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 26, № 3, 2018, Саратов

СОДЕРЖАНИЕ

К 80-летию профессора Д.И. Трубецкова

От редактора выпуска. Кузнецов С. П	3
ОБЗОРЫ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ	
Руденко О. В. «Экзотические» модели физики интенсивных волн: Линеаризуемые уравнения, точно решаемые задачи и неаналитические нелинейности	7
<i>Кузнецов С. П.</i> Простые электронные генераторы хаоса и их схемотехническое моделирование	35
ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ НЕЛИНЕЙНОЙ ТЕОРИИ КОЛЕБАНИЙ И ВОЛН	
Аринушкин П. А., Анищенко В. С. Анализ синхронных режимов работы цепочки связанных осцилляторов энергосетей	62
НОВОЕ В ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКЕ	
Розенталь Р. М., Исаева О. Б., Гинзбург Н. С., Зотова И. В, Сергеев А. С., Рожнев А. Г., Тараканов В. П. Автомодуляционные и хаотические режимы генерации в двухрезонаторном гироклистроне с запаздывающей обратной связью	78
Мясин Е. А., Максимов Н. А., Котов В. Д. Воздействие низкочастотного шумового сигнала на СВЧ-генератор детерминированных колебаний на Si-Ge транзисторе	99
Соминский Г. Г., Сезонов В. Е., Тумарева Т. А., Тарадаев Е. П. Разработка и исследование полевых эммитеров для коротковолновых СВЧ приборов в СПбПУ: Последние достижения	109
НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА В ЛИЦАХ. PERSONALIA	
Пойзнер Б. Н. Hommage Дмитрию Ивановичу Трубецкову, или Ученый и времена: Типология отношений	127

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. 26, № 3, 2018, Saratov

CONTENTS

To the 80th Birthday of professor D.I. Trubetskov

Editorial. Kuznetsov S.P.	3
REVIEWS OF ACTUAL PROBLEMS OF NONLINEAR DYNAMICS	
Rudenko O.V. «Exotic» models of high-intensity wave physics: Linearizing equations, exactly solvable problems and non-analytic nonlinearities	7
Kuznetsov S.P. Simple electronic chaos generators and their circuit simulation	35
APPLIED PROBLEMS OF NONLINEAR OSCILLATION AND WAVE THEORY	
Arinushkin P.A., Anishchenko V.S. Analysis of synchronous modes of coupled oscillators in power grids	62
INNOVATIONS IN APPLIED PHYSICS	
Rozental R. M., Isaeva O. B., Ginzburg N. S., Zotova I. V., Sergeev A. S., Rozhnev A. G., Tarakanov V. P. Automodulation and chaotic regimes of generation in a two-resonator gyroklystron with delayed feedback	78
signal on microwave oscillator of deterministic oscillation at Si–Ge transistor	99
Sominskii G. G., Sezonov V. E., Tumareva T. A., Taradaev E. P. Development of field emitters for short wave microwave devices and their investigation in SPbPU: The last achievements	108
HISTORY OF NONLINEAR DYNAMICS. PERSONALIA	
Poizner B. N. Hommage Dmitry Ivanovich Ttrubetskov, or Scientist and times: Typology of relations	127

От редактора выпуска

14 июня 2018 года исполняется 80 лет нашему дорогому коллеге, учителю, соратнику — члену-корреспонденту РАН, профессору Дмитрию Ивановичу Трубецкову. Настоящий выпуск журнала посвящен Юбилею этого замечательного Ученого и Человека.

Вся научная жизнь Дмитрия Ивановича связана с Саратовским государственным университетом, где он учился в 1955–1960 годах, затем был аспирантом, ассистентом, старшим преподавателем, доцентом, профессором, возглавил кафедру электроники, колебаний и волн, а в 1994–2003 годах занимал пост ректора университета.

