреднённых движений нелинейных систем под действием шума и вибраций // Изв. вузов. ПНД. 2008. Т. 16, № 3. С. 33.
6. *Пановко Я.Г.* Внутреннее трение при колебаниях упругих систем. М.: Физматгиз, 1960. 194 с.
7. *Нашив А., Джоунс Д., Хендерсон Дж.* Демпфирование колебаний. М.: Мир, 1988. 448 с.
8. *Сорокин Е.С.* Динамический расчёт несущих конструкций. М.: Госстройиздат, 1958. 325 с.
9. *Коловский М.З.* Нелинейная теория виброзащитных систем. М.: Наука, 1966. 317 с.
10. *Кочнева Л.Ф.* Внутреннее трение в твёрдых телах при колебаниях. М.: Наука, 1979. 96 с.
11. *Коловский М.З.* О влиянии высокочастотных возмущений на резонансные колебания в нелинейной системе // Динамика и прочность машин. Труды ЛПИ. № 226. М., Л.: Машгиз, 1963. С. 7.
12. *Вульфсон И.И.* Определение приведенных значений параметров диссипации при бигармонических колебаниях // Вибротехника. 1968. Т. 9, № 4. С. 33.
13. *Вульфсон И.И.* Учет нелинейных диссипативных сил при полигармонических колебаниях элементов машин // Вибротехника. 1981. Т. 38, № 4. С. 63.
14. *Вульфсон И.И., Вульфсон М.Н.* Уточненная эквивалентная линеаризация позиционных диссипативных сил при неоднородных колебаниях // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2004. № 4. С. 20.
15. *Dresig H., Vulfson J.I.* Zur Dämpfungstheorie bei nichtharmonischer Belastung. Dämpfung und Nichtlinearität. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1993. S. 141.
16. *Blechman I., Dresig H., Vulfson I.* To the theory of nonlinear dissipation at polyharmonic excitation. Proceedings of XXXII International Summer School-Conference «Advanced Problems in Mechanics». St. Petersburg, 2004. P. 50.
17. Нелинейные задачи динамики и прочности машин / Под ред. В.Л. Вейца. Л.: ЛГУ. 1983. 336 с.

18. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. М.: Высшая школа, 1980. 408 с.
19. Вульфсон И.И., Коловский М.З. Нелинейные задачи динамики машин. Л.: Машиностроение, 1968. 284 с.
20. Вульфсон И.И. Об условиях возникновения субгармонических резонансов при неоднородном возбуждении // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2005. № 2. С. 3.

Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна Поступила в редакцию 28.05.2012
 После доработки 10.10.2012

EFFECT OF LOW-FREQUENCY VIBRATIONS ON NONLINEAR DISSIPATIVE FORCES

I. I. Vul'fson

The paper examines the impact of the slow movements to effective values of dissipative forces in the equations of fast motion of oscillatory system. It was previously shown that the dissipative characteristics obtained experimentally under harmonic oscillations can change significantly with polyharmonic excitation. In this paper the problem is considered in more detail in relation to the determination of the resonance amplitudes and threshold conditions for parametric and subharmonic resonances.

Keywords: Slow and fast motion, vibration, nonlinear dissipative forces, the dynamical stability, parametric resonance, subharmonic resonance.

Вульфсон Иосиф Исаакович – родился в Риге (1931). После окончания Ленинградского политехнического института (1956) работал на инженерных должностях в конструкторских бюро полиграфического машиностроения и станкостроения (1956–1963); с 1963 года – в ЛИТЛП, ныне – в Санкт-Петербургском государственном университете технологии и дизайна (СПб-ГУТД). Защитил диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук (1963) и доктора технических наук (1970) в области механики машин и теории колебаний. Заслуженный деятель науки Российской Федерации (2002). Автор более 500 научных публикаций, в том числе 7 монографий, изданных в России, Германии и США, 11 учебных пособий, двух справочников: «Нелинейные задачи динамики машин» (в соавторстве), «Динамические расчеты цикловых механизмов», «Колебания машин с механизмами циклового действия», «Vibroactivity of branched and ring structured mechanical drives», «Dynamik der Mechanismen» (в соавторстве), Справочник «Вибрации в технике» (в соавторстве), «Механика машин» (в соавторстве), «Колебания в машинах» и др. Член Научно-методического совета по теории механизмов и машин Министерства образования и науки РФ. Член редакционной коллегии журнала «Теория механизмов и машин».



191186 Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая морская, 18
 Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна
 E-mail: jov@sutd.ru



НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ В АВТОГЕНЕРАТОРНОЙ СИСТЕМЕ С ЧАСТОТНО-ФАЗОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

В. П. Пономаренко

Исследованы режимы динамического поведения и нелинейные явления в моделях системы с частотно-фазовым управлением в случае периодической нелинейной характеристики частотного дискриминатора. Определены условия синхронизации, выяснено, что в системе может реализоваться множество разнообразных (как периодических, так и хаотических) несинхронных режимов. Рассмотрены особенности динамики системы, обусловленные параметрами, характеризующими степень влияния цепи частотного управления.

Ключевые слова: Системы с фазовым и частотно-фазовым управлением, динамическое поведение, синхронный и несинхронные режимы, устойчивость, бифуркации, аттракторы, фазовые портреты, динамический хаос.

Введение

Автогенераторные системы с фазовым и комбинированным частотно-фазовым управлением широко используются при решении многих радиофизических и радиотехнических задач, связанных с формированием, передачей и обработкой сигналов, в том числе в спутниковых радионавигационных системах и информационно-коммуникационных технологиях. Традиционное назначение таких систем состоит в обеспечении и поддержании синхронного режима, в котором разность частот поступающих извне колебаний и колебаний управляемого генератора равна нулю. Реализация такого режима позволяет осуществлять слежение за изменяющейся частотой внешнего (эталонного) сигнала с целью повторения всех изменений его частоты и тем самым обеспечить воспроизведение внешнего сигнала. Системы с частотно-фазовым управлением, иначе называемые системами частотно-фазовой автоподстройки (ЧФАП), отличаются наличием в цепях управления двух дискриминаторов расогласований – фазового с периодической нелинейной характеристикой и частотного с непериодической нелинейной характеристикой [1]. Для теории и приложений фазовой синхронизации частотно-фазовые системы интересны, прежде всего, тем,

что позволяют частично разрешить предъявляемые противоречивые требования по обеспечению широкой области захвата в синхронный режим и помехоустойчивости [1,2]. С позиции теории колебаний и нелинейной динамики системы с фазовым и частотно-фазовым управлением представляют интерес как сложные автоколебательные системы, в которых могут возникать различные динамические состояния и нелинейные явления (синхронизация, развитие неустойчивости синхронного режима и переходы по различным сценариям к несинхронным режимам различной сложности с периодической, квазипериодической или хаотической автомодуляцией частоты колебаний управляемого генератора, бифуркации колебательных режимов, мультистабильность и др.). К изучению механизмов возбуждения и развития автомодуляционных колебаний, эффектов сложной динамики и переходов к хаотическому поведению в настоящее время проявляется большой интерес в исследованиях свойств динамического поведения таких систем. Этот интерес в значительной степени стимулирован перспективой создания на основе систем с фазовым управлением устройств генерирования сложных регулярных и хаотических сигналов для использования в системах связи [3,4].

Одной из актуальных проблем в исследованиях сложной динамики систем с фазовым и частотным управлением является изучение влияния типов фильтров в цепях управления и нелинейности характеристик фазового и частотного дискриминаторов. В работах [5–16] исследованы динамические режимы и бифуркации в моделях таких систем с фильтрами различной сложности в цепях управления и с непериодической нелинейной характеристикой частотного дискриминатора. В данной работе, продолжающей исследования [11,12,15,16], изучаются особенности динамического поведения частотно-фазовой системы, обусловленные использованием в цепи частотного управления многочастотного дискриминатора [17] с периодической нелинейной характеристикой.

1. Общее уравнение динамики системы ЧФАП

Уравнение динамики системы ЧФАП, записанное в операторной форме ($p \equiv d/dt$) для разности фаз φ управляемого и внешнего колебаний, имеет вид [1]

$$p\varphi + \Omega_1 K_1(p)F(\varphi) + \Omega_2 K_2(p)\Phi(p\varphi) = \delta\omega, \quad (1)$$

где $K_1(p)$ и $K_2(p)$ – коэффициенты передачи фильтров низких частот в цепях фазового и частотного управления; $F(\varphi)$ и $\Phi(p\varphi)$ – характеристики фазового и частотного дискриминаторов, нормированные на единицу; Ω_1 и Ω_2 – коэффициенты усиления по цепям управления; $\delta\omega$ – начальная расстройка частот управляемого и внешнего колебаний. Характеристики дискриминаторов будем аппроксимировать функциями $F(\varphi) = \sin \varphi$ и $\Phi(p\varphi) = \sin(\beta_1 p\varphi)$, где β_1 – параметр частотного дискриминатора. Отметим, что уравнения динамики отдельной системы частотной автоподстройки с периодической характеристикой $\Phi(p\varphi)$ совпадает с уравнением динамики системы автоподстройки фазовых набегов, для которой характерна возможность существования множества состояний равновесия [18].

Конкретный вид уравнений динамики системы ЧФАП, получаемых из (1), определяется коэффициентами передачи $K_1(p)$ и $K_2(p)$. В данной работе рассмот-

рим особенности динамического поведения системы ЧФАП, описываемой уравнениями (1), в следующих случаях: 1) $K_1(p) = 1$, $K_2(p) = 1/(1 + T_0p)$ – без фильтра в цепи фазового управления и применении фильтра первого порядка в цепи частотного управления (T_0 – постоянная времени); 2) $K_1(p) = 1/(1 + T_1p)$, $K_2(p) = 1/(1 + b_1p + b_2p^2 + b_3p^3)$ – с применением фильтра первого порядка в цепи фазового управления и фильтра третьего порядка в цепи частотного управления ($b_1 = T_2 + T_3 + T_4$, $b_2 = T_2T_3 + T_2T_4 + T_3T_4$, $b_3 = T_2T_3T_4$, T_1, T_2, T_3 и T_4 – постоянные времени). В первом случае отдельные системы фазовой и частотной автоподстройки обладают простейшей регулярной динамикой – стационарные режимы систем определяются устойчивыми состояниями равновесия. Во втором случае система фазовой автоподстройки автономно демонстрирует только регулярное поведение [10], а в отдельной системе частотной автоподстройки наряду с регулярными возможны хаотические автомодуляционные режимы [19].

2. Динамика частотно-фазовой системы с простейшими фильтрами первого порядка

Полагая в уравнениях (1) $K_1(p) = 1$ и $K_2(p) = 1/(1 + T_0p)$ и вводя безразмерное время $\tau = t\sqrt{\Omega_1 T_0^{-1}}$, получим следующую динамическую систему:

$$d\varphi/d\tau = u, \quad du/d\tau = \gamma - \sin \varphi + b \sin(\beta\lambda u) - (\lambda + \lambda^{-1} \cos \varphi)u, \quad (2)$$

в которой $\lambda = 1/\sqrt{\Omega_1 T_0}$ – параметр инерционности, $\gamma = \delta\omega/\Omega_1$ – начальная расстройка, $b = -\Omega_2/\Omega_1$, $\beta = \beta_1\Omega_1$. В силу периодичности правых частей системы (2) по переменной φ с периодом 2π фазовым пространством системы является цилиндрическое фазовое пространство $U_1 = \{\varphi(\text{mod } 2\pi), u\}$. В дальнейшем поверхность цилиндра U_1 будем рассматривать развернутой на часть $-\pi \leq \varphi \leq \pi$ плоскости (φ, u) . В системе (2) параметр $\lambda > 0$ по физическому смыслу. Параметр b может принимать как положительные, так и отрицательные значения, при этом значения $b < 0$ соответствуют традиционной отрицательной [1], а значения $b > 0$ – положительной обратной связи в цепи частотного управления, которая реализуется инверсным включением частотного дискриминатора [6,7]. В силу инвариантности системы (2) относительно замены $(\varphi, u, \gamma) \rightarrow (-\varphi, -u, -\gamma)$ достаточно исследовать ее при значениях $\gamma \geq 0$.

Динамика модели (2) с непериодической характеристикой частотного дискриминатора $\Phi(p\varphi)$ исследована в [11,20]. Рассмотрим в рамках модели (2) режимы динамического поведения системы ЧФАП с периодической характеристикой $\Phi(p\varphi)$. Разбиение фазового цилиндра U_1 на траектории модели (2) определяют [21] состояния равновесия, предельные циклы первого и второго рода (соответственно колебательные и вращательные) и сепаратрисы седел. Особые траектории системы (2) имеют применительно к динамике рассматриваемой системы ЧФАП следующий физический смысл. Устойчивое состояние равновесия соответствует синхронному режиму, в котором частоты колебаний управляемого генератора и внешнего сигнала совпадают. Устойчивый предельный цикл колебательного типа (не охватывающий фазовый цилиндр) определяет квазисинхронный режим, в котором рассогласования φ и u периодически изменяются относительно ставшего неустойчивым синхронного

состояния. Устойчивый предельный цикл вращательного типа (охватывающий фазовый цилиндр) отвечает асинхронному режиму с вращением фазы, в котором рассогласование фаз φ неограниченно нарастает (при $\gamma > 0$) или убывает (при $\gamma < 0$), а разность частот u периодически изменяется относительно некоторого среднего значения.

При значениях $0 \leq \gamma < 1$ система (2) имеет два состояния равновесия $A_1(\arcsin \gamma, 0)$ и $A_2(\pi - \arcsin \gamma, 0)$. Определяя характер состояний равновесия по корням соответствующих характеристических уравнений [21], устанавливаем, что состояние равновесия A_1 устойчиво при значениях $b < b_s$ и неустойчиво при $b > b_s$, где $b_s = (1 + \sqrt{1 - \gamma^2/\lambda^2})/\beta$; состояние равновесия A_2 – седло. Отметим, что в случае, когда $b < 0$, состояние равновесия A_1 всегда устойчиво. Устойчивому состоянию равновесия A_1 отвечает синхронный режим системы ЧФАП. Вычисляя первую ляпуновскую величину L [22] на границе $b = b_s$, получаем

$$L(b = b_s) = -\pi \left[\beta^2 \lambda^2 (1 - \gamma^2) (\lambda^2 + \sqrt{1 - \gamma^2}) - 1 \right] (8\lambda^4 \sqrt{(1 - \gamma^2)^3})^{-1}. \quad (3)$$

Из (3) следует, что величина $L(b = b_s) < 0$ при значениях параметра $\lambda < \lambda_0$, где $\lambda_0 = \sqrt{1/2(\sqrt{(\beta^2 + 4)\beta^{-1}} - 1)}$. Когда $\lambda \geq \lambda_0$, величина $L(b = b_s) = 0$ при значениях $\gamma = \gamma^0$, где γ^0 находится из уравнения $1 - \beta^2 \lambda^4 (1 - \gamma^2) - \beta^2 \lambda^2 (1 - \gamma^2)^{3/2} = 0$; $L(b = b_s) < 0$ при значениях $0 \leq \gamma < \gamma^0$, $L(b = b_s) > 0$ при значениях $\gamma^0 < \gamma < 1$. В соответствии с [22] при пересечении границы области устойчивости $b = b_s$ с возрастанием параметра b синхронный режим в системе ЧФАП мягко (когда $\lambda < \lambda_0$ и когда $\lambda \geq \lambda_0$, $0 \leq \gamma < \gamma^0$) или жестко (когда $\lambda \geq \lambda_0$, $\gamma^0 < \gamma < 1$) сменяется квазисинхронным режимом колебательного предельного цикла модели (2).

На рис. 1 и 2 приведены качественные параметрические портреты системы (2) на плоскости параметров (γ, b) , построенные по результатам численного исследования системы при значениях параметров $\lambda = 0.2$, $\beta = 8$. Охарактеризуем бифуркационные кривые, изображенные на рис. 1, 2. Линия d_0 ($b = b_s$) на рис. 1 отвечает бифуркации Андронова–Хопфа [23,24]. Точка N, соответствующая значению $\gamma = \gamma^0$, делит линию d_0 на две части: безопасную d_0^- – слева от точки N и опасную d_0^+ – справа от точки N. На части d_0^- кривой d_0 первая ляпуновская величина $L < 0$, а на части d_0^+ кривой d_0 величина $L > 0$. При пересечении линии d_0^- в сторону возрастания параметра b на фазовом цилиндре U_1 мягко рождается устойчивый предельный цикл S_0 колебательного типа, охватывающий ставшее неустойчивым состояние равновесия A_1 . Цикл S_0 соответствует квазисинхронному режиму системы ЧФАП. В этом режиме имеется периодическая автомодуляция частоты колебаний управляемого генератора системы ЧФАП, причем величина разности фаз φ не превосходит 2π . При пересечении линии d_0^+ в сторону убывания параметра b на фазовом цилиндре рождается неустойчивый предельный цикл Γ_0 , охватывающий устойчивое состояние равновесия A_1 .

Из точки N, где происходит смена знака первой ляпуновской величины L , выходит бифуркационная кривая d_1 (см. рис. 1), которая отвечает бифуркации двойного предельного цикла колебательного типа, охватывающего состояние равновесия A_1 . При пересечении кривой d_1 в сторону убывания параметра b происходит рождение устойчивого и неустойчивого предельных циклов, охватывающих состояние равновесия A_1 .

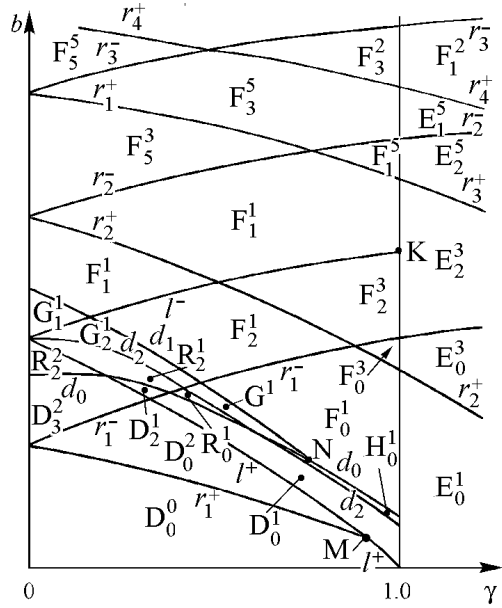


Рис. 1. Параметрический портрет модели (2) в области значений $b > 0$

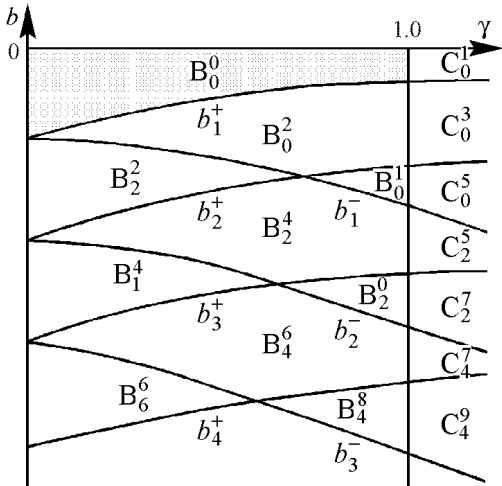


Рис. 2. Параметрический портрет модели (2) в области значений $b < 0$

Кривые r_i^+ , b_i^+ и r_i^- , b_i^- , $i = 1, 2, 3, \dots$ (см. рис. 1, 2) соответствуют образованию на фазовом цилиндре U_1 двойных предельных циклов вращательного типа, расположенных на U_1 соответственно в областях $u > 0$ и $u < 0$. Кривая r_1^+ выходит из точки М на кривой l^+ . При пересечении кривых r_i^+ в сторону возрастания параметра b или кривых b_i^+ в сторону убывания b на фазовом цилиндре появляются пары вращательных предельных циклов – верхний устойчивый L_i^+ и нижний неустойчивый Γ_i^+ в области $u > 0$. При пересечении кривых r_i^- в сторону возрастания b или кривых b_i^- в сторону убывания b в области $u < 0$ на фазовом цилиндре также появляются пары вращательных предельных циклов – верхний Γ_i^- неустойчивый и нижний L_i^- устойчивый.

Кривая d_2 (см. рис. 1) отвечает петле сепаратрис первого рода Π_0 , охватывающей A_1 . Так как на кривой d_2 седловая величина, вычисленная в соответствии с [21], $\sigma = \lambda^{-1}(1 - \gamma^2) + \lambda(b\beta - 1) > 0$, то при пересечении с возрастанием b кривой d_2 из неустойчивой петли Π_0 рождается неустойчивый предельный цикл Γ_0 , охватывающий состояние равновесия A_1 .

Кривые l^+ и l^- (см. рис. 1) отвечают петлям сепаратрис второго рода Π_φ^+ и Π_φ^- , охватывающим фазовый цилиндр U_1 и расположенным на U_1 соответственно в областях $u > 0$ и $u < 0$. Точка М на кривой l^+ , соответствующая $\gamma = \gamma_0 = \sqrt{1 - (b\beta - 1)^2 \lambda^4}$, отвечает обращению в ноль седловой величины σ и делит кривую l^+ на две части: l_1^+ – справа от точки М и l_2^+ – слева от точки М. Петля сепаратрис Π_φ^+ устойчивая ($\sigma < 0$) на части l_1^+ кривой l^+ и неустойчивая ($\sigma > 0$) на части l_2^+ кривой l^+ . При пересечении кривой l_1^+ в сторону возрастания параметра b петля Π_φ^+ разрушается, из нее рождается устойчивый вращательный предельный цикл L_1 в области $u > 0$ фазового цилиндра. При пересечении кривой l_2^+ в сторону убывания параметра b из петли Π_φ^+ рождается неустойчивый вращательный предельный цикл Γ_1 в области $u > 0$ фазового цилиндра. Петля Π_φ^- неустойчивая ($\sigma > 0$), при пересечении кривой l^- в сторону уменьшения b эта петля разрушается, из нее рождается неустойчивый вращательный предельный цикл в области $u < 0$ фазового цилиндра.

Часть γ^+ линии $\gamma = 1$ выше точки К (см. рис. 1) и часть γ^- линии $\gamma = 1$, соответствующая значениям параметра $b < 0$ (см. рис. 2), отвечают петле сепаратрисы седло-узла второго рода. При пересечении линии γ^+ (линии γ^-) в сторону возрастания параметра γ эта петля разрушается, из нее рождается неустойчивый (устойчивый) вращательный предельный цикл в области $u < 0$ (в области $u > 0$) на фазовом цилиндре U_1 .

Обсудим фазовые портреты, соответствующие областям значений параметров, выделенным перечисленными бифуркационными кривыми на плоскости (γ, b) . Отметим, что в обозначениях этих областей верхний и нижний индексы означают число вращательных предельных циклов, расположенных соответственно в области $u > 0$ и в области $u < 0$ фазового цилиндра. Фазовые портреты системы (2) приведены на рис. 3–5. В областях D_0^0 и B_0^0 (см. рис. 1, 2) система (2) не имеет предельных циклов, единственным аттрактором на фазовом цилиндре U_1 является состояние равновесия A_1 (рис. 3, а). Для значений параметров из областей D_0^0 и B_0^0 режим синхронизации в системе ЧФАП реализуется при любых начальных значениях φ и u . При значениях $0 \leq \gamma < 1$ в области параметров, расположенной ниже кривой b_1^+ (см. рис. 2) и в областях $D_0^1, D_0^2, D_2^1, D_2^2, H_0^1$ (см. рис. 1), режим синхронизации также существует, но одновременно с ним существует и асинхронные режимы системы ЧФАП, определяемые устойчивыми вращательными предельными циклами (рис. 3, б–е, рис. 4, а, б). То есть в этих областях модель (2) является мультистабильной, следовательно, в зависимости от начальных значений φ и u в системе ЧФАП устанавливается либо режим синхронизации, либо один из асинхронных режимов предельных циклов L_i^+ или L_i^- .

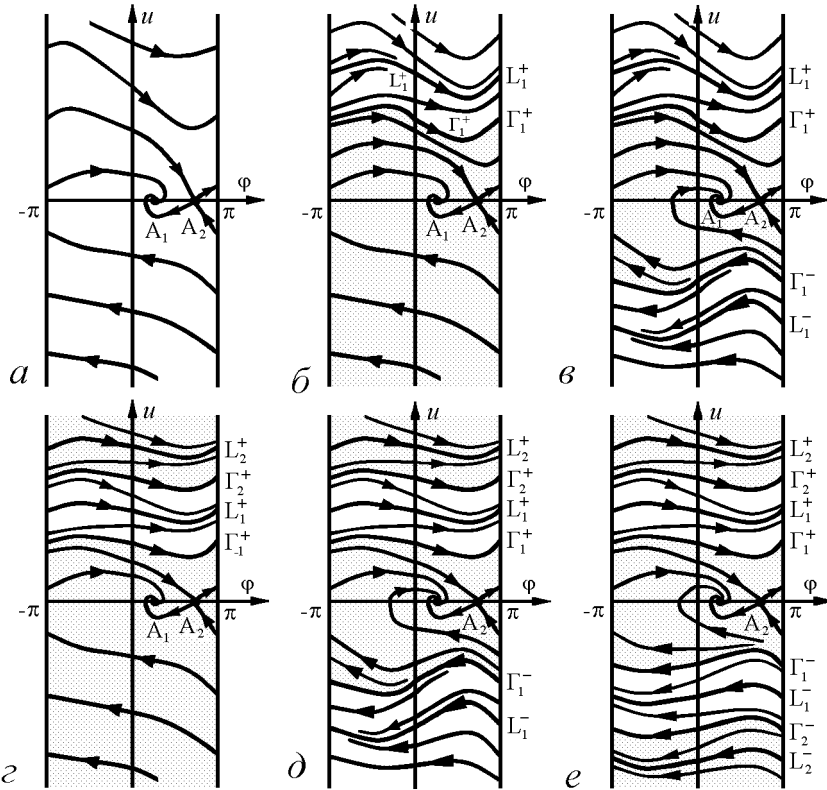


Рис. 3. Фазовые портреты модели (2) в областях B_0^0 и D_0^0 (а), B_0^2 (б), B_2^2 (в), B_0^4 (г), B_2^4 (д), B_4^4 (е)

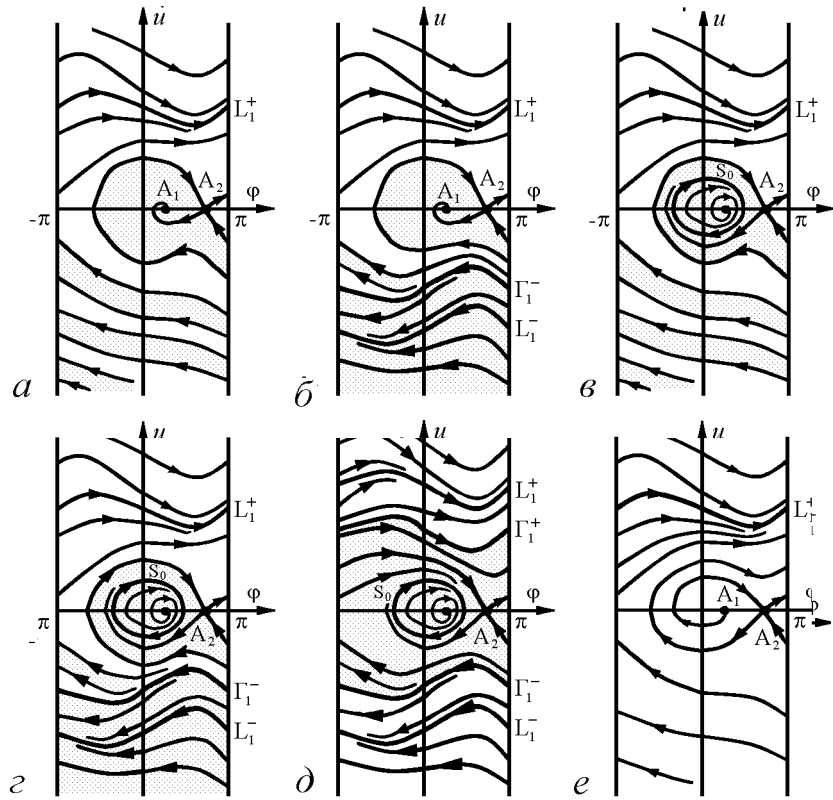


Рис. 4. Фазовые портреты модели (2) в областях D_0^1 (a), D_2^1 (б), R_0^1 (в), R_2^1 (г), R_2^2 (д), F_0^1 (е)

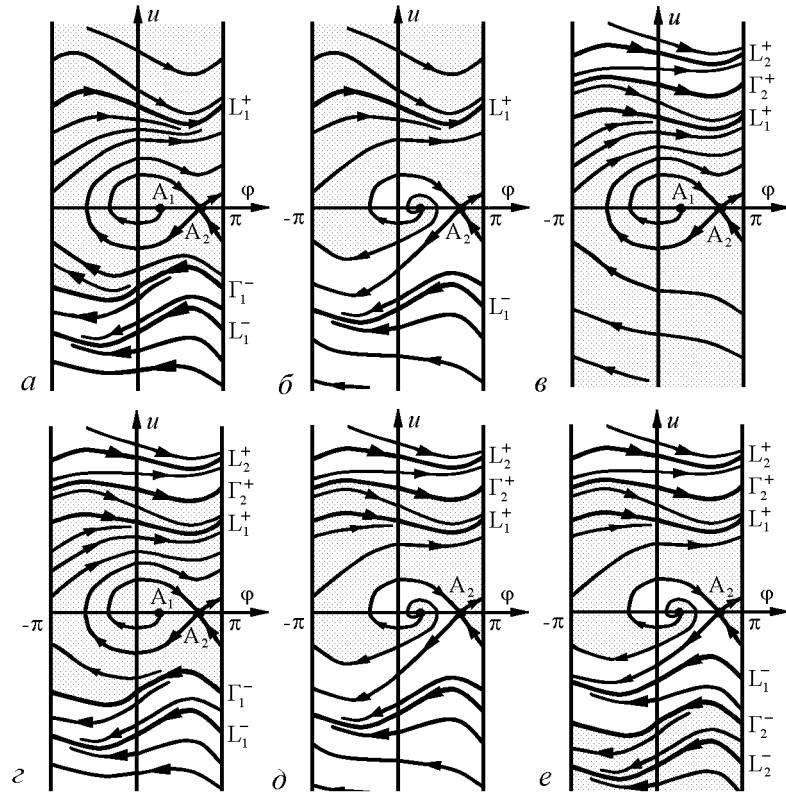


Рис. 5. Фазовые портреты модели (2) в областях F_2^1 (a), F_1^1 (б), F_0^3 (в), F_2^3 (г), F_1^3 (д), F_3^3 (е)

($i = 1, 2, 3, \dots$), расположенных соответственно в областях $u > 0$ и $u < 0$ фазового цилиндра. Важно отметить, что при значениях параметров из областей, расположенных ниже кривой d_0 (см. рис. 1, 2) система ЧФАП может функционировать в режиме удержания состояния синхронизации.

При значениях параметров из областей $R_0^1, R_2^1, R_2^2, G_0^1, G_1^1$ и G_2^1 аттракторами системы (2) на фазовом цилиндре U_1 являются устойчивый колебательный предельный цикл S_0 и устойчивые вращательные предельные циклы L_1^+ и L_1^- (рис. 4, в, з, д). Области притяжения этих аттракторов определяются сепаратрисами седла A_2 и неустойчивыми предельными циклами Γ_0 колебательного и Γ_1^+ и Γ_1^- вращательного типа. Цикл Γ_0 , охватывающий устойчивый предельный цикл S_0 , существует для значений параметров из областей G_0^1, G_1^1 и G_2^1 . В областях $R_0^1, R_2^1, R_2^2, G_0^1, G_1^1$ и G_2^1 модель (2) также демонстрирует мультистабильное поведение – в зависимости от начальных значений φ и u в системе ЧФАП устанавливается либо квазисинхронный режим предельного цикла S_0 , либо один из асинхронных режимов предельных циклов L_1^+ и L_1^- .

Для значений параметров из областей, расположенных выше кривой r^* ($r^* = \max(d_0, d_1)$) при $0 \leq \gamma < 1$, и для значений $\gamma > 1$, $b > 0$ аттракторами модели (2) являются вращательные предельные циклы L_i^+ и L_i^- (рис. 4, е, рис. 5). Следовательно, в системе ЧФАП возможны только асинхронные режимы. Какой из режимов предельных циклов L_i^+ или L_i^- реализуется в системе – это определяется начальными значениями фазовых переменных φ и u .

Представленные результаты качественно-численного исследования модели (2) показывают, что уже в случае простейших фильтров первого порядка в цепях управления системы ЧФАП применение частотного дискриминатора с периодической характеристикой приводит к значительному усложнению поведения системы. Это усложнение обусловлено возможностью существования множества различных асинхронных режимов, а также и возможностью потери устойчивости режима синхронизации с возникновением квазисинхронного режима при одновременном существовании асинхронных режимов.

3. Особенности динамики частотно-фазовой системы с фильтрами первого и третьего порядка в цепях управления

Применение фильтров более высокого порядка в цепях фазового и частотно-го управления ведет к усложнению динамики системы ЧФАП – становится возможным развитие неустойчивости квазисинхронного и множества асинхронных режимов и появление сложных, в том числе хаотических несинхронных режимов. Рассмотрим особенности динамического поведения системы в случае, когда в уравнении (1) операторы

$$K_1(p) = \frac{1}{1+T_1p}, \quad K_2(p) = \frac{1}{1+(T_2+T_3+T_4)p+(T_2T_3+T_2T_4+T_3T_4)p^2+T_2T_3T_4p^3}.$$

Уравнения динамики системы ЧФАП с фильтрами в цепях управления, имеющими такие коэффициенты передачи, на основании (1) после перехода к безразмерному

времени $\tau = \Omega_1 t$ записываем в виде

$$\begin{aligned} d\varphi/d\tau &= u, & du/d\tau &= z, & dz/d\tau &= v, & dv/d\tau &= w, \\ \varepsilon_1 \mu_1 dw/d\tau &= \gamma - \sin \varphi + b \sin(\beta u) - (1 + \varepsilon_2 \cos \varphi)u - \\ & - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \mu \cos \varphi - b\beta \varepsilon_1 \cos(\beta u))z - (\mu + \mu_1 \cos \varphi + \varepsilon_1 \varepsilon_2)v - \\ & - (\mu \varepsilon_1 + \mu_1)w + \mu u^2 \sin \varphi + \mu_1 u^3 \cos \varphi + 3\mu_1 u z \sin \varphi \end{aligned} \quad (4)$$

где $\varepsilon_1 = T_1 \Omega_1$, $\varepsilon_2 = (T_2 + T_3 + T_4) \Omega_1$, $\mu = (T_2 T_3 + T_2 T_4 + T_3 T_4) \Omega_1^2$, $\mu_1 = T_2 T_3 T_4 \Omega_1^3$. Система (4) имеет пятимерное цилиндрическое фазовое пространство $U_2 = \{\varphi(\text{mod } 2\pi), u, z, v, w\}$. В фазовом пространстве U_2 синхронному режиму системы ЧФАП отвечает устойчивое состояние равновесия модели (4), квазисинхронным режимам соответствуют устойчивые предельные циклы, притягивающие торы или хаотические аттракторы колебательного типа (без вращения фазы), асинхронным режимам – устойчивые предельные циклы, притягивающие торы или хаотические аттракторы вращательного или колебательно-вращательного типа. Для колебательно-вращательных режимов характерно чередование неограниченного изменения разности фаз φ и ее колебательного поведения.

Выясним условия существования режима синхронизации в системе ЧФАП с рассматриваемыми типами фильтров. Система (4) при значениях $0 \leq \gamma < 1$ имеет два состояния равновесия $A_1(\arcsin \gamma, 0, 0, 0, 0)$ и $A_2(\pi - \arcsin \gamma, 0, 0, 0, 0)$. Состояние равновесия A_1 может быть как устойчивым, так и неустойчивым; состояние равновесия A_2 – неустойчивое седлового типа. Условия устойчивости состояния равновесия A_1 определяем из характеристического уравнения

$$\chi^5 + c_1 \chi^4 + c_2 \chi^3 + c_3 \chi^2 + c_4 \chi + c_5 = 0, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} c_1 &= (\mu \varepsilon_1 + \mu_1)(\mu_1 \varepsilon_1)^{-1}, \\ c_2 &= (\varepsilon_1 \varepsilon_2 + \mu + \mu_1 \sqrt{1 - \gamma^2})(\mu_1 \varepsilon_1)^{-1}, \\ c_3 &= (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - 2b\beta \varepsilon_1 + \mu \sqrt{1 - \gamma^2})(\mu_1 \varepsilon_1)^{-1}, \\ c_4 &= (1 - 2b\beta + \varepsilon_2 \sqrt{1 - \gamma^2})(\mu_1 \varepsilon_1)^{-1}, \\ c_5 &= \sqrt{1 - \gamma^2}(\mu_1 \varepsilon_1)^{-1}, \end{aligned}$$

и в силу критерия Рауса–Гурвица записываем в виде неравенств [22]

$$c_1 c_2 - c_3 > 0, \quad (c_1 c_2 - c_3)(c_3 c_4 - c_3 c_5) - c_1 c_4 + c_5 > 0. \quad (6)$$

Неравенства (6) являются условиями существования режима синхронизации в системе ЧФАП, а область значений параметров модели (4), при которых выполняются неравенства (6), соответствует области удержания этого режима. Когда условия (6) нарушаются, в фазовом пространстве U_2 происходит либо рождение устойчивого колебательного предельного цикла из состояния равновесия A_1 , либо стягивание седлового предельного цикла к состоянию равновесия A_1 с последующим мягким или жестким переходом системы ЧФАП к квазисинхронному режиму с периодической модуляцией частоты управляемого генератора.

Рассмотрим нелинейные эффекты и особенности поведения системы ЧФАП в области неустойчивости режима синхронизации, обусловленные периодической характеристикой частотного дискриминатора и параметром инерционности μ_1 , который характеризует степень влияния фильтра в частотной цепи управления. Для этого обратимся к результатам исследования модели (4), полученным с применением качественно-численных методов нелинейной динамики [23,24] и компьютерного моделирования с использованием программного комплекса «ДНС» [25].