Научная и организационная деятельность, которую с необычайной активностью и энергией проводил Дмитрий Иванович, во многом пришлась на трудные для страны 1990-е годы. Однако именно в это время ему вместе с учениками и коллегами удается реализовать грандиозную программу - организовать новую, оригинальную, глубокую и продуманную систему образовательного процесса, от обучения старших классов средней школы в Лицее прикладных наук до подготовки высококвалифицированных научных кадров на факультете нелинейных процессов Саратовского университета. Ключевой фундаментальный принцип состоял в том, что в основу этой системы был заложен междисциплинарный подход нелинейной динамики, синергетики, теории колебаний и волн. Универсальность научного мировоззрения, получаемого выпускниками, позволяет им успешно заниматься научными исследованиями и преподавательской деятельностью в самых разных областях - от электроники и радиофизики до биомедицины и социальных наук. В рамках огромного труда, обеспечившего построение этой уникальной системы, разработано множество учебных курсов, программ, практикумов, издано большое количество учебных пособий, в том числе получившая всероссийскую известность учебно-научная серия из 6 книг «Современная теория колебаний и волн». Широко известна выдержавшая несколько изданий в России и за рубежом, ранее изданная совместная книга Д.И. Трубецкова и М.И. Рабиновича «Введение в теорию колебаний и волн». Высококвалифицированные научные кадры, подготовленные Лицеем прикладных наук и факультетом нелинейных процессов, в числе которых много кандидатов и теперь уже докторов наук, успешно и плодотворно трудятся в образовательных и научных учреждениях России, в электронной промышленности и в других областях.

Дмитрий Иванович – один из главных организаторов проводимых в Саратове каждые три года (начиная с 1972 года) Зимних школ-семинаров по радиофизике и электронике СВЧ, которые внесли неоценимый вклад в повышение как уровня теоретических исследований в этой области в нашей стране, так и непосредственно уровня подготовки разработчиков электронных приборов в Саратовском регионе. Дмитрий Иванович и его научная школа также выступили организаторами школконференций «Хаотические автоколебания и образование структур» (ХАОС). Именно эти школы, проходящие раз в три года, обеспечили сохранение в 1990-е годы традиции проведения в России школ по нелинейным колебаниям и волнам, в то время

как она оказалась прерванной даже в таком признанном научном центре, как Нижний Новгород. Для школьников и студентов, ориентированных на занятие наукой, благодаря усилиям Дмитрия Ивановича, в течение многих лет ежегодно проводятся школы «Нелинейные дни в Саратове для молодых».

Научные интересы Дмитрия Ивановича необычайно широки и многогранны и при этом нашли выражение не только в научных трудах – книгах, статьях, но и в преподавательской деятельности. Все, кому довелось обучаться в Саратовском университете в эти годы, помнят его прекрасные, наполненные глубоким содержанием и блестяще читавшиеся лекционные курсы «Теория волн», «Электронные приборы М- и О-типа», «Введение в специальность» и другие.

Дмитрий Иванович – один из главных инициаторов издания нашего журнала «Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика», который выходит с 1993 года и пользуется заслуженным признанием научной общественности, во многом определяя развитие исследований в области нелинейной науки в нашей стране. В рамках настоящего юбилейного выпуска журнала редколлегия и авторы публикуемых статей постарались отразить разнообразные научные интересы Дмитрия Ивановича. Мы надеемся, что юбиляру будет интересен этот выпуск, подготовленный трудами его друзей, коллег и учеников.

Выпуск открывает обзор академика РАН О.В. Руденко «Экзотические модели физики интенсивных волн: Линеаризуемые уравнения, точно решаемые задачи и неаналитические нелинейности». В статье обсуждаются математические модели нелинейных волн, мотивированные в основном проблемами акустики, но фактически имеющие более широкое значение. Материал прекрасно изложен на уровне, доступном студентам и аспирантам, формирует у читателя общее представление о предмете и побуждает к заинтересованности данным кругом проблем, включая математические, физические, прикладные аспекты. Материал статьи находится в русле той области научных интересов юбиляра, которая касается теории нелинейных волн во всем многообразии ее междисциплинарной проблематики, многопланового теоретического инструментария и богатой феноменологии.

Обзор профессора С.П. Кузнецова «Простые электронные генераторы хаоса и их схемотехническое моделирование» посвящен рассмотрению коллекции электронных генераторов хаоса, содержащей как примеры из литературы, так и оригинальные конструкции, рассмотренные с единых позиций, включая предоставленные в статье результаты схемотехнического моделирования с помощью современного программного продукта «Multisim». Исследование сложной динамики и хаоса в электронных системах – одно из главных направлений научной школы, созданной Д.И. Трубецковым, к которой принадлежит и автор статьи. Во многом благодаря исследованиям именно этой школы электроника сверхвысоких частот заняла достойное место в рамках междисциплинарного направления, имеющего содержанием сложную динамику нелинейных систем различной природы.