На рис. 6 приведены построенные при значениях $\gamma = 0.1, \varepsilon_1 = 1, \varepsilon_2 = 2, \beta = 2, \mu = 2, \mu_1 = 4$ однопараметрическая бифуркационная диаграмма (b, u) точечного отображения Пуанкаре (а); (φ, u) -проекции фазовых портретов и фрагменты реализаций $u(\tau)$ (б-л), соответствующие аттракторам модели (4) при различных значениях параметра b . Эти результаты иллюстрируют потерю устойчивости квазисинхронного режима в системе ЧФАП и эффекты перехода к хаотическому квазисинхронному режиму через перемежаемость и к асинхронному хаотическому режиму колебательно-вращательного типа при изменении b . В соответствии с (b, u) -диаграммой при увеличении b вначале реализуется бифуркация удвоения периода колебательного предельного цикла S_1 (рис. 6, б) с рождением устойчивого двухоборотного предельного цикла S_2 (рис. 6, в), далее наблюдается перемежаемость – чередование длин-

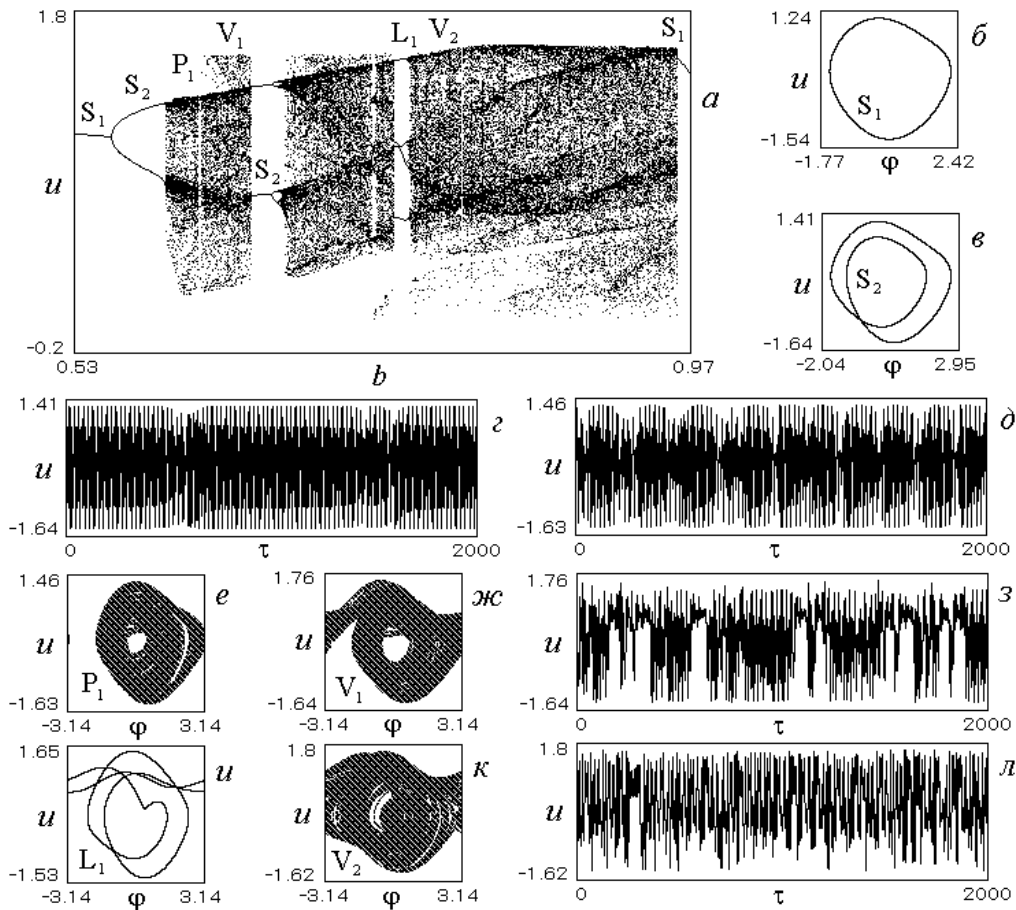


Рис. 6. Эволюция квазисинхронного режима предельного цикла S_1 при изменении параметра b ($\gamma = 0.1, \varepsilon_1 = 1, \varepsilon_2 = 2, \beta = 2, \mu = 2, \mu_1 = 4$): $b = 0.53$ (б), 0.58 (в), 0.595 (з), 0.61 (д, е), 0.65 (ж, з), 0.76 (и), 0.9 (к, л)

ных стадий колебаний, соответствующих циклу S_2 и относительно коротких стадий нерегулярных движений (рис. 6, z). Через перемежаемость в системе возникает хаотический квазисинхронный режим аттрактора P_1 (рис. 6, d, e). Затем в структуре аттрактора P_1 появляются витки вращательных траекторий, система вновь демонстрирует перемежающееся поведение, от которого она переходит к асинхронному режиму колебательно-вращательного хаотического аттрактора V_1 (рис. 6, $ж, з$). При дальнейшем увеличении параметра b наблюдается чередование режима хаотического аттрактора V_1 , периодического квазисинхронного режима предельного цикла S_2 (см. рис. 6, $в$) и периодического асинхронного режима сложного предельного цикла L_1 (рис. 6, u). От режима цикла L_1 через бифуркации удвоения периода этого цикла система переходит к хаотическому асинхронному режиму аттрактора V_2 (рис. 6, $к, л$). Расчеты показывают, что хаотический аттрактор V_2 при $b = 0.95$ имеет максимальный ляпуновский характеристический показатель $\rho_m = 0.21$. Примечательно, что от режима аттрактора V_2 при увеличении b система возвращается к периодическому квазисинхронному режиму колебательного предельного цикла S_1 (см. рис. 6, $б$).

Численное исследование модели (4) показывает, что развитие неустойчивости периодического квазисинхронного режима происходит также и в результате бифуркации рождения притягивающего двумерного тора в фазовом пространстве U_2 . На рис. 7, a приведена построенная при значениях $\gamma = 0.1$, $\varepsilon_1 = 1$, $\varepsilon_2 = 2$, $\beta = 8$, $\mu = 2$, $\mu_1 = 3.5$ бифуркационная диаграмма (b, u), характеризующая эволюцию периодического квазисинхронного режима предельного цикла S_1 (см. рис. 6, $б$) при изменении параметра b от 1.62 до 1.98. На рис. 7, $б-к$ даны (φ, u) -проекции фазо-

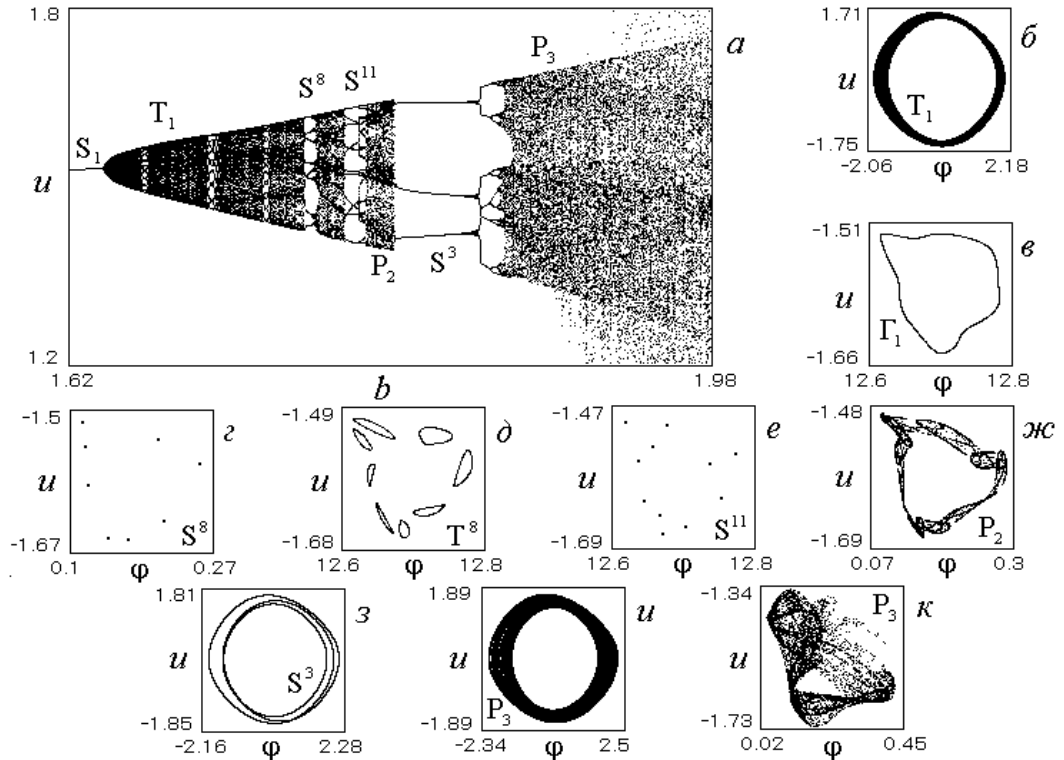


Рис. 7. Диаграмма развития квазисинхронного режима предельного цикла S_1 при изменении параметра b (a) и аттракторы модели (4) ($б-к$) при значениях $\gamma = 0.1$, $\varepsilon_1 = 1$, $\varepsilon_2 = 2$, $\beta = 8$, $\mu = 2$, $\mu_1 = 3.5$, $b = 1.72$ ($б, в$), 1.755 ($г$), 1.76 ($д$), 1.78 ($е$), 1.788 ($ж$), 1.81 ($з$), 1.9 ($и, к$)

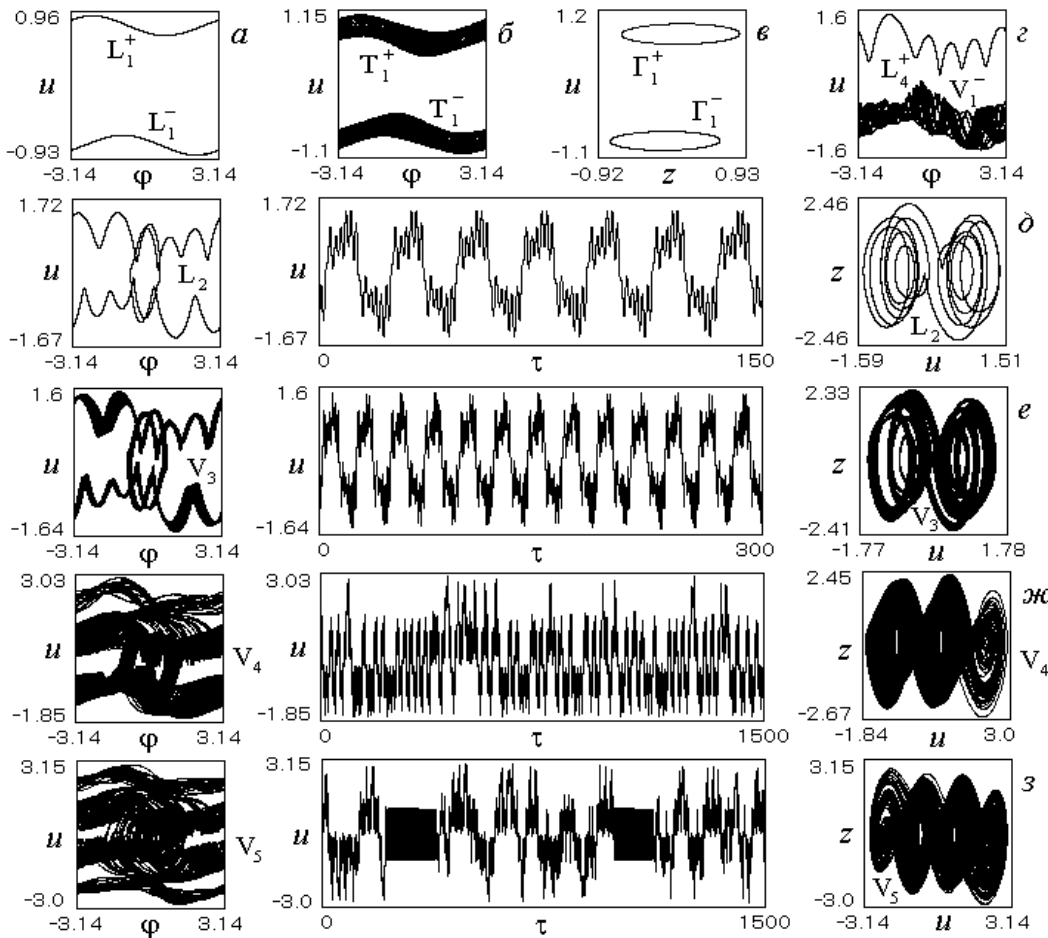


Рис. 8. Развитие асинхронных режимов предельных циклов L_1^+ и L_1^- при изменении параметра μ_1 : $\mu_1 = 0.2$ (а), 0.23 (б, в), 0.34 (з), 0.386 (д), 0.418 (е), 0.43 (ж), 0.51 (з) ($\gamma = 0.1$, $\varepsilon_1 = 1$, $\varepsilon_2 = 5$, $\beta = 4$, $\mu = 1$, $b = 6$)

вых портретов и (φ, u) -проекции сечения Пуанкаре, соответствующие аттракторам модели (4). В соответствии с (b, u) -диаграммой при увеличении b из колебательного предельного цикла S_1 мягко рождается притягивающий двумерный тор T_1 (рис. 7, б), которому в сечении Пуанкаре отвечает замкнутая инвариантная кривая Γ_1 (рис. 7, в). Модулирующие колебания в петле управления, соответствующие тору T_1 , носят квазипериодический характер с двумя несоизмеримыми частотами. Область существования режима тора T_1 прерывается узкими «окнами» сложных предельных циклов. При возрастании параметра b наблюдаются следующие явления: бифуркация потери устойчивости сложного колебательного предельного цикла S^8 (рис. 7, з) с рождением тора T^8 (рис. 7, д); бифуркации удвоения периода сложного предельного цикла S^{11} (рис. 7, е), через которые система переходит к хаотическому квазисинхронному режиму аттрактора P_2 (рис. 7, ж); жесткий переход от режима хаотического аттрактора P_2 к периодическому квазисинхронному режиму трехоборотного предельного цикла S^3 (рис. 7, з); переход к хаотическому квазисинхронному режиму аттрактора P_3 (рис. 7, и, к) через бифуркации удвоения периода цикла S^3 ; установление в системе хаотического асинхронного режима колебательно-вращательного типа.

Обсудим особенности процессов развития периодических асинхронных режимов системы ЧФАП, для чего рассмотрим результаты численного исследования мо-

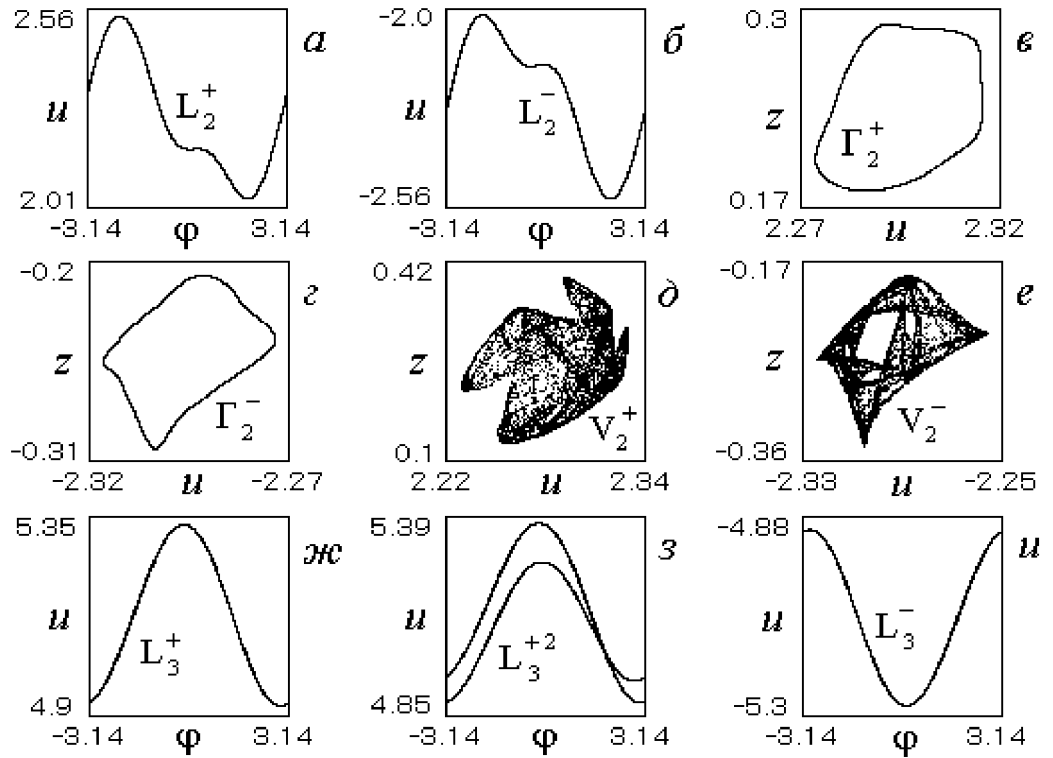


Рис. 9. Аттракторы асинхронных режимов, наблюдаемые при изменении параметра μ_1 : $\mu_1 = 0.2$ (а, б, ж, и), 0.325 (е), 0.344 (з), 0.331 (д), 0.348 (е), 0.3 (з) ($\gamma = 0.1, \varepsilon_1 = 1, \varepsilon_2 = 5, \beta = 4, \mu = 1, b = 6$)

дели (4) при значениях $\gamma = 0.1, b = 6, \varepsilon_1 = 1, \varepsilon_2 = 5, \beta = 4, \mu = 1$, когда параметр μ_1 является варьируемым. При $\mu_1 = 0.2$ в фазовом пространстве U_2 существует шесть устойчивых вращательных предельных циклов $L_1^+, L_2^+, L_3^+, L_1^-, L_2^-$ и L_3^- , которые расположены в областях $0.63 < u < 0.9, 2.02 < u < 2.56, 4.9 < u < 5.34, -0.89 < u < -0.63, -2.55 < u < -2.01$ и $-5.29 < u < -4.88$, соответственно. Эволюцию асинхронных режимов предельных циклов $L_1^+, L_2^+, L_3^+, L_1^-, L_2^-$ и L_3^- при возрастании μ_1 характеризуют представленные на рис. 8, 9 (φ, u)- и (u, z)-проекции фазовых портретов, (z, u)-проекции сечения Пуанкаре и зависимости $u(\tau)$, соответствующие аттракторам модели (4) при различных значениях параметра μ_1 .

Наиболее богатая динамика модели (4) наблюдается в процессе развития режимов предельных циклов L_1^+ и L_1^- . Вначале циклы L_1^+ и L_1^- (рис. 8, а) теряют устойчивость с рождением в фазовом пространстве притягивающих двумерных торов T_1^+ и T_1^- вращательного типа (рис. 8, б). На рис. 8, в изображены замкнутые инвариантные кривые Γ_1^+ и Γ_1^- отображения Пуанкаре плоскости $\varphi = -\pi$ в плоскость $\varphi = \pi$, отвечающие одновременно существующим торам T_1^+ и T_1^- . С возрастанием μ_1 тор T_1^+ вырождается во вращательный предельный цикл L_4^+ , а тор T_1^- – в хаотический аттрактор V_1^- вращательного типа (рис. 8, з). Затем аттрактор V_1^- разрушается, в системе наблюдается жесткий переход к режиму цикла L_4^+ . Далее от режима цикла L_4^+ система переходит к периодическому асинхронному режиму сложного предельного цикла L_2 (рис. 8, д), для которого характерны переключения фазовой переменной u .

При возрастании параметра μ_1 реализуются бифуркации удвоения периода цикла L_2 , в результате которых в фазовом пространстве U_2 образуется хаотический

аттрактор V_3 с переключениями переменной u (рис. 8, *е*). Структура аттрактора V_3 отличается наличием двух областей сосредоточения колебательных движений с нерегулярными переходами между этими областями. Увеличение μ_1 приводит к образованию в фазовом пространстве хаотических вращательных аттракторов V_4 (рис. 8, *ж*) и V_5 (рис. 8, *з*) с переключениями между тремя и четырьмя областями притяжения колебательных движений. Примечательно, что в проекции (u, z) (см. рис. 8, *е, ж, з*) аттракторы V_3 , V_4 и V_5 качественно похожи на двух, трех и четырехспиральные хаотические аттракторы, характерные для динамических систем с неединственным состоянием равновесия (см., например, [8,9,26,27]). Об этом же свидетельствует и характер реализаций колебаний $u(\tau)$ на аттракторах V_3 , V_4 и V_5 (рис. 8, *е, ж, з*).

Развитие режимов предельных циклов L_2^+ и L_2^- (рис. 9, *а, б*) при возрастании параметра μ_1 характеризуется следующими явлениями: потеря устойчивости L_2^+ и L_2^- и рождение вращательных торов T_2^+ и T_2^- ; разрушение торов T_2^+ и T_2^- и образование вращательных хаотических аттракторов V_2^+ и V_2^- . На рис. 9, *в-е* приведены инвариантные замкнутые кривые Γ_2^+ и Γ_2^- сечения Пуанкаре, отвечающие торам T_2^+ и T_2^- (*в, з*), и вид сечений Пуанкаре, соответствующих аттракторам V_2^+ и V_2^- (*д, е*). При увеличении μ_1 в системе наблюдаются жесткие переходы от режима хаотического аттрактора V_2^+ к режиму тора T_1^+ (рис. 8, *б*) и от режима хаотического аттрактора V_2^- к режиму сложного предельного цикла с переключениями переменной u (см. рис. 8, *д*).

Предельный цикл L_3^+ (рис. 9, *ж*) при возрастании μ_1 испытывает бифуркацию удвоения периода с рождением устойчивого двухоборотного (4π -периодического по φ) предельного цикла L_3^{+2} (рис. 9, *з*), далее наблюдается седло-узловая бифуркация цикла L_3^{+2} и жесткий переход к режиму хаотического аттрактора V_5 с переключениями переменной u (см. рис. 8, *з*). Для режима аттрактора V_5 характерны нерегулярно переключающиеся хаотические движения колебательного и вращательного типа.

От режима предельного цикла L_3^- (рис. 9, *и*) с увеличением μ_1 система переходит к режиму предельного цикла L_2 (рис. 9, *д*) в результате седло-узловой бифуркации цикла L_3^- .

Результаты, приведенные на рис. 9, иллюстрируют мультистабильное поведение системы, обусловленное одновременным существованием периодических и хаотических асинхронных режимов. При исследовании асинхронных режимов выяснены еще следующие эффекты нелинейной динамики модели (4): образование в фазовом пространстве сложного хаотического аттрактора вращательного типа в результате объединения двух вращательных хаотических аттракторов с нерегулярными переключениями движений; формирование вращательных хаотических аттракторов с переключениями движений между более чем четырьмя областями притяжения; возникновение вращательного хаотического аттрактора через бифуркации удвоения торов. Эти эффекты характеризуются представленными на рис. 10, 11 (φ, u)- и (u, z) -проекциями фазовых портретов, зависимостями $u(\tau)$ и (z, u) -проекциями сечения Пуанкаре, соответствующими аттракторам модели (4) при значениях $\gamma = 0.1$, $\beta = 8$, $\mu = 2$ и различных значениях параметров b , ε_1 , ε_2 и μ_1 .

На рис. 10, *а* показаны одновременно существующие хаотические аттракторы V_3^+ и V_3^- с переключениями движений; эти аттракторы образуются на базе вращательных предельных циклов L_1^+ ($0.32 < u < 0.49$) и L_1^- ($0.49 - < u < -0.32$). Рис. 10, *б* демонстрирует объединенный хаотический аттрактор V_6 с нерегулярными переключениями движений между аттракторами V_3^+ и V_3^- . Максимальные ляпуновские характеристические показатели аттракторов V_3^+ , V_3^- и V_6 (см. рис. 10, *а, б*)

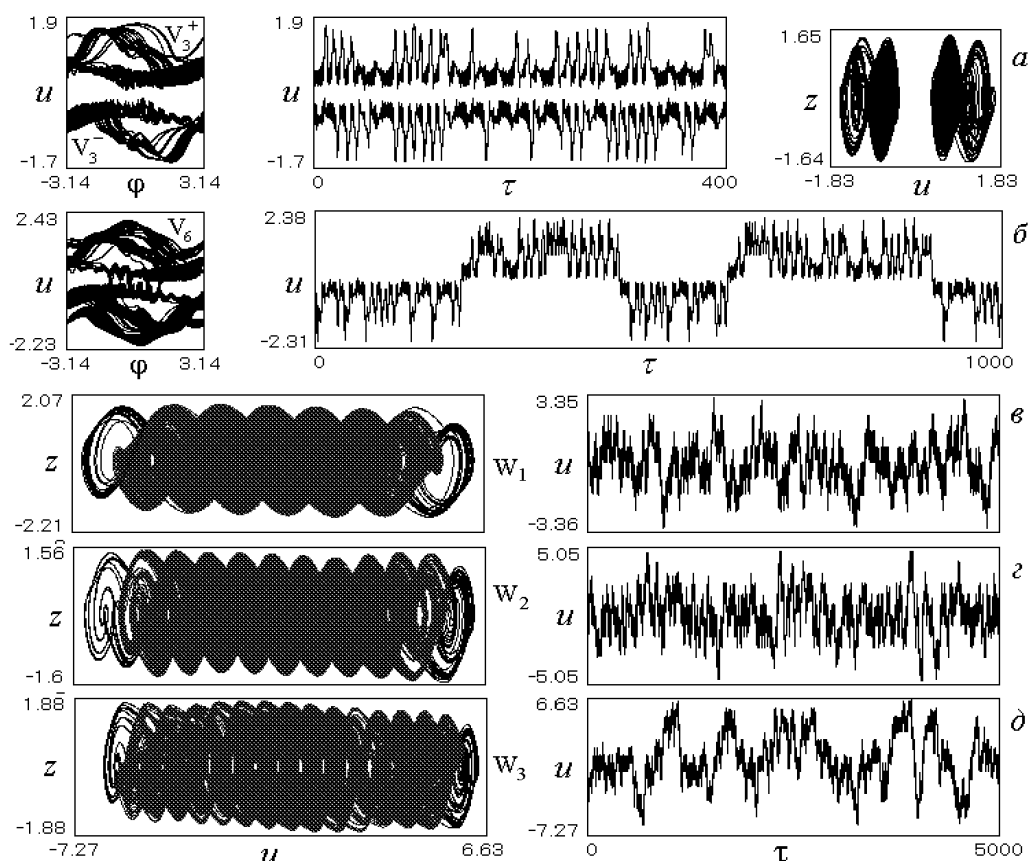


Рис. 10. Сложные хаотические асинхронные режимы, наблюдаемые при значениях параметров $\gamma = 0.1$, $b = 12$, $\varepsilon_1 = 1$, $\varepsilon_2 = 20$, $\beta = 8$, $\mu = 2$, $\mu_1 = 0.83$ (а), 0.92 (б); $\gamma = 0.1$, $\varepsilon_1 = 20$, $\varepsilon_2 = 25$, $\beta = 8$, $b = 20$, $\mu = 2$, $\mu_1 = 2.9$ (в), $b = 25$, $\mu = 5$, $\mu_1 = 4.5$ (г), $b = 30$, $\mu = 5$, $\mu_1 = 4.6$ (д)

имеют значения 0.36 , 0.32 и 0.38 , соответственно. На рис. 10, в, г, д показаны примеры сложных хаотических аттракторов (W_1, W_2 и W_3) с переключениями движений. Эти аттракторы имеют более сложную структуру и больший занимаемый фазовый объем. Максимальный ляпуновский характеристический показатель аттрактора W_1 (см. рис. 10, в) имеет значение 1.1 , то есть более чем в два раза превышает по величине соответствующие показатели аттракторов V_3^+, V_3^- и V_6 , что свидетельствует о значительно большей скорости разбегания близких фазовых траекторий.

Рис. 11 характеризует эволюцию режима вращательного тора T_3 (рис. 11, а, б) при возрастании параметра μ_1 . Тору T_3 в сечении Пуанкаре отвечает замкнутая инвариантная кривая Γ_3 (рис. 11, в). С возрастанием μ_1 наблюдаются бифуркации удвоения периода кривой Γ_3 (рис. 11, г, д, е), адекватные бифуркациям удвоения тора T_3 . В результате этих бифуркаций в фазовом пространстве образуется вращательный хаотический аттрактор V_7 (рис. 11, ж, з). При значении $\mu_1 = 6.62$, которому соответствует рис. 11, з, максимальный ляпуновский характеристический показатель аттрактора V_7 имеет значение 0.2 .

Представленные результаты исследования динамики модели (4) показывают, что в системе ЧФАП с фильтрами первого и третьего порядка в цепях фазового и частотного управления и периодической характеристикой частотного дискриминатора создаются возможности для реализации множества разнообразных периодических и хаотических автомодуляционных колебательных режимов управляемого генератора.

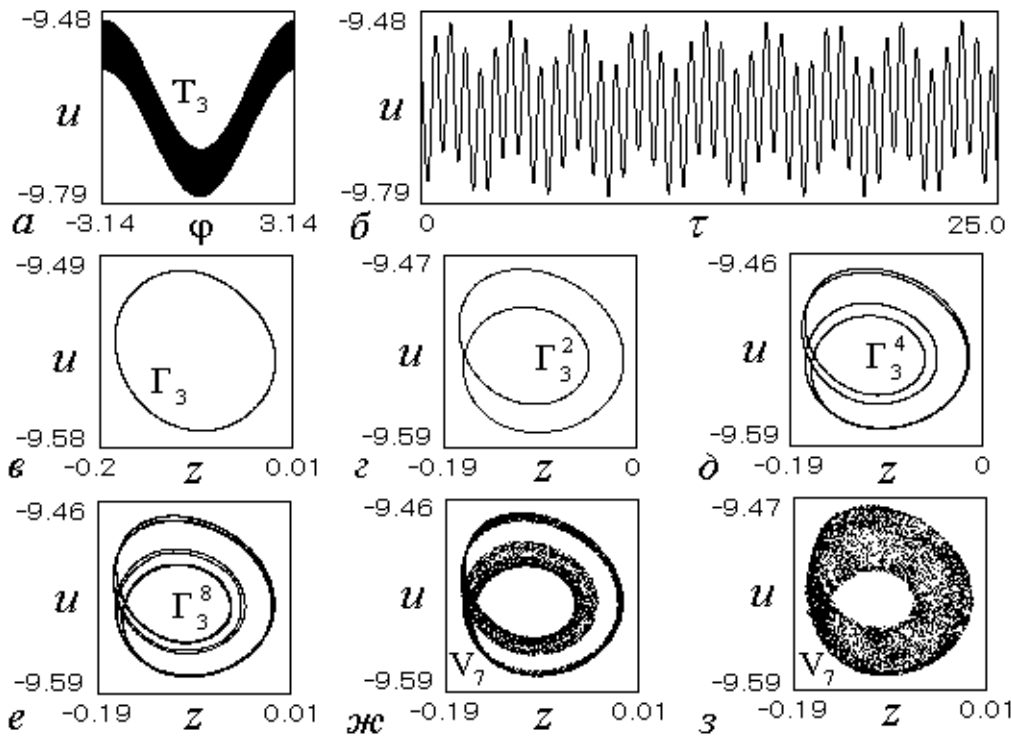


Рис. 11. Переход к хаотическому асинхронному режиму через бифуркации удвоения двумерного тора при изменении параметра μ_1 : $\mu_1 = 4.0$ (а, б, в), 6.2 (г), 6.4 (д), 6.43 (е), 6.5 (ж), 6.62 (з) ($\gamma = 0.1$, $b = 12$, $\varepsilon_1 = 1$, $\varepsilon_2 = 20$, $\beta = 8$, $\mu = 2$)

Заключение

В данной работе представлены результаты исследования режимов динамического поведения и нелинейных явлений в автогенераторной системе с частотно-фазовой автоподстройкой частоты с многочастотным дискриминатором в цепи частотного управления. Исследование проведено на основе математических моделей (2) и (4) системы с одной и двумя с половиной степенями свободы в цилиндрических фазовых пространствах.

Получены условия существования синхронного режима, определяющие границу области его удержания при изменении параметров системы. Выяснено, что поведение системы вне области удержания синхронного режима является достаточно сложным и разнообразным даже при простейших типах фильтров первого порядка в цепях управления, когда динамика системы ЧФАП описывается моделью (2). В этом случае в системе реализуются периодические квазисинхронный и асинхронные режимы, невозможные в отдельных системах с фазовым и частотным управлением. Благодаря периодической характеристике многочастотного дискриминатора, обуславливающей возможность существования множества состояний равновесия в моделях отдельной системы частотной автоподстройки, в частотно-фазовой системе создаются возможности для реализации множества периодических асинхронных режимов. Установлено, что в зависимости от значений параметров для модели (2) характерно существование множества качественно различных типов фазового портрета движений, отличающихся числом и расположением вращательных предельных циклов на фазовом цилиндре.

При усложнении фильтров в цепях управления в системе ЧФАП наряду с синхронным и периодическими несинхронными режимами становятся возможными сложнопериодические, квазипериодические и хаотические квазисинхронные и асинхронные режимы, может существовать множество одновременно существующих асинхронных режимов различного типа. Наблюдаются переходы между квазисинхронными и асинхронными режимами при изменении параметров модели (4), реализуются переходы к хаотическим режимам через бифуркации удвоения периода предельных циклов, через перемежаемость, через разрушение торов и бифуркации удвоения торов. Возникают хаотические асинхронные режимы с нерегулярными переключениями между различными колебательными состояниями, качественно подобные режимам многоспиральных хаотических аттракторов с нерегулярными переходами между различными неустойчивыми состояниями равновесия в многустойчивых динамических системах. Выяснено, что в процессах возникновения и развития несинхронных режимов важную роль играют параметры μ_1 и b , характеризующие степень влияния цепи частотного управления. Примечательно, что явления сложной динамики наблюдаются в системе при относительно небольших величинах параметра инерционности μ_1 .

Для применения рассматриваемой системы ЧФАП в традиционных задачах стабилизации частоты и синхронизации колебаний наибольший интерес представляют полученные в работе результаты о границах областей удержания синхронного режима и захвата в этот режим, о смене режимов поведения при выходе из этих областей. В плане расширения функциональных возможностей системы за счет использования несинхронных режимов в качестве ее рабочих состояний представляют интерес полученные результаты о явлениях сложной динамики модели (4), в частности, результаты о хаотических режимах колебательно-вращательного типа и хаотических режимах с переключениями движений. Данные об этих режимах могут быть полезными при решении задач управления характеристиками генерируемых в системе колебательных процессов и перевода в колебательный режим с желаемыми свойствами.

Библиографический список

1. Капранов М.В. О полосе захвата при частотно-фазовой автоподстройке // Науч. докл. высш. школы. Сер. «Радиотехника и электроника». 1958. Т. 2, № 9. С. 162.
2. Каганов В.И., Терещенко С.В. Помехоустойчивость двухкольцевой системы автоматического управления // Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57, № 3. С. 353.
3. Дмитриев А.С., Широков М.Е. Выбор генератора для прямохаотической системы связи // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49, № 7. С. 840.
4. Дмитриев А.С., Клецов А.В., Кузьмин Л.В. Генерация сверхширокополосного хаоса в дециметровом диапазоне // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54, № 7. С. 709.
5. Заулин И.А., Пономаренко В.П. Динамические режимы и бифуркационные явления в нелинейных статических системах синхронизации // Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38, № 5. С. 889.
6. Пономаренко В.П., Заулин И.А. Динамика автогенератора, управляемого петлей частотной автоподстройки с инвертированной характеристикой дискриминатора // Радиотехника и электроника. 1997. Т. 42, № 7. С. 828.

7. Пономаренко В.П. Формирование сложных колебаний в автогенераторной системе с нелинейной цепью частотного управления // Радиотехника и электроника. 1999. Т.44, № 5. С. 565.
8. Пономаренко В.П., Матросов В.В. Самоорганизация временных структур в мультиравновесной автогенераторной системе с частотным управлением // Журнал технической физики. 1997. Т. 67, № 3. С. 1.
9. Пономаренко В.П., Матросов В.В. Сложная динамика автогенератора, управляемого петлей частотной автоподстройки с комбинированным дискриминатором // Радиотехника и электроника. 1997. Т. 42, № 9. С. 1125.
10. Матросов В.В., Шалфеев В.Д. Динамический хаос в фазовых системах: Учебное пособие. Издание второе, дополненное. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2009. 271 с.
11. Пономаренко В.П., Тихонов Е.А. Динамика автогенератора с частотно-фазовым управлением при инверсии характеристики частотного дискриминатора // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2003. Т. 11, № 6. С. 75.
12. Пономаренко В.П., Тихонов Е.А. Хаотическая и регулярная динамика автогенераторной системы с нелинейной петлей частотно-фазового управления // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49, № 2. С. 205.
13. Матросов В.В. Динамические свойства генератора с частотно-фазовым управлением // Известия вузов. Радиофизика. 2004. Т. 47, № 4. С. 334.
14. Матросов В.В. Моделирование динамики системы частотно-фазовой автоподстройки с фильтрами первого порядка // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Сер. «Математическое моделирование и управление». 2006. Вып. 2(31). С. 17.
15. Пономаренко В.П. Динамические режимы в моделях автогенераторных систем с частотным и частотно-фазовым управлением // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2007. Т. 15, № 3. С. 33.
16. Пономаренко В.П. Динамические режимы и нелинейные эффекты в автогенераторе с частотно-фазовым управлением // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2008. Т. 16, № 6. С. 18.
17. Каганов В.И. Системы автоматического регулирования в радиопередатчиках. М.: Связь, 1969. 232 с.
18. Заулин И.А., Пономаренко В.П. Анализ динамических процессов в статических системах синхронизации // Радиотехника и электроника. 1989. Т. 33, № 1. С. 106.
19. Заулин И.А., Пономаренко В.П. Синхронные и автоколебательные режимы в многоустойчивых системах с фазовым управлением // Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38, № 4. С. 732.
20. Пономаренко В.П., Шалфеев В.Д. Нелинейная система частотно-фазовой автоподстройки частоты с широкой полосой захвата // Известия вузов. Радиофизика. 1968. Т. 11, № 11. С. 1694.
21. Баутин Н.Н., Леонтович Е.А. Методы и приемы качественного исследования динамических систем на плоскости. М.: Наука, 1984.
22. Баутин Н.Н. Поведение динамических систем вблизи границ области устойчивости. М.: Наука, 1984.
23. Шильников Л.П., Шильников А.Л., Тураев Д.В., Чуа Л. Методы качественной

теории в нелинейной динамике. Часть 2. М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2009.

24. *Анищенко В.С.* Сложные колебания в простых системах. М.: Наука, 1990.
25. Динамика нелинейных систем. Программный комплекс для исследования нелинейных динамических систем с непрерывным временем: Учебно-методическая разработка / Сост. В.В. Матросов. Н. Новгород: ННГУ, 2002.
26. *Suykens J.A.K., Vanderwalle J.* Generation of n -double scrolls ($n = 1, 2, 3, 4, \dots$) // IEEE Transaction on circuits and systems-1: Fundamental theory and applications. 1993. Vol. 40, № 11. P. 861.
27. *Radwan A., Soliman A.M., Elwakil A.S.* 1-D digitally-controlled multiscroll chaos generator // International journal of bifurcation and chaos. 2007. Vol. 17, № 1. P. 227.