Статья профессора Саратовского университета В.С. Анищенко в соавторстве с П.А. Аринушкиным «Анализ синхронных режимов работы цепочки связанных осцилляторов энергосетей» посвящена применению методов нелинейной динамики для анализа процессов в сетях связанных источников и элементов потребления энергии. Работа представляет собой интересный пример нетривиальных особенностей поведения связанных элементов, таких как синхронные электрические машины,

выявляет нежелательные моменты, возникающие при девиации собственных частот индивидуальных элементов.

Статья «Автомодуляционные и хаотические режимы генерации в двухрезонаторном гироклистроне с запаздывающей обратной связью» большой группы авторов, представляющих Нижегородскую и Саратовскую научные школы, имеет содержанием современное исследование в рамках нестационарной нелинейной теории и численного моделирования различных динамических режимов применительно к определенному типу вакуумных электронных приборов сверхвысоких частот (гироклистроны). Начало этого научного направления восхолит к 1970-м голам, когла в научной группе, возглавляемой Д.И. Трубецковым в Саратове, и в группе М.И. Петелина в Нижнем Новгороде приблизительно в одно и то же время были выработаны основные принципы построения математических моделей электронных приборов с распределенным взаимодействием и их анализа. Тогда же были получены первые численные результаты, относящиеся к лампам обратной волны типа М и генераторам обратной волны с релятивистским электронным потоком. При этом обнаружились интересные и неожиланные особенности нелинейной динамики этих систем. такие как автомодуляция и хаос. После контактов и взаимного обмена результатами на VIII Всесоюзной межвузовской конференции по электронике СВЧ в Ростове-на-Дону в 1976 году усилия обеих групп были объединены, что послужило основой для многопланового и содержательного развития работ в этом направлении применительно к различным типам устройств вакуумной СВЧ электроники и реализующимся в них процессам.

Е.А. Мясин, Н.А. Максимов и В.Д. Котов из Фрязинского филиала Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН представили статью «Воздействие низкочастотного шумового сигнала на СВЧ генератор детерминированных колебаний на Si–Ge транзисторе», посвященную экспериментальному исследованию воздействия низкочастотного шумового сигнала на электронный генератор Колпитца, функционирующий в режиме детерминированных колебаний. Это исследование находится в русле еще одного научного направления, которому в научной школе Д.И. Трубецкова традиционно уделялось большое внимание, и которое имеет содержанием изучение воздействия шумов на электронные устройства. Достаточно сказать, что этим проблемам посвящена значительная часть изданной в Саратовском университете коллективной монографии «Электроника ламп с обратной волной» (1975).

Научную часть выпуска завершает статья группы исследователей из Санкт-Петербургского политехнического университета – профессора Г.Г. Соминского и его сотрудников В.Е. Сезонова, Т.А. Тумаревой и Е.П. Тарадаева «Разработка и исследование полевых эммитеров для коротковолновых СВЧ приборов в СПбПУ: Последние достижения». В статье приводятся данные о разработке и исследованиях полевых эмиттеров для создания электронных пучков СВЧ приборов миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн. Описаны методы создания и характеристики многоострийных кремниевых катодов с двухслойными металлфуллереновыми покрытиями, а также многослойных нано-структурированных катодов. Работа представлена группой, давно и плодотворно сотрудничающей с научной школой Д.И. Трубецкова. Можно заметить, что Дмитрию Ивановичу с соавторами принадлежит изданное в Саратовском университете первое в литературе учебно-

научное пособие, излагающее проблематику полевой эмиссии в контексте создания новых типов холодных катодов, пригодных дли микроминиатюризации вакуумных электронных приборов – «Лекции по сверхвысокочастотной вакуумной микроэлектронике».

Заключительная статья выпуска написана давним другом Саратовской научной школы профессором Б.Н. Пойзнером из Томского университета и представляет собой многоплановое научно-философское эссе, нацеленное на анализ структуры творческой деятельности и рефлексии учёного. Обширная часть рассуждений автора посвящена персонально Дмитрию Ивановичу. Текст читается на одном дыхании и тесно сочетается с еще одной стороной деятельности юбиляра – его интересами гуманитарного плана и проблемами истории науки, исследованием и популяризацией которых Дмитрий Иванович много занимается в последние годы.

Мы надеемся, что этот юбилейный выпуск журнала послужит хорошим подарком Дмитрию Ивановичу к его юбилею. Мы желаем Дмитрию Ивановичу здоровья, энергии, радости от научной и общественной деятельности, дальнейших успехов, позитивных эмоций от общения с коллегами, друзьями, учениками.

Профессор, доктор физико-математических наук

С.П. Кузнецов



УДК 534.222

«ЭКЗОТИЧЕСКИЕ» МОДЕЛИ ФИЗИКИ ИНТЕНСИВНЫХ ВОЛН: ЛИНЕАРИЗУЕМЫЕ УРАВНЕНИЯ, ТОЧНО РЕШАЕМЫЕ ЗАДАЧИ И НЕАНАЛИТИЧЕСКИЕ НЕЛИНЕЙНОСТИ

О. В. Руденко

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова Россия, 119991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, стр. 2 Институт общей физики имени А.М. Прохорова РАН Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38 Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН Россия, 123242 Москва, Б. Грузинская ул., 10, стр. 1 Blekinge Institute of Technology, Karlskrona, Sweden E-mail: rudenko@acs366.phys.msu.ru

Поступила в редакцию 1.05.2018

Тема и цель исследования. Представлен краткий обзор публикаций и обсуждение ряда математических моделей, которые, по мнению автора, знакомы только узкому кругу специалистов. Эти модели недостаточно изучены, несмотря на их универсальность и практическую значимость. Результаты, опубликованные в разное время и в разных журналах, обобщены в рамках одной статьи. Цель - сформировать у читателя общее представление о предмете и заинтересовать его математическими, физическими или прикладными деталями, подробно изложенными в цитируемой литературе. Исследуемые модели. Обсуждаются диссипативные модели высших порядков. Рассмотрены точно линеаризуемые уравнения, содержащие неаналитические нелинейности: квадратично-кубичную (QC) и модульную (М). Анализируются уравнения типа Бюргерса, Кортевега-де Вриза, Хохлова-Заболотской, Островского-Вахненко, неоднородные и нелинейные интегро-дифференциальные уравнения. Результаты. Дано объяснение появлению диссипативных осцилляций вблизи ударного фронта. Описано формирование в QC-среде ударных волн сжатия и разрежения, устойчивых лишь при определенных параметрах «скачка», формирование периодических трапециевидных пилообразных волн и автомодельных импульсных сигналов N-типа. Рассмотрены столкновения одиночных импульсов в М-среде, обнаруживающие новые корпускулярные свойства (взаимное поглощение и аннигиляцию) и похожие на соударения сгустков химически реагирующих веществ, например, горючего и окислителя. Описаны особенности поведения «модульных» солитонов. Изучено явление нелинейного волнового резонанса в средах с QC-, Q- и М-нелинейностями. Использованы точно линеаризуемые неоднородные уравнения с источниками. Указан сдвиг максимума резонансных кривых относительно линейного положения, определяемого равенством скоростей собственной и вынужденной волн. Дан анализ упрощенных моделей для дифрагирующих пучков, полученных проецированием 3D уравнений на ось пучка. Обсуждаются сильно нелинейные волны в системах с голономными связями. Рассматриваются интегро-дифференциальные уравнения с ядрами релаксационного типа и возможности сведения их к дифференциальным и дифференциально-разностным уравнениям. Обсуждение. Материал изложен на популярном уровне. По-видимому, эти исследования могут быть продолжены, если читатели сочтут их достаточно интересными.

Ключевые слова: диссипативные модели, ударные фронты, линеаризуемые уравнения, QC-, Q- и М-нелинейности.

DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-3-7-34

Образец цитирования: Руденко О.В. «Экзотические» модели физики интенсивных волн: Линеаризуемые уравнения, точно решаемые задачи и неаналитические нелинейности // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2018. Т. 26, № 3. С. 7–34. DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-3-7-34

«EXOTIC» MODELS OF HIGH-INTENSITY WAVE PHYSICS: LINEARIZING EQUATIONS, EXACTLY SOLVABLE PROBLEMS AND NON-ANALYTIC NONLINEARITIES

O. V. Rudenko

Lomonosov Moscow State University, Physics Faculty
1–2, Leninskie Gory, 119991 Moscow, Russia
Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences
38, Vavilov Str., 119991 Moscow, Russia
Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences
10–1, Bolshaya Gruzinskaya str., 123242 Moscow, Russia
Blekinge Institute of Technology
Karlskrona 371 79, Sweden
Received 1.05.2018

Topic and aim. A brief review of publications and discussion of some mathematical models are presented, which, in the author's opinion, are well-known only to a few specialists. These models are not well studied, despite their universality and practical significance. Since the results were published at different times and in different journals, it is useful to summarize them in one article. The goal is to form a general idea of the subject for the readers and to interest them with mathematical, physical or applied details described in the cited references. Investigated models. Higher-order dissipative models are discussed. Precisely linearizable equations containing nonanalytic nonlinearities – quadratically-cubic (QC) and modular (M) – are considered. Equations like Burgers, KdV, KZ, Ostrovsky–Vakhnenko, inhomogeneous and nonlinear integro-differential equations are analyzed. Results. The appearance of dissipative oscillations near the shock front is explained. The formation in the QC-medium of compression and rarefaction shocks, which are stable only for certain parameters of the «jump», as well as the formation of periodic trapezoidal sawtooth waves and self-similar N-pulse signals are described. Collisions of single pulses in the M-medium are discussed, revealing new corpuscular properties (mutual absorption and annihilation). Collisions are similar to interactions of clusters of chemically reacting substances, for example, fuel and oxidizer. The features of the behavior of «modular» solitons are described. The phenomenon of nonlinear wave resonance in media with QC-, Q- and M-nonlinearities is studied. Precisely linearizable inhomogeneous equations with external sources are used. The shift of maximum of resonance curves relative to the linear position, which is determined by the equality of velocities of freely propagating and forced waves, is indicated. Simplified models for diffracting beams obtained by projecting 3D equations onto the beam axis are analyzed. Strongly nonlinear waves in systems with holonomic constraints are discussed. Integro-differential equations with relaxation type kernel, and the possibility of reducing them to differential and differentialdifference equations are considered. Discussion. The material is outlined on a popular level. Apparently, these studies can be continued if the readers find them interesting enough.

Key words: dissipative models, shock fronts, linearizing equations, QC-, Q- and M-non-linearities.

DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-3-7-34

References: Rudenko O.V. «Exotic» models of high-intensity wave physics: Linearizing equations, exactly solvable problems and non-analytic nonlinearities. *Izvestiya VUZ, Applied Nonlinear Dynamics*, 2018, vol. 26, no. 3, pp. 7–34. DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-3-7-34

Ввеление

Дмитрий Иванович Трубецков известен не только как выдающийся ученый, но и как блестящий популяризатор науки, на книгах которого училось несколько поколений специалистов. Мне посчастливилось быть научным редактором учебного пособия Д.И. Трубецкова [1], написанного вместе с М.И. Рабиновичем в то время, когда «нелинейная» литература была остро востребована. Я и в последующие годы получал большое удовольствие от книг Дмитрия Ивановича и его лекций на школах по нелинейным волнам, которые организовал А.В. Гапонов-Грехов в Нижнем Новгороде.

Писать статью в специальный выпуск журнала, посвященный Д.И. Трубецкову, – большая ответственность. Трудно поддержать необходимый научный и учебнометодический уровень, заданный Юбиляром. Это тем более сложно сделать в ограниченный промежуток времени, отведенный Редакцией. С другой стороны, не откликнуться на Юбилей никак нельзя, пусть даже «неотлежавшимся» материалом. Очень надеюсь, что читатели и сам Дмитрий Иванович не будут судить слишком строго результат моих поспешных усилий.

Точно решаемые нелинейные задачи много лет привлекали мое внимание, наверное, потому, что я не владею компьютерными искусствами. Заниматься расчетами на ЭВМ меня «разубедили» академики Р.В. Хохлов (мой научный руководитель) и Н.С. Бахвалов, известный эксперт по численным методам. Они организовали в 1974 году группу физиков и математиков (см. [2]) для компьютерного решения нелинейных волновых задач. Много лет взаимодействуя с Н.С. Бахваловым и его сотрудниками, я понял, что развитие и применение численных методов – это самостоятельный род деятельности, требующий специфических навыков. Каждому лучше заниматься своим делом, а мое дело – аналитическая теория, ориентированная на эксперимент и приложения.