*НИИ Прикладной математики
и кибернетики, Н. Новгород*

Поступила в редакцию 19.07.2012

NONLINEAR EFFECTS IN AUTOOSCILLATORY SYSTEM WITH FREQUENCY-PHASE CONTROL

V. P. Ponomarenko

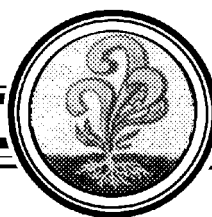
Dynamical modes and nonlinear phenomena in the models of oscillatory system with frequency-phase control in the case of periodic nonlinear characteristics of frequency discriminator are investigated. Stability of synchronous mode is analyzed. The existences of a great number various periodic and chaotic nonsynchronous modes are established. Peculiarities of the system dynamics caused by parameters of frequency control loop are considered. The results are presented in the form of one- and two-parameter bifurcation diagrams, phase portraits, Poincare sections and waveforms of attractors.

Keywords: Systems with phase and frequency-phase control, dynamical behavior, synchronous and nonsynchronous modes, stability, bifurcation, attractors, phase portraits, dynamical chaos.



Пономаренко Валерий Павлович – родился в Мурманске (1941), окончил Горьковский университет (1963). С 1968 года работает в Научно-исследовательском институте прикладной математики и кибернетики при Нижегородском университете (НИИ ПМК при ННГУ). Защитил диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук (1972) и доктора физико-математических наук (1993) в области теории синхронизации, теории колебаний и динамики систем. С 1991 года – заместитель директора НИИ ПМК при ННГУ. Область научных интересов – теория колебаний и волн, применение нелинейной динамики в радиоавтоматике синхронизация автоколебательных систем, математическое моделирование. Один из авторов монографий «Фазовая синхронизация» и «Системы фазовой синхронизации». Опубликовал много научных статей по направлениям, указанным выше.

603005 Н. Новгород, ул. Ульянова, 10
НИИ Прикладной математики и кибернетики
E-mail: povp@uic.nnov.ru



СЛУЧАЙНЫЕ РЕЗОНАТОРЫ

Ю. П. Блюх

Андерсоновская локализация электромагнитных волн проявляется в том, что амплитуда падающей на неупорядоченную среду волны экспоненциально убывает вглубь среды. Прозрачность слоя такой среды экспоненциально мала, если толщина слоя достаточно велика. Однако существует набор частот (резонансов), специфический для каждой реализации случайно-неоднородной среды, для которых среда почти прозрачна. Такие наборы частот являются «отпечатками пальцев» среды: каждая реализация характеризуется своим уникальным набором резонансов. Каждому резонансу соответствует случайно образованный в среде резонатор: случайно прозрачный участок среды («полость»), окруженный почти непрозрачными (благодаря локализации волны) «стенками». Такое взаимно-однозначное соответствие позволяет определить параметры среды и внутреннее пространственное распределение поля волны в данном экземпляре случайной среды по внешним измерениям характеристик резонансов.

Ключевые слова: Локализация волн, резонансы, дистанционное зондирование.

Введение

Распространение волн в случайно-неоднородной среде также носит случайный характер. При дистанционном зондировании такой среды измеряемыми величинами являются только коэффициенты отражения и, если это возможно, прохождения. В силу случайности этих величин, рассматриваются, как правило, только их статистические характеристики. Такие усредненные по ансамблю реализаций случайной среды характеристики не позволяют сказать что-либо о каждой конкретной реализации. Более того, если данная среда существует только в единственном экземпляре, оправданность применения статистических характеристик оказывается под большим вопросом. Например, при зондировании звуковыми волнами Земли (существует в единственном экземпляре!) усредненные характеристики ничего не говорят о ее структуре в данном месте.

Однако задача об определении каких-либо характеристик единичного экземпляра случайно-неоднородной среды не столь безнадежна, как это может показаться. Ниже будет показано, что анализ частотной зависимости коэффициентов отражения и прохождения волн при нормальном падении на слоистую случайную среду позволяет определить некоторые ее свойства.

1. Андерсоновская локализация

Разнообразная яркая окраска крыльев бабочек не связана с наличием «краски». Цвет отраженному свету придают сложные дифракционные решетки, расположенные на крыльях. Радужная окраска хитинового слоя насекомых возникает благодаря брэгговскому отражению от периодической системы слоев с разными показателями преломления. Но как достигается *зеркальное* отражение от чешуи рыбы? Ведь чешуя не покрыта металлом! Ответ на этот вопрос был найден более пятидесяти лет назад при... исследовании электронных волновых функций в слабонеупорядоченной кристаллической решетке. В своей работе [1] P.W. Anderson показал, что волновая функция электрона *локализована*, если степень беспорядка достаточно велика. Дефекты кристаллической решетки можно рассматривать как рассеивающие центры. Если количество и величина рассеивателей малы, то первоначально локализованная в пространстве волновая функция расплывается диффузионным образом. Но при некоторой степени беспорядка ситуация меняется радикально: диффузия полностью подавляется и волновой пакет остается локализованным в некоторой области, характерный размер которой называется *длиной локализации* ℓ_{loc} . В одномерном случае эффект локализации проявляется в зависимости проводимости от длины образца (провода). В диффузионном режиме проводимость σ обратно пропорциональна длине проволоки L : $\sigma \sim 1/L$. В режиме локализации проводимость падает *экспоненциально быстро* с ростом длины: $\sigma \sim \exp(-L/\ell_{loc})$.

За работы по физике неупорядоченных систем P.W. Anderson, J. van Vleck и N.F. Mott были удостоены Нобелевской премии в 1977 году. А в год пятидесятилетия выхода статьи [1] в Кембридже, Париже, Дрездене и других городах и странах была проведена *непрерывная* полугодовая конференция, на которой рассматривались всевозможные проявления андерсоновской локализации (с кратким обзором 50-летнего развития этой области можно ознакомиться в статье [2]).

Локализация не является исключительным свойством электронной волновой функции, это явление свойственно волнам любой природы, распространяющимся в неоднородной среде. Локализацию световых волн легко наблюдать в домашних условиях. Стопка «прозрачек» отражает свет как зеркало, несмотря на то, что каждая из них прозрачна [3]. Дело в том, что между листами «прозрачек» в стопке остаются воздушные промежутки, толщина которых случайна. Многократные отражения от неупорядоченно расположенных границ раздела сред с разными показателями преломления (рассеивателей) приводят к локализации света, и прозрачность всей стопки, как и проводимость проволоки в предыдущем примере, становится экспоненциально малой. В силу малости потерь в материале «прозрачки» малость коэффициента прохождения означает, что коэффициент отражения близок к единице. Отметим, что стопка «прозрачек» отражает белый свет. Если бы слои воздуха и листы «прозрачек» были расположены строго периодически, отраженный свет был бы окрашен: брэгговское отражение выделяло бы интенсивность света на некоторых частотах.

Теперь можно вернуться к рыбьей чешуе. Она отражает белый свет как зеркало, потому что состоит из *нерегулярной*, случайной последовательности прозрачных слоев с разной диэлектрической проницаемостью [4, 5].

Локализация волны, падающей на нерегулярную среду, проявляется в экспоненциальном убывании ее амплитуды $\psi(x)$ вглубь среды: $\psi(x) \sim \exp(-x/\ell_{\text{loc}})$. Падение амплитуды не связано с диссипацией, а обусловлено интерференцией отраженных от неоднородностей волн. Если толщина среды конечна и намного превосходит длину локализации, то коэффициент прохождения волны через среду экспоненциально мал. Это утверждение, однако, справедливо только для *усредненного* по многим реализациям (или частотам в некотором узком диапазоне) коэффициента прохождения. Если же посмотреть на частотную зависимость коэффициента прохождения через данную среду, то окажется, что наряду с экспоненциально малыми значениями коэффициент прохождения на некоторых частотах аномально высок и может достигать единицы. Частотная ширина пиков коэффициента прохождения мала и их вклад в усредненное по частотам значение коэффициента прохождения мал. Однако именно эти пики – резонансы – содержат информацию о каждом *конкретном* образце случайной среды. Каждый набор резонансов является «отпечатками пальцев» данной конкретной среды. Анализ коэффициентов прохождения и отражения вблизи резонансов позволяет восстановить с некоторой степенью достоверности как характеристики среды, так и распределение интенсивности падающей волны внутри образца, которое для резонансных частот сильно отличается от усредненной, экспоненциально убывающей.

2. Резонансы и резонаторы

Восстановление параметров среды и распределения полей волн в ней по характеристикам резонансов представляет собой задачу о черном ящике. Зная отклик черного ящика (коэффициентов прохождения и отражения) на внешнее воздействие (падающая волна), надо определить его внутреннее устройство. Для этого нужно знать набор элементов, которые могут содержаться в черном ящике. Оказывается, что в рассматриваемом случае случайно-неоднородной среды этот набор крайне прост: это резонаторы с различными собственными частотами и добротностями. Резонаторы могут быть связаны между собой. В этом случае следует добавить в набор элементов и коэффициенты связи. Правда, резонаторы эти необычные.

Чтобы понять, как устроены «резонаторы», рассмотрим одномерную задачу о распространении волны в слоисто-неоднородной случайной среде. Пусть коэффициенты отражения R от границ между слоями малы, $R \ll 1$. В этом случае отраженную волну можно представить в виде суммы волн, однократно отразившихся от границ разделов – рассеивателей. Эффект локализации состоит в том, что отраженные волны складываются в фазе и, если число рассеивателей велико, амплитуда отраженной волны достигает величины амплитуды падающей волны, то есть коэффициент отражения стремится к единице, а коэффициент прохождения – к нулю. Отражение от случайно расположенных рассеивателей аналогично брэгговскому отражению от регулярной периодической системы рассеивателей. Поскольку в случайной среде для каждой волны с волновым вектором k всегда найдется $2k$ -гармоника пространственного спектра Фурье расположения рассеивателей, то амплитуда волны будет экспоненциально убывать вглубь среды. Но, в силу случайности расположения рассеивателей, есть конечная вероятность того, что в некоторой области $2k$ -гармоника

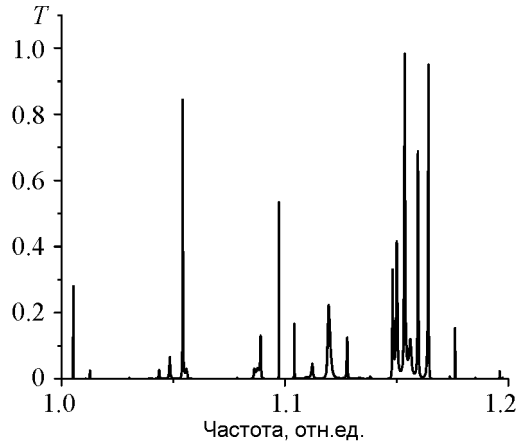


Рис. 1. Коэффициент прохождения T как функция частоты падающей волны



Рис. 2. Распределение интенсивности волны в среде для трех разных частот. Средняя частота соответствует резонансу, боковые частоты соответствуют «типичному», нерезонансному случаю

ной частоте – это и есть резонанс, о котором шла речь в предыдущем разделе. Как и в случае обычного резонатора, амплитуда поля в случайном резонаторе намного превышает амплитуду падающей волны, если ее частота совпадает с собственной частотой резонатора.

Приведенные качественные соображения подтверждаются результатами численного моделирования. На рис. 1 приведен пример спектра коэффициента прохождения через слоисто-неоднородную среду. На рис. 2 изображено пространственное распределение интенсивности поля волны внутри среды для трех близких частот. Средняя частота соответствует одному из резонансов, изображенных на рис. 1. Отчетливо видна сильная концентрация интенсивности волны в случайном резонаторе. Разделим этот экземпляр среды на три сегмента, средний из которых соответствует месту концентрации энергии. Распределение интенсивностей волн с резонансной частотой, падающих на каждый из этих отдельных сегментов, приведено на рис. 3. Видно, что в среднем сегменте поле практически однородно и коэффициент прохождения через этот сегмент близок к единице: это «полость» резонатора. В крайних же сегментах поле спадает экспоненциально от границы и коэффициенты прохождения для этих участков малы: это «стенки» резонатора.

Расположение резонаторов внутри среды и их собственные частоты (резонансы) можно определить, если известна структура среды. Решение этой *прямой* задачи выходит за рамки данной статьи. Отметим только, что специфический простран-

в *локальном* пространственном спектре рассеивателей подавлена или даже равна нулю. Такой участок среды будет прозрачен для волны с волновым вектором k . Вокруг этого участка величина $2k$ -гармоники является типичной для данной степени беспорядка и коэффициенты отражения от участков слева и справа от прозрачной области велики.

Случайно прозрачная область среды, окруженная «типичными» отражающими участками – «стенками» – вместе образуют резонатор. Это полная аналогия резонатора с брэгговскими зеркалами. Особенность его в том, что для разных частот такой резонатор может образоваться в разных областях случайной среды.

Если частота падающей волны совпадает с собственной частотой случайно образовавшегося резонатора внутри среды конечной длины, то коэффициент прохождения для такой волны будет аномально высок за счет резонансного туннелирования. В частотном спектре коэффициента прохождения возникнет резкий пик на резонансной

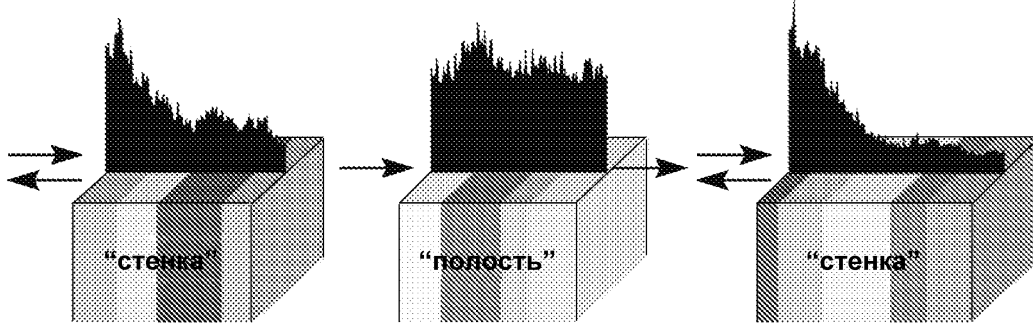


Рис. 3. Распределение интенсивностей волн с резонансной частотой, падающих на каждый из сегментов случайной среды.

ственный оконный фурье-анализ, предложенный в [6], позволяет точно указать расположение резонаторов, собственные частоты которых находятся в заданном интервале, для каждой конкретной реализации случайной среды.

3. Восстановление параметров резонатора по внешним измерениям

Таким образом, каждому резонансному максимуму коэффициента прохождения (минимуму коэффициента отражения) можно сопоставить некоторый резонатор. Если среда достаточно длинная, то в ней возможно случайное образование двух или более резонаторов с близкими частотами. Резонаторы связаны взаимопроницающими полями через полупрозрачные стенки. Через цепочку связанных случайных резонаторов волна может проникать далеко вглубь неупорядоченной среды. Такие связанные состояния, получившие название *necklace states* [7, 8], будут рассмотрены позже, а здесь предполагаем, что наблюдаемые резонансы обязаны своим происхождением единичным резонаторам.

Единственным пространственным масштабом, характеризующим локализацию волн в случайной среде, является длина локализации ℓ_{loc} . Поэтому естественно предположить, что характерный размер полости случайного резонатора совпадает с длиной локализации. Стенки резонатора образованы «типичными» областями среды, в которых амплитуда волны ψ убывает экспоненциально: $\psi(z) \simeq \psi(0) \exp(-z/\ell_{\text{loc}})$, где $\psi(0)$ – амплитуда на границе стенки и координата z отсчитывается от границы. Теперь можно связать коэффициенты прохождения T_1 и T_2 через стенки резонатора с его положением внутри среды

$$T_1 \simeq \exp(-2x_r/\ell_{\text{loc}}), \quad T_2 \simeq \exp[-2(L - x_r)/\ell_{\text{loc}}], \quad (1)$$

где L – толщина слоя среды и x_r – координата положения резонатора. Чтобы не усложнять запись, здесь пренебрегаем размером полости резонатора $\ell_{\text{res}} \sim \ell_{\text{loc}}$ по сравнению с толщиной $L \gg \ell_{\text{loc}}$.

Будем характеризовать диссипативные свойства среды пространственным декрементом Γ , описывающим экспоненциальное убывание интенсивности волны I по мере ее распространения: $I(x) \sim \exp(-\Gamma x)$. Закон сохранения энергии связывает коэффициенты отражения и прохождения с нормированной на поток энергии в падающей волне величиной диссипативных потерь I_{loss}

$$1 - T - R = I_{\text{loss}} = \Gamma \int_0^L \frac{v_g}{v_{g0}} I(x, \omega) \varepsilon(x) dx, \quad (2)$$

где ω – частота падающей волны, v_g и v_{g0} – групповые скорости волн вне и внутри среды, соответственно, $\varepsilon(x)$ – диэлектрическая проницаемость среды, которая предполагается бездисперсной в исследуемом диапазоне частот, $I(x, \omega)$ – нормированная интенсивность волны в среде. Далее считаем, что $v_{g0} = c$ и $v_g = c/\sqrt{\varepsilon}$. Если частота волны совпадает с частотой одного из резонансов, то энергия волны сосредоточена, в основном, в соответствующем резонаторе и интеграл в правой части (2) можно оценить как $I_{\text{loss}} \simeq I_{\text{res}} \Gamma \ell_{\text{res}} \sqrt{\bar{\varepsilon}}$, где $\bar{\varepsilon}$ – среднее значение ε и I_{res} – интенсивность поля в резонаторе.

Теперь можно связать такие *измеряемые* величины, как резонансный коэффициент прохождения T_{res} , коэффициент отражения R_{res} и спектральную ширину резонансной линии $\delta\omega$ с приведенными выше параметрами резонатора

$$T_{\text{res}} = \frac{4T_1 T_2}{(\Gamma \ell_{\text{res}} \sqrt{\bar{\varepsilon}} + T_1 + T_2)^2}, \quad (3)$$

$$R_{\text{res}} = 1 - T_{\text{res}} - \Gamma \ell_{\text{res}} \sqrt{\bar{\varepsilon}} T_{\text{res}} / T_2, \quad (4)$$

$$\delta\omega = \frac{c}{4\pi \ell_{\text{res}} \bar{\varepsilon}} (\Gamma \ell_{\text{res}} \sqrt{\bar{\varepsilon}} + T_1 + T_2). \quad (5)$$

Здесь учтено, что интенсивность I_{res} поля внутри резонатора определяется отношением T_{res}/T_2 , где T_2 – прозрачность дальней от источника волны стенки резонатора

$$I_{\text{res}} = T_{\text{res}}/T_2. \quad (6)$$

Типичный коэффициент прохождения для нерезонансной частоты определяется выражением

$$T_{\text{typ}} = \exp(-2L/\ell_{\text{loc}}), \quad (7)$$

а закон сохранения энергии записывается как

$$1 - T_{\text{typ}} - R_{\text{typ}} = \Gamma \ell_{\text{loc}} \sqrt{\bar{\varepsilon}}. \quad (8)$$

Здесь предполагается, что диссипация в среде достаточно слабая, $\Gamma \ell_{\text{loc}} \ll 1$, так что экспоненциальное убывание поля внутрь среды обусловлено, в основном, эффектом локализации, а не диссипацией. В противном случае локализация себя практически не проявляет, резонансы подавлены и вводить понятие резонатора не имеет смысла.

Уравнения (1)–(8) связывают измеряемые (в принципе) величины T_{res} , R_{res} , $\delta\omega$, T_{typ} и R_{typ} с неизвестными параметрами среды ℓ_{loc} , $\bar{\varepsilon}$, Γ местом локализации x_r волны и ее интенсивностью I_{res} в этом месте. Однако далеко не всегда можно получить данные о перечисленных измеряемых величинах. Например, типичный коэффициент прохождения $T_{\text{typ}} \ll 1$ может быть столь малым, что приборные шумы делают измерение его невозможным. В ряде случаев недоступны измерения характеристик волны, прошедшей сквозь среду. Для полубесконечной среды измеряемыми могут быть только характеристики отраженной волны. Поэтому внешние измерения позволяют восстановить какие-то характеристики среды и распределение поля в ней, а какие-то могут оставаться неизвестными.

Если среда занимает все полупространство или же ее толщина очень велика, то $T_2 \rightarrow 0$ и $R = 1$ (без диссипации) для всех частот, то есть внешние измерения ничего не говорят о параметрах среды и распределении поля волны в ней. Но наличие диссипации позволяет (с помощью уравнений (4), (5) и (7)) получить некоторую нетривиальную информацию.

4. Экспериментальные исследования резонансов

Экспериментальные проверки изложенной выше теоретической модели проводились в различных диапазонах частот и с разными квазиодномерными средами. В работах [9, 10] одномодовый волновод, заполненный случайной последовательностью диэлектрических вставок, использовался в качестве одномерной слоистой среды. Измерения проводились в диапазоне 14–16 ГГц. В работе [11] стопка случайно расположенных диэлектрических пластин просвечивалась электромагнитными волнами с частотами в диапазоне 75–110 ГГц. В работе [6] исследовалась локализация волн светового диапазона (длина волны примерно 1535 нм) в одномодовом оптическом волокне со случайно расположенными рассеивателями в виде отрезков брэгговских решеток. В разных экспериментах были доступны для измерения различные характеристики. Так, например, в работах [9, 10] измерялись характеристики отраженного сигнала и распределение интенсивности внутри волновода, а уровень экспериментальных шумов делал невозможными измерения выходного сигнала. В работах [6, 11] измерялись характеристики отраженного и прошедшего сигналов, а распределение интенсивности внутри образца экспериментально не исследовалось.

На рис. 4 приведен пример экспериментального измерения распределения интенсивности внутри случайной среды и коэффициента отражения R [9]. В условиях эксперимента $T_2 \simeq 0$, как и в полубесконечной среде, и приведенная выше модель использовалась для определения положения мест локализации поля – координат x_r «резонаторов» и оценки интенсивностей I_{res} полей в них. Измерения распределений полей внутри образца позволило сравнить результаты эксперимента с вычисленными величинами (табл. 1 [9]).

Целью работы [11] было определение среднего коэффициента диссипации (тангенса угла потерь) случайной среды. Результаты анализа характеристик ряда резонансов и вычисленные значения тангенса угла потерь $\tan \alpha$ приведены в табл. 2. Среднее значение тангенса угла потерь, определенное по пяти резонансам, составляет $8.35 \cdot 10^{-4}$, тогда как истинное его значение в ма-

Таблица 1
Вычисленные и измеренные значения координат и величин максимумов интенсивности поля [9]

	$x_r(\text{см})$	I_{res}
Теория	4.0, 4.8, 3.6	190, 150, 123
Эксперимент	4.2, 5.5, 3.6	86, 201, 96

Таблица 2

Измеренные и вычисленные по пяти резонансам параметры среды [11]

Частота (ГГц)	$1 - R$	T	δf (ГГц)	$\Gamma/\sqrt{\epsilon} \cdot 10^2$	$\tan \alpha \cdot 10^4$
$f_1 = 83.5$	0.978	0.75	0.40	0.83	4.77
$f_2 = 92.0$	0.998	0.33	0.39	2.6	13.45
$f_3 = 105.7$	0.993	0.31	0.34	2.25	10.14
$f_4 = 101.8$	0.87	0.18	0.25	1.33	6.22
$f_5 = 99.8$	0.77	0.30	0.45	1.5	7.16

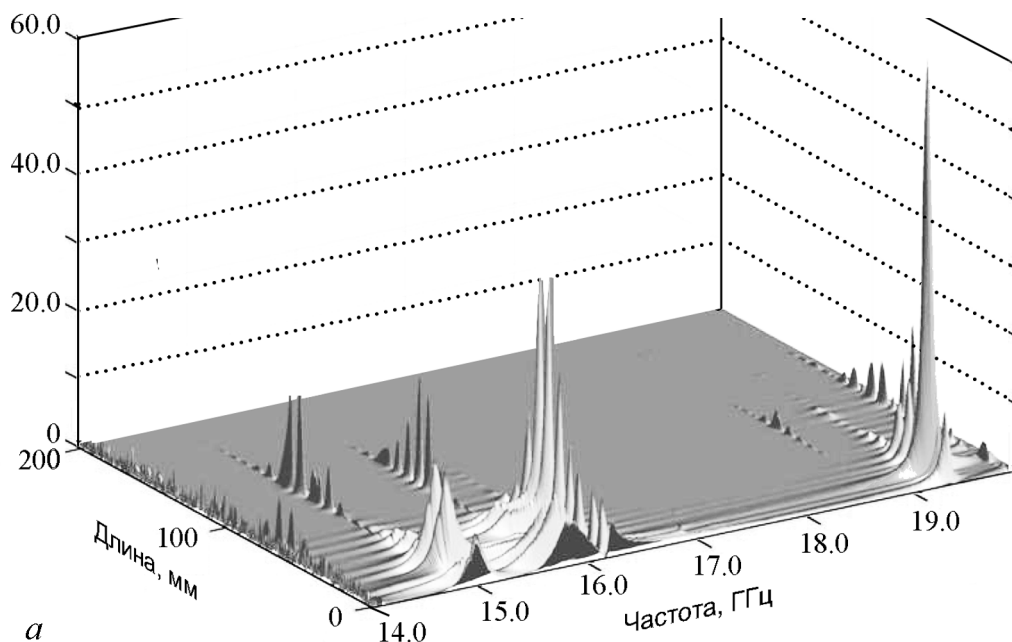
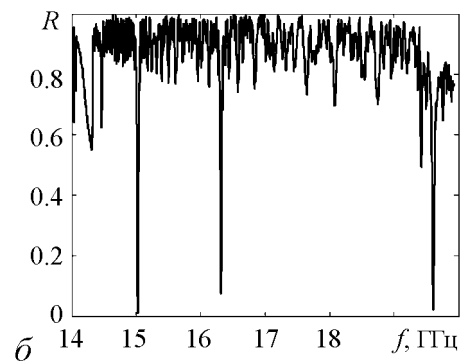


Рис. 4. Пример распределения интенсивности поля волны внутри случайной среды для частот в диапазоне 14–16 ГГц (а). Отчетливо видно, что для некоторых частот проникновение волны вглубь образца аномально велико, интенсивность ее локализована в некоторых областях среды (в «случайных резонаторах») и намного превышает интенсивность падающей волны. Соответственно, на этих резонансных частотах резко возрастает диссипация энергии волны, что проявляется в появлении узких линий поглощения в спектре коэффициента отражения. Соответствующая зависимость $R(f)$ приведена на рис. б [9]



териале образца равно $5.2 \cdot 10^{-4}$. Важно отметить, что именно случайная неоднородность среды сделала возможным измерение такой малой величины потерь без использования какой-либо специальной аппаратуры. Для однородного экземпляра отклонение суммы коэффициентов отражения и прохождения от единицы (I_{loss} в уравнении (2)) было бы меньше доступного для измерения уровня.

Вероятность образования в случайной среде двух и более резонаторов с близкими частотами (necklase states) мала. Можно, однако, подстроить частоту одного из случайных резонаторов так, чтобы она совпала с частотой другого резонатора. В работе [10] это было сделано следующим образом. Стопка заполняющих одномерный волновод диэлектрических пластин разделялась на две части так, что раздел приходился на область локализации поля волны выбранного резонанса с частотой ω_{r1} . Затем обе части стопки раздвигались. Дистанция d между стопками менялась с шагом 0.5 мм. При этом изменялась и частота $\omega_{r1}(d)$ выбранного резонанса, тогда как частоты ω_{ri} других резонансов оставались неизменными до тех пор, пока

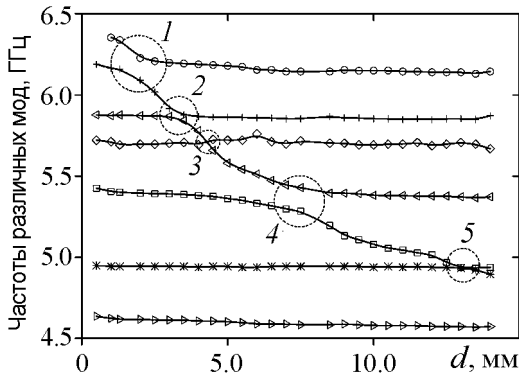


Рис. 5. Зависимость резонансных частот от расстояния d между двумя частями стопки диэлектрических пластин. В области 3 частоты пересекаются, а в остальных областях – расталкиваются [10]

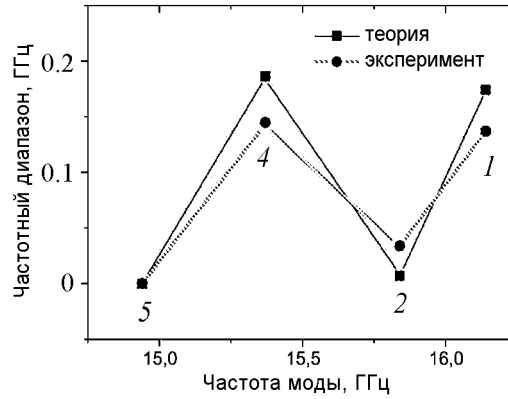


Рис. 6. Теоретические и экспериментальные значения минимального расстояния между частотами резонансов в областях, отмеченных соответствующими цифрами на рис. 5 [10]

перестраиваемая частота $\omega_{r1}(d)$ не оказывалась близко к одной из частот ω_{ri} . В зависимости от соотношения между коэффициентами связи резонаторов и их добротностями, при сближении частот наблюдалось либо их расталкивание, либо пересечение (рис. 5). Добротности резонаторов определялись экспериментально по спектральной ширине резонансов, а коэффициенты связи q – по расстоянию $d_{1,i}$ между резонаторами: $q_{1,i} = \exp(-|x_{r1} - x_{ri}|/\ell_{loc})$. Описанная выше модель может быть расширена очевидным образом на случай двух связанных резонаторов. Такая модель позволяет определить минимальное расстояние $\Delta\omega$ между частотами связанных резонаторов. На рис. 6 представлен результат сравнения теории и описанного эксперимента.

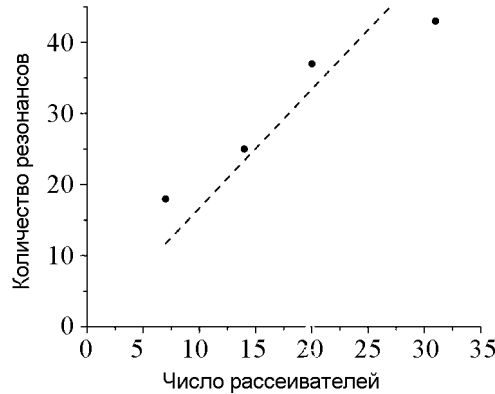


Рис. 7. Количество резонансов N_{res} в оптическом волокне со случайно расположенными рассеивателями (брэгговскими решетками). Пунктирная прямая – теоретическая зависимость N_{res} от числа решеток, точки – результаты экспериментов. [6]

Если случайная среда активная, то есть характеризуется отрицательным коэффициентом $\Gamma < 0$, то каждое резонансное состояние может стать источником когерентного излучения. Такая среда является случайным лазером (Random laser) [12]. Такой случайный лазер генерирует одновременно много частот, количество которых N_{las} меньше числа резонансов N_{res} , но пропорционально ему. В работе [6] резонаторная модель резонансов случайной среды была использована для вычисления числа резонансов в заданном частотном диапазоне. Результат сравнения вычисленного значения N_{res} с числом экспериментально обнаруженных резонансов в оптическом волокне с различным числом случайно расположенных рассеивателей (брэгговских решеток) представлен на рис. 7.

5. Локализация в нелинейной среде

Резонансы, обусловленные андерсоновской локализацией, сопровождаются сильным возрастанием амплитуды поля волны в области «резонатора», поэтому даже слабая нелинейность среды может существенно сказаться на пропускании волны. Как и в обычных резонаторах, резонансная частота может зависеть от амплитуды падающей волны, возможно появление гистерезиса при последовательном росте и убывании амплитуды падающей волны и т.д. Отметим, что в среде с малой нелинейностью все эти эффекты проявляются только при наличии неоднородностей, однородная же среда остается квазилинейной.

В работе [13] численно исследовалась слоистая случайно-неоднородная среда с керровской нелинейностью. Обобщение резонаторной модели на нелинейную среду проводилось следующим образом. В линейной среде форма спектра прохождения $T(\omega)$ вблизи резонансной частоты ω_{r0} имеет вид лоренциана

$$T(\omega) = \frac{T_{\text{res}}}{1 + [2Q(\omega/\omega_{r0} - 1)]^2}, \quad (9)$$

где $T_{\text{res}} = T(\omega_{r0})$ и Q – добротность резонатора. Нелинейность среды, приводящая к зависимости резонансной частоты ω_r от интенсивности волны, проявляется в первую очередь внутри резонатора, но для дальнейшего удобно характеризовать сдвиг резонансной частоты ее зависимостью от интенсивности I_{out} прошедшей волны

$$\omega_r(I_{\text{out}}) = \omega_{r0} + \chi I_{\text{out}}, \quad (10)$$

где $\chi = d\omega_r/dI_{\text{out}}|_{I_{\text{out}}=0}$ – керровский коэффициент. Теперь спектр (9) можно обобщить на случай нелинейной среды

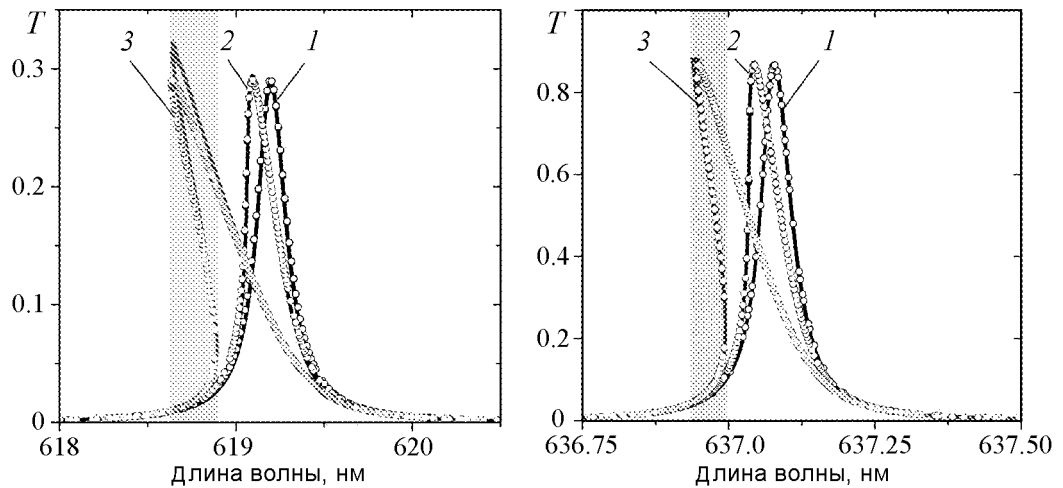


Рис. 8. Зависимости коэффициентов прохождения через случайно-неоднородную нелинейную среду от длины волны (от частоты) вблизи двух резонансов при различных интенсивностях падающей волны. Точки – результаты численного эксперимента, сплошные линии – зависимости (11) [13]

$$T(\omega, I_{\text{out}}) \equiv \frac{I_{\text{out}}}{I_{\text{in}}} = \frac{T_{\text{res}}}{1 + [AI_{\text{out}} + \delta]^2}. \quad (11)$$

Здесь

$$A = 2Q \left. \frac{d \ln \omega_r}{dI_{\text{out}}} \right|_{I_{\text{out}}=0}, \quad \delta = 2Q \left(1 - \frac{\omega}{\omega_{r0}} \right). \quad (12)$$

Параметры резонатора (прозрачности стенок T_1 и T_2 , добротность Q , резонансная частота ω_{r0}), сопоставляемого резонансу в неоднородной среде, определяются внешними измерениями, как это было показано выше. Параметр A определяется по смещению резонансной частоты при изменении интенсивности падающей волны, для чего достаточно сравнить спектры прохождения для двух разных значений интенсивности. Описанная процедура была проведена на численном эксперименте со средой, состоящей из 19 слоев диэлектриков с разными показателями преломления и случайными толщинами. Сравнение зависимости $T(\omega)$ (11) с определенными по внешним измерениям параметрами T_{res} , A и ω_{r0} с результатами численного решения задачи о прохождении волны через случайную среду представлено на рис. 8.

6. Обсуждение результатов

Приведенные в таблицах 1 и 2 данные демонстрируют довольно грубое совпадение экспериментальных результатов с вычисленными с помощью резонаторной модели характеристиками среды и распределением поля падающей волны в ней. Более точное согласие теории с экспериментом демонстрируют рис. 6 и рис. 7, и совсем хорошее согласие теории с результатами численного эксперимента представлено на рис. 8. Однако, несмотря на наличие в ряде случаев довольно большого (но не на порядок величины!) отклонения восстановленных по внешним измерениям внутренних характеристик среды, можно утверждать, что простая резонаторная модель является адекватным описанием резонансов, возникающих при андерсоновской локализации волн в случайной среде. Следует подчеркнуть, что во всех экспериментах среда представляла собой несколько десятков случайно перемешанных диэлектрических слоев, то есть число параметров среды, необходимых для ее *точного* описания было порядка 10^2 . Более того, зачастую точные параметры невозможно контролировать с достаточной точностью. Так, например, в экспериментах с оптическим волокном для *точного* описания среды необходимо определение положения рассеивателей с точностью до долей длины волны $\lambda \simeq 1535$ нм. Поскольку андерсоновская локализация есть результат интерференции многих волн, отраженных от большого числа случайно расположенных рассеивателей (границы раздела слоев, брэгговские решетки и т.п), то ошибка в определении положений рассеивателей даже на величину, много меньшую длины волны, приводит к полной потере информации. Поэтому эффективность резонаторной модели, содержащей всего *пять* параметров (величина собственной частоты резонатора не играет никакой роли) – прозрачности стенок резонатора T_1 и T_2 , коэффициент диссипации среды Γ , среднее значение диэлектрической проницаемости (часто известно а priori), длина локализации ℓ_{loc} (и коэффициент керровской нелинейности χ , если среда нелинейна) – можно считать удивительно высокой.

Я благодарен редакции журнала за приглашение принять участие в подготовке этого выпуска. Изложенные в статье идеи и результаты были получены совместно с коллегами из Украины, Израиля, США, Франции, Мексики, Австралии и Японии. Я благодарен им всем за приятное и плодотворное сотрудничество.

Библиографический список

1. *Anderson P.W.* Absence of diffusion in certain random lattices // *Phys. Rev.* 1958. Vol. 109. P. 1492.
2. *Lagendijk A., van Tiggelen B., Wiersma D.S.* Fifty years of Anderson localization // *Phys. Today*, 24-29, August 2009.
3. *Berry M.V., Klein S.* Transparent mirrors: rays, waves and localization // *Eur. J. Phys.* 1997. Vol. 18. P. 222.
4. *McKenzie D.R., Yin Y., McFall W.D.* Silvery fish skin as an example of a chaotic reflector // *Proc. R. Soc. Lond. A.* 1997. Vol. 451. P. 579.
5. *Parker A.R.* A geological history of reflecting optics // *J. R. Soc. Interface* 2005. Vol. 2. P. 1.
6. *Bliokh Y., Chaikina E.I., Lizárraga N., Freilikher V., Méndez E., Nori F.* Disorder-induced cavities, resonances, and lasing in randomly-layered media // *Phys. Rev. B.* 2012. Vol. 86. 054204.
7. *Луфшиц И.М., Курпиченков В.Я.* О туннельной прозрачности неупорядоченных систем // *ЖЭТФ.* 1979. Т. 77. P. 989. [*Sov. Phys. JETP* **50**, 499 (1979)].
8. *Pendry J.* Quasi-extended electron states in strongly disordered systems // *J. Phys. C.* 1987. Vol. 20. P. 733.
9. *Bliokh K.Y., Bliokh Y., Freilikher V., Genack A., Hu B., Sebbah P.* Localized modes in open one-dimensional dissipative random systems // *Phys. Rev. Lett.* 2006. Vol. 97. 2439094.
10. *Bliokh K.Y., Bliokh Y., Freilikher V., Genack A., Sebbah P.* Coupling and level repulsion in the localized regime: from isolated to quasi-extended modes // *Phys. Rev. Lett.* 2008. Vol. 101. 133901.
11. *Scales J.A., Carr L.D., McIntosh D.B., Freilikher V., Bliokh Y.P.* 9 Millimeter wave localization: Slow light and enhanced absorption in random dielectric media // *Phys. Rev. B* 2007. Vol. 76. 085118.
12. *Cao H.* Lasing in random media // *Waves in Random Media.* 2003. Vol. 13. R1; *Cao H.* Review on latest developments in random lasers with coherent feedback // *J. Phys. A.* 2005. Vol. 38, 10497; *Wiersma D.S.* The physics and applications of random lasers // *Nature Phys.* 2008. Vol. 4. P. 359.
13. *Shadrivov I., Bliokh K., Bliokh Y., Freilikher V., Kivshar Y.* Bistability of Anderson localized states in nonlinear random media // *Phys. Rev. Lett.* 2010. Vol. 104. 123902.

Израильский технологический институт, Хайфа, Израиль

Поступила в редакцию 17.07.2012

ACCIDENTAL RESONATORS

Y. P. Bliokh

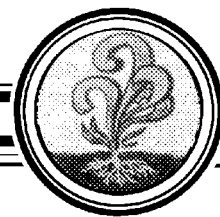
Anderson localization of electromagnetic waves incident on a disordered medium manifests itself in exponential decrease of the wave amplitude inwards the medium. Transparency of the medium is exponentially small if the medium thickness is large enough. However, there is a set of frequencies (resonances), specific for every random realization of the disordered medium, for which the medium is almost transparent. These sets are «fingerprints» of the media: every realization is characterized by its own unique set of resonances. Any resonance is associated with accidentally formed resonator: accidentally transparent region («cavity») surrounded by almost non-transparent (due to the wave localization) «walls». This unambiguous correspondence allows determination of the medium parameters and the wave amplitude distribution within the given sample of randomly disordered medium using externally measured characteristics of the resonances.

Keywords: Wave localization, resonances, remote sensing.



Блиох Юрий Павлович – родился в Харькове (1946), окончил Харьковский государственный университет (1970). С 1970 по 2000 год работал в Харьковском физико-техническом институте. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в ХГУ (1977) и доктора физико-математических наук в ХФТИ (1987). В 2000 году эмигрировал в Израиль, где работает старшим научным сотрудником физического факультета Техниона (Хайфа). Область научных интересов – волновые явления в разных средах.

32000 Израиль, Хайфа
Израильский технологический институт «Технион»
E-mail: bliokh@physics.technion.ac.il



ДВУХВОЛНОВЫЙ ГИРОТРОН НА МОДАХ ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ НЕРЕГУЛЯРНОГО ВОЛНОВОДА

А. А. Кураев, С. В. Колосов, А. В. Сенько

Изложена трехмерная теория возбуждения электронным потоком продольно нерегулярного волновода с учетом конечной проводимости его стенок и приведены конечные рабочие формулы для использования в самосогласованных математических моделях гиротронов, пениотронов, релятивистских ЛБВ и ЛОВ.

Рассмотрены возможности повышения эффективности работы миллиметрового гиротрона при многомодовом взаимодействии полей волн шепчущей галереи с релятивистским спирализованным электронным потоком. Показано, что двухмодовый гиротрон по сравнению с одномодовым позволяет повысить КПД с 40 до 45%.

Ключевые слова: Нерегулярный волновод, многомодовый режим, гиротрон.

Предисловие

В далеком теперь 1960 году Дмитрий Иванович Трубецков, Николай Иванович Сеницын и я (А.А. Кураев) после окончания СГУ поступили на очное отделение аспирантуры кафедры электроники. Нашим научным руководителем и учителем стал заведующий кафедрой электроники Владимир Николаевич Шевчик – один из ведущих ученых страны в области электроники СВЧ. Нам повезло: Владимир Николаевич был (к сожалению, был!) не только выдающимся ученым, но и обладал редким природным даром научного наставника и воспитателя. Одним из его принципов было предоставление полной свободы научного поиска, необходимого условия для формирования самостоятельного научного мышления. А достаточное условие – направляющая рука научного руководителя, обсуждения, дискуссии, а нередко – споры. И не только это. Мы трое учились в одной группе, за пять лет крепко сдружились (на всю жизнь, как показало время), понимали друг друга прекрасно и, конечно, входили в научные поиски друг друга очень подробно.

И вот теперь подходим к причинам появления предлагаемой читателям статьи. В 1962 году после очередного моего доклада на научном семинаре кафедры ко мне подошел Николай Иванович Сеницын и поделился мечтой: «А вот когда-нибудь

теория и методы электроники СВЧ достигнут такого уровня, что можно, задавая произвольный физический профиль электродинамической системы прибора и варьируя его, точно рассчитать и оптимизировать выходные характеристики прибора?». Эта идея Н.И. Синицына захватила меня и стала основным направлением моих работ и работ моих сотрудников.

Развитие этого направления дало плоды лишь в 1974–79 годах в отношении гирорезонансных приборов частных видов (осесимметричные поля). Теперь это – 3D-модели и методы для многих типов приборов. В предлагаемой статье даны основы этих методов и их приложение к конкретной задаче, означенной в названии статьи.

Введение

Современный этап развития электронных приборов СВЧ характеризуется широким использованием строгих математических методов исследования, привлечением к исследованию физики процессов взаимодействия в приборах методов оптимального управления. В сущности, теория и оптимизация электронных приборов СВЧ взаимосвязаны: наибольший интерес представляют исследования именно оптимальных процессов в оптимальных системах; с другой стороны – глубокое исследование физики процессов в заданных системах и режимах на основе достаточно полных математических моделей позволяет осуществить поиск новых эффективных механизмов усиления и генерации СВЧ-колебаний электронными потоками.

При использовании численных методов возникает вопрос о степени соответствия математической модели реальному процессу взаимодействия в приборе, а также допустимой области параметров и режимов прибора. Учет большого количества факторов, влияющих на процесс взаимодействия, улучшает соответствие. Это особенно ощутимо при оптимизации. При достаточно точной математической формулировке реальный эксперимент может быть заменен компьютерным экспериментом.

Главными проблемами теории являются: создание трехмерных нелинейных моделей процессов взаимодействия, расчет и синтез электродинамических систем сложной конфигурации, учет взаимодействия релятивистских электронов (задача взаимодействия неравномерно движущихся релятивистских заряженных частиц до настоящего времени не имеет точного решения), организация процедуры поиска и оптимизации.

К настоящему времени в США созданы комплексы программ для использования при моделировании СВЧ-приборов: MAFIA (solutions of MAXwell's equations by the Finite Integration Algorithm), MWS (CST Microwave Studio), CHRISTINE, MICHELLE и др. Программа MAFIA реализует алгоритм конечно-разностного интегрирования уравнений Максвелла при заданных граничных условиях. Выполнение программы требует весьма трудоемких вычислений, а сходимость решения не всегда гарантирована. Основанная на ней программа MWS предназначена для расчета «холодных» (то есть без воздействия электронного пучка) характеристик электродинамических систем приборов СВЧ. Программа CHRISTINE реализует расчет нелинейных характеристик спиральных ЛБВ на основе дисковой модели электронного потока. Программа MICHELLE предназначена для расчета многоступенчатого коллектора. Может показаться, что совокупность этих программ решает все пробле-

мы моделирования приборов СВЧ. Однако это не так: некоторые программы имеют частный характер (например, CHRISTINE и MWS), но самое важное состоит в том, что все перечисленные программы требуют задания граничных условий первого или второго рода на всей граничной поверхности рассматриваемой области. А этого сделать нельзя на входном и выходном сечениях нерегулярного волновода, представляющего электродинамическую систему электронного прибора: модовый состав здесь определяется лишь после решения самосогласованной задачи возбуждения волновода электронным потоком. Тогда можно поставить парциальные условия излучения (граничные условия третьего рода) для каждой из возбужденных волн. Таким образом, перечисленные программы в свете изложенного могут быть использованы лишь для проверки полученного решения другими методами. Тем более, если это решение – следствие не только анализа, но и оптимизации профиля электродинамической системы, которая не может быть проведена с использованием упомянутых программ из-за чрезмерной вычислительной трудоемкости при их использовании.

Более предпочтительными представляются «интеллектуальные» методы, основанные на применении тех или иных процедур преобразования исходной краевой задачи, позволяющих редуцировать ее к более простой в вычислительном отношении.

Наиболее эффективным и строгим методом решения задач возбуждения нерегулярных электродинамических структур к настоящему времени представляется метод, основанный на использовании неортогональных координат в уравнениях Максвелла [1], что позволяет отобразить нерегулярную границу электродинамической структуры на регулярную и в преобразованной регулярной области использовать проекционный метод Галеркина с использованием априори известной полной системы векторных базисных функций для этой области. Этот метод предложен А.Г. Свешниковым [2] и затем развит в работах [3–7]. Его применение позволяет свести трехмерную исходную краевую задачу к одномерной (двухточечной) краевой задаче для амплитуд нормальных связанных волн нерегулярной электродинамической структуры. Эта задача формулируется в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) с граничными условиями третьего рода (условия излучения) в начальном и конечном сечениях электродинамической структуры. Таким образом, использование описываемого метода позволяет существенно снизить вычислительные затраты при решении исходной краевой задачи именно за счет сведения трехмерной задачи к одномерной.

1. Уравнения возбуждения нерегулярных волноводов с конечной проводимостью стенок

Теория возбуждения нерегулярных волноводов электронными потоками (в общем случае непрямолинейными) является основой моделирования и оптимизации широкого класса мощных электронных приборов сверхвысоких и крайне высоких частот (СВЧ и КВЧ) – релятивистских ламп бегущей и обратной волны (ЛБВ и ЛОВ), гирорезонансных приборов, убитронов и гиротонов. К настоящему времени общие основы трехмерной теории возбуждения продольно-нерегулярных волноводов разработаны [2–8], однако необходимо их развитие в двух направлениях:

а) поскольку интегралы возбуждения в имеющихся работах записаны лишь в общей форме, то для использования уравнений возбуждения в конкретных задачах интегралы необходимо взять с применением специальных процедур, так как многие из них не относятся к известным табличным;

б) в уравнениях возбуждения необходимо учесть конечную проводимость стенок, что особенно важно в КВЧ-диапазоне.

Обе задачи решаются в данном разделе.

2. Общая постановка и схема решения задачи возбуждения нерегулярного волновода

Рассмотрим задачу возбуждения однородно заполненного нерегулярного волновода, боковая поверхность которого S_b отличается от регулярной цилиндрической поверхности. Эта задача сводится к решению системы уравнений Максвелла

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mathbf{J}, \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \end{aligned} \quad (1)$$

с условиями излучения в начальном и конечном сечениях волновода и граничными условиями [9]

$$[\mathbf{n}, \mathbf{E}]|_{S_b} = \sqrt{\frac{\mu_\sigma}{\pi\sigma}} \int_0^t \frac{\partial [\mathbf{n}, [\mathbf{H}, \mathbf{n}]]|_{S_b}}{\partial \tilde{t}} \frac{d\tilde{t}}{\sqrt{t - \tilde{t}}}, \quad (2)$$

где σ – удельная проводимость стенок волновода, μ_σ – ее магнитная проницаемость, $\tilde{t} \in [0, t]$ – аргумент интеграла.

Плотность электрического тока \mathbf{J} определяется электронным потоком в приборе. Теория возбуждения нерегулярного волновода строится на основе метода преобразования координат. Для решения задачи введем криволинейную систему координат (r, φ, s) , связанную с геометрией волновода (r, φ – полярные координаты в плоскости поперечного сечения волновода), s – длина дуги оси волновода). Схема нерегулярного волновода приведена на рис. 1. Здесь $\mathbf{t} = \mathbf{r}'/|\mathbf{r}'|$ – единичный вектор касательной к оси волновода (штрих означает производную по s , $\mathbf{n} = \mathbf{r}''/|\mathbf{r}''| = (1/k)\mathbf{r}''$ – единичная нормаль к поверхности, $\mathbf{b} = \mathbf{t} \times \mathbf{n}$ – бинормаль к оси волновода. Эти три величины связаны с помощью формул Френа–Серре.

$$\mathbf{t}' = k\mathbf{n}, \quad \mathbf{n}' = -k\mathbf{t} + \tau\mathbf{b}, \quad \mathbf{b}' = -\tau\mathbf{n}, \quad (3)$$

где $k = 1/\rho_k = |\mathbf{r}''|$ – угловая скорость вращения касательной вокруг бинормали; ρ_k – радиус кривизны; $\tau(s) = 1/\rho_\tau = (1/k)\mathbf{r}'\mathbf{r}''\mathbf{r}'''$ – угловая скорость вращения бинормали вокруг касательной; ρ_τ – радиус кручения. Декартовы прямоугольные координаты произвольной

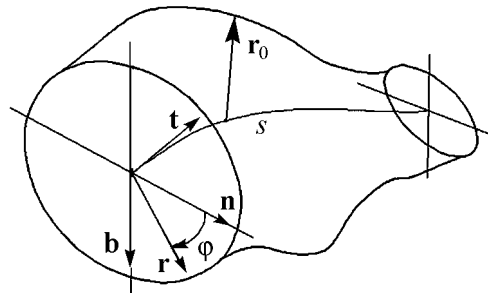


Рис. 1. Геометрия нерегулярного волновода

точки (x, y, z) внутри волновода связаны с введенными координатами (ρ, φ, s) соотношением

$$\mathbf{r}(\rho, \varphi, s) = \mathbf{R}(s) + \rho r_b(\varphi, s) \{ \mathbf{n}(s) \cos \varphi + \mathbf{b}(s) \sin \varphi \}, \quad (4)$$

где \mathbf{r} – радиус-вектор произвольной точки внутри волновода; $\mathbf{R}(s)$ – уравнение оси волновода в декартовой системе координат; $\mathbf{n}(s)$ и $\mathbf{b}(s)$ – единичные векторы главной нормали и бинормали оси волновода, определенные как функции ее длины,

$$\rho = r/r_b(\varphi, s), \quad (5)$$

где $r = r_b(\varphi, s)$ – уравнение контура поперечного сечения волновода в системе координат (r, φ, s) . Тогда в системе координат (ρ, φ, s) уравнение боковой поверхности рассматриваемого волновода принимает вид

$$\rho = 1. \quad (6)$$

В новой неортогональной системе координат выражение для первого уравнения Максвелла имеет вид

$$\begin{aligned} \hat{g}^{-1} \left\{ \left(\frac{\partial H'_s}{\partial \varphi} - \frac{\partial H'_\varphi}{\partial s} \right) \mathbf{a}_\rho + \left(\frac{\partial H'_\rho}{\partial s} - \frac{\partial H'_s}{\partial \rho} \right) \mathbf{a}_\varphi + \left(\frac{\partial H'_\varphi}{\partial \rho} - \frac{\partial H'_\rho}{\partial \varphi} \right) \mathbf{a}_s \right\} = \\ = \varepsilon_0 \left\{ \frac{\partial E'_\rho}{\partial t} \mathbf{a}^\rho + \frac{\partial E'_\varphi}{\partial t} \mathbf{a}^\varphi + \frac{\partial E'_s}{\partial t} \mathbf{a}^s \right\} + \{ J'^E_\rho \mathbf{a}^\rho + J'^E_\varphi \mathbf{a}^\varphi + J'^E_s \mathbf{a}^s \}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $(E'_\rho, E'_\varphi, E'_s)$, $(H'_\rho, H'_\varphi, H'_s)$, $(J'^E_\rho, J'^E_\varphi, J'^E_s)$ – ковариантные компоненты векторов \mathbf{E}' , \mathbf{H}' и \mathbf{J}' в данной системе координат, пропорциональные проекциям этих векторов на основные координатные векторы $\mathbf{a}_\rho, \mathbf{a}_\varphi, \mathbf{a}_s$, \hat{g} – метрический тензор. Контравариантные векторы $\mathbf{a}^\rho, \mathbf{a}^\varphi, \mathbf{a}^s$ образуют взаимную систему. Аналогичным образом записывается и второе уравнение из (1). Умножив (7) на взаимные векторы, получим ковариантную форму записи уравнений Максвелла в новой системе координат. Например, первое из уравнений запишется в виде

$$\frac{\partial H'_s}{\partial \varphi} - \frac{\partial H'_\varphi}{\partial s} = \varepsilon_0 \sqrt{\hat{g}} \left\{ g^{11} \frac{\partial E'_\rho}{\partial t} + g^{12} \frac{\partial E'_\varphi}{\partial t} + g^{13} \frac{\partial E'_s}{\partial t} \right\} + \{ g^{11} J'^E_\rho + g^{12} J'^E_\varphi + g^{13} J'^E_s \}, \quad (8)$$

где g^{ik} – метрические коэффициенты.

Аналогичный вид будут иметь и остальные пять уравнений. Граница волновода S_b в новой системе координат имеет вид: $\rho = 1$. Это позволяет искать решение волновых уравнений (8) в виде разложений по системе базисных функций регулярного цилиндрического волновода. Например, для периодических во времени полей ($\omega = 2\pi/T$) можно искать решение (8) для электрической и магнитной напряженностей поля в виде

$$E'_{1t} = \text{Re} \sum_m \dot{\mathbf{E}}_{1tm} \exp(jm\omega t), \quad E'_{1s} = \text{Re} \sum_m \dot{\mathbf{E}}_{1sm} \exp(jm\omega t), \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} \mathbf{E}'_{1tm} &= \sum_{i=1}^l \sum_{n=-N}^N \left(\dot{A}_{mni}^E \mathbf{e}_{ni}^E + \dot{A}_{mni}^M \mathbf{e}_{ni}^M \right), \\ \mathbf{E}'_{1sm} &= \sum_{i=1}^l \sum_{n=-N}^N \dot{C}_{mni} \Phi_{ni}, \quad \mathbf{H}_{1m} = \frac{j}{m\omega\mu_0} \hat{g}^{-1} \text{rot } \mathbf{E}_{1m}, \end{aligned}$$

а собственные функции регулярного волновода выражены следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}
e_{rni}^E &= J'_n(v_{ni}\rho) \exp(-jn\varphi), & e_{rni}^M &= -\frac{n}{\mu_{ni}\rho} J_n(\mu_{ni}\rho) \exp(-jn\varphi), \\
e_{\varphi ni}^E &= -\frac{jn}{v_{ni}\rho} J_n(v_{ni}\rho) \exp(-jn\varphi), & e_{\rho ni}^M &= jJ'_n(\mu_{ni}\rho) \exp(-jn\varphi), \\
\varphi_{ni} &= J_n(v_{ni}\rho) \exp(-jn\varphi).
\end{aligned} \tag{10}$$

В формулах (9), (10) m – номер гармоники основной частоты ω , n – азимутальный индекс, i – радиальный индекс, j – мнимая единица, v_{ni} – корни функции Бесселя ($J_n(v_{ni}) = 0$), μ_{ni} – корни производной от функции Бесселя ($J'_n(\mu_{ni}) = 0$). Направляющие векторы новой (косоугольной) системы координат (ρ, φ, s) определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}
\mathbf{a}_1 = \mathbf{a}_\rho &= \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \rho} = r_b(\varphi, s) (\mathbf{n} \cos \varphi + \mathbf{b} \sin \varphi) = r_b \mathbf{r}_0, \\
\mathbf{a}_2 = \mathbf{a}_\varphi &= \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \varphi} = \rho \frac{\partial r_b}{\partial \varphi} (\mathbf{n} \cos \varphi + \mathbf{b} \sin \varphi) + \rho r_b (-\mathbf{n} \sin \varphi + \mathbf{b} \cos \varphi) = \\
&= \rho \frac{\partial r_b}{\partial \varphi} \mathbf{r}_0 + \rho r_b \varphi_0, \\
\mathbf{a}_3 = \mathbf{a}_s &= \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial s} = \rho \frac{\partial r_b}{\partial s} (\mathbf{n} \cos \varphi + \mathbf{b} \sin \varphi) + \rho r_b r (-\mathbf{n} \sin \varphi + \mathbf{b} \cos \varphi) + \\
&+ \mathbf{t} (1 - k\rho r_b \cos \varphi) = \rho \frac{\partial r_b}{\partial s} \mathbf{r}_0 + \rho r_b r \varphi_0 + \mathbf{t} (1 - k\rho r_b \cos \varphi),
\end{aligned} \tag{11}$$

здесь φ_0 – вектор.

Взаимная система контравариантных векторов записывается через основную

$$\begin{aligned}
\mathbf{a}^i &= [\mathbf{a}_{i+1}, \mathbf{a}_{i+2}] / (\mathbf{a}_i [\mathbf{a}_{i+1}, \mathbf{a}_{i+2}]), \\
\mathbf{a}^1 = \mathbf{a}^\rho &= \frac{1}{r_b} \mathbf{r}_0 - \frac{1}{r_b^2} \frac{\partial r_b}{\partial \varphi} \varphi_0 + \frac{\rho}{r_b h_4} \left(\frac{\partial r_b}{\partial \varphi} r - \frac{\partial r_b}{\partial s} \right) \mathbf{t}, \\
\mathbf{a}^2 = \mathbf{a}^\varphi &= \frac{1}{\rho r_b} \varphi_0 - \frac{r}{h_4} \mathbf{t}, \quad \mathbf{a}^3 = \mathbf{a}^s = \mathbf{t} / h_4.
\end{aligned} \tag{12}$$

Уравнения Максвелла (1) в новых координатах (ρ, φ, s) в ковариантной форме имеют вид:

$$\begin{aligned}
\text{rot } \mathbf{H}' &= \varepsilon_0 \hat{g} \frac{\partial \mathbf{E}'}{\partial t} + \hat{g} \mathbf{J}', \\
\text{rot } \mathbf{E}' &= -\mu_0 \hat{g} \frac{\partial \mathbf{H}'}{\partial t}.
\end{aligned} \tag{13}$$

Здесь метрический тензор \hat{g} записывается как

$$\hat{g} = \sqrt{\hat{g}} \begin{vmatrix} g^{11}/\rho & g^{12} & g^{13}/\rho \\ g^{21} & \rho g^{22} & g^{23} \\ g^{31}/\rho & g^{32} & g^{33}/\rho \end{vmatrix}, \quad \text{где } g^{ij} = (\mathbf{a}^i, \mathbf{a}^j), \quad \sqrt{\hat{g}} = \mathbf{a}^1 [\mathbf{a}^2, \mathbf{a}^3] = \rho r_b^2 h_4. \tag{14}$$

Составляющие метрического тензора следующие:

$$\begin{aligned}
g^{11} &= \frac{1}{r_b^2} + \frac{1}{r_b^4} \left(\frac{\partial r_b}{\partial \varphi} \right)^2 + \frac{\rho^2}{r_b^2 h_4^2} \left[\tau \frac{\partial r_b}{\partial \varphi} - \frac{\partial r_b}{\partial s} \right]^2, & g^{22} &= \frac{1}{r_b^2 \rho^2} + \frac{\tau^2}{h_4^2}, \\
g^{12} &= -\frac{1}{r_b^3 \rho} \frac{\partial r_b}{\partial \varphi} - \frac{\rho \tau}{r_b h_4^2} \left[\tau \frac{\partial r_b}{\partial \varphi} - \frac{\partial r_b}{\partial s} \right], & g^{23} &= -\frac{\tau}{h_4^2}, \\
g^{13} &= \frac{\rho}{r_b h_4^2} \left[\tau \frac{\partial r_b}{\partial \varphi} - \frac{\partial r_b}{\partial s} \right], & g^{33} &= \frac{1}{h_4^2},
\end{aligned} \tag{15}$$

где $h_4 = 1 - \rho r_b(\varphi, s) k(s) \cos \varphi$, $k(s)$ – кривизна и $\tau(s)$ – кручение оси волновода. Реальные физические векторы определяются через расчетные (штрихованные) следующим образом:

$$\begin{aligned}
\mathbf{E} &= E'_\rho \mathbf{a}^1 + E'_\varphi \rho \mathbf{a}^2 + E'_s \mathbf{a}^3, \\
\mathbf{H} &= H'_\rho \mathbf{a}^1 + H'_\varphi \rho \mathbf{a}^2 + H'_s \mathbf{a}^3, \\
\mathbf{J} &= J'_\rho \mathbf{a}^1 + J'_\varphi \rho \mathbf{a}^2 + J'_s \mathbf{a}^3.
\end{aligned} \tag{16}$$

Для решения (13) воспользуемся методом Галеркина, который заключается в том, что коэффициенты разложений (9) определяются из условия ортогональности невязок уравнения (13) собственным векторам разложения (10) при любом s .

$$\begin{aligned}
&\int_0^{2\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} \left\{ \text{rot}(\hat{g}^{-1} \text{rot} \mathbf{E}'_1) + \mu_0 \hat{g} \left[\varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}'_1}{\partial t^2} + \frac{\partial \mathbf{J}'}{\partial t} \right] \right\}_\perp \mathbf{e}_{ni}^{E,M*} \rho d\varphi d\rho \exp(-jm\omega t) d\omega t = 0, \\
&\int_0^{2\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} \left\{ \text{rot}(\hat{g}^{-1} \text{rot} \mathbf{E}'_1) + \mu_0 \hat{g} \left[\varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}'_1}{\partial t^2} + \frac{\partial \mathbf{J}'}{\partial t} \right] \right\}_s \varphi_{ni} \rho d\varphi d\rho \exp(-jm\omega t) d\omega t = 0.
\end{aligned} \tag{17}$$

Это наиболее общее решение задачи возбуждения волновода произвольной формы имеет очень громоздкий вид. Для рассматриваемых осесимметричных волноводов с прямолинейной осью радиус кривизны ρ_k и радиус кручения оси волновода ρ_τ стремятся к ∞ , а скорость вращения касательной вокруг бинормали k и скорость вращения бинормали вокруг касательной τ стремятся к нулю. Соответственно изменятся выражения для направляющих ковариантных и контравариантных векторов (3), (4). Выражения для метрических тензоров принимают вид

$$\hat{g} = \begin{pmatrix} 1 + \rho^2 \left(\frac{\partial r_b}{\partial z} \right)^2 & 0 & -\rho r_b \frac{\partial r_b}{\partial z} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\rho r_b \frac{\partial r_b}{\partial z} & 0 & r_b^2 \end{pmatrix}, \quad \hat{g}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \frac{\rho}{r_b} \frac{\partial r_b}{\partial z} \\ 0 & 1 & 0 \\ \frac{\rho}{r_b} \frac{\partial r_b}{\partial z} & 0 & \frac{1}{r_b^2} + \frac{\rho^2}{r_b^2} \left(\frac{\partial r_b}{\partial z} \right)^2 \end{pmatrix}. \tag{18}$$

Прежде чем переходить к дальнейшему решению, следует учесть следующие обстоятельства.

1. Базисные функции в разложении (9) удовлетворяют однородным граничным условиям в преобразованной системе координат при $\rho = 1$

$$[\mathbf{ne}_{ni}^E]_{\rho=1} = 0, \quad [\mathbf{ne}_{ni}^M]_{\rho=1} = 0, \quad \varphi_{ni}|_{\rho=1} = 0. \quad (19)$$

2. Искомое поле должно быть подчинено условию (2), которое для гармонических компонент разложения (9) в той же преобразованной системе координат имеет форму

$$[\rho_0 \dot{\mathbf{E}}_{1m}]_{\rho=1} = -\hat{G}_m [\rho_0 [\rho_0 \dot{\mathbf{H}}_{1m}]]_{\rho=1}, \quad (20)$$

где ρ_0 – единичный вектор, а тензор \hat{G} с учетом граничных условий Щукина–Леонтовича определяется как

$$\hat{G}_m = \dot{W}_\sigma^m \sqrt{\frac{\hat{g}}{g^{11}}} \begin{pmatrix} \rho [(g^{12})^2 - g^{11}g^{22}] & g^{12}g^{13} - g^{11}g^{23} \\ g^{12}g^{13} - g^{11}g^{23} & (1/\rho) [g^{11}g^{33} - (g^{13})^2] \end{pmatrix}, \quad (21)$$

$$\dot{W}_\sigma^m = (1 + j) \sqrt{\frac{m\omega\mu_0}{\sigma}}.$$

Таким образом, ряды (9) имеют разрыв на границе $\rho = 1$ и операции дифференцирования рядов типа $\text{rot } \dot{\mathbf{E}}_{1m}$ должны быть исключены. Поэтому необходимо осуществить соответствующее преобразование (17) с использованием дифференциальных тождеств

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_{ni}^{E,M^*} \text{rot} (\hat{g}^{-1} \text{rot} (\mathbf{E}_{1im})) &= \hat{g}^{-1} \text{rot} (\mathbf{E}_{1im}) \text{rot} (\mathbf{e}_{ni}^{E,M^*}) + \text{div} [\hat{g}^{-1} \mathbf{E}_{1im}, \mathbf{e}_{ni}^{E,M^*}] = \\ &= \mathbf{E}_{1im} \text{rot} (\hat{g}^{-1} \text{rot} (\mathbf{e}_{ni}^{E,M^*})) + \text{div} [\mathbf{E}_{1im}, \hat{g}^{-1} \text{rot} (\mathbf{e}_{ni}^{E,M^*})] + \text{div} [\hat{g}^{-1} \mathbf{E}_{1im}, \mathbf{e}_{ni}^{E,M^*}] \end{aligned} \quad (22)$$

и интегрального тождества

$$\int_{S_\perp} \text{div } \mathbf{A} dS_\perp = \int_{S_\perp} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial z} z_0 dS_\perp + \oint_l (\mathbf{A}, \mathbf{n}) dl, \quad (23)$$

где l есть граничный контур S_\perp . Тожество (23) справедливо для $S_\perp = \text{const}$. В рассматриваемом случае $\rho = 1 = \text{const}$ и это условие выполняется. Следует также учесть несколько тождеств для базисных функций

$$\begin{aligned} \text{rot } \mathbf{e}_{ni}^{E^*} &= \rho_0 \frac{jn}{\rho} J_n(v_{ni}\rho) \exp(jn\varphi) - \varphi_0 v_{ni} J'_n(v_{ni}\rho) \exp(jn\varphi), \\ \text{rot } \mathbf{e}_{ni}^{M^*} &= z_0 j \mu_{ni} \rho J_n(\mu_{ni}\rho) \exp(jn\varphi). \end{aligned} \quad (24)$$

С использованием (22)–(24) вместо выражения (17) получаем систему уравнений возбуждения в следующей математически корректной форме:

$$\begin{aligned}
\frac{d\dot{A}_{mnp}^e}{dz} &= \dot{V}_{mnp} + v_{np}\dot{C}_{mnp}, \\
v_{np}\dot{C}_{mnp} &= -\frac{\dot{V}_{mnp}v_{np}^2}{m^2g^2} - \frac{1}{g} \frac{dg}{dz} \frac{v_{np}}{e_{npp}m^2g^2} \sum_i \dot{A}_{mni}^m \gamma_{npi}^3 + \\
&+ \frac{v_{np}}{ge_{npp}} \frac{dg}{dz} \left[\sum_i \dot{A}_{mni}^e I_{2npi} - \sum_i \dot{A}_{mni}^m \bar{\gamma}_{npi}^3 \right] - \\
&- j \frac{\Delta v_{np}}{me_{npp}\pi g^2} \frac{1}{N_e} \sum_{j=1}^{N_e} J_n(v_{np}\rho_j) \exp(j(n\varphi_j - mT_j)) - \\
&- j \frac{v_{np} J'_n(v_{np}) \sqrt{1+(g')^2} W}{gme_{npp}} \sum_i \left[J'_n(v_{ni}) \dot{V}_{mni} - \frac{n}{\mu_{ni}} J_n(\mu_{ni}) \dot{P}_{mni} \right], \\
\frac{d\dot{V}_{mnp}}{dz} &= -m^2 \dot{A}_{mnp}^e + \frac{1}{e_{npp}} \sum_i \left\{ \dot{A}_{mni}^m \left[-\frac{1}{g^2} \left(\frac{dg}{dz} \right)^2 + \frac{1}{g} \frac{d^2g}{dz^2} \right] + \dot{P}_{mni} \frac{1}{g} \frac{dg}{dz} \right\} \gamma_{npi}^4 - \\
&- m^2 \left(\frac{dg}{dz} \right)^2 \frac{1}{e_{npp}} \sum_i \dot{A}_{mni}^e I_{3npi} + m^2 \left(\frac{dg}{dz} \right)^2 \frac{1}{e_{npp}} \sum_i \dot{A}_{mni}^m \gamma_{npi}^5 + \\
&+ m^2 g \frac{dg}{dz} \frac{1}{e_{npp}} \sum_i \dot{C}_{mni} I_{2npi} - \frac{j m \Delta}{e_{npp} g \pi} \frac{1}{N_e} \sum_{j=1}^{N_e} \left[\left(\beta_{r_j} - \rho_j \beta_{z_j} \frac{dg}{dz} \right) J'_n(v_{np}\rho_j) + \right. \\
&\quad \left. + j \frac{n}{v_{np}\rho_j} J_n(v_{np}\rho_j) \beta_{\varphi_j} \right] \frac{\exp(j(n\varphi_j - mT_j))}{\beta_{z_j}}, \\
\frac{d\dot{A}_{mnp}^m}{dz} &= \dot{P}_{mnp}, \\
\frac{d\dot{P}_{mnp}}{dz} &= -\dot{A}_{mnp}^m \left[m^2 \left(1 + \gamma_{npp}^6 \left(\frac{dg}{dz} \right)^2 \right) - \frac{\mu_{np}^2}{g^2} - \frac{\gamma_{snp}^5}{g^2} \left(\frac{dg}{dz} \right)^2 + \frac{1}{g} \frac{d^2g}{dz^2} \gamma_{npp}^6 \right] + \\
&+ \sum_{i \neq p} \dot{A}_{mni}^m \left(\left(\frac{1}{g} \frac{dg}{dz} \right)^2 \gamma_{npi}^7 + \frac{1}{g} \frac{d^2g}{dz^2} \gamma_{npi}^8 \right) / h_{npp} + \\
&+ \frac{1}{g} \frac{dg}{dz} \sum_{i \neq p} \dot{P}_{mni} \gamma_{npi}^9 / h_{npp} + \frac{1}{g} \frac{dg}{dz} \sum_i \dot{V}_{mni} \gamma_{npi}^{10} / h_{npp} + \\
&+ m^2 \left(\frac{dg}{dz} \right)^2 \sum_i \dot{A}_{mni}^e \gamma_{npi}^{11} / h_{npp} - m^2 g \frac{dg}{dz} \sum_i \dot{C}_{mni} \gamma_{npi}^{12} / h_{npp} - \\
&- j \frac{m \Delta}{h_{npp} \pi g} \frac{1}{N_e} \sum_{j=1}^{N_e} \left[- \left(\beta_{r_j} - \rho_j \beta_{z_j} \frac{dg}{dz} \right) \frac{n}{\mu_{np}\rho_j} J_n(\mu_{np}\rho_j) - \right. \\
&- \left. j \beta_{\varphi_j} J'_n(\mu_{np}\rho_j) \right] \frac{\exp(j(n\varphi_j - mT_j))}{\beta_{z_j}} + \\
&\quad + \frac{j \left(1 + (g')^2 \right)^{2/3} \mu_{np} J_n(\mu_{np}) \dot{W}}{mg^3 h_{npp}} \sum_i \dot{A}_{mni} \mu_{ni} J_n(\mu_{ni}).
\end{aligned} \tag{25}$$

Здесь приняты следующие обозначения:

$$z = Z \frac{2\pi}{\lambda_0}, \quad g = b \frac{2\pi}{\lambda_0}, \quad \beta = \frac{V}{c}, \quad m = \frac{\omega}{\omega_0}, \quad \Delta = I_0 \frac{\eta_0 \mu_0}{c} = I_0 0.73723 \cdot 10^{-3},$$

T_j – текущее время для j -й траектории электронов ($T = \omega t$),

$$\dot{A}_{mnp}^e = \frac{\dot{E}_{\perp mnp}^e \eta_0}{c^2}, \quad \dot{C}_{mnp} = \frac{\dot{E}_{z mnp}^e \eta_0}{\omega_0 c}, \quad \dot{A}_{mnp}^m = \frac{\dot{E}_{\perp mnp}^m \eta_0}{c^2},$$

$$h_{npp} = \frac{1}{2} J_n^2(\mu_{np}) \left(1 - \left(\frac{n}{\mu_{np}} \right)^2 \right), \quad e_{npp} = \frac{1}{2} J_{n-1}^2(\nu_{np}),$$

$$\gamma_{npi}^3 = \frac{n \mu_{ni} \nu_{np}}{\nu_{np}^2 - \mu_{ni}^2} J_{n-1}(\nu_{np}) J_n(\mu_{ni}),$$

$$\bar{\gamma}_{npi}^3 = \frac{n \nu_{ni}}{\mu_{ni}^2 (\mu_{ni}^2 - \nu_{np}^2)} J_{n-1}(\nu_{np}) J_n(\mu_{ni}),$$

$$\gamma_{npi}^4 = \frac{n \mu_{ni}}{\mu_{ni}^2 - \nu_{np}^2} J_n(\mu_{ni}) J_{n-1}(\nu_{np}),$$

$$\gamma_{npi}^5 = \frac{2n \nu_{np}^2}{\mu_{ni} (\mu_{ni}^2 - \nu_{np}^2)^2} J_n(\mu_{ni}) J_{n-1}(\nu_{np}),$$

$$\gamma_{snp}^5 = \left(\mu_{np}^2 + n^2 \left(3 - \frac{2n^2}{\mu_{np}^2} + \frac{5}{\mu_{np}^2} \right) \right) \frac{J_n^2(\mu_{np})}{6h_{npp}},$$

$$\gamma_{npp}^6 = \frac{n^2}{2\mu_{np}^2 h_{npp}} J_n^2(\mu_{np}),$$

$$\gamma_{npi}^7 = \frac{\mu_{ni} J_n(\mu_{ni}) J_n(\mu_{np})}{\mu_{np} (\mu_{ni}^2 - \mu_{np}^2)^2} \left[n^2 (\mu_{ni}^2 - 5\mu_{np}^2) + \mu_{np}^2 (\mu_{ni}^2 + 3\mu_{np}^2) \right],$$

$$\gamma_{npi}^8 = \frac{\mu_{ni} \mu_{np}}{\mu_{ni}^2 - \mu_{np}^2} \left(1 - \frac{n^2}{\mu_{np}^2} \right) J_n(\mu_{ni}) J_n(\mu_{np}),$$

$$\gamma_{npi}^9 = \frac{2\mu_{ni} \mu_{np} - n^2 (\mu_{np}/\mu_{ni} + \mu_{ni}/\mu_{np})}{\mu_{ni}^2 - \mu_{np}^2} J_n(\mu_{ni}) J_n(\mu_{np}),$$

$$\gamma_{npi}^{10} = \frac{n \mu_{np}}{\nu_{ni}^2 - \mu_{np}^2} J_{n-1}(\nu_{ni}) J_n(\mu_{np}),$$

$$\gamma_{npi}^{11} = \frac{n \mu_{np} \nu_{ni}}{\nu_{ni}^2 - \mu_{np}^2} J_{n-1}(\nu_{ni}) J_n(\mu_{np}),$$

$$\gamma_{npi}^{12} = \frac{n \nu_{ni}}{\mu_{np} (\mu_{np}^2 - \nu_{ni}^2)} J_{n-1}(\nu_{ni}) J_n(\mu_{np}),$$

$$I_{2npi} = \frac{\nu_{np} J_{n-1}(\nu_{np}) J_{n-1}(\nu_{ni})}{\nu_{ni}^2 - \nu_{np}^2} \quad \text{для } i \neq p,$$

$$I_{2npp} = -\frac{1}{2\nu_{np}} J_{n-1}^2(\nu_{np}) = -\frac{e_{npp}}{\nu_{np}},$$

$$I_{3npi} = \frac{2(\nu_{ni}^2 + \nu_{np}^2)}{(\nu_{ni}^2 - \nu_{np}^2)^2} J_{n-1}(\nu_{np}) J_{n-1}(\nu_{ni}) \quad \text{для } i \neq p,$$

$$I_{3npp} = J_{n-1}^2(\nu_{np}) \left[\frac{1}{6} + \frac{1}{\nu_{np}^2} \left(\frac{2}{3} - \frac{n^2}{6} \right) \right],$$

$$\dot{W}_\sigma^m = (1+j) W_0 \sqrt{\frac{\omega \varepsilon_0}{2\sigma}} = W_0 \dot{W}, \quad W_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}},$$

$$\dot{W} = (1+j) \sqrt{f [\Gamma \Gamma \Pi] \rho [\text{МКОМ, М}] 2.77 \cdot 10^{-8}}.$$

(26)

Система уравнений (25) является решением задачи возбуждения сторонними источниками продольно-нерегулярного волновода. В этой системе оказываются связанными E и H типы волн с одинаковым азимутальным индексом n , что обусловлено азимутальной симметрией волновода вдоль оси z . Следует, однако, иметь в виду, что все типы волн связаны через плотность стороннего потока \mathbf{J}' , поскольку \mathbf{J}' и ρ' формируются под действием суперпозиции всех волн.

Физические вектора электромагнитных полей определяются по формуле (16). Выражения для компонент электрического и магнитного полей в системе координат (r_0, φ_0, z_0) , будут иметь вид

$$\begin{aligned} \dot{E}_{1rm} &= \frac{\dot{E}'_{1\rho m}}{r_b}, & \dot{E}_{1\varphi m} &= \frac{\dot{E}'_{1\varphi m}}{r_b}, & \dot{E}_{1zm} &= \dot{E}'_{1sm} - \dot{E}'_{1\rho m} \frac{\rho}{r_b} \frac{dr_b}{dz}, \\ \dot{\mathbf{H}}_m &= \frac{j}{m\omega\mu_0} \text{rot } \dot{\mathbf{E}}_{1m}. \end{aligned} \quad (27)$$

Выражения (27) совместно с уравнениями возбуждения (25) определяют полное электрическое поле, возбуждаемое заданной плотностью тока \mathbf{J}' .

Уравнения (25) положены в основу программного комплекса КЕДР [10,11].

3. Двухмодовый гиротрон на модах шепчущей галереи

Оптимальным распределением ВЧ-поля по длине резонатора гиротрона является нарастающее к концу резонатора поле [12], то есть фазовая группировка пучка электронов должна проводиться в слабом нарастающем поле, а отбор энергии в сильном поле, быстро спадающим в конце резонатора.

Реально при больших азимутальных и радиальных индексах волновых мод в волноводе реализовать такое распределение в одномодовом режиме невозможно даже в нерегулярном волноводе. Но если использовать резонатор состоящий из секций с разными типами волн, то можно добиться того, что амплитуды волн от секции к секции будут нарастать и это приведет к повышению общего КПД прибора. При этом в каждой из секций распределение амплитуды волны будет близко с синусоидальному.

Для расчетов использовалась программа Gyro-K из программного комплекса КЕДР. В качестве прототипа был выбран гиротрон, рассмотренный в [14]. Этот гиротрон работал на моде $TE_{22,6}$ с напряжением электронного пучка 96 кВ, током 40 А на частоте 110 ГГц и пинч-фактором $q = V_{\perp}/V_z = 1.4$. Начальный угловой разброс скоростей электронов равен $\Delta V_t/V_t = 2\%$. Нормированное значение магнито-статического поля $F = (\mu_0\eta_0 H_{z0})/\omega_0 = 1.0875$. Длина гиротрона $l = (2\pi L)/\lambda_0 = (2\pi 90)/2.73 = 184$ рад. Профиль волновода определялся параметрами, приведенными на рис. 2. Для заданного в [14] профиля волновода нормированные параметры задавались следующими: $g_1 = (2\pi R_1)/\lambda_0 = (2\pi 19.4 \text{ мм})/2.73 \text{ мм} = 44.65$, $g_2 = 45.665$, $g_3 = 46.95$, $g_4 = 48.33$, $g_5 = 23$, $g_6 = 23$, $g_7 = 46$, $g_8 = 46$, $g_9 = 46$. Нормированный радиус ведущего центра электронных орбит $r_{vc} = (2\pi 10.24)/2.73 = 23.57$. Результаты расчета данного варианта гиротрона приведены на рис. 3. Как видно на рисунке, амплитуда волны $TE_{22,6}$ в активной области резонатора похожа на

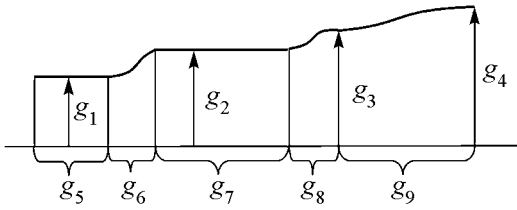


Рис. 2. Параметры, определяющие профиль волновода

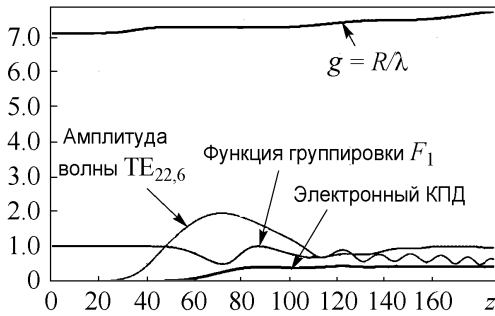


Рис. 3. Интегральные характеристики гиротрона

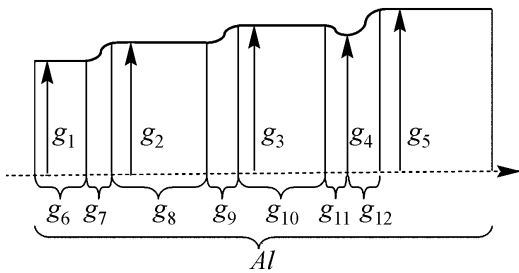


Рис. 4. Параметры определяющие профиль многомодового волновода

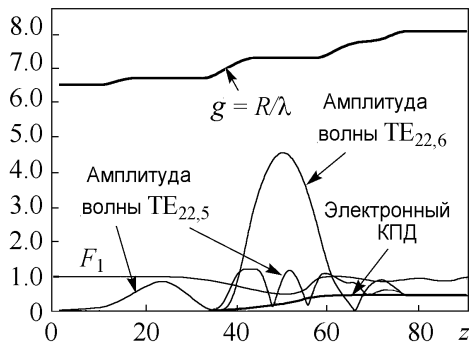


Рис. 5. Интегральные характеристики двухмодового гиротрона

синусоиду. Электронный КПД этого гиротрона, по нашим расчетам, составляет 40.5%. Расчеты по программе MAGY показали значение 39% [14]. Это говорит о хорошем совпадении расчетных данных, полученных по программе GYRO-K и программе MAGY.

Для проведения расчетов многомодового гиротрона для описания профиля волновода были использованы параметры, приведенные на рис. 4.

В результате оптимизации профиля волновода был получен двухмодовый гиротрон с параметрами: $g_1 = 41.5109, g_2 = 42.4272, g_3 = 46.0768, g_4 = 49.0268, g_5 = 50.9772, g_6 = 10.0, g_7 = 8.8921, g_8 = 12.7941, g_9 = 11.982, g_{10} = 12.7628, g_{11} = 12.001, g_{12} = 10.0$.

В отличие от гиротрона, характеристики которого приведены на рис. 3, в данном гиротроне на участке $15 < z < 35$ взаимодействие электронного потока происходит с волной $TE_{22,5}$, а на участке $40 < z < 62$ с волной $TE_{22,6}$.

Возбуждаемая волна $TE_{22,5}$ имеет существенно меньшую амплитуду по сравнению с возбуждаемой волной $TE_{22,6}$. Это позволяет более эффективно группировать фазовый электронный сгусток электронов, то есть он получается более сжатым и при этом не происходит такого сильного динамического разброса скоростей электронов, как в одномодовом гиротроне, что в итоге позволяет повысить электронный КПД данного гиротрона до 45%.

Следует отметить, что влияние моды $TE_{22,5}$ сказывается и на участке максимума моды $TE_{22,6}$. В итоге на выходе гиротрона обе волны имеют приблизительно одинаковую амплитуду и, следовательно, одинаковый волновой КПД по 22.5%.

Заключение

Приведенные в статье материалы свидетельствуют о перспективности много-модовых гиротронов в плане повышения КПД. Заметим, что в таких гиротронах на выходе резонатора сигнал оказывается многомодовым. Однако использование трансформаторов мод на регулярном волноводе, конструкция и расчет которых (для TE_{0n} мод) приведены в [7], позволяет преобразовать сигнал в одномодовый (например, смесь $TE_{22,5}+TE_{22,6}$ в моду $TE_{22,5}$ или $TE_{22,6}$).

Библиографический список

1. Стрэттон Дж.А. Теория электромагнетизма. М.: ОГИЗ, 1948. 539 с.
2. Свешников А.Г. Нерегулярные волноводы // Изв. вузов СССР. Радиофизика. 1959. Т. 2, № 5. С. 720.
3. Ильинский А.С., Слепян Г.Я. Колебания и волны в электродинамических системах с потерями. М.: Изд-во МГУ, 1983. 232 с.
4. Кураев А.А. Теория и оптимизация электронных приборов СВЧ. Минск: Наука и техника, 1979. 334 с.
5. Кураев А.А. Мощные приборы СВЧ. Методы анализа и оптимизации параметров. М.: Радио и связь, 1986. 208 с.
6. Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот. Том I. Стационарные процессы / Под редакцией А.А. Кураева и Д.И. Трубецкова. М.: Физматлит, 2009. 288 с.
7. Батура М.П., Кураев А.А., Сеницын А.К. Основы теории, расчета и оптимизации современных электронных приборов СВЧ. Минск: БГУИР, 2007. 246 с.
8. Батура М.П., Кураев А.А., Сеницын А.К. Моделирование и оптимизация мощных электронных приборов СВЧ. Минск: БГУИР, 2006. 275 с.
9. Ерофеев В.Т., Козловская И.С. Математические модели в электродинамике: Курс лекций. Ч. 2. Минск: БГУ, 2008. 167с.
10. Kolosov S.V., Kurayev A.A., Senko A.V. The simulation code CEDR. IVEC-2010. USA, Monterey. P. 115.
11. Свидетельство о регистрации компьютерной программы № 384. Компьютерный программный комплекс КЕДР / правообладатель БГУИР / Авторы: Колосов С.В., Кураев А.А., Сеницын А.К., Аксенчик А.В.; заявл.19.01.2012; внесено в реестр Национального центра интеллектуальной собственности БР-07.02.2012.
12. Кураев А.А., Ковалев И.С., Колосов С.В. Численные методы оптимизации в задачах электроники СВЧ. Минск: Наука и техника, 1975. 295 с.
13. Колосов С.В., Кураев А.А., Сенько А.В. Уравнения возбуждения нерегулярных волноводов с конечной проводимостью стенок // Техника и приборы СВЧ. 2009. № 2. С. 8.
14. Anderson James P. Experimental Study of a 1.5-MW, 110 GHz Gyrotron Oscillator. Massachusetts Institute of Technology. 2005. P. 171.

Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники

Поступила в редакцию 19.06.2012

TWO-WAVE GYROTRON ON WHISPERING GALLERY MODES AT THE IRREGULAR WAVEGUIDE

A. A. Kurayev, S. V. Kolosov, A. V. Senko

The three-dimensional excitation equations for the longitudinal-irregular circular waveguides with finite conductions of the walls by electron beams in completed form for self-consistent models of gyrotrons, peniotrons, relativistic TWT and BWO had been derived.

The possibilities of improving the efficiency of millimeter-wave gyrotron with multimode interaction fields of whispering gallery waves and a relativistic helical electron beam were consider. It is shown that two-mode gyrotron, compared with single-mode allows you to raise the efficiency from 40 to 45%.

Keywords: Irregular waveguide, multimode regime, gyrotron.

Куряев Александр Александрович – родился в Саратове (1937). Окончил Саратовский государственный университет (1960). Защитил кандидатскую диссертацию (1965, СГУ) и докторскую (1980, ИРЭ АН СССР), Заслуженный деятель науки Республики Беларусь. В 1966 году организовал и возглавил в Минском радиотехническом институте (ныне – Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники) группу специалистов, активно развивающих новое научное направление – теоретическое исследование, математическое моделирование и оптимизация линейных и нелинейных электромагнитных процессов, программная реализация и приложение к задачам электроники и электродинамики. В настоящее время является заведующим кафедрой «Антенны и устройства СВЧ» БГУИР, д.ф.-м.н., профессор. Автор 9 монографий и 237 статей.



220013 Республика Беларусь, Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
E-mail: kurayev@bsuir.by

Колосов Станислав Васильевич – родился в Бобруйске (1946), Беларусь. Окончил Минский радиотехнический институт (1970). Защитил кандидатскую диссертацию (1979, МГУ) и докторскую диссертацию (2000, БГУ), профессор кафедры «Вычислительные методы и программирование» БГУИР, автор 107 статей и одной монографии.

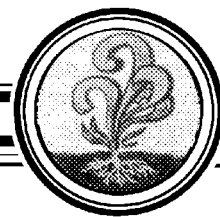


220013 Республика Беларусь, Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
E-mail: kolosov@bsuir.by

Сенько Александр Васильевич – родился в Минске (1985), Беларусь. Окончил Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (2008). В настоящее время является аспирантом кафедры «Вычислительные методы и программирование» БГУИР. Автор 6 статей.



220013 Республика Беларусь, Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
E-mail: kurayev@bsuir.by



РАСЧЕТ ОМИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ОТКРЫТЫХ РЕЗОНАТОРАХ

Г. Д. Богомолов, А. И. Клеев

Приведены результаты решения задачи о собственных колебаниях открытого двумерного резонатора, зеркала которого имеют конечную проводимость. При расчетах использовали модифицированный метод продолженных граничных условий. Результаты сопоставлены с асимптотическим решением, полученным методом параболического уравнения.

Ключевые слова: Открытые резонаторы, метод интегральных уравнений, метод адаптивной коллокации, эквивалентные граничные условия, аналитическое продолжение поля.

Введение

В физике и технике при работе в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн широко применяются открытые резонаторы. В частности, такие резонаторы используются при измерении свойств металлов в терагерцовом диапазоне [1]. Очевидно, что для адекватной интерпретации экспериментальных данных необходимо иметь в своем распоряжении надежный и удобный метод решения соответствующей краевой задачи. В работе [2] был предложен приближенный подход: метод продолженных граничных условий (МПГУ). Этот метод прост в реализации, позволяет создавать весьма эффективные алгоритмы для решения достаточно сложных задач и был успешно апробирован при решении широкого класса задач рассеяния [3,4]. В работе [5] авторами настоящей статьи было дано развитие МПГУ: предложен модифицированный МПГУ, позволяющий существенно повысить точность вычислений и снизить их трудоемкость. В настоящей работе данный подход использован для расчета омических потерь в открытом квазиоптическом резонаторе.

1. Основные соотношения

Геометрия задачи показана на рис. 1. Рассматриваем двумерный резонатор, зеркала которого являются тонкими экранами. Полагаем, что зависимость от времени пропорциональна $\exp(-i\omega t)$ где $\omega = ck$, $k = 2\pi/\lambda$, а λ и c – длина волны и скорость света в вакууме, соответственно.

Рассмотрим задачу о собственных колебаниях открытого резонатора в свободном пространстве [6,7]. В настоящей работе ограничимся анализом колебаний, для которых отлична от нуля единственная компонента H_x магнитного поля (H -поляризация). Полагаем, что на поверхности зеркал поля удовлетворяют двусторонним импедансным граничным условиям [8,9]

$$E_\tau \pm \zeta H_x = 0, \quad (1)$$

где E_τ – касательное к поверхности зеркала электрическое поле, τ – единичный касательный вектор.

Для хороших проводников (имеющих малое удельное сопротивление ρ) значение волнового импеданса ζ можно определить по формуле

$$\zeta = \frac{(1 - i) \pi d}{\lambda}, \quad (2)$$

где $d = \sqrt{\lambda \rho c} / (2\pi)$ – толщина скин-слоя. Отметим, что, как показано в работе [10], граничное условие (1) применимо в том случае, если толщина экрана много больше толщины скин-слоя.

В соответствии с МПГУ [2–4], граничное условие (1) ставится на некоторых вспомогательных контурах $S_{1,2}^{(\delta)}$, расположенных на достаточно малом расстоянии δ от основных $S_{1,2}^{(0)}$ (см. рис. 1). Фактически такая постановка эквивалентна решению некоторой вспомогательной задачи, в которой граница смещена относительно своего истинного положения. Очевидно, что значение поля на вспомогательной границе отличается от точного и вследствие этого решение вспомогательной задачи также будет отличаться от точного. Учесть это изменение можно воспользовавшись результатами работы [5]. В данной работе используется методика пересчета поля (см. например [11, 12]) при переходе к вспомогательному контуру, на котором и ставятся граничные условия (1). Используя развитую в [5] технику, можно показать, что эквивалентные граничные условия на вспомогательных контурах имеют вид

$$(1 \pm ik\delta\zeta) E_\tau = (\pm\zeta - ik\delta) H_x - \frac{\partial \delta E_n}{\partial \tau}. \quad (3)$$

В соотношении (3) для упрощения мы полагали, что вспомогательный контур принадлежит семейству кривых, параллельных основному контуру. Положение вспомогательного контура определяется при этом расстоянием δ до основного контура. Отметим, что, используя методику работы [5], можно получить выражение, аналогичное соотношению (3) и в более общем случае. Однако, как показали проведенные вычисления, иной выбор вспомогательных контуров не приводит к существенному выигрышу в эффективности вычислений.

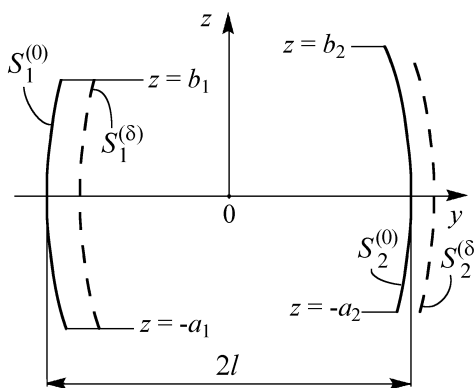


Рис. 1. Геометрия задачи. Поперечное сечение двумерного открытого резонатора. Ось x перпендикулярна плоскости рисунка.

Будем использовать следующие интегральные представления для компонент электромагнитного поля

$$H_x = \int_S \left(J_e \frac{\partial}{\partial n} + ikJ_m \right) G dS, \quad (4)$$

$$E_\tau = \int_S \left(J_e \frac{i}{k} \frac{\partial^2}{\partial n \partial n_1} - J_m \frac{\partial}{\partial n} \right) G dS, \quad (5)$$

$$E_n = \int_S \left(-J_e \frac{i}{k} \frac{\partial^2}{\partial \tau \partial n_1} + J_m \frac{\partial}{\partial \tau} \right) G dS. \quad (6)$$

В соотношениях (4)–(6) интегрирование проводится по контуру поперечного сечения зеркала; n и n_1 – единичные нормали в точках наблюдения и интегрирования, соответственно;

$$G = -\frac{i}{4} H_0^{(1)}(kr), \quad (7)$$

где r – расстояние между точками интегрирования и наблюдения, $H_0^{(1)}(x)$ – функция Ганкеля [13].

Используя интегральные представления (4)–(6) и эквивалентные граничные условия (3), можно получить для рассматриваемого случая интегральные уравнения на вспомогательном контуре

$$\int_S J_e K_+^{(e)} dS + \int_S J_m K_+^{(m)} dS = 0, \quad (8)$$

$$\int_S J_e K_-^{(e)} dS + \int_S J_m K_-^{(m)} dS = 0, \quad (9)$$

где

$$K_+^{(e)} = \left[\frac{i}{k} (1 + ik\delta\varsigma) \frac{\partial^2}{\partial n \partial n_1} + (ik\delta - \varsigma) \frac{\partial}{\partial n} - \frac{i}{k} \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\delta \frac{\partial^2}{\partial n_1 \partial \tau} \right) \right] G, \quad (10)$$

$$K_-^{(e)} = \left[\frac{i}{k} (1 - ik\delta\varsigma) \frac{\partial^2}{\partial n \partial n_1} + (ik\delta + \varsigma) \frac{\partial}{\partial n} - \frac{i}{k} \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\delta \frac{\partial^2}{\partial n_1 \partial \tau} \right) \right] G, \quad (11)$$

$$K_+^{(m)} = \left[-(1 + ik\delta\varsigma) \frac{\partial}{\partial n} + ik(ik\delta - \varsigma) + \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\delta \frac{\partial}{\partial \tau} \right) \right] G, \quad (12)$$

$$K_-^{(m)} = \left[-(1 - ik\delta\varsigma) \frac{\partial}{\partial n} + ik(ik\delta + \varsigma) + \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\delta \frac{\partial}{\partial \tau} \right) \right] G. \quad (13)$$

Как показано в работе [5], предлагаемый подход, который можно назвать модифицированным МПГУ, базируется на более аккуратном учете физических свойств

реальной структуры и позволяет существенно увеличить точность расчетов. Действительно, результаты работ [14–16] убедительно демонстрируют, что учет априорной информации дает возможность значительно повысить эффективность алгоритма решения задачи дифракции.

Методика решения системы уравнений, подобных (8), (9), подробно дана в [6,7] и мы приведем здесь лишь ее некоторые ключевые положения. В соответствии с описанным в [6,7] подходом, аппроксимируем неизвестные токовые функции $J_{e,m}$ рядами вида

$$J_{e,m} = \sum_{n=0}^{N_J^{(e,m)}-1} C_n^{(e,m)} J_n^{(e,m)}, \quad (14)$$

где $J_n^{(e,m)}$ – базисные функции, учитывающие в явном виде особенность решения на краю зеркала, а число слагаемых $N_J^{(e,m)}$ выбираем исходя из необходимой точности аппроксимации.

Алгебраизацию системы интегральных уравнений (8), (9) проводили методом адаптивной коллокации [17]. Подставляя в уравнения (8), (9) ряды, аппроксимирующие неизвестные функции J_e и J_m и приравнивая правые и левые части получившегося выражения в узлах коллокации $(y_m^{(1,2)}, z_m^{(1,2)})$ ($m = 0, 1, \dots, N_J^{(e,m)} - 1$), приходим к следующей системе линейных алгебраических уравнений для неизвестных коэффициентов $C_n^{(e,m)}$

$$\mathbf{S}\mathbf{C} = \mathbf{0}, \quad (15)$$

где

$$\mathbf{C} = \left(C_0^{(e)}, C_1^{(e)}, C_2^{(e)}, \dots, C_{N_J^{(e)}-1}^{(e)}, C_0^{(m)}, C_1^{(m)}, C_2^{(m)}, \dots, C_{N_J^{(m)}-1}^{(m)} \right)^T \quad (16)$$

(символом T обозначена операция транспонирования).

Комплексную резонансную длину волны $\lambda = \lambda' + i\lambda''$ (и соответствующее волновое число $k = k' + ik''$) определяли из уравнения $\det \mathbf{S}(\lambda) = 0$, а неизвестные коэффициенты \mathbf{C} – как собственный вектор матрицы \mathbf{S} , соответствующий нулевому собственному значению.

2. Результаты расчетов

Приведем некоторые результаты, иллюстрирующие возможности предлагаемого подхода и некоторые, наиболее существенные, свойства собственных колебаний. Рассматривали несколько наиболее добротных H -поляризованных колебаний в симметричном резонаторе ($a_1 = a_2 = b_1 = b_2 = a$).

При расчетах полагали, что зеркало резонатора имеет параболическую форму

$$y(z) = l - \frac{z^2}{2R}, \quad (17)$$

где R – радиус кривизны зеркала при $z = 0$. Рассматривали симметричные собственные колебания. Как известно, в квазиоптическом приближении распределение

поля такого колебания дается выражением [18]

$$H_x = H\sqrt{\cos\sigma}H_{q_z}(\zeta\cos\sigma)\exp\left(-\frac{1}{2}\zeta^2\cos^2\sigma\right)\times \\ \times \cos\left[\frac{1}{4}\zeta^2\sin 2\sigma - \left(q_z + \frac{1}{2}\right)\sigma + ky\right], \quad (18)$$

где

$$\zeta = z/\bar{a}, \quad \eta = y/l, \quad \operatorname{tg}\sigma = y/k\bar{a}^2, \quad k\bar{a}^2 = \sqrt{l(R-l)}, \quad (19)$$

$H_m(x)$ – полиномы Эрмита [13], H – нормировочный множитель.

В данном приближении для комплексного волнового числа k можно получить следующее явное выражение

$$kl = \pi q_y + (q_z + 1/2) \arcsin \sqrt{l/R} - i \ln \sqrt{\mathfrak{R}}. \quad (20)$$

В соотношениях (18) и (20) q_y и q_z соответственно продольный и поперечный индекс колебания, \mathfrak{R} – коэффициент отражения от зеркала. Для случая сильного скин-эффекта, когда на поверхности зеркала выполняется граничное условие Леонтовича (1), выражение для \mathfrak{R} можно записать в виде

$$\mathfrak{R} = \frac{1 - \zeta}{1 + \zeta}. \quad (21)$$

Для резонатора, имеющего конечную апертуру зеркала (сравнимую, вообще говоря, с его длиной), распределения полей и собственные частоты могут отличаться от асимптотического решения (18)–(20) [19]. Тем не менее мы будем использовать асимптотические выражения (18)–(20) для приближенной классификации решений, полученных в строгой постановке. Отметим, что соотношения (18)–(20) широко применяются для интерпретации экспериментальных данных, полученных при использовании резонаторов с конечной апертурой. Поэтому установление области применимости этих асимптотических соотношений представляет определенный практический интерес.

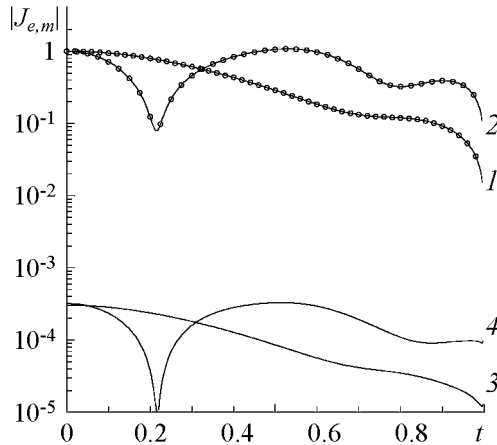


Рис. 2. Распределение абсолютного значения токовых функций $|J_e|$ (кривые 1 и 2) и $|J_m|$ (кривые 3 и 4) на зеркале резонатора. Расчеты проводили при $a = 4.5$ мм, $l = 3.9$ мм, $R = 7$ мм; удельное сопротивление материала зеркала $\rho = 2 \cdot 10^{-8}$ Ом · м

На рис. 2 приведено распределение абсолютного значения токовых функций на зеркале резонатора. При расчетах полагали, что зеркало изготовлено из материала с удельным сопротивлением $\rho = 2 \cdot 10^{-8}$ Ом · м (соответствует принятым значениям для меди). Кривые 1 и 3 демонстрируют решение, полученное для колебания $H_{0,4}$ ($q_y = 4, q_z = 0$). Кривые 2 и 4 соответствуют колебанию $H_{2,4}$. В рассматриваемом случае колебание $H_{0,4}$ обладает наибольшей добротностью. Как видно из приведенных на рис. 2 результатов, распределение токов на зеркале резонатора близко к гауссову и хорошо описывается формулой (18).

Отметим, что амплитуда магнитного тока существенно меньше амплитуды электрического, причем распределение последнего близко к полученному для резонатора с идеально проводящими зеркалами (кружочки на рисунке).

На рис. 3 показано распределение невязки Δ (погрешности выполнения эквивалентного граничного условия на вспомогательном контуре) решения системы интегральных уравнений. Величину Δ определяли выражением

$$\Delta = \left| (1 \pm ik\delta\zeta) E_\tau - (\pm\zeta - ik\delta) H_x + \frac{\partial\delta E_n}{\partial\tau} \right|. \quad (22)$$

Как показывают приведенные результаты расчетов, описываемый алгоритм обладает определенной устойчивостью: среднее значение невязки монотонно уменьшается при увеличении числа слагаемых $N_J^{(e,m)}$ в представлении тока (14) [20].

На рис. 4 показаны зависимости добротности и резонансной длины мод открытого квазиоптического резонатора от радиуса кривизны зеркала. Расчеты проводили для симметричного резонатора, длина которого $2l = 7.8$, апертура зеркала $2a = 9$. Кривые 1–3 соответствуют модам $H_{0,4}$, $H_{2,4}$ и $H_{3,6}$. Приведены решения для двумерной задачи (поля не зависят от координаты x), полученные различными способами. Кружочками показаны результаты приближенного расчета, полученные при аппроксимации поля собственного колебания соответствующими волновыми пучками Гаусса–Эрмита. Отметим, что значение добротности, полученное из асимптотической формулы (20), практически одинаково для всех рассматриваемых типов колебаний и слабо зависит от радиуса кривизны зеркала.

Как показывают представленные на рис. 4 результаты расчетов, асимптотическое решение (20) находится в хорошем согласии с результатами численного решения задачи в строгой постановке в том случае, когда колебание обладает отчетливо выраженной каустикой и дифракцией на краях зеркала допустимо пренебречь. В рассматриваемом случае это выполняется для колебаний $H_{0,4}$ и $H_{2,4}$. Резонансные длины волн этих колебаний достаточно хорошо описываются асимптотической формулой, а для колебания $H_{0,4}$ формула (20) дает вполне приемлемую точность и при расчете добротности в достаточно широком диапазоне изменения параметра R . Колебание $H_{3,6}$ в данном случае формируется в значительной степени благодаря дифракции на краях зеркала и это приводит к существенному отличию резонансной длины волны от асимптотического значения, даваемого формулой (20).

При увеличении апертуры зеркала точность расчета комплексной резонансной длины волны при помощи асимптотической формулы (20) повышается. Это демонстрируют результаты, показанные на рис. 5, на котором приведены те же зависимости, что и на рис. 4, но для резонатора с увеличенной апертурой зеркала: $2a = 11$. Как видно из рисунка, для колебаний $H_{0,4}$ и $H_{2,4}$

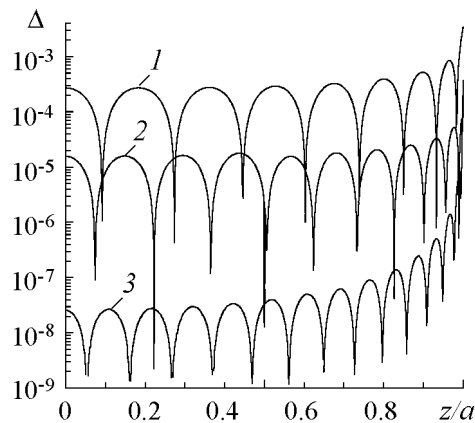


Рис. 5. Распределение погрешности Δ выполнения эквивалентного граничного условия. Кривые 1–3 соответствуют $N_J^{(e)} = N_J^{(m)} = 8, 10$ и 14. Остальные параметры задачи те же, что и для рис. 2

асимптотическая формула (20) дает достаточно точные значения не только для резонансной длины волны, но и для добротности в некотором диапазоне изменения радиуса кривизны зеркала. Точность расчета резонансной длины волны при использовании асимптотической формулы (20) для колебания $H_{3,6}$ в этом случае значительно выше.

Результаты, приведенные на рис. 4 и 5 иллюстрируют существование междуподовой связи собственных колебаний открытого резонатора. Данное явление для открытых резонаторов с идеально проводящими зеркалами было описано в монографии [21]. Отметим, что, как показано в [22], подобные явления наблюдаются и в некоторых других открытых электродинамических структурах. В работе [23] показано, что изменение геометрии открытой резонансной структуры может приводить к изменению типа связи. В случае слабой связи кривые зависимости потерь двух

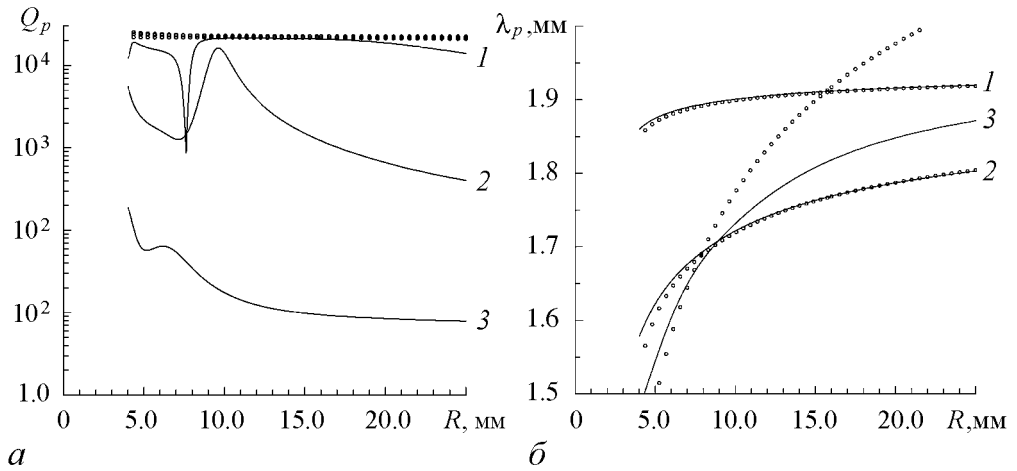


Рис. 3. Зависимость добротности (а) и резонансной длины волны (б) мод открытого резонатора от радиуса кривизны зеркала R . Кривые 1–3 соответствуют модам $H_{0,4}$, $H_{2,4}$ и $H_{3,6}$. Расчеты проводили при $a = 4.5$. Остальные параметры задачи те же, что и для рис. 2. Кривыми с кружочками показаны результаты расчета по приближенной асимптотической формуле (20)

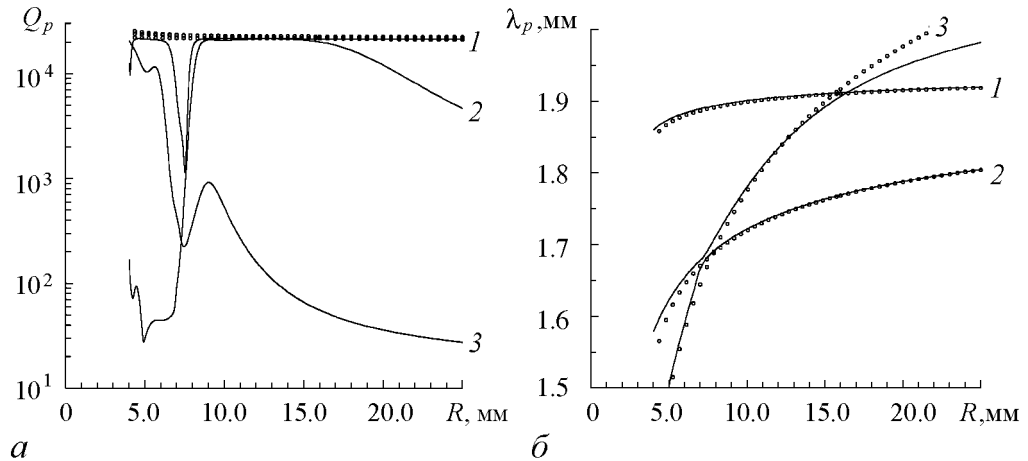


Рис. 4. Зависимость добротности (а) и резонансной длины волны (б) мод открытого резонатора от радиуса кривизны зеркала R . Кривые 1–3 соответствуют модам $H_{0,4}$, $H_{2,4}$ и $H_{3,6}$. Расчеты проводили при $a = 5.5$. Остальные параметры задачи те же, что и для рис. 2. Кривыми с кружочками показаны результаты расчета по приближенной асимптотической формуле (20)

различных колебаний от параметра, характеризующего геометрию структуры, пересекаются вблизи точки совпадения частот, а частоты собственных колебаний ведут себя подобно частотам двух связанных осцилляторов на графике Вина. Для сильной связи характеры зависимостей меняются местами. Отметим, что слабая связь между колебаниями характерна для неустойчивых открытых резонаторов [24, 25].

Как видно из результатов, приведенных на рис. 4 и 5, изменение апертуры зеркала приводит к изменению типа связи мод открытого резонатора. При $2a = 9$ связь между колебаниями $H_{4,0}$ и $H_{4,2}$ является сильной. Увеличение апертуры зеркала до $2a = 11$ мм приводит к тому, что связь этих колебаний становится слабой. Физически это проявляется в том, что при $2a = 9$ мм с изменением радиуса кривизны зеркала колебания $H_{4,2}$ и $H_{3,6}$ остаются изолированными [23]. При $2a = 11$ изменение радиуса кривизны зеркала приводит к обмену типами колебаний: мода $H_{4,2}$ превращается в $H_{3,6}$ и наоборот.

Результаты данной работы показывают, что для корректного использования асимптотического выражения (20) геометрия резонатора, применяемого для экспериментальных исследований, должна удовлетворять ряду требований. В частности, размер каустики должен быть существенно меньше апертуры зеркала. Кроме того, необходимо выбирать значения радиуса кривизны зеркала так, чтобы работать вне условий существования междутиповой связи колебаний. Как следует из рассмотрения кривых на рис. 4 и 5, данным условиям удовлетворяет достаточно узкий диапазон значений R : при малых R заметными становятся явления взаимодействия мод, а при увеличении R значительно возрастают радиационные потери вследствие увеличения относительного размера каустики.

Заключение

В статье приведены результаты решения задачи о собственных колебаниях открытого резонатора с зеркалами, обладающими конечной проводимостью. Решение получено модифицированным методом продолженных граничных условий. Результаты решения задачи в строгой постановке сопоставлены с полученными в квазиоптическом приближении. Установлено, что в некотором диапазоне параметров задачи асимптотическое решение приводит к вполне приемлемому по точности результату. Показано, что относительно небольшое изменение апертуры зеркала может привести к изменению типа связи мод открытого резонатора.

Библиографический список

1. *Afsar M.N., Birch J.B., Clarke R.N.* The Measurements of the Properties of Materials // Proceedings of the IEEE. 1986. Vol. 74, № 1, P. 183.
2. *Кюркчан А.Г., Анютин А.П.* Метод продолженных граничных условий и вейвлеты // Доклады Академии наук. 2002. Т. 385, № 3. С. 309.
3. *Кюркчан А.Г., Маненков С.А.* Дифракция электромагнитного поля на большом выступе импедансной плоскости // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49, № 12. С. 1413.
4. *Кюркчан А.Г., Смирнова Н.И.* Решение задач дифракции методом продолженных граничных условий и дискретных источников // Радиотехника и электроника. 2005. Т. 50, № 10. С. 1231.

5. *Богомолов Г.Д., Клеев А.И.* Использование модифицированного метода продолженных граничных условий для расчета открытых резонаторов // Радиотехника и электроника. 2011. Т. 56, № 10. С. 1187.
6. *Богомолов Г.Д., Клеев А.И., Тарасов М.А.* Квазиоптическое возбуждение открытого резонатора // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55, № 6. С. 645.
7. *Богомолов Г.Д., Клеев А.И., Тарасов М.А.* О возбуждении открытого резонатора, связанного с волноводом через отверстие в зеркале // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55, № 11. С. 1319.
8. *Mitzner M.K.* Effective boundary conditions for reflection and transmission by an absorbing shell of arbitrary shape // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1968. Vol. AP-16, № 6. P. 706.
9. *Bleszynski E., Bleszynski M., Jaroszewich T.* Surface-integral equations for electromagnetic scattering from impenetrable and penetrable sheets // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 1993. Vol. 35, № 6. P. 14.
10. *Богомолов Г.Д., Клеев А.И.* К расчету омических потерь при дифракции на ленточной решетке // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54, № 6. С. 645.
11. *Каценеленбаум Б.З.* Теория нерегулярных волноводов с медленно меняющимися параметрами. М.: Издательство Академии наук СССР, 1961. 214 с.
12. *Морс Ф.М., Фешбах Г.* Методы теоретической физики. М.: Издательство иностранной литературы, 1958. Т. 1. 930 с.
13. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / Под редакцией М. Абрамовица и И. Стиган. М.: Наука, 1979.
14. *Kyurkchan A.G., Sukov A.I., Kleev A.I.* Singularities of wave fields and numerical methods of solving the boundary-value problems for Helmholtz equations // Generalized Multipole Techniques for Electromagnetic and Light Scattering / Ed. T. Wriedt. Amsterdam: Elsevier, 1999. P. 81.
15. *Kyurkchan A.G., Sukov A.I., Kleev A.I.* The method for solving the problems of the diffraction of electromagnetic and acoustic waves using the information on analytical properties of the scattered field // Applied Computational Electromagnetic Society Journal. 1994. Vol. 9, № 3. P. 101.
16. *Кюркчан А.Г., Клеев А.И.* Использование априорной информации об аналитических свойствах решения в задачах электродинамики и акустики // Радиотехника и электроника. 1996. Т. 41, № 2. С. 162.
17. *Богомолов Г.Д., Клеев А.И.* Расчет квазиоптического резонатора с гофрированным зеркалом // Радиотехника и электроника. 1999. Т. 44, № 9. С. 1040.
18. *Вайнштейн Л.А.* Открытые резонаторы и открытые волноводы. М.: Советское радио, 1966. 475 с.
19. *Богомолов Г.Д., Клеев А.И.* О применении асимптотических методов в теории открытых резонаторов // Радиотехника и электроника. 2011. Т. 56, № 9. С. 1080.
20. *Кюркчан А.Г., Анютин А.П.* О корректности задач дифракции, сводящихся к интегральным уравнениям Фредгольма I рода с гладким ядром // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51, № 1. С. 54.
21. *Шестопалов В.П.* Спектральная теория и возбуждение открытых структур. Киев: «Наукова думка», 1987. 288 с.
22. *Yakovlev A.B., Hanson G.W.* Fundamental modal phenomena on isotropic and anisotropic planar slab dielectric waveguide // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2003. Vol. 51, № 4. P. 888.

23. *Богомолов Г.Д., Клеев А.И.* Область стабильности основного колебания волноводного квазиоптического резонатора // Радиотехника и электроника. 1999. Т. 44, № 3. С. 276.
24. *Ананьев Ю.А.* Неустойчивые резонаторы и их применения (обзор) // Квантовая электроника. 1971. Т. 1, № 6. С. 3.
25. *Sanderson R.L., Streifer W.* Unstable laser resonator modes // Applied Optics. 1969. Vol. 8, № 10. P. 2129.

*Институт физических проблем
им. П.Л. Капицы РАН*

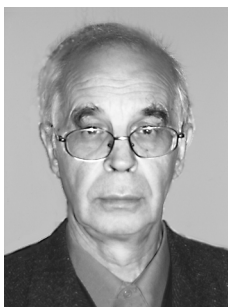
Поступила в редакцию 29.08.2012

OHMIC LOSS CALCULATION IN THE OPEN RESONATORS

G. D. Bogomolov, A. I. Kleev

We present a numerical method for calculation the eigenmodes of the open resonator. We assume, that the resonator mirror has the finite conductivity. The new approach, based on the modified method of the field continuation, was suggested. The results obtained were compared with the asymptotic solution.

Keywords: Open resonators, integral equation method, adaptive collocation method, equivalent boundary conditions, analytical continuation.



Богомолов Генрих Дмитриевич – родился в 1941 году, окончил Московский физико-технический институт (1963). После окончания МФТИ работает в ИФП РАН заместителем директора по науке. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в ИФП АН СССР (1968). Опубликовал 54 научных статьи по теории и экспериментальному исследованию оротрона, микротрона и квазиоптических резонаторов. Доцент Московского физико-технического института. Заместитель главного редактора журнала «Приборы и техника эксперимента».

119334 Москва, ул. Косыгина, д. 2
Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН
E-mail: bogomolov@kapitza.ras.ru



Клеев Андрей Игоревич – родился в Москве (1958), окончил Московский физико-технический институт (1981). После окончания МФТИ работает в ИФП РАН ведущим научным сотрудником. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в ИФП АН СССР (1986) и доктора физико-математических наук в СГУ им. Н.Г.Чернышевского (1995). Опубликовал 58 научных статей по численным методам теории дифракции, теории квазиоптических волноводов и резонаторов, теории электронно-волнового взаимодействия в резонансных структурах.

119334 Москва, ул. Косыгина, д. 2
Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН
E-mail: kleev@kapitza.ras.ru



НЕЙРОНОПОДОБНАЯ ДИНАМИКА В СИСТЕМЕ ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

М. А. Мищенко, В. Д. Шалфеев, В. В. Матросов

Обсуждается использование системы фазовой синхронизации в качестве модели нейроноподобного элемента. Производится разбиение плоскости параметров рассматриваемой системы на области существования различных режимов, характерных для динамики реальных нейронов. Изучаются бифуркационные механизмы переходов между режимами.

Ключевые слова: Нейроноподобная модель, система фазовой синхронизации.

Введение

Исследование динамики больших ансамблей нейронов мозга – одна из наиболее трудных, интересных и актуальных проблем современной науки, привлекающая внимание ученых как в теоретическом плане, так и в области эксперимента. В силу сложности постановки экспериментов с живыми нейронами, особый интерес сейчас приобретают различные приёмы моделирования нейронных сетей. С позиции моделирования, нейрон является сложным нелинейным объектом, способным демонстрировать множество динамических режимов [1, 2]. Обычно за основную характеристику динамики нейрона принимают мембранный потенциал. Для математического исследования динамики нейрона предложено множество моделей различной степени детализации, реализующих те или иные динамические режимы. Наиболее известной является модель нейрона Ходжкина–Хаксли [3], описывающая вклад различных ионных каналов в изменение мембранного потенциала под воздействием приложенного внешнего тока. Однако из-за большого количества динамических переменных и параметров использование данной модели для моделирования ансамблей взаимодействующих нейронов представляет определенные трудности. Для анализа коллективной динамики нейронных ансамблей можно использовать более простые модели – фазовые модели первого порядка [1, 4–6]. Эти модели описывают квазигармонические колебания связанных элементов с взаимодействием, пропорциональным разности фаз колебаний, но, в силу своей простоты, они не способны описывать более сложное поведение нейрона, например пачечную активность живого нейрона.

В данной работе рассматривается модель нейроноподобного элемента на основе системы фазовой синхронизации [7]. Системы фазовой синхронизации получили широкое распространение в радиотехнике и связи. Эти системы изначально разрабатывались для решения задач синхронизации, стабилизации частоты, управления частотой и фазой радиоколебаний, фильтрации, демодуляции, формирования и обработки сигналов, а также ряда других задач. К настоящему времени теория систем фазовой синхронизации достаточно хорошо развита [8–10].

В работах [11, 12] рассматривалась система фазовой синхронизации с фильтрами нижних и верхних частот в цепи управления. В такой системе отсутствует состояние равновесия, но существует предельный цикл, который при изменении параметров системы может менять период, кратность и превращаться в хаотический аттрактор. Как установлено в [7, 12], реализующиеся в такой системе режимы качественно отображают некоторые режимы изменения мембранного потенциала нейрона, например регулярную импульсную активность и пачечные разряды с различным числом импульсов в пачке, а также квазихаотические колебания. Поэтому такую систему фазовой синхронизации можно рассматривать как модель нейрона.

В данной работе исследуется динамика описанной выше системы, изучается влияние параметров на поведение модели, а также строится разбиение пространства параметров на области существования различных режимов.

1. Описание модели

Динамика рассматриваемой модели описывается следующей системой дифференциальных уравнений [7], определенной в цилиндрическом фазовом пространстве $(\varphi(\text{mod } 2\pi), y, z)$:

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi}{d\tau} &= y, & \frac{dy}{d\tau} &= z, \\ \varepsilon_1 \varepsilon_2 \frac{dz}{d\tau} &= \gamma - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)z - (1 + \varepsilon_1 \cos \varphi)y, \end{aligned} \quad (1)$$

где φ – текущая разность фаз подстраиваемого и опорного генераторов, γ – начальная частотная расстройка, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – параметры инерционности фильтров. Применительно к динамике нейрона, переменную y можно интерпретировать как описывающую изменение мембранного потенциала, параметры ε_1 и ε_2 позволяют задавать необходимый динамический режим, а γ оказывает воздействие, сходное с воздействием внешнего тока в модели Ходжкина–Хаксли.

На рис. 1 представлены примеры аттракторов и осциллограмм модели (1), характеризующие различные динамические режимы. Периодическую активность нейрона иллюстрирует рис. 1, *a*, пачечную активность – рис. 1, *b–e*. Для регулярных движений количество импульсов в пачке совпадает с кратностью предельного цикла. Соответственно обозначим пачечные режимы $\langle 1 \rangle, \langle 2 \rangle, \langle 3 \rangle$ и т.д., а отвечающие им предельные циклы – $L_1, L_2, L_3 \dots$. На рис. 1, *e* представлен режим пачечной активности, когда вместо предельного цикла имеет место хаотический аттрактор. В этом случае число импульсов в пачке есть случайная величина.

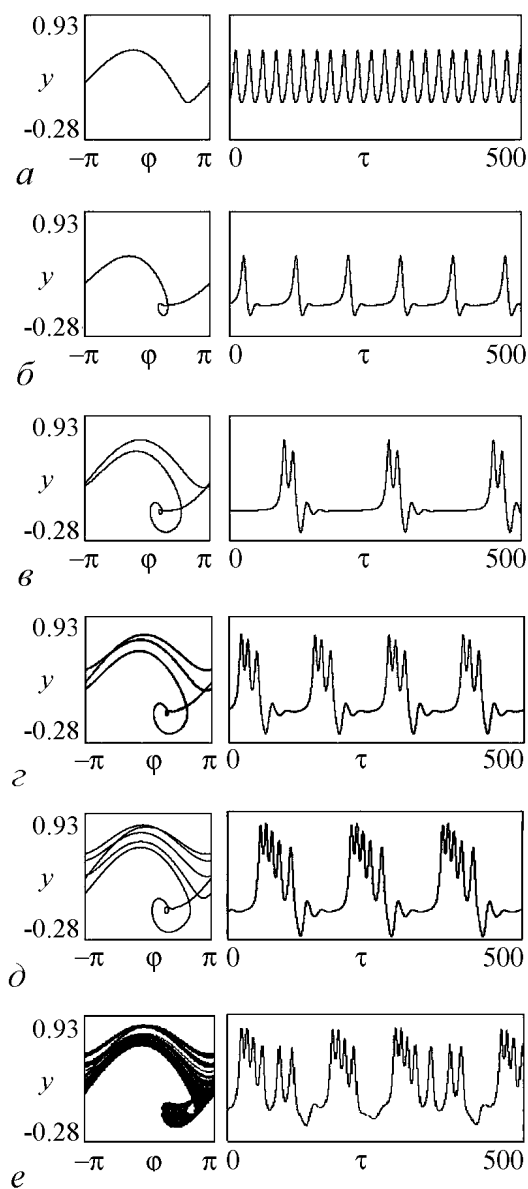


Рис. 1. Примеры проекций (φ, y) и осциллограмм (τ, y) аттракторов модели (1)

Из сравнительного анализа осциллограмм (см. рис. 1) и примеров активности мембранного потенциала реального нейрона (рис. 2) можно сделать вывод, что движения, описываемые моделью (1), качественно похожи на колебания мембранного потенциала как реальных нейронов, так и нейронов, описываемых другими моделями.

Все приведенные режимы реализуются в данной модели при изменении параметров $\gamma, \varepsilon_1, \varepsilon_2$, в результате чего имеется возможность регулировать количество импульсов в пачке, интервалы между пачками, амплитуду импульсов. На рис. 3 представлены разбиения сечений (ε_1, γ) и $(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ пространства параметров модели (1) на области с различным динамическим поведением. Внутри каждой области, в основном, реализуется один из возможных режимов. В области 1 реализуется режим периодической активности (см. рис. 1, а) и пачечный режим $\langle 1 \rangle$ с одним импульсом в пачке (рис. 1, б), в области 2 – режим $\langle 2 \rangle$ (рис. 1, в), в области 3 – режим $\langle 3 \rangle$ (рис. 1, г) и так далее. Области параметров, где реализуются хаотические режимы (рис. 1, е), на рис. 3 отмечены штриховкой. При изменении параметров модели внутри области тип режима сохраняется, меняются только характеристики колебаний (интервал между пачками, амплитуда и т.д.). Из рис. 3

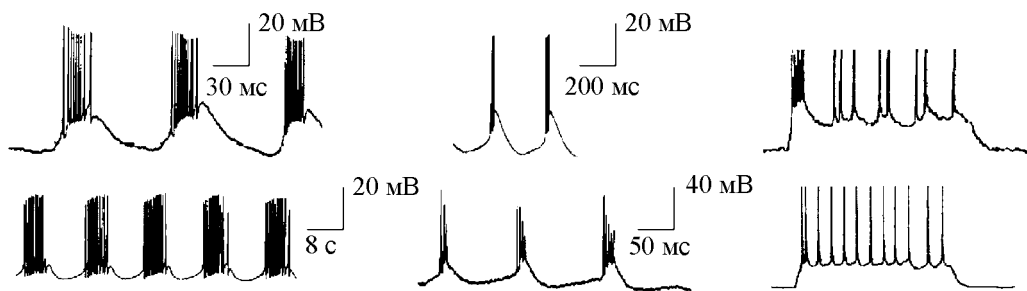


Рис. 2. Примеры активности мембранного потенциала нейрона [1, 13]

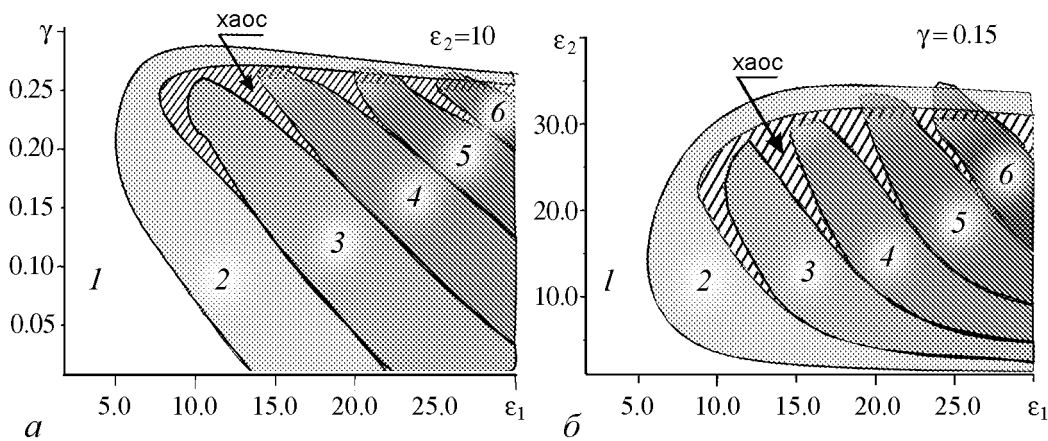


Рис. 3. Структуры сечений пространства параметров модели (1) при $\varepsilon_2 = 10$ (а) и $\gamma = 0.15$ (б)

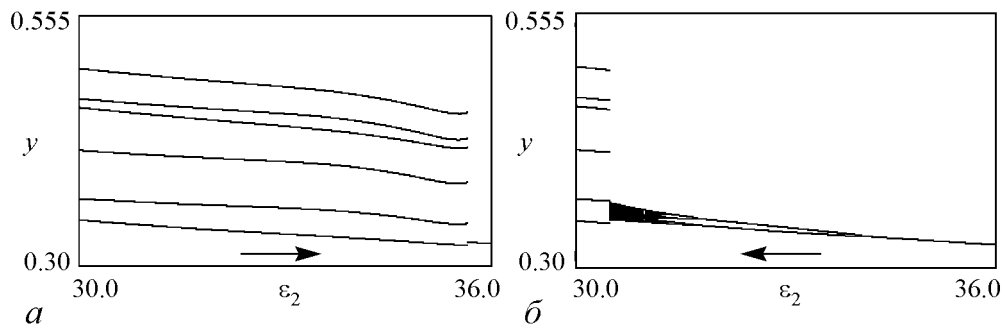


Рис. 4. Пример мультистабильности в системе (1): бифуркационные диаграммы отображения Пуанкаре при $\gamma = 0.15$, $\varepsilon_1 = 24.5$, построенные при увеличении (а) и уменьшении (б) параметра ε_2

видно, что области существования различных режимов могут перекрываться, порождая области мультистабильного поведения. Было установлено перекрытие области 4 с областью хаотических колебаний, области 5 с областью хаотических колебаний и областью 2, области 6 с областью хаотических колебаний и областями 2 и 1. Пример бифуркационной диаграммы отображения Пуанкаре, иллюстрирующей сопутствующее перекрыванию областей явление мультистабильности, приведен на рис. 4.

2. Механизмы переходов между режимами

Рассмотрим подробнее механизмы переходов между режимами. Изменение в поведении динамической системы связано с бифуркациями особых траекторий. Области 1 и 2 (см. рис. 3) разделяет бифуркационная кривая удвоения периода. При переходе из области 1 в область 2 цикл L_1 становится неустойчивым, в фазовом пространстве появляется предельный цикл удвоенного периода L_2 , соответствующий режиму $\langle 2 \rangle$.

Тип бифуркационной кривой, разделяющей области 2, 3, 4, ... на рис. 3, а при малых γ , на рис. 3, б при малых ε_2 или при больших ε_1 , не установлен. При пересечении этих участков границ циклы одного типа исчезают, а другого типа появляются,

в частности, цикл L_2 замещается циклом L_3 , цикл L_3 – циклом L_4 и т.д., при этом модули мультипликаторов соответствующих предельных циклов в единицу не обращаются. Здесь картины перестроек фазового портрета аналогичны картинам, наблюдаемым в модели кольца из двух систем фазовой автоподстройки (ФАП) в окрестности бифуркационных кривых, отвечающих за образование сепаратрисных контуров [15]. Однако в рассматриваемой модели упомянутые бифуркации реализоваться не могут, в силу отсутствия состояний равновесия. Возможно, что рассматриваемые переходы от одного динамического режима к другому происходят через образование сложных структур, области существования которых настолько малы, что мы не смогли их зафиксировать в численном эксперименте.

Наличие разделяющих областей со сложной динамикой обнаружено в модели (1) при не малых γ (рис. 3, *a*) и не малых ε_2 (рис. 3, *б*). Возникновению сложной динамики предшествуют бифуркации соответствующих предельных циклов. В процессе вычислительных экспериментов установлены следующие бифуркации:

- двухкратного предельного цикла (касательная или седло-узловая бифуркации), когда один из мультипликаторов цикла принимает значение $+1$;
- удвоения периода, когда один из мультипликаторов цикла равен -1 ;
- бифуркация Неймарка–Сакера, когда комплексно-сопряженные мультипликаторы по модулю равны 1.

Таким образом, правая граница области существования цикла L_2 и границы областей 3, 4, 5, ... состоят из нескольких бифуркационных кривых; расположение этих кривых на плоскости параметров для различных областей одинаково.

Структуру границ рассмотрим на примере границы области 5 (рис. 5). Внутри области 5 существует единственный предельный цикл L_5 кратности пять (см. рис. 1, *д*). Левая и правая границы области 5 устроены идентично, поэтому рассмотрим поведение системы при выходе из области 5 с увеличением параметра ε_1 , то есть через правую границу, схематическое изображение которой приведено на

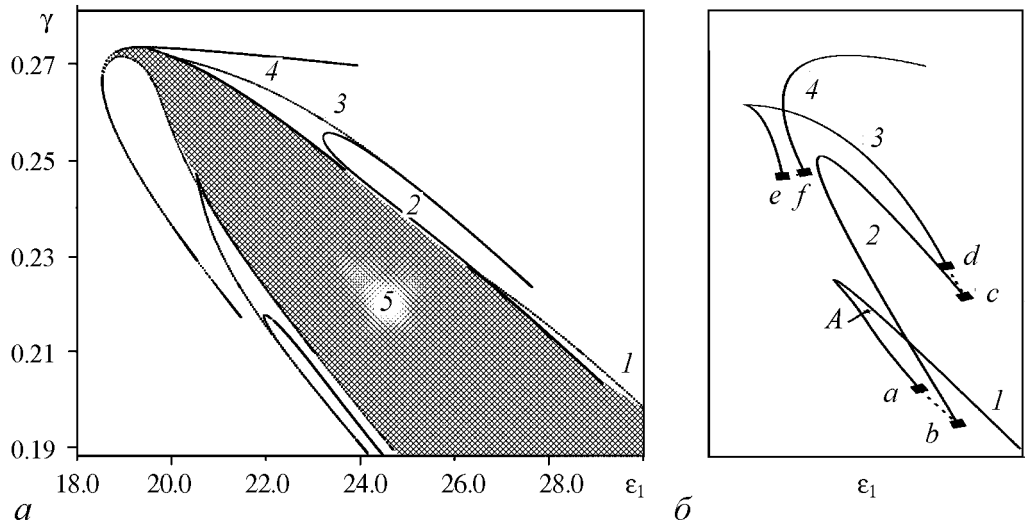


Рис. 5. Структура границы области 5 режима (5) (*a*) и схематическое изображение правой части границы (*б*)

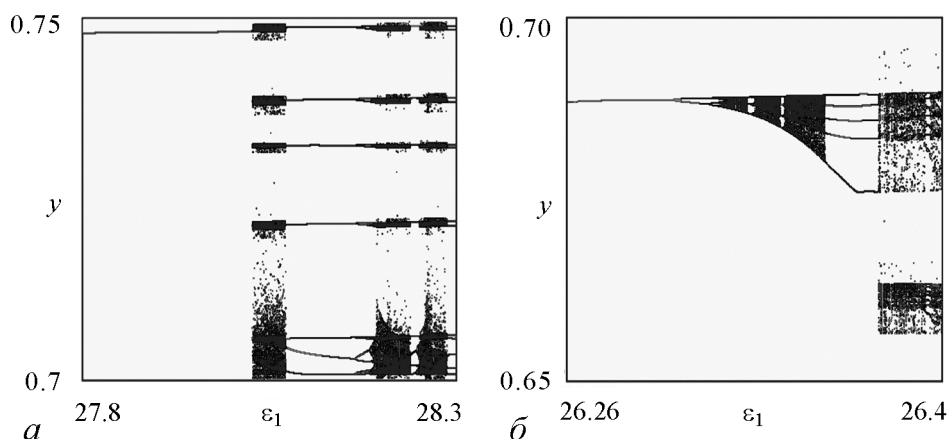


Рис. 6. Бифуркационные диаграммы отображения Пуанкаре кратности 5 системы (1) при $\gamma = 0.2$ (а) и $\gamma = 0.215$ (б), $\varepsilon_2 = 10$

рис. 5, б. Рассматриваемая граница включает в себя участки следующих бифуркационных кривых: двукратного предельного цикла (линии 1 и 3), удвоения периода (линии 2 и 4), Неймарка–Сакера (пунктирные линии, соединяющие точки a и b , c и d , e и f). Точки a , d , e и точки b , c , f есть точки нейтральности, где предельный цикл L_5 имеет два мультипликатора, соответственно равные $+1$ и -1 . Заметим, что при движении вдоль бифуркационной кривой Неймарка–Сакера, например, от точки a к точке b показатель степени ψ мультипликаторов $\mu_{1,2} = e^{\pm i\psi}$ непрерывно меняется от $\psi = 0$ до $\psi = \pi$. В зависимости от значений параметров здесь могут реализоваться случаи рождения как инвариантных торов, так и периодических движений седлового типа с пересекающимися инвариантными многообразиями, а также случаи, когда рождаются устойчивые периодические движения различной кратности. Эти особые бифуркации могут приводить к возникновению хаотических движений [14].

Существуют иные механизмы возникновения хаотической динамики, в частности, через перемежаемость первого рода и через каскад бифуркаций удвоения периода. Эти сценарии иллюстрируют однопараметрические бифуркационные диаграммы отображения Пуанкаре кратности пять, приведенные на рис. 6.

Стартовым состоянием для построения диаграмм служил предельный цикл L_5 . Построенное отображение имеет кратность пять, поэтому на диаграмме предельному циклу L_5 отвечает одна линия. Диаграмма на рис. 6, а показывает поведение системы (1) при выходе из области 5 через линию 1 (см. рис. 5). Здесь предельный цикл L_5 исчезает в результате касательной бифуркации, а на его месте формируется хаотический аттрактор. Диаграмма на рис. 6, б иллюстрирует поведение системы (1) при выходе из области 5 через линию 2 (см. рис. 5). Здесь при увеличении ε_1 наблюдается переход к хаосу по сценарию Фейгенбаума.

Заметим, что бифуркационные кривые, участвующие в формировании границы области 5, имеют неоднозначное определение. Например, при значении $\gamma = 0.215$ кривая 1 (см. рис. 5) имеет две ветви, образуя некоторое подобие «клюва». На левой ветви этой кривой при $\varepsilon_1 = 27.82$ происходит бифуркация рождения устойчивого предельного цикла L'_5 кратности 5, который разрушается при пересечении бифуркационной кривой 2 через бифуркацию удвоения периода. Предельный цикл L_5

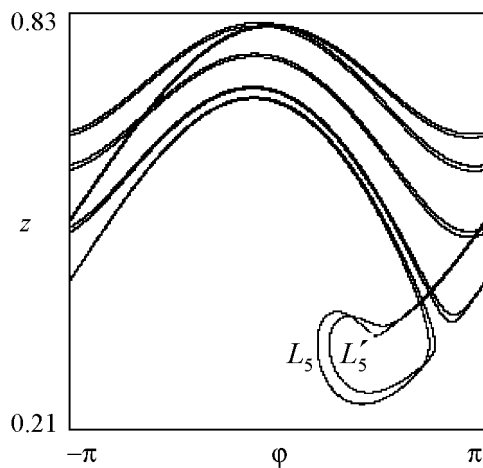


Рис. 7. Проекция предельных циклов L_5 и L'_5 модели (1) при $\gamma=0.215$, $\varepsilon_1 = 27.9$, $\varepsilon_2 = 10$

разрушается через касательную бифуркацию на правой ветви *кривой 1* при $\varepsilon_1 = 28.04$. Таким образом, между *кривыми 1* и *2* в точке *A* (см. рис. 5, б) существует два предельных цикла кратности 5: L_5 и L'_5 , которые имеют одинаковый период, но различимы в фазовом пространстве (рис. 7).

При $\gamma = 0.226$ также происходит рождение предельного цикла L'_5 на левой ветви бифуркационной *кривой 1* при $\varepsilon_1 = 26.51$, но сначала происходит разрушение предельного цикла L_5 на правой ветви *кривой 1* при $\varepsilon_1 = 26.53$, а затем разрушение цикла L'_5 на *кривой 2* при $\varepsilon_1 = 26.54$.

Заключение

В работе была предложена и исследована модель нейроноподобного элемента на основе системы фазовой синхронизации. Данная модель в отличие от простейших фазовых моделей нейрона позволяет демонстрировать не только периодические, но и пачечные типы колебаний, характерные для реальных нейронов. Было построено разбиение плоскостей параметров модели на области существования динамических режимов с различным количеством импульсов в пачке. Исследованы бифуркационные механизмы переходов между режимами модели. Системы фазовой синхронизации и их ансамбли хорошо изучены в радиофизике, что позволяет использовать эти данные при изучении взаимодействия нескольких нейроноподобных элементов. Важным преимуществом данной модели является наличие аппаратной реализации в виде электронной схемы, на основе которой могут быть составлены различные радиотехнические схемы для экспериментального изучения динамики взаимодействующих нейроноподобных элементов.

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013гг. (контракт №14.740.11.0075).

Библиографический список

1. Rabinovich M.I., Varona P., Selverston A.I., Abarbanel H.D.I. Dynamical principles in neuroscience // Reviews of Modern Physics. 2006. Vol. 78. P. 1213.
2. Izhikevich E.M. Dynamical Systems in Neuroscience: The Geometry of Excitability and Bursting. Cambridge, The MIT Press, 2007.
3. Hodgkin A.L., Huxley A.F. A Quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve // Journal of Physiology. 1952. Vol. 117. P. 500.

4. *Cohen A.H., Holmes P.J., Rand R.H.* The nature of the coupling between segmental oscillators of the lamprey spinal generator for locomotion: A mathematical model // *Journal of Mathematical Biology*. 1982. Vol. 13. P. 345.
5. *Kazanovich Ya.B., Krukov V.I., Lyuzuyanina T.B.* Synchronisation and Phase Locking in Oscillatory Models of Neural Networks in Neurocomputers and Attention. Vol. I: Neurobiology, synchronisation and chaos. Manchester: Manchester University Press, 1991.
6. *Абарбанель Г.Д.И., Рабинович М.И. и др.* Синхронизация в нейронных ансамблях // *Успехи физических наук*. 1996. Vol. 166, № 4. С. 363.
7. *Мищенко М.А.* Нейроподобная модель на основе системы фазовой автоподстройки частоты // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2011, № 5(3). С. 279.
8. *Шахгильдян В.В., Ляховкин А.А.* Системы фазовой автоподстройки частоты. М.: Связь, 1972.
9. *Линдсей В.* Системы синхронизации в связи и управлении / Пер. с англ. под ред. Ю.Н. Бакаева, М.В. Капранова. М.: Сов. Радио, 1978.
10. *Капранов М.В.* Элементы теории систем фазовой синхронизации. Учебное пособие по курсу теории колебаний. М.: Изд-во МЭИ, 2006.
11. *Шалфеев В.Д.* Исследование динамики системы фазовой автоподстройки частоты с разделительным конденсатором в цепи управления // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1968. Т. 11, № 3.
12. *Бакунов Г.М., Матросов В.В.* Сложные и хаотические колебания в системе ФАП с разделительной емкостью в цепи управления // *Труды XIII научной конференции по радиофизике, посвященной 85-летию со дня рождения М.А. Миллера, Нижний Новгород, 7 мая 2009*. С. 65.
13. *Zhu J.J., Connors B.W.* Intrinsic firing patterns and whisker-evoked synaptic responses of neurons in the rat barrel cortex // *Journal of Neurophysiology*. 1999. Vol. 81. P. 1171.
14. *Неймарк Ю.И., Ланда П.С.* Стохастические и хаотические колебания. М.: Наука, 1987.
15. *Матросов В.В., Шмелев А.В.* Нелинейная динамика ансамбля из двух фазоуправляемых генераторов с кольцевым типом объединения // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 2010. Т. 18, № 4. С. 67.

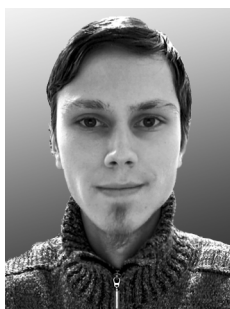
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского *Поступила в редакцию* 30.03.2012

NEURON-LIKE DYNAMICS IN PHASE-LOCKED LOOP

M. A. Mischenko, V. D. Shalfeev, V. V. Matrosov

Use of phase-locked loop as a model of neuron-like element is discussed. Parameter space of the model is partitioned into areas of different regimes specific for dynamics of real neurons. Bifurcation mechanisms of transitions between regimes are examined.

Keywords: Neuron-like model, phase-locked loop.



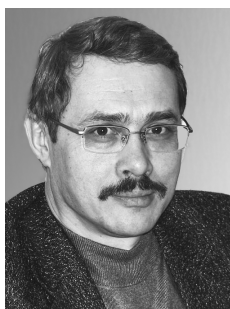
Мищенко Михаил Андреевич – родился в Нижнем Новгороде (1987), окончил радиофизический факультет Нижегородского Государственного Университета им. Н.И. Лобачевского (2010). Аспирант кафедры теории колебаний и автоматического регулирования радиофизического факультета ННГУ. Научные интересы: нелинейная динамика живых систем, нейродинамика.

603950 Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
E-mail: mischenko@neuro.nnov.ru



Шалфеев Владимир Дмитриевич – родился в 1941 году, окончил Горьковский университет в 1963 году. Заведующий кафедрой теории колебаний Нижегородского государственного университета, доктор физико-математических наук, профессор, действительный член Академии инженерных наук РФ. Область научных интересов: динамика нелинейных систем, теория синхронизации, пространственно-временной хаос, структуры. Соавтор монографий «Системы фазовой синхронизации», «Устойчивость, структуры и хаос в нелинейных сетях синхронизации», «Динамический хаос в фазовых системах», «Нелинейная динамика систем фазирования в антенных решетках».

603950 Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
E-mail: shalfeev@rf.unn.ru



Матросов Валерий Владимирович – родился в 1960 году, окончил Горьковский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (1982) по специальности «прикладная математика». Защитил диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1994), доктора физико-математических наук (2007). С 1999 года работает на радиофизическом факультете ННГУ, в настоящее время профессор кафедры теории колебаний и автоматического регулирования. Область научных интересов – динамика нелинейных систем, динамический хаос, синхронизация и управление хаосом, математическое моделирование. Имеет более 100 публикаций в отечественных и зарубежных изданиях, является соавтором двух монографий и трех учебных пособий.

603950 Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
E-mail: matrosov@rf.unn.ru



СТАТЬЯ ОТОЗВАНА РЕДКОЛЛЕГИЕЙ 25.03.2022

МИРЫ СИНЕРГЕТИКИ: ОТ ПРОШЛОГО К БУДУЩЕМУ

Г. Г. Малинецкий

Среди миров, в мерцании светил.
Одной Звезды я повторяю имя.
Не потому, чтоб я Ее любил.
А потому, что я томлюсь с другими.

И. Анненский

«Обаяние целостности» – первоначальное название статьи. Целое обладает удивительной способностью придавать новый смысл частям, создавать внутреннюю гармонию, приоткрывать завесу грядущего. Эта статья о целом.

Ключевые слова: Синергетика, междисциплинарные исследования, индекс цитирования, целостность.

Чтобы представить пройденный маршрут, перевалы и вершины, стоит взглянуть на карту. Такой картой для науки можно считать график, отражающий среднюю цитируемость статей в различных областях науки (рис. 1). Эта величина показывает, насколько активно и энергично научное сообщество, развивающее данную область, какой путь уже пройден, насколько широк фронт исследований.

Мое сознание, как и мнение большинства коллег, до знакомства с подобными данными оставалось «школьным», связанным с детским восприятием отдельных «предметов». И в этом восприятии «физика» сравнима с «химией», каждая из них по объему и трудности материала гораздо «больше» биологии и намного «меньше» математики.

Но «взрослая» наука оказывается совсем другой. Если взять вместе «лидеров» – молекулярную биологию и генетику, фармакологию и токсикологию вместе с биологией и биохимией («потомков» школьной биологии), то они в 7 раз превосходят физику и химию и в 17 раз математику или информатику.

Это результат того, что науки живут как бы «в разном времени», находятся «в разном возрасте» – одни в старости, другие в зрелости, третьи в юности. Отсюда

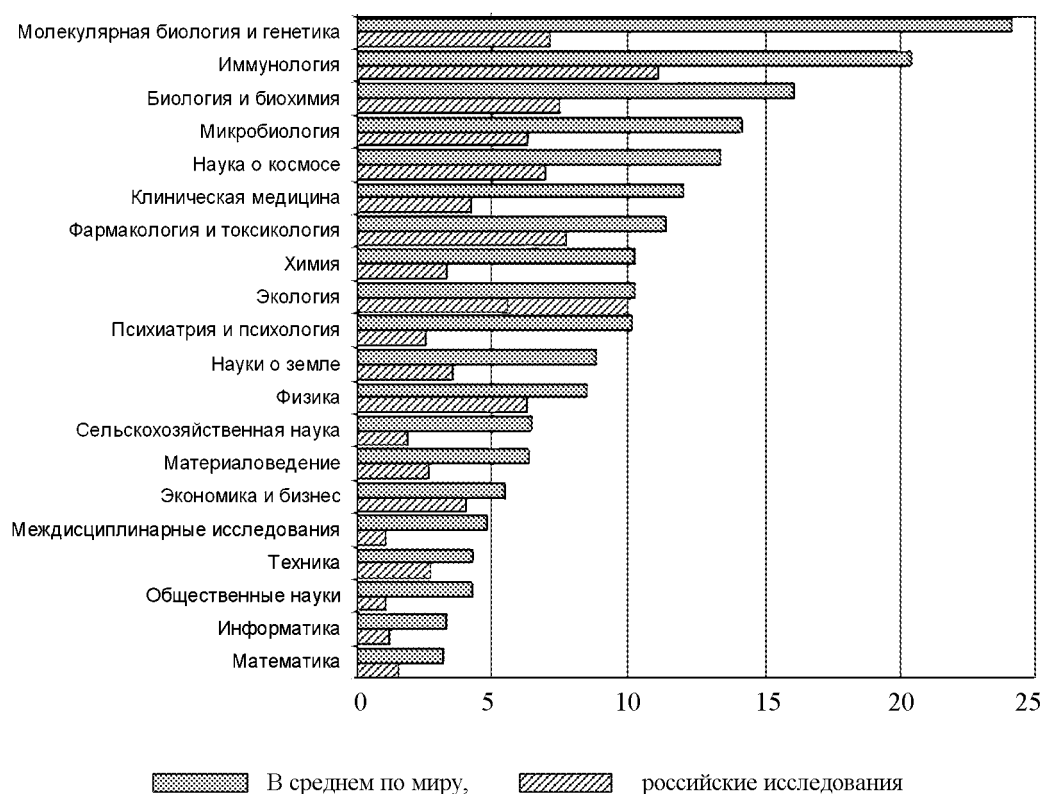


Рис. 1. Средняя цитируемость статей по областям науки. Обращает на себя внимание очень большая разница в цитируемости статей в разных областях. Обратим внимание на иммунологию, дела в которой обстоят у нас существенно лучше, чем в других областях

следует, что многие идеи, методы, подходы, «пройденные» в одной области исследований, могут оказаться последним словом и волнующей перспективой в другой. Поэтому самым ученым очень нужны *междисциплинарные подходы*, которые позволяют мыслить широко, поверх границ отдельных дисциплин, направлений, школ, традиций, помогают ломать барьеры, мешающие двигаться вперед.

Более того, это хорошо понимается в мире (см. рис. 1). Цитируемость работ, посвященных *междисциплинарным исследованиям*, всего лишь вдвое меньше, чем у статей по химии. Значит, в мире такими исследованиями занимаются масштабно и всерьез.

Ну, а теперь посмотрим на профиль российской науки. Он довольно сильно отличается от мирового. Как ни странно, ближе всего к мировым показателям находятся исследования, относящиеся к экономике и бизнесу. Если бы так же дела обстояли с экономикой и бизнесом в нашем отечестве...

Неплохо на мировом фоне смотрится физика. По большинству направлений науки бесстрастная статистика фиксирует отставание показателей российской науки вдвое-втрое.

По-видимому, XXI век будет веком человека. Развитие возможностей и способностей людей и коллективов станет магистральным направлением. С ним будут

связаны и главные возможности, и основные угрозы. Поэтому очень показателен перечень «аутсайдеров» российской науки – это *общественные науки*, а также – *психология и психиатрия*. Здесь мы отстаем от мировых показателей вчетверо.

И завершают этот список *междисциплинарные подходы*, где отставание оказывается почти пятикратным...

И такое положение дел очень тревожит. В самом деле, до середины XX века магистральным путем развития научного знания был анализ («расчленение», «дробление» в дословном переводе). Организация науки походила на средневековый город – гильдия физиков, лига обществоведов, секта химиков и прочие сообщества были слабо связаны, не слишком хорошо представляли проблемы друг друга и уж, тем более, не опирались друг на друга и не очень поддерживали собратьев из других научных цехов. Да и до сих пор «корпоративные интересы» институтов, отделений, секций Академии обычно выступают как непререкаемые аргументы или священные коровы Российской академии наук. Пирог должен печь пирожник, сапоги тачать сапожник. А если что идет не так, то, как в известном детском стихе Бориса Заходера, надо звать «академика по котам» и «академика по китам».

Привычное, по-своему очаровательное научное средневековье – «только физика соль, остальные все ноль», «что-то физики в почете, что-то лирики в загоне», «...а филолог и химик дуби-и-и-на!», «среди наук есть только физика, все остальное – собирание марок»...

Однако уже с середины XX века ситуация начала стремительно меняться. Новые науки, технологии, профессии стали рождаться на стыках существовавших дисциплин или специальностей, подчас довольно далеких – биологическая физика, математическая психология, компьютерная графика, молекулярный дизайн, а также многое, многое другое.

В настоящее время широким фронтом развивается технологическая платформа NBIC (Nano Bio Info Cognito), в которой междисциплинарность заложена изначально. Предполагается, что именно сочетание нанотехнологий и биотехнологий с информационными и когнитивными технологиями даст новое качество. Ученые и инженеры надеются, что целое окажется гораздо больше суммы своих частей.

Но, пожалуй, наиболее остро потребность в междисциплинарности, в специалистах, умеющих видеть лес в целом, а не только отдельные деревья, ветви или листья, ощутили руководители. «У нас есть тысяча специалистов, которые знают, как построить пирамиду, и нет ни одного, который бы сказал, следует ли ее строить», – говорил Джон Кеннеди в нелегкий для Америки час.

Первым междисциплинарным подходом стала *«общая теория управления и связи в человеке, машине и обществе»* или *кибернетика*. Именно так ее определял основоположник этого подхода, американский математик Норберт Винер. Он вместе с коллегами обратил внимание на поразительную аналогию между системами наведения зенитных ракет, некоторыми заболеваниями нервной системы и экономическими механизмами, определяющими периодические кризисы в капиталистической экономике. Появившиеся в то время компьютеры дали кибернетике крылья. Ее термины – «обратная связь», «черный ящик», «большая система», «цена игры», «контур управления» – стали общеупотребительными.

Идеи кибернетики вдохновляли инженеров, футурологов, ученых, давали ощущение огромных возможностей человечества. Польский фантаст Станислав Лем в книге «Сумма технологии», опираясь на идеи кибернетики, рассуждал о *предельных возможностях* человечества, о том, сможем ли мы гасить звезды и преобразить себя для жизни в космосе. Биохимик, писатель и популяризатор науки Айзек Азимов писал о сказках роботов и об этических основах, на которых должно быть основано наше с ними совместное существование.

Но... прекрасное зеркало кибернетики, отражающее реальность и перспективы, через 20 лет после работ Винера разбилось на отдельные науки, направления, научные школы. Из кибернетики «вышли» системное программирование и робототехника, имитационное моделирование и системный анализ, теория информации и математическая лингвистика, распознавание образов и искусственный интеллект, дискретная математика, теория алгоритмических языков и многое другое. Но целостность была утрачена...

Наверно, отчасти это связано с запросами техники, которые привели к неравномерному и негармоничному развитию целого. Может быть, как это иногда бывает, в нужное время в нужном месте не оказалось талантов, энтузиастов и стратегов, видящих перспективу и увлекающих коллег, учеников, последователей...

Может быть, виноваты отцы-основатели, рисовавшие слишком радужные перспективы и далеко отрывавшиеся от конкретных концептуальных и математических моделей, что позволяло «растворять» подход в общих, не имеющих отношения к предмету рассуждениях. Один из создателей кибернетики – Росс Эшби – заявлял, что этот подход представляет собой «состояние ума». Подобные взгляды позволили распахнуть двери для не слишком сведущих людей, которые начали говорить от лица «кибернетиков».

Но дело, может быть, и в самой сути. Вспомним про «черный ящик». Это очень удачный образ управляемой системы. В ответ на заданные управляющие воздействия он должен давать вполне четкие и определенные реакции. При этом не так важно, как устроена такая система, что находится внутри «черного ящика». Для задач управления многими технологическими системами такой взаимосвязи «стимул–реакция» может быть вполне достаточно.

Но если чуть-чуть отойти в сторону, то увидим иное. Представим себе социологический опрос, в ходе которого мы задаем *одни и те же вопросы одним и тем же людям*. Социологи знают, что ответы будут различными и они будут зависеть от множества привходящих факторов, например от времени между подобными опросами. Здесь «черный ящик» придется «открывать» и более глубоко и конкретно разбираться в природе изучаемой системы.

Следующая «междисциплинарная эпоха» началась в 1970-х годах и оказалась связана с именами немецкого физика-теоретика Германа Хакена и лауреата Нобелевской премии по химии 1977 года бельгийского ученого Ильи Романовича Пригожина.

Первый обратил внимание на удивительную аналогию простейших математических моделей, описывающих различные нелинейные системы. Например, уравнения для динамики лазера совпали с теми, которые моделируют конвекцию в подогреваемом снизу слое жидкости (такие процессы являются одними из ключевых факторов, влияющих на погоду). За множеством подобных аналогий Герман Хакен

увидел контуры внутреннего единства, основу для создания нового междисциплинарного подхода. Этот подход он назвал *теорией самоорганизации* или *синергетикой* (от греческих слов, обозначающих совместное действие). Герман Хакен вложил в этот термин два смысла. Во-первых, это подход, показывающий, как у системы (целого) возникают новые свойства, характеристики, стратегии, которыми не обладают ее элементы (части). Во-вторых, это междисциплинарный подход, развитие которого требует совместных усилий ученых-естественников, гуманитариев, математиков, а сейчас можно добавить, инженеров, управленцев, системных аналитиков.

Оглядываясь назад, понимаешь, каким нелегким было становление синергетики в научном сообществе, разделенном на узкие цеховые рамки, и при наличии системы образования, ориентированной на конкретные знания, умения, навыки, а не на общее видение, постановку проблем и перенос идей и методов из одной области в другую.

И тут большую роль играет личность родоначальника научного направления, его энергия, оптимизм, умение привлекать коллег, способность увидеть перспективу. И этими важными качествами Герман Хакен обладает в полной мере. Его блестящей находкой стал выпуск большой серии книг – лекций по синергетике, которые издавались в издательстве «Шпрингер». За несколько десятилетий в этой замечательной серии было издано около сотни томов.

Серия сыграла огромную роль в становлении и развитии синергетики. Научная статья «живет» несколько лет, время жизни большинства книг (не считая учебников и того, чему суждено стать «классикой») 5–7 лет, серия живет в «долгом времени», измеряемом многими десятилетиями, создавая свой круг авторов, читателей, идей, надежд... «Бог на стороне больших батальонов», – говорил Наполеон. Вероятно, и к информационному пространству это относится не в меньшей мере, чем к военному искусству.

В междисциплинарных областях такое дело, как издание серии, особенно важно. Активно работающие исследователи, выступающие как авторы, осмысливают новый круг идей, привносят свое видение и начинают прокладывать путь в междисциплинарном поле. Для студентов, аспирантов, молодых сотрудников, всех интересующихся «драмой идей», открывается целый мир, в котором можно найти или уютный уголок для собственных научных занятий, или вершину, с которой видны новые горизонты.

Большую роль сыграла энциклопедическая эрудиция Германа Хакена, его энтузиазм, интерес к науке, юмор и легкий характер, а также прекрасное знание русского языка.

– Почему Вы назвали новую дисциплину «синергетикой»?

– Мне показалось, что эксперты фондов могут поддержать междисциплинарные идеи, но нужны новые слова и новое название. Под латинские названия больших денег не дадут, поэтому я остановился на греческом варианте.

Или:

– Как Вам удалось так успешно овладеть русским языком?

– Мой дед в Первую мировую войну воевал на Восточном фронте, попал в плен и выучил там русский язык. Мой отец во Вторую мировую воевал на Восточном фронте, попал в плен и там выучил русский язык. Имея в виду, что история повторяется, мама посоветовала мне выучить русский язык заранее. И я последовал этому совету.

Такие диалоги входят в легенды и обрастают подробностями, придавая тепло и внося ощущение игры в огромный мир, каковым является наука.

Большое влияние на развитие синергетики оказал выдающийся исследователь, специалист по термодинамике и статической физике, философ и блестящий лектор И.Р. Пригожин. С ним связан масштаб тех вопросов, которые сегодня задает себе синергетика.

Один из выдающихся физиков сравнил закон сохранения энергии со скромным бухгалтером, скрупулезно сводящим доход и расходы, а второе начало термодинамики – со всемогущим директором, определяющим, куда идут процессы. И направление это – к росту энтропии, к хаосу, к тепловой смерти. Но как же этот безрадостный финал согласуется с химической, геологической, биологической и социальной эволюцией?

В учении Дарвина, обобщающем огромный биологический материал, утверждается, что эволюция ведет нас ко все более совершенным, развитым, приспособленным к окружающей среде видам и формам живого. Острое противоречие между двумя основополагающими теориями налицо.

Другой «вечный вопрос» связан с природой времени. В свое время один из классиков философии – Блаженный Августин – как-то заметил, что если его не спрашивают, что такое время, то он прекрасно это знает, но если спрашивают, то не знает, что ответить (как это похоже на ощущение многих современных студентов!).

Развитие естествознания сделало этот вопрос еще более острым. В самом деле, во втором законе Ньютона переменную t , соответствующую времени, можно заменить на $-t$. Уравнение от этого не изменится. Это означает, что киноленту, фиксирующую нашу реальность, в соответствии с классической механикой, можно пустить как в прямом, так и в обратном направлении. Пуля может влететь в ствол ружья. В стакан с водой, который при «прямом просмотре» упал со стола и разбился, вода при «обратном просмотре» будет удивительным образом собираться, а сам сосуд «впрыгнет на стол». Однако в жизни этого почему-то не происходит. Почему?

На этот важнейший вопрос физики давали и дают разные ответы, которые не очень устраивают их самих. На макроскопическом уровне, как показали работы Брюссельской научной школы, которую в течение многих лет возглавлял И.Р. Пригожин, в нелинейных, далеких от равновесия системах рассеяние энергии (связанное с вязкостью, теплопроводностью, диффузией, электрическим сопротивлением) выступает в качестве «архитектора» возникающей упорядоченности. И.Р. Пригожин предположил, что схожим образом дело обстоит и на микроуровне, что рассеяние энергии (диссипация) должно входить в фундаментальные уравнения, описывающие нашу реальность.

Сама постановка подобных вопросов придает совсем другой масштаб и звучание идеям междисциплинарности. В самом деле, если не привлекать для объяснения того, что установили ученые, высшие силы, то нам самим надо многое понять и представить. Как «возникла» Вселенная (и существует ли она в единственном экземпляре или есть целый набор «миров»)? Почему вещества в ней оказалось гораздо больше, чем антивещества, несмотря на всю симметрию соответствующих уравнений? Как и при каких условиях возникает жизнь? Что такое «сознание» и можно ли наделить чем-то подобным искусственные, кремниевые создания?

Ответы на эти и многие другие волнующие вопросы вновь и вновь требуют широкого взгляда и междисциплинарности.

Российский контекст междисциплинарности

Своначальный, жадный ум, –
Как пламень русский ум опасен:
Так он не удержишь, так ясен,
Так весел он – и так угрюм.

Вячеслав Иванов

Мы – молодой народ, сильный, у нас величайшие таланты. Но кому дано много, с того во многом и взыщется. Не затучнеем и не задремлем! И всему миру покажем пути иные!

Иван Шмелев

Что толку охать и тужить –
Россию нужно заслужить!

Игорь Северянин

Идеи теории самоорганизации, синергетики оказались очень важны и востребованны в российском обществе.

Во-первых, дело в традиции. Перед российским ученым или государственным деятелем, решившим опираться на знание, на технологии, заниматься модернизацией, говоря современным языком, сразу встает множество проблем. Вспомним пушкинскую характеристику Петра I – «то академик, то герой, то мореплаватель, то плотник». Но главная черта – огромное, неукротимое желание сделать Дело, возвысить Россию, используя для этого все возможные средства.

Недавно на родине Русского Флота, в городе Воронеже, в очередной раз поразился петровскому размаху. Советники объяснили Петру, что головы ему не сносить, если начнет дело великое и державе надобное делать в Москве. В беспощадной борьбе родов и кланов для этого не было места. И морской флот был создан, вероятно, впервые в мировой истории... за 1200 километров от моря на не слишком глубоком Дону. В считанные месяцы население города увеличилось всемерно, было отстроено 17 верфей, на которых возвели 36 кораблей. Петр лично экзаменовал 75 недорослей, посланных учиться навигационному делу и другим морским наукам в Европу. Удовлетворительными признал знания четверых, а остальные были направлены проходить дальнейшую практику на русских кораблях. Масштаб сделанного и достигнутые результаты даже сейчас трудно представить. Но ничего... Вроде получилось.

Или Ломоносов, 300-летие которого недавно отмечали. Химия, метеорология, физика, история, геология, филология и вдобавок стихосложение, создание мозаичных панно и руководство стекольным заводом, – круг его дел, интересов, свершений был огромен. И вновь пушкинское: «Ломоносов был великий человек. Он создал университет. Он, лучше сказать, сам был первым нашим университетом».

В узких цеховых рамках было тесно Дмитрию Ивановичу Менделееву – инженеру, метрологу, демографу, экономисту, пионеру нефтедобычи и нефтепереработки, воздухоплавателю, педагогу и организатору, глубокому мыслителю, знаменитому чемоданных и переплетных дел мастеру и, конечно, великому химику. В его последних статьях, написанных в начале XX века, виден глубокий, обобщающий, оригинальный взгляд на мир, уверенность в великом будущем России...

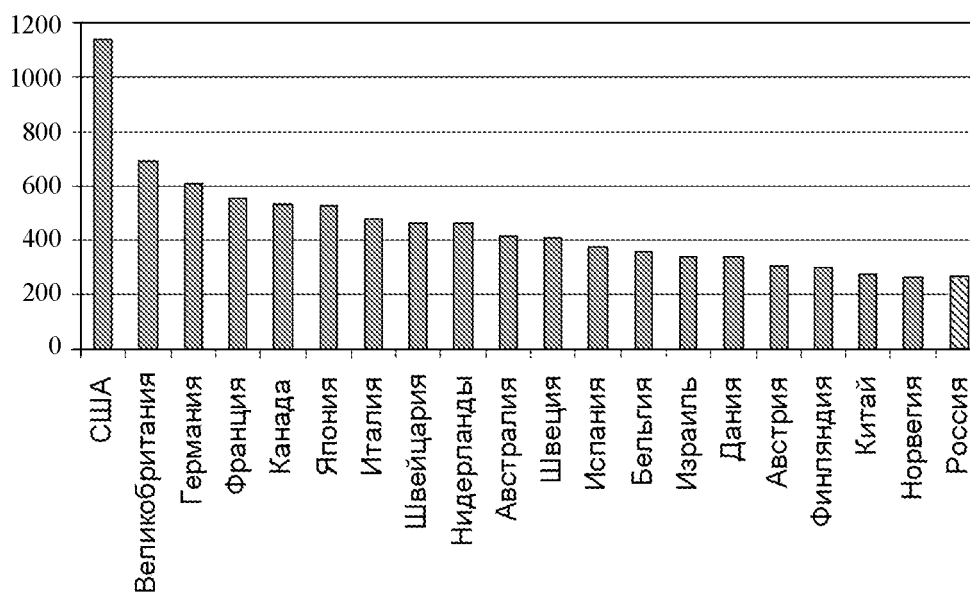


Рис. 2. Индекс Хирша для различных стран. Обратим внимание, что несмотря на достаточно большое количество исследователей и высокий уровень работ во многих областях, наша страна находится на 20-м месте

Можно только удивиться прозорливости геолога, химика, биолога, создателя учения о ноосфере и биогеохимии Владимира Ивановича Вернадского, предсказавшего огромное будущее и опасность ядерной энергии задолго до того, как в этой области были сделаны основополагающие открытия.

И этот список выдающихся ученых, воплощавших междисциплинарность в своем взгляде на мир и в своей деятельности, можно продолжать и продолжать.

Во-вторых, форсированное развитие междисциплинарных подходов, технологий, проектов как воздух необходимо новой России.

И вновь можно обратиться к количественным данным и междисциплинарным сравнениям (рис. 2). Со школьных времен мы привыкли сравнивать научные сверхдержавы СССР и США. Ныне место России значительно скромнее – мы отстаем по числу статей и ссылок на них примерно в 10 раз. По этому показателю нас также опережают Китай, Великобритания, Япония, Германия, Франция, Канада, Италия, Испания, Австралия.

Этот показатель коррелирует с объемом валового внутреннего продукта. У СССР он составлял более 60% американского, у новой России – менее 6%... И это сказывается на всем, в том числе и на науке, и на самооценке, и на мировоззрении. *«Был целый мир провинцией России. Теперь она провинция его».*

Ну, а теперь отвлечемся от валовых показателей и обратимся к тем, которые характеризуют организацию науки и ее вклад в экономику. В настоящее время в связи с указаниями ретивых «эффективных менеджеров», которые сейчас заправляют наукой и образованием, и отдельным исследователям и научным организациям велено считать индекс Хирша (H-индекс). Этот индекс равен h , если у человека (страны) есть h статей с цитируемостью выше h . Например, если $h = 10$, то у человека (страны) есть 10 статей, каждая из которых цитировалась больше 10 раз.

Не будем преувеличивать значение этого (как и любого другого) показателя – он отражает лишь один срез такого большого и сложного явления как наука. Что же он отражает?

Конечно, прежде всего – продуктивность и эффективность исследователя. Можно написать множество текстов, повторяющих давно известное (компьютеры, сканеры, ксероксы, а также обилие журналов и конференций к этому располагают...), которые никого не заинтересуют. Или, напротив, можно сделать блестящую работу, настолько опередившую свое время, что она просто не будет понята современниками (такое в науке тоже случалось). Однако, если исследователь написал много статей, заинтересовавших коллег, на которые они опираются и которые цитируют, то его индекс Хирша велик.

Но у этого индекса есть и вторая сторона. Это организация и стиль научной деятельности. Например, блестящая статья оказалась в малоизвестном или «непрофильном» журнале, и ее просто не заметили. К примеру, работа Эдварда Лоренца, в которой было рассказано о динамическом хаосе – одном из главных открытий XX века – была опубликована в солидном, международном *метеорологическом* журнале в 1963 году. И, как оказалось, *никто* до 1971 года не удосужился всерьез прочесть эту работу. Лишь в 1971 году, подбирая библиографию для литературного обзора, один усердный аспирант наткнулся на нее, прочитал, понял, был поражен открывшейся ему картиной и начал рассказывать об этом своим коллегам. И вновь междисциплинарность!

Аспирант не был специалистом по метеорологии, он пришел из другой области, но увидел в случайно попавшейся работе ответы на свои вопросы. Иными словами, индекс Хирша говорит и о том, насколько хорошо в стране организована наука, насколько люди знают, уважают и ценят своих классиков и научные школы, как масштабно и эффективно доводят результаты выполненных работ до научного сообщества и общества в целом.

И здесь нам нечем похвастаться – Россия по этому показателю оказывается на 20 месте в мире, позади таких небольших (по населению и научному бюджету) стран как Австрия, Бельгия, Дания, Израиль, Финляндия и Норвегия (см. рис. 2). Нет пророков в своем отечестве! Гораздо в большей мере, чем в других странах. Да и в мире нас не очень знают – по среднему числу цитирований на статью среди ведущих научных держав мы находимся на почетном двадцатом месте.

Но, может быть, это не так и важно? Мы-то себя знаем и собой гордимся! Поэтому другие нам не указ, и со всякой междисциплинарщиной мы и возиться не будем. Почему бы и нет?

Конечно, можно и так (как сейчас и делается). Просто платим мы за это очень дорого и будем платить еще дороже.

Мы живем в *технологической цивилизации*, в стремительно меняющейся реальности. Например, в двадцатом веке в России ожидаемое увеличение средней продолжительности жизни превышено примерно вдвое. Урожайность зерновых за столетие выросла втрое, что потребовало увеличения энергоемкости почти в 100 раз. Образно говоря, мы едим, в основном, нефть. Человечество *каждый год* потребляет такое количество углеводородов, на создание которого Природе требовалось *около миллиона лет*. Если бы весь мир захотел жить по стандартам Калифорнии (этот стандарт потребления превышает показатели слаборазвитых стран более чем в 100 раз!), то одних полезных ископаемых миру хватило бы на 2.5 года, а других на 4... Согласитесь, что это не очень много.

Поэтому главная надежда человечества и России возлагается на научные открытия, изобретения и нововведения (которые сейчас часто на иностранный манер именуют *инновация*), на то, что удастся найти новые ресурсы и источники развития. И эти источники и ресурсы должны быть найдены *очень быстро – в течение ближайших 10–15 лет*. Эта грандиозная задача сейчас очень остро стоит перед наукой и человечеством. Она не имеет аналогов в прошлом. И задача эта междисциплинарна. Каждая страна ищет ее решение и свой путь в будущее.

И тут самое время поговорить о России. О нашей *национальной инновационной системе*. Это организационная система, которая должна создать условия для поиска научных идей, организации экспертизы, создания новых товаров, услуг и возможностей, вывода всего этого на рынок, привлечения ресурсов, необходимых для этой деятельности, подготовки и переподготовки людей, которые желают и умеют этим заниматься на современном уровне. Только и всего. Начать и кончить.

Суть дела можно представить с помощью простой аналогии с автомобилем. Чтобы машина могла ехать, она должна иметь стекла – водителю надо видеть, куда ехать. Ей не обойтись без руля, особенно, если на дороге есть повороты. Наконец, нужен двигатель – сердце машины. И, конечно, автомобиль должен иметь колеса. Без этого он не поедет, сколько бы мы ни занимались полировкой капота или подогревом сидений.

Стеклам соответствуют мозговые центры, управляющие и координирующие научную и образовательную деятельность и направляющие промышленную политику (производить новое вам должно быть интереснее, чем гнать старое, даже если вы монополист на рынке). Им следует анализировать мировые тенденции, осмысливать состояние страны, ее перспективы и сценарии развития и, исходя из этого, выбирать инновационные и технологические приоритеты. Всего этого у нас в новой России пока нет. «Приоритеты» и «критические технологии» меняют как перчатки – ежегодно. И того, и другого так много, что сразу становится понятно – кадрами, ресурсами, финансами по-настоящему ничего не обеспечено. Нужны прогноз, целеполагание и планирование. Заметим, что все эти задачи междисциплинарны – нельзя продвигать одну, дорогую сердцу отрасль, не обращая внимания на риски, возможности, системное взаимодействие, на все остальное.

Руль – это то, что позволяет, исходя из наших идей о маршруте, дороге и конечном пункте, управлять всей необходимой для движения механикой. Руля тоже нет. Весной 2011 года я с удивлением узнал, знакомясь с планами и результатами деятельности Комитета по науке и наукоемким технологиям Государственной Думы, что до этой весны слово «инновации» *вообще не фигурировало в российских законах*. И одно из главных достижений Комитета состоит в том, что в новый вариант «Закона о науке» два абзаца, разъясняющие этот термин, удалось включить.

Это тем более странно и досадно, поскольку политическое решение было принято 10 лет назад. В декабре 2001 года, в бытность президентом РФ, В.В. Путин обозначил перевод хозяйства страны от «экономики трубы» к инновационному пути развития как важнейший приоритет. Однако все 10 лет изобретателям, предпринимателям, работающим в инновационном секторе, ученым, говорившим о возрождении прикладной науки и просившим для этого ресурсы, налоговые льготы, организационные решения, говорили, что их просто нет. Экономика не понимает общих слов. А у наших депутатов, чиновников, вице-премьеров, видно, руки не дошли до этих проблем и исполнения решения президента.

И вновь мы имеем дело с *синергетическим эффектом*. Мало иметь научные школы и идеи мирового уровня, талантливых изобретателей, предпринимателей, желающих вложиться в сектор высоких технологий, и деньги, наконец. *Нужно собрать все это воедино и дать всему этому возможность работать*. Поэтому организационные инновации, повышающие эффективность деятельности государственной машины в сфере высоких технологий, во всем мире рассматриваются как важнейшие. У нас пока иначе. И счастливые исключения, в многом обязанные «ручному управлению» отдельных чиновников у вершины властной пирамиды, лишь подтверждает общее правило.

Двигатель инновационного сектора – это та самая прикладная наука, которая порождает поток технических идей, проектов, патентов, действующих образцов. В нашем отечестве ее значительная часть была уничтожена в лихие 1990-е. Мировой опыт показывает, что прикладная наука, а с ней и малый и средний бизнес, ориентированный на инновационную деятельность, «стоит» примерно в 10 раз больше, чем вся фундаментальная наука и образование вместе взятые. Но игра стоит свеч – именно в этом секторе, как показывает практика, и рождается 73 % изобретений. Поэтому без двигателя не обойтись.

И вновь синергетика! Сейчас широко обсуждают жизненный путь выдающегося предпринимателя, изобретателя персонального компьютера Стива Джобса.

Возглавляя фирму Apple, он выпустил на рынок iPad и тем самым открыл новую эпоху – эпоху компьютеров-наладонников. Как правило, большинство биографов подчеркивает выдающиеся личные способности этого человека. Но это только одна сторона медали. Другая сторона – уникальная инновационная, технологическая, образовательная, предпринимательская среда, сформировавшаяся в Кремниевой долине – цитадели информационно-телекоммуникационного комплекса Америки. Один из выводов синергетики состоит в том, что именно среда определяет все типы структур, которые могут возникнуть в такой системе.

Вспомним биографию Стива Джобса – в 1972 году он заканчивает школу и поступает в Рид-Колледж (Портленд, штат Орегон). И бросает его, проучившись всего один семестр. В 1976 году он начинает работать в компании Atari, которая занимается разработкой видеоигр, и тогда же начинает посещать компьютерный клуб «Homebrew» – место встречи электронщиков-любителей.

В фирме Atari идея, пришедшая ему и его другу Стивену Возняку, «повесить» на один аппарат две игры, отвергается как явная нелепость. Ведь при этом и продажи упадут вдвое!

Но он представляет, что заинтересует друзей из компьютерного клуба, и решает «склепать» игрушку, реализовав на ней простейший язык программирования «Бейсик». Он знает, что они точно такое купят... Как видим, инновационная среда определила сферу интересов, свела его с ему подобными, позволила дешево заказать микросхемы для прибора, помогла найти деньги, которые и позволили фирме Apple взлететь.

С одной стороны, эта среда жестока – из 1000 проектов в Кремниевой долине венчурные фонды поддерживают в среднем только 7 (но для этого должна быть эта 1000 и квалифицированная научная технологическая, маркетинговая и иная экспертиза, которая позволяет оценить и достаточно точно отобрать эти 7...). Ну, а теперь слово самому Джобсу: «У меня всегда уши на макушке в ожидании, что вот-вот

откроется какая-то новая грандиозная перспектива. Однако современный мир так устроен, что для реализации масштабных перспектив необходимы столь же необычные ресурсы – и в денежном выражении и в человеческом (талантливые инженеры)»¹.

Предприниматель должен знать, что предлагают ученые и как это можно использовать. Руководители – представлять научно-технический потенциал страны, развивать его и направлять его. Здесь огромное поле для междисциплинарного взаимодействия!

И, наконец, колеса. Наши чиновники выучили и уже без запинки произносят слова «малый и средний бизнес». Но для развития инновационного сектора экономики *нужен крупный бизнес* – игроки мирового уровня, готовые вложить в 100 раз больше средств, чем в образование и фундаментальные исследования, чтобы создать эффективные, надежные, дешевые технологии производства нового и вывести его на мировой рынок... Представьте себе, что у вас появилась прекрасная технология мирового уровня в сфере биотехнологий. Но чтобы вашу сказку сделать былью, нужен транснациональный гигант, к примеру Procter & Gamble. В России же подобных компаний за 20 лет как-то не возникло. Не сложился пока капитализм в России... И крупных высокотехнологичных компаний транснационального масштаба не получилось, и к «национальному капиталу» есть много вопросов... Но, допустим, ваша разработка попадает на Запад, в тот же Procter & Gamble, в Microsoft, Intel или Boeing. Может быть, с вами щедро расплатятся, а то и предложат теплое место в метрополии. Вас, всех нас и Россию это устроит?

Поэтому и нет у нас пока этого автомобиля – *национальной инновационной системы*. И деньги тратятся, и фонды есть, и «Сколково» строят, и министр бодрые речи произносит, а автомобиль не едет...

Если в том есть сомнения, то вновь можно обратиться к цифрам. Место страны в мировом инновационном пространстве определяется, в частности, числом ежегодно получаемых ею международных патентов. Например, в 2009 году в мире было получено более 150 тысяч патентов, из которых более 40 тысяч приходится на долю США. Наша страна оказалась на 23 месте, получив 549 патентов. Интересно, что это место удивительно коррелирует с 20 местом нашей страны по индексу Хирша. Очевидно, оба они относятся к организации – ведь ярких, талантливых, увлеченных людей у нас хватает.

Нас всех огорчает, что, располагая 30% всех минеральных ресурсов мира, Российская Федерация дает вклад в валовой глобальный продукт, не превышающий 2.9%... Однако на инновационной карте мира наша страна в 10 раз меньше – 0.3%... Начать и кончить.

Однако, если страна будет вставать с колен, то и национальная инновационная система, и высокотехнологичный сектор экономики будут отстроены. Обязательно будут! И междисциплинарные подходы будут хорошим инструментом, а то и основой для всего этого.

В-третьих... Говоря на рыночном «новоязе», у нас есть серьезные конкурентные преимущества, чтобы энергично и на высоком уровне создавать, развивать и использовать междисциплинарные идеи.

¹Стив Джобс: от первого лица / Сост. Дж. Гоим / М: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2012. С. 5.

В самом деле, синергетика сегодня представляется *междисциплинарным подходом, лежащим на пересечении сферы предметного знания, математического моделирования и философской рефлексии.*

Синергетика говорит сегодня на языке математических моделей. И этот язык все активнее и успешнее осваивается известными, активными учеными-гуманитариями. Наглядные примеры – книжные серии, выпускаемые издательством URSS – «Синергетика в гуманитарных науках», «История и компьютер». Уже много лет выходит журнал «Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика», выпускаемый в Саратове, журнал «Стратегическая стабильность», издаваемый одной из секций Академии военных наук, альманах «Экономическая синергетика», выходящий в Набережных Челнах, и этот список можно продолжать. И многие авторы этих изданий обсуждают проблемы, которые традиционно считались «чисто гуманитарными» или «философскими», самым активным образом опираясь на идеи и модели синергетики.

Преимуществом является весьма высокий уровень математического образования. В самом деле, до войны в Москве работало более 400 школьных математических кружков. От них остались задачки, традиции, учителя, легендарные спецшколы; некоторые существуют и поныне. И многие представители старшего поколения и не забывали те азы школьной и институтской математики, которые порой мучительно вспоминают наши сегодняшние школьники и студенты на контрольных, зачетах и экзаменах. Есть на кого и на что опираться.

И, конечно, есть куда идти. Анализ статистики доменных зон, относящихся к странам-лидерам научного и технологического развития показывает очень интересную тенденцию. В числе наиболее часто употребляемых ключевых слов, касающихся рационального знания, среди лидеров (по крайней мере, в первой десятке) фигурируют запросы «математика», «популярная математика» и многое другое, связанное с этим миром, а также «Луна» и «космос». Это находится в разительном противоречии с тем, о чем спрашивают российские пользователи – «готовые домашние задания», «решения ЕГЭ», «тесты» и т.д., а также с тем, что проходит по разряду халявы, халтуры и связано с императивом «казаться», а не «быть». Для конкретности приведем статистику системы Google по запросу «наука». Самые популярные запросы в мире: математика, Луна, клетка, Википедия, ДНК, химия, математические игры, физика, большой взрыв, химия (в испанском варианте). В США: математика, Луна, наука, математические игры, занимательная математика, калькулятор, занимательные математические игры, химия, периодическая таблица элементов. Как видим, большой акцент на математике и разных сферах естествознания. В Российской Федерации: ЕГЭ (единый государственный экзамен), ГДЗ (готовые домашние задания), решебник, результаты ЕГЭ, Википедия, ЕГЭ по русскому, ЕГЭ-2011, алгебра, ГДЗ по математике. А у наших у ворот все идет наоборот². Но если пока есть корни и ствол, то, наверно и ветви с листьями, и молодые побеги можно вырастить.

Еще одно преимущество связано с традиционным уважением и интересом к знанию, к осмыслению мировоззренческих проблем, к теоретическим, философским идеям. Именно такое отношение настойчиво прививалось и «насаждалось» в течение 70 лет: «Здравствуй, страна героев, страна мечтателей, страна ученых!». Огромные тиражи научно-популярных журналов: «Наука и жизнь» – 3 млн. экземпляров, «Зна-

²Наука через призму Google. В мире ищут Луну и математику, а в России – ЕГЭ и решебники // Русский репортер. 2011, № 34, с. 62–63.

ние – сила» – 800 тыс., «Химия и жизнь» – 400 тысяч. Людей это занимало, им было интересно. А громадный блок «занимательной науки» – занимательная физика, алгебра, геометрия, астрономия выдающегося популяризатора Я.И. Перельмана, занимательная геология академика В.А. Обручева и прочая, прочая, прочая...

Недавно начала издаваться серия (вновь серия) – «Шедевры научно-популярной литературы. Науку – всем!». Переизданы многие книги, написанные и переведенные в советские времена. Даже бегло просмотрев или перечитав их, в очередной раз убеждаешься широте того удивительного поля возможностей, которое открывает перед нами наука.

И одна из главных задач нынешнего поколения ученых, преподавателей, профессоров – пронести огонь науки через сумрак нынешнего российского безвременья и передать его следующему поколению. И, конечно, греет душу мысль, что найдутся молодые, пытливые умы, которые захотят это прочитать, сумеют понять, примут эстафету и пойдут дальше.

За 20 лет новой России тиражи научно-популярных журналов упали примерно в сотни раз, книг – в десятки. Здесь есть над чем поработать. Форсированное развитие междисциплинарных подходов нужно нашей стране как воздух! Это развитие помогает создать поток идей, проектов, изобретений, организовать эффективную экспертизу, избежать стратегических ошибок.

По направлению к горизонту

Когда целое вполне обнаруживает себя, оно указывает на все остальное, и в этом понимании лежит величайшее дерзновение и величайшее смирение.

И.В. Гете

И будущее, и настоящее, и прошлое живут в сегодняшнем дне. Просто надо увидеть будущее и поддержать его.

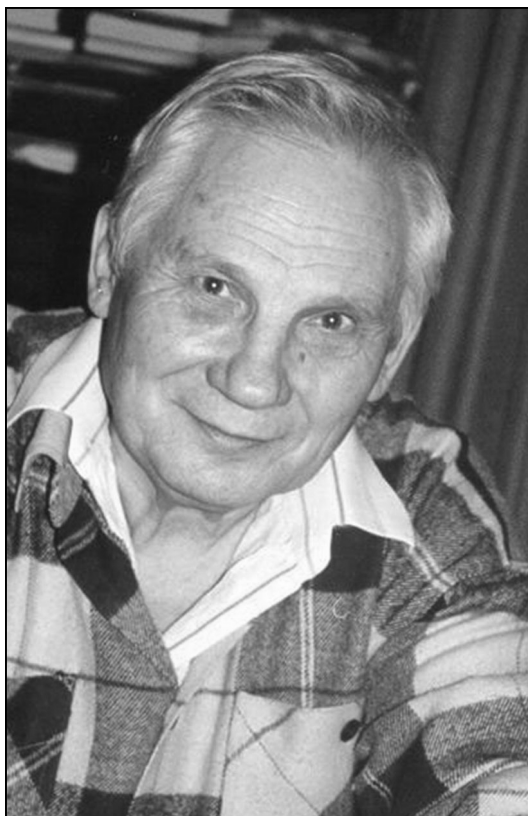
С.П. Курдюмов

Роль личности в истории научных идей, технологий, в прокладывании путей в будущее – огромна. Здесь один может изменить очень многое. Конечно, если коллеги и общество его поддержат.

Междисциплинарным исследованиям в России во многом повезло. Одна из удач – это то, что одним из их основоположников в России стал член-корреспондент РАН Сергей Павлович Курдюмов. Выдающийся специалист в прикладной математике, синергетике, философии науки. Третий директор Института прикладной математики им М.В. Келдыша РАН. Замечательный человек, умевший заражать друзей, коллег, всех, кто с ним общался, энергией и оптимизмом.

Исследователь, который ценил не степени, звания, материальные блага и не свое место в науке, а саму науку в себе и других. Именно это позволяло ему радоваться и удивляться успехам коллег и учеников больше, чем своим. Учеников у него всегда было много, и одним из них посчастливилось быть мне.

Очень часто говорят, что наука интернациональна, что она не знает границ. И как большинство общих утверждений, это верно лишь отчасти. Во всяком случае, оно относится к очень небольшой части научного пространства. Законы Ньютона, уравнения Максвелла или Шредингера, которые есть в учебниках студентов разных стран – скорее, счастливое исключение, чем общее правило. В самом деле, со времен Галилея эксперимент, наблюдение, анализ данных прочно вошли в науку как полноправный способ постижения реальности. Однако разные лаборатории, компании, институты имеют *разное оборудование*. И некоторые установки *уникальны*. Видимо, и второй сверхпроводящий коллайдер не построят, и полномасштабный демонстрационный токамак останется в одном экземпляре. Да, на этих объектах сейчас работают международные команды. Но во многих других фирмах и институтах люди очень часто отнюдь не спешат поделиться полученным знанием. «Знание – сила», – говорил Френсис Бэкон. А мы можем добавить, что это и сверхприбыли, и военная мощь, и возможность определять направления развития.



Сергей Павлович Курдюмов (1928–2004)
Один из основоположников синергетики в России

У разных стран разная экономика и, соответственно, различные научные приоритеты. Создатель Института прикладной математики, его первый директор, трижды Герой Социалистического труда, «главный теоретик космонавтики», как его часто называли, Мстислав Всеволодович Келдыш считал, что будущее советской науки – дальний космос, что огромная космическая отрасль, создающая уникальные технологии и готовая ими поделиться с другими, – один из локомотивов экономики. Полувековой опыт СССР, запускавшего космические аппараты к Марсу и Венере, американские достижения последних десятилетий подтверждают правоту и точность этого взгляда. Состояние космической отрасли – отличный индикатор экономического положения страны и ее амбиций. Большинству государств мира такие проекты просто не под силу, потому что интереса к таким научным изысканиям они проявляют меньше.

Эксперты американского космического агентства NASA, анализируя результаты космической деятельности многих государств, увидели любопытную закономерность. Число ученых в стране, связанных с космосом, прямо пропорционально валовому внутреннему продукту (ВВП) страны, а важность результатов их деятельности пропорциональна квадрату ВВП, отнесенному к численности населения. Отсюда понятно, что лучший способ поправить наши дела в космосе и космической науке – поднять экономику и увеличить ВВП. Многие проблемы российской науки сейчас лежат вне ее.

И на образование, и на науку, и на культуру России большое влияние оказала Германия. Помните блоковское – «нам внятно все – и острый галльский смысл, и сумрачный германский гений». Влияние классической немецкой философии – Канта, Гегеля, Фихте – на становление новой русской литературы было очень велико. Одна из черт этого стиля мышления – стремление непосредственно претворять следствия общих теорий, мировоззренческих конструкций в жизнь, опираться на первые принципы.

Это в корне противоречит протестантской традиции, характерной для американской культуры. Например, Джордж Сорос – миллиардер, филантроп, оригинальный мыслитель – вообще ставит под сомнения понятие истины, считая, что «истиной» в общественных делах, науке и в большинстве значимых сфер становится то мнение, которое, в конце концов, начнет разделять большинство.

Может быть, именно поэтому идеи синергетики, развившиеся в Европе и, прежде всего, в Германии, упали на благодатную почву в России. Поэтому и первый визит Германа Хакена в Институт прикладной математики, и другие поездки в Россию, оказали и на нас, и на значительную часть отечественного научного сообщества большое влияние.

Итак, каждая страна «затачивает» развиваемую в ней науку под свои потребности, стратегические ориентиры и видение будущего. Относится это и к междисциплинарным исследованиям.

Если Герман Хакен пришел в синергетику из физики лазеров, Илья Пригожин от химической термодинамики, то Сергея Павловича привели в этот мир задачи горения, взрыва, физики плазмы, идеи вычислительного эксперимента.

Институт прикладной математики, в котором С.П. Курдюмов проработал всю жизнь, был создан в 1953 году для решения стратегических проблем, стоявших перед СССР, которые требовали использования прикладной математики и компьютерного моделирования. Эти задачи были связаны с совершенствованием ядерного оружия и созданием водородной бомбы, с математическим обеспечением космических полетов и разработкой систем управления. Ученым пришлось решать сложнейшие уравнения радиационной газовой динамики с невиданной ранее точностью и в исключительно короткие сроки. Организацию и проведение таких расчетов выдающийся физик Л.Д. Ландау назвал «научным подвигом». Основы новых наук – системного программирования, теории разностных схем, теории уравнений переноса и ряда других были заложены в течение нескольких лет. Это было время напряженных поисков и открытий, стремительного роста и научной романтики. Прекрасный период для формирования крупных ученых, научных школ и направлений. Именно на это время пришлась «научная молодость» С.П. Курдюмова.

Компьютерными расчетами процессов в нелинейных средах руководили академики А.Н. Тихонов и А.А. Самарский, которых С.П. Курдюмов считал своими учителями и к которым относился всю жизнь с огромным уважением.

Решаемые задачи стремительно усложнялись параллельно с совершенствованием вычислительных машин. И вскоре стало понятно, что дальнейший путь в нелинейный мир требует новых понятий, идей, подходов, более глубокого уровня *понимания* изучаемых процессов. И это потребовало развития междисциплинарных идей. Одним из первых по этому пути в ИПМ и в отечественной прикладной математике пошел С.П. Курдюмов.

Другая тенденция, которая вновь и вновь наблюдается и в науке, и в сфере высоких технологий. Обычно прорыв к новым возможностям, в новую реальность

происходит в очень узкой области благодаря идеям, таланту и работе небольшой группы людей. Но затем, со временем, поле приложения новых идей, возможностей, достижений начинает стремительно расширяться. Подобный процесс происходил, да и сейчас происходит, с ИПМ или Центром нелинейных исследований в Лос-Аламосе, выросшем из ядерного центра, работавшего над оборонными проблемами.

И это стремление донести новое до всех, превратить широкий круг исследователей – от студентов и своих учеников до академиков и государственных деятелей – в единомышленников было отличительной чертой Сергея Павловича. На это он не жалел ни времени, ни сил. Порой и обсуждения, в которых он участвовал, и семинары, на которых выступал, затягивались до полуночи. Огромная энергия, увлеченность наукой, доброжелательность и романтика привлекали к нему очень многих людей. Только на конференциях и семинарах, которые устраивала профессор Г.Ю. Ризниченко, стоящая во главе ассоциации «Женщины в науке и образовании», он выступил за десяток лет около сотни раз.

Его любимым детищем была теория *режимов с обострением*. Это такие режимы, при которых одна или несколько переменных, характеризующих исследуемую систему, неограниченно возрастает за конечное время (время обострения).

В начале XX века такие решения с легкой руки Жана Адамара отбрасывали как не имеющие физического смысла. В середине к ним относились как к странной экзотике. Однако оказалось, что для задач физики взрыва, горения, теории ряда неустойчивостей в гидродинамике и физике плазмы нужны и интересны именно они. О них мой учитель мог говорить часами, «зажигая» собеседника своими идеями, надеждами и мечтами.

Поэтому идея издания книг, посвященных синергетике, с начала 2000-х годов витала в воздухе. Помнится, во время одного из визитов Г. Хакена в наш институт я подробно расспрашивал его о том, много ли усилий и времени требует от него, как от редактора серии, издание такого множества книг. «Вначале и трудностей много, и времени уходит немало. Но потом, когда дело налажено, все идет довольно легко. И, конечно, успех дела зависит от издательства, с которым вы работаете. Оно должно находиться на высоком уровне и быть очень заинтересовано в таком издании».

И последним толчком стало наше с Сергеем Павловичем выступление на заседании Президиума РАН, которое вызвало и большой отклик, и оживленную дискуссию. Междисциплинарные идеи и подходы обладают огромной притягательной силой.

Сергей Павлович с огромной энергией и энтузиазмом включился в это новое для нас дело. Помню, как он увлеченно рассказывал В.Б. Уварову и А.Ф. Никифорову (выдающимся специалистам в области физики экстремальных состояний вещества и специальных функций, лауреатам Ленинской премии, авторам многих методов расчета, используемых в атомной промышленности): «Дело очень важное! У нас будут тоже больше сотни томов! Подумайте, что вы могли бы туда написать!»

Замечательно, что это говорилось тогда, когда в серии не было еще ни одной книги. Но романтики от науки находятся в других отношениях с будущим, чем все остальные. Иногда они заглядывают далеко вперед и действуют более мудро и точно, чем «реалисты» и «прагматики».

Думаю, что Сергея Павловича очень порадовали бы и 10-летие нашей серии, с которой он связывал большие надежды, и 60 вышедших в ней книг.

Серия как она есть

Мы просто хотели сделать самое лучшее из того, что возможно... Лучше взять и изобрести завтрашний день, чем переживать о том, что вчерашний был так себе.

С. Джобс

Если театр начинается с вешалки, то выпуск серии книг начинается с издательства. И этим издательством стал URSS. Около 20 лет назад оно было создано талантливыми, энергичными, увлеченными выпускниками физического факультета МГУ. За прошедшие годы оно превратилось в крупнейшее (по числу наименований и охвату тематики) издательство научной и учебной литературы России. *Ежедневный* выпуск 3–4 книг впечатляет. При этом постоянный и хорошо организованный мониторинг книжного рынка помогает сотрудникам URSS ясно представить, каких книг «не хватает» в сегодняшней России. Кроме того, активное успешное развитие требует не только амбициозных идей и больших планов, но и систематической работы, продумывания деталей. И в этом издательство URSS также преуспело.

Издательство – это, прежде всего, идеи и люди. И свою мысль, творчество, труд, энергию в издание книг нашей серии вложили в разное время очень многие сотрудники: Доминго Рикой, Виктория Малашенко, Виктор Романов, Ирина Макеева, Наталья Финогенова, Елена Ермолаева, Лю Го Хва, Любовь Чирок и многие другие.

Итак, началом серии стала книга Г.Г. Малинецкого, А.Б. Потапова «Современные проблемы нелинейной динамики». В этой книге было обращение «От редакции», которое стоит привести здесь.

Издательство URSS начинает новую серию книг: «Синергетика – от прошлого к будущему».

Синергетика, или теория самоорганизации, сегодня представляется одним из наиболее популярных и перспективных междисциплинарных подходов. Термин «синергетика» в переводе с греческого означает «совместное действие». Вводя его, Герман Хакен вкладывал в него два смысла. Первый – теория возникновения новых свойств у целого, состоящего из взаимодействующих объектов. Второй – подход, требующий для своей разработки сотрудничества специалистов из разных областей.

Но это привело и к замечательному обратному эффекту – синергетика начала оказывать все большее влияние на разные сферы деятельности и вызывать все больший интерес. Сейчас этим подходом интересуются очень многие – от студентов до политиков, от менеджеров до активно работающих исследователей.

Синергетика прошла большой путь. Тридцать лет назад на нее смотрели как на забаву физиков-теоретиков, увидевших сходство в описании многих нелинейных явлений. Двадцать лет назад, благодаря ее концепциям, методам, представлениям были экспериментально обнаружены многие замечательные явления в физике, химии, биологии, гидродинамике. Сейчас этот междисциплинарный подход все шире используется в стратегическом планировании, при анализе исторических альтернатив, в поиске путей решения глобальных проблем, вставших перед человечеством.

Название серии «От прошлого к будущему» тоже содержательно. Как говорил один из создателей квантовой механики: при рождении каждая область обычно богаче идеями, чем в период зрелости. Видимо, не является исключением и синергетика. Поэтому мы предлагаем переиздать часть «синергетической классики», сделав акцент на тех возможностях и подходах, которые пока используются не в полной мере. При этом мы надеемся познакомить читателя и с рядом интересных работ, ранее не издававшихся на русском языке.

«Настоящее» – как важнейший элемент серии – тоже понятно. В эпоху информационного шума и перманентного написания то заявок на гранты, то отчетов по ним, даже классики синергетики очень немного знают о последних работах коллег и новых при-

ложениях. Мы постараемся восполнить этот пробел, представив в серии исследования, которые проводятся в ведущих научных центрах страны.

«Будущее...» – это самое важное. От того, насколько ясно мы его представляем, зависят наши сегодняшние усилия и научная стратегия. Прогнозы – дело неблагодарное, – хотя и совершенно необходимое. Поэтому ряд книг серии мы надеемся посвятить и им.

В редакционную коллегию нашей серии любезно согласились войти многие ведущие специалисты в области синергетики и нелинейной динамики. В них не следует видеть «свадебных генералов». В их задачу входит анализ развития нелинейной динамики в целом и ее отдельных областей, определение приоритетов нашей серии и подготовка предложений по изданию конкретных работ. Поэтому мы указываем в книгах серии не только организации, в которых работают эти исследователи, но и важнейшие области их научных интересов.

И, конечно, мы надеемся на диалог с читателями. При создании междисциплинарных подходов он особенно важен. Итак, вперед – в будущее.

Добавить почти нечего. В течение 10 лет и редакция и издательство действовали именно так, как намеревались.

Успех серии, интерес и потребность читателей в книгах, которые мы издали – прежде всего, заслуга нашей редакционной коллегии. Они предлагают книги для издания, рецензируют приходящие рукописи, обсуждают, куда двигаться дальше, и, наконец, сами иногда выступают как авторы.

Уже в нескольких первых книгах список нашей редакционной коллегии выглядел так.

- *Председатель редколлегии – Г.Г. Малинецкий*, Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН (сложность, хаос, прогноз)

Члены редколлегии:

- *Р.Г. Баранцев*, Санкт-Петербургский государственный университет (асимптотология, семидинамика, философия естествознания)
- *А.В. Гусев*, Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН (вычислительные гидродинамика, технологии, медицина)
- *Ю.А. Данилов*, Федеральный научный центр «Курчатовский институт» (симметрия, фракталы, история нелинейной динамики, нелинейная динамика в контексте современного естествознания)
- *А.С. Дмитриев*, Институт радиоэлектроники РАН (динамический хаос, защита информации, телекоммуникации)
- *В.П. Дымников*, Институт вычислительной математики РАН (физика атмосферы и океана, аттракторы большой размерности)
- *С.А. Кащенко*, Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова (асимптотический анализ нелинейных систем, образование, инновации)
- *И.В. Кузнецов*, Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН (анализ временных рядов, вычислительная сейсмология, клеточные автоматы)
- *С.П. Курдюмов*, Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН (диссипативные структуры, режимы с обострением, философия синергетики)
- *А.Ю. Лоскутов*, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (эргодическая теория, билиарды, фракталы)
- *И.Г. Поспелов*, Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН (развивающиеся системы, математическая экономика)
- *Д.И. Трубецков*, Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского (теория колебаний и волн, электроника, преподавание синергетики)
- *Д.С. Чернавский*, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (биофизика, экономика, информация)

Нам казалось важным, чтобы в редколлегии были представители разных регионов России, различных научных школ и областей науки.

Можно очень много говорить о каждом из этих замечательных людей, их делах и идеях. Трудно удержаться. Однако сказать хотя бы несколько слов о каждом из них в этой книге считаю необходимым. Это не только дань искреннего уважения к ним, но и возможность представить читателям различные грани междисциплинарности и связанные с ней научные траектории.

Профессор мехмата Ленинградского, а позже Санкт-петербургского университета *Рэм Георгиевич Баранцев* воплощает в своем научном творчестве идею восхождения от конкретного к абстрактному. Будучи одним из ведущих специалистов страны по трансзвуковой газовой динамике, решившим ряд важных прикладных задач, создав научную школу, он перешел к методам, идеям и приемам асимптотического анализа в их различных воплощениях. От них – к теории развития знаковых систем – семиодинамики. И эти работы по семиодинамике, и семинар в университете, посвященный этим проблемам, опередили свое время. По-видимому, семиодинамика, рассматривающая самоорганизацию знаний, понятий, представленный в знаке или символе, – не только предшественница синергетики, но ее будущее. К вопросам, поставленным в семиодинамике тридцать с лишним лет назад, теория самоорганизации начинает подбираться только сейчас.

Алексей Владимирович Гусев, сотрудник ИПМ, много лет занимавшийся вычислительной аэродинамикой и расчетами специальной техники, сейчас активно развивает идеи математической медицины, теории экстремальных состояний.

Путь от боевой техники к человеку с его очень серьезными ограничениями и удивительными возможностями, в основе которых лежит явление самоорганизации, представляется естественным. По сути, это магистральный путь, по которому идут современная наука и высокие технологии и вооружения.

На первых порах огромную помощь оказал оригинальный исследователь, энциклопедически образованный человек, блестящий лектор и популяризатор науки, сотрудник Курчатовского института *Юлий Александрович Данилов*. Он обладал даром просто, ясно и увлекательно говорить и писать о науке как для школьников, так и для предполагаемых ученых. Этот удивительный и очень обаятельный человек владел 20 языками и перевел на русский язык 110 книг. Возможностью с удовольствием читать множество прекрасных книг, в том числе и по синергетике, изданных в нашей стране, мы обязаны ему.

Александр Сергеевич Дмитриев, заведующий отделом Института радиоэлектроники РАН, профессор Физтеха является одним из ведущих специалистов в России в области использования динамического хаоса в радиоэлектронных системах. Круг идей и приложений здесь очень широк: от защиты информации до управления хаосом, от передачи сигналов на хаотической несущей до записи информации и ассоциативной памяти на одномерных отображениях, от систем обеспечения безопасности зданий и сооружений до задач медицинской диагностики. Коллектив, которым руководит А.С. Дмитриев, отличается способностью быстро и эффективно проходить весь путь – от общих идей синергетики и нелинейной динамики до работающих на этих принципах радиоэлектронных систем.

Академик *Валентин Павлович Дымников* – ведущий специалист в России по математическому моделированию глобальных климатических изменений. Большинство экспертов по мировой динамике считает такие изменения главной угрозой существованию человечества. Под руководством В.П. Дымникова, в бытность его директором Института вычислительной математики РАН, был создан ряд больших программ, ориентированных на суперкомпьютеры, позволяющих моделировать динамику климата. Мечтой и надеждой в этой области было смоделировать «климатический



Рис. 3. Группа участников конференции по синергетике в 2004 году, проводившейся в Российской академии государственной службы при Президенте РФ. Нижний ряд: В.В. Мурина, Н.М. Чернавская, В.Л. Романов, В. Эбелинг. Верхний ряд: С.П. Курдюмов, В.И. Аршинов, В.Г. Буданов, Г. Хакен, Г.Г. Малинецкий, К. Майнцер, И.Е. Москалев, В.С. Курдюмов.

аттрактор» – выявить параметры порядка в этой системе, оценить ее размерность, количественные характеристики хаоса аттрактора, описывающего динамику климата. К этой цели В.П. Дымников и его научная школа шли более 30 лет. В последние годы ее удалось достичь.

Профессор *Сергей Александрович Кащенко* – первый проректор Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова, ведущий специалист по уравнениям с запаздыванием. Роль университета в городе очень велика – инновационные проекты, инициативы власти, развитие промышленности и социальной сферы, оказывается, связаны с ним самым тесным образом. Это располагает к междисциплинарности. С другой стороны, те строгие результаты, которые получены С.А. Кащенко, самым тесным образом связаны с конкретными математическими моделями экологии, физики лазеров, динамики нейронов, теории ядерных реакторов, защиты информации, а также многих других областей науки и высоких технологий.

Сотрудник Международного института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН *Игорь Васильевич Кузнецов* занимается алгоритмами прогноза катастрофических событий на основе анализа временных рядов – последовательности чисел, характеризующей состояния исследуемой системы в последовательные моменты времени. Если следовать логике теории самоорганизации и представлениям об общих, универсальных механизмах развития сложных, нелинейных систем, то универсальными должны быть и алгоритмы прогноза. И это прекрасно показывает деятельность И.В. Кузнецова и его коллег. На основе созданных методик дается среднесрочный прогноз землетрясений и результатов выборов в американский сенат, экономических рецессий и скачков тяжких преступлений на региональном уровне, что кажется совсем удивительным.

О *Сергее Павловиче Курдюмове*, стоявшем у истоков нашей серии уже сказано в этом тексте достаточно много. Ему посвящена большая книга³, в которую вошли фрагменты дневников, которые он вел со школьных времен. Судя по ним, его путь к междисциплинарности был связан с глубоким интересом к мировоззренческим проблемам, философским вопросам, со стремлением осмыслить мир в его целостности.

Профессор физического факультета МГУ *Александр Юрьевич Лоскутов*, автор курсов «Физика хаоса» и «Математика хаоса», ряда книг, посвященных синергетике. На каждой конференции его вдохновенные, яркие, красивые доклады, находящиеся на грани науки и искусства, становились событием и надолго запоминались, так же, как его игра на фортепиано... Его уход в 2011 году стал горькой неожиданностью и большой потерей для всего синергетического сообщества России...

Член-корреспондент РАН *Игорь Гермогенович Поспелов*, заведующий отделом Вычислительного центра им. А.А. Дородницына РАН, представитель научной школы академиков Н.Н. Моисеева и А.А. Петрова. В основе подхода этой школы в области математической экономики – анализ развития последней как самоорганизующейся, саморазвивающейся системы, части которой способны к рефлексии, прогнозу, решению оптимизационных задач, адаптации и изменению механизмов взаимодействия. Благодаря усилиям этого коллектива, можно проследить летопись российских экономических реформ в описывающих их математических моделях. Это дает более глубокое понимание и происходившего, и будущего.

Глава Саратовской научной школы в области прикладной нелинейной динамики, в недалеком прошлом ректор Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского, вдохновитель и организатор журнала «Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика», член-корреспондент РАН *Дмитрий Иванович Трубецков*. Автор множества замечательных книг по синергетике, адресованных как естественникам, так и гуманитариям, как школьникам, так и активно работающим исследователям.

Сотрудник Физического института им. П.Н. Лебедева, профессор биологического факультета МГУ, руководитель научного семинара по математической экономике, патриарх отечественной синергетики *Дмитрий Сергеевич Чернавский*. Его научная судьба воплощает идеи междисциплинарности. Начав с ядерной физики, с участия в советском атомном проекте, придя в биофизику и создав там научную школу и ряд глубоких математических моделей, он пришел к новому осмыслению медицинских задач и возможностей организма, а затем и к проблемам описания экономических проблем, математическому моделированию исторических процессов и осмыслению философских вопросов естествознания.

Позже в редакционную коллегию нашей серии вошел заведующий кафедрой неорганической химии МГУ им.М.В. Ломоносова, организатор и декан факультета наук о материалах этого университета, ведущий специалист в области нанотехнологий, один из основателей и первый президент Нанотехнологического общества России *Юрий Дмитриевич Третьяков*. Самоорганизация, по его мысли, является одной из главных надежд нанотехнологий, волнующей возможностью проходить путь от наноструктур к новым материалам «снизу вверх». В моделировании, понимании явлений самоорганизации на наноуровне, в разработках соответствующих материалов, устройств, технологий синергетика может сыграть очень важную роль.

Как дать представление о нашей серии, о том, что было издано за последние 10 лет. Можно проследить хронологию того, что издавалось (см. Приложение).

Другой путь – обратиться к статистике.

³Мне нужно быть. Памяти Сергея Павловича Курдюмова/ Ред.-сост. Е.З. Журавлева. М.: КРАСАНД, 2010. 480 с.

Общий тираж книг серии превысил 100 тысяч экземпляров, 5 книг были переведены на испанский язык. Самый большой общий тираж (около 15 тысяч экземпляров) имела книга Роджера Пенроуза – английского математика и физика-теоретика «Новый ум короля. О компьютерах, мышлении и законах физики», выдержавшая 4 издания. Любопытно, что именно она, а также книга Брайана Грина «Эlegantная вселенная». Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории» в течение многих лет возглавляли список читательского интереса издательства. Кажалось бы, людей должны волновать более приземленные сущности – будущее человечества, экономические кризисы, нанотехнологии или методы прогноза. На первый взгляд, тонкие квантовые эффекты, которые, возможно, определяют природу нашего сознания, черные дыры, первые мгновения существования Вселенной или скрытые размерности слишком далеки от нас. Но, видимо, именно они волнуют ум, будят фантазию, отвечают стремлению дойти до предела и заглянуть за него. Более остальных в серии издавали книги физика, химика, профессора Нобелевского лауреата И.Р. Пригожина (7 книг), за ним следуют работы Д.И. Трубецкого (5 книг). Рекордсменом по числу переизданий – 7 – стал учебник Г.Г. Малинецкого «Математические основы синергетики. Хаос, структуры, вычислительный эксперимент».

Надеюсь, что самые поразительные открытия, удивительные технологии и блестящие книги, связанные с междисциплинарными подходами, впереди. Ожидая, приближая, надеясь на них, мы создали серию «Синергетика: от прошлого в будущее».

Итак, через тернии к звездам! Вновь и вновь!

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

Поступила в редакцию

2.05.2012

Приложение

Издания серии «Синергетика: от прошлого к будущему»

1. Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б. Современные проблемы нелинейной динамики/ 2-е изд., исправл. и доп. М.: Эдиториал УРСС, 2002. 360 с.
2. Малинецкий Г.Г. Математические основы синергетики: Хаос, структуры, вычислительный эксперимент/ 6-е изд. стереот. М.: Либроком, 2009. 312 с.
3. Капица С.П., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. Синергетика и прогнозы будущего/ 3-е изд. М.: Эдиториал УРСС, 2003. 288 с.
4. Пригожин И.Р., Стенгерс И. Время. Хаос. Квант: К решению парадокса времени/ Пер. с англ./ 7-е изд. М.: Либроком, 2009. 232 с.
5. Пригожин И.Р., Стенгерс И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой/ Пер. с англ./ 6-е изд. М.: ЛКИ, 2008. 296 с.
6. Пригожин И.Р. От существующего к возникающему: Время и сложность в физических науках/ Перевод с англ./ 3-е изд. М.: КомКнига, 2006. 296 с.
7. Пенроуз Р. Новый ум короля: О компьютерах, мышлении и законах физики/ Пер. с англ./ 4-е изд. М.: URSS, 2011. 400 с.
8. Трубецков Д.И. Введение в синергетику: Колебания и волны/ 4-е изд. М.: URSS, 2012. 224 с.
9. Трубецков Д.И. Введение в синергетику: Хаос и структуры/ 4-е изд. М.: URSS, 2012. 240 с.
10. Пригожин И.Р., Николис Г. Познание сложного. Введение/ Перевод с англ./ 3-е изд., доп. М.: ЛКИ, 2008. 352 с.
11. Баранцев Р.Г. Синергетика в современном естествознании/ 2-е изд., доп. М.: Либроком, 2009. 160 с.
12. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций/ Перевод с англ./ 2-е изд., стереот. М.: Эдиториал УРСС, 2003. 280 с.
13. Чернавский Д.С. Синергетика и информация: Динамическая теория информации/ Предисл. и послесл. Г.Г. Малинецкого/ Изд. 3-е, доп. М.: Либроком, 2009. 304 с.
14. Арнольд В.И. Теория катастроф/ 6-е изд. М.: Либроком, 2009. 136 с.
15. Андрианов И.В., Баранцев Р.Г., Маневич Л.И. Асимптотическая математика и синергетика: Путь к целостной простоте. М.: Эдиториал УРСС, 2004. 304 с.

16. *Пригожин И.Р.* Неравновесная статистическая механика/ Пер. с англ./ 3-е изд. М.: Либроком, 2009. 312 с.
17. *Котов Ю.Б.* Новые математические подходы к задачам медицинской диагностики. М.: Эдиториал УРСС, 2004. 328 с.
18. *Гельфанд И.М., Розенфельд Б.И., Шифрин М.А.* Очерки о совместной работе математиков и врачей/ 3-е изд., стереотипное. М.: URSS, 2011. 320 с.
19. *Хакен Г.* Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам/ Перевод с англ./ 2-е изд. М.: КомКнига, 2005. 248 с.
20. *Князева Е.Н., Курдюмов С.П.* Основания синергетики: Синергетическое мировидение/ Изд. 3-е, доп. М.: Книжный дом «Либроком», 2010. 236 с.
21. *Князева Е.Н., Курдюмов С.П.* Основания синергетики: Человек, конструирующий себя и свое будущее/ Изд. 4, доп. М.: URSS, 2011. 264 с.
22. *Чумаченко Е.Н., Смирнов О.М., Цепин М.А.* Сверхпластичность: Материалы, теория, технологии/ 2-е изд. М.: Либроком, 2009. 320 с.
23. *Редько В.Г.* Эволюция, нейронные сети, интеллект: Модели и концепции эволюционной кибернетики/ 2-е изд. М.: КомКнига, 2006. 224 с.
24. *Безручко Б.П., Короновский А.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Путь в синергетику: Экскурс в десяти лекциях/ 2-е изд. М.: Изд-во ЛКИ, 2010. 304 с.
25. *Суздаlev И.П.* Нанотехнология: Физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов/ 2-е изд., испр. М.: Либроком, 2009. 592 с.
26. *Данилов Ю.А.* Лекции по нелинейной динамике. Элементарное введение/ 4-е изд., стереот. М.: URSS, 2011. 208 с.
27. *Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б.* Нелинейная динамика и хаос: Основные понятия. Учебное пособие. 3-е изд. М.: Либроком, 2011. 240 с.
28. *Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б., Подлазов А.В.* Нелинейная динамика: Подходы, результаты, надежды. 3-е изд. М.: Либроком, 2011. 280 с.
29. Будущее и настоящее России в зеркале синергетики/ 2-е изд., испр. и доп./ Ред. Г.Г. Малинецкий. М.: URSS, 2011. 328 с.
30. *Быков В.И.* Моделирование критических явлений в химической кинетике/ 2-е изд., испр. и доп. М.: КомКнига, 2006. 328 с.
31. *Климонтович Ю.Л.* Турбулентное движение и структура хаоса: Новый подход к статистической теории открытых систем/ 2-е изд. М.: КомКнига, 2007. 328 с.
32. *Князева Е.Н., Курдюмов С.П.* Синергетика: Нелинейность времени и ландшафты коэволюции/ Изд. 2 М.: URSS, 2011. 272 с.
33. *Гуц А.К., Фролова Ю.В.* Математические методы в социологии/ 3-е изд. М.: URSS, 2012. 210 с.
34. *Турчин П.В.* Историческая динамика: На пути к теоретической истории / Пер. с англ. под общ. ред. Г.Г. Малинецкого, А.В. Подлазова, С.А. Боринской. Предисл. Г.Г. Малинецкого. М.: ЛКИ, 2007. 368 с.
35. Синергетика: Исследования и технологии/ Ред. Г.Г. Малинецкий. М.: ЛКИ, 2007. 224 с.
36. *Тюкин И.Ю., Терехов В.А.* Адаптация в нелинейных динамических системах. М.: ЛКИ, 2008. 384 с.
37. *Анищенко В.С.* Знакомство с нелинейной динамикой/ 3-е изд., перераб. и доп. М.: ЛКИ, 2008. 224 с.
38. Синергетика: Будущее мира и России / Под ред. Г.Г. Малинецкого. М.: ЛКИ, 2008. 384 с.
39. *Васильков Г.В.* Эволюционная теория жизненного цикла механических систем: Теория сооружений. М.: ЛКИ, 2008. 320 с.
40. *Белецкий В.В.* Очерки о движении космических тел / 3-е изд., испр. и доп. М.: Либроком, 2009. 432 с.
41. *Долгонос Б.М.* Нелинейная динамика экологических и гидрологических процессов. М.: Либроком, 2009. 440 с.
42. *Майнцер К.* Сложносистемное мышление: Материя, разум, человечество. Новый синтез/ Пер. с англ. М.: Либроком, 2009. 464 с.
43. *Каценко С.А., Майоров В.В.* Модели волновой памяти. М.: URSS, 2009. 288 с.
44. *Анищенко В.С.* Сложные колебания в простых системах: Механизмы возникновения, структура и свойства динамического хаоса в радиофизических системах/ 2-е изд., доп. М.: Либроком, 2009. 320 с.
45. *Олемской А.И.* Синергетика сложных систем: Феноменология и статистическая теория. М.: Либроком, 2009. 384 с.

46. Белотелов Н.В., Бродский Ю.И., Павловский Ю.Н. Сложность. Математическое моделирование. Гуманитарный анализ: Исследование исторических, военных, социально-экономических и политических процессов. М.: Либроком, 2009. 320 с.
47. Алексеев Ю.К., Сухоруков А.П. Введение в теорию катастроф / 2-е изд., доп. М.: Либроком, 2009. 184 с.
48. Нелинейность в современном естествознании/ Ред. Г.Г. Малинецкий. М.: Изд-во ЛКИ, 2009. 424 с.
49. Неймарк Ю.И., Ланда П.С. Стохастические и хаотические колебания / 2-е изд., доп. М.: Либроком, 2009. 424 с.
50. Бадалян Л.Г., Криворотов В.Ф. История. Кризисы. Перспективы: Новый взгляд на прошлое и будущее/ Под ред. и с предисл. Г.Г. Малинецкого. М.: Книжный дом «Либроком», 2010. 288 с.
51. Ланда П.С. Нелинейные колебания и волны/ 2-е изд., испр. и доп. М.: URSS, 2010. 395 с.
52. Орлов Ю.Н., Осминин К.П. Нестационарные временные ряды: Методы прогнозирования с примерами анализа финансовых и сырьевых рынков. М.: Либроком, 2011. 384 с.
53. Быков В.И., Цыбенкова С.Б. Нелинейные модели химической кинетики. М.: URSS, 2011. 400 с.
54. Орлов Ю.Н., Осминин К.П. Методы статистического анализа литературных текстов. М.: URSS, 2012. 312 с.
55. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа.
56. Солодова Е.А. Новые математические модели образовательных процессов / Под ред. Г.Г. Малинецкого. М.: ЛКИ, 2008. С. 347.
57. Абаимов С.Г. Статистическая физика сложных систем: От фракталов до скейлинга-поведения. М.: URSS, 2012. 392 с.
58. Малинецкий Г.Г. Чтоб сказку сделать былью... Высокие технологии – путь России в будущее. М.: URSS, 2012. 224 с.
59. Кляцкин В.И. Очерки по динамике стохастических систем. М.: URSS, 2012. 448 с.
60. Малинецкий Г.Г. Миры синергетики. <http://www.rusnor.org/pubs/articles/7919.htm>

WORLDS OF SYNERGETICS: FROM THE PAST TO THE FUTURE

G. G. Malinetski

The whole have possess a wonderful gift to attach a new meaning to it's parts, create inner harmony, lift the veil of future. This paper is about the whole.

Keywords: Synergetics, interbranch science research, citing index.



Малинецкий Георгий Геннадьевич – родился в Уфе (1956), окончил физический факультет МГУ (1979), защитил кандидатскую диссертацию на тему «Нестационарные диссипативные структуры в нелинейных средах» (1982) и докторскую диссертацию на тему «Диффузионный хаос и новые типы упорядоченности в нелинейных средах» (1990) в Институте прикладной математики РАН. В настоящее время работает заместителем директора ИПМ, а также профессором кафедры прикладной математики МФТИ. Автор большого количества статей в области исследования хаоса и нелинейных явлений, а также учебника «Структуры, хаос, вычислительный эксперимент. Введение в нелинейную динамику».

125047 Москва, Миусская пл., д. 4
Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН
E-mail: gmalin@spp.keldysh.ru

Зав. редакцией *Н.Н. Левина*
Редакторы *Л.А. Сидорова, Н.Н. Левина*
Оформление художника *Д.В. Соколова*
Оригинал-макет подготовлен
И.А. Пономаревой, О.Н. Строгановой,
Е.Е. Сидоровой в пакете $L^A T_E X$

Подписка на 2013 год осуществляется
по каталогу Агентства Роспечать
«Газеты. Журналы», индекс 73498
и по договору между Подписчиком
(юридическим или физическим лицом)
и Издателем (Саратовским государственным университетом)

Стоимость подписки на 2013 год 1080 руб. (6 номеров)
Заявки на заключение договора принимаются
по почте, по телефону редакции, по эл. почте редакции

Адрес редакции: 410012, Саратов, Астраханская, 83
Тел./факс: (845-2) 52-38-64
E-mail: and@nonlin.sgu.ru

Распространение журнала осуществляется
редакцией журнала по адресной системе

**Условия подписки на электронную версию журнала на сайте
Научной электронной библиотеки <http://elibrary.ru>**

Сдано в набор 20.09.2012. Подписано к печати 29.10.2012
Формат 70x108/16. Бумага «Снегурочка». Печать трафаретная
Усл. печ. л. 13,65(9,75). Уч.-изд. л. 13,0. Заказ 442

Отпечатано на ризографе GR 3750 редакции журнала

© Редакция журнала
«Известия вузов. ПНД», 2012
© Оформление художника
Д.В. Соколова, 2012