1. Уравнения типа Бюргерса с высшими производными

В этом разделе речь пойдет об эволюционных уравнениях вида

$$\frac{\partial V}{\partial z} - V \frac{\partial V}{\partial \theta} = \pm \Gamma \frac{\partial^n V}{\partial \theta^n},\tag{1}$$

где Γ — диссипативный параметр. В большинстве волновых задач использованные в (1) безразмерные переменные z, θ имеют смысл «медленной» координаты вдоль направления распространения волны и «запаздывающего» времени в системе отсчета, движущейся со скоростью собственной волны в среде. При n=1 из (1) получается уравнение типа Хопфа, при n=2 — Бюргерса, при n=3 — Кортевега—де Вриза. Все три относятся к числу наиболее известных и понятно, почему. Они не только обладают интересными математическими свойствами, но и правильно моделируют процессы разной физической природы. Уравнение второго порядка — уравнение Бюргерса (которое придумал Бейтмен) — вообще уникально: оно допускает точную линеаризацию с помощью простого преобразования переменной (замены Хопфа—Коула, которую придумал Флорин).

Возникает вопрос: а что при n>3? Востребованы ли эти уравнения или же их стоит рассматривать, лишь формально продолжая ряд n=1,2,3,...? Примером интересной, но сложно устроенной модели, может служить одномерное уравнение Курамото-Сивашинского с производными второго, третьего и четвертого порядка. Вместе с тем, уравнение типа (1) с одной только четвертой производной почему-то внимания не привлекало. Однако оно, безусловно, интересно для приложений. Дело в том, что уравнение [3]

$$\frac{\partial V}{\partial z} - V \frac{\partial V}{\partial \theta} = -\Gamma \frac{\partial^4 V}{\partial \theta^4} \tag{2}$$

соответствует закону дисперсии

$$k = \frac{\omega}{c} + i\chi\omega^4,$$

то есть описывает нелинейные волны в диссипативной среде, где затухание пропорционально четвертой степени частоты с некоторым коэффициентом χ . Зависимость затухания упругих волн, пропорциональное $\chi\omega^4$, наблюдается в средах с малоразмерными неоднородностями (горные породы [4], кости черепа [5]). Например, в жидкостях с пузырьками газа радиуса a, их объемной концентрацией n и собственной частотой ω_* коэффициент равен $\chi = 4\pi na^2/\omega_*^2$. Такие же потери происходят вследствие рэлеевского рассеяния в средах с мелкомасштабными флуктуациями показателя преломления μ , радиус корреляции которых a, коэффициент $\chi = 8 \langle \mu^2 \rangle a^3/c^4$.

Нетрудно найти частное решение (2) в виде стационарной волны [3]

$$\theta = \left(\frac{40}{9}\Gamma\right)^{1/3} \int_{0}^{V} \frac{dt}{(1-t^2)^{2/3}}.$$
 (3)

Точное решение (3) в квадратурах описывает ударную волну сжатия (рис. 1) с конечной шириной фронта, определяемой конкуренцией между нелинейностью и диссипацией, пропорциональной $\beta\omega^4$. Кривые I-5 отвечают значениям диссипативного параметра Γ , равным соответственно: $2.2 \cdot 10^{-4}$, $6.1 \cdot 10^{-3}$, $2.8 \cdot 10^{-2}$, $7.7 \cdot 10^{-2}$, $2.2 \cdot 10^{-1}$. С ростом диссипации фронт уширяется.

Значение V=1 достигается за конечное время $\theta=\theta_*\approx 3.4\cdot \Gamma^{1/3}.$ В точке $\theta=\theta_*$ первая и вторая производные обращаются в ноль.

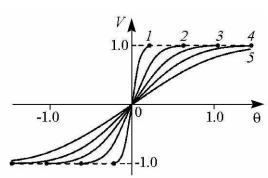


Рис. 1. Форма ударного фронта, описываемая решением (3) [3]

Fig. 1. Shape of the shock front, described by the solution (3) [3]

Однако третья производная положительна, и рост V в области за точкой перегиба $\theta > \theta_*$ продолжается. Таким образом, стационарная волна (3) формируется для возмущения, неограниченно растущего на бесконечности. В этом различие с уравнением Бюргерса, для которого стационарная волна $V = \tanh\left(\theta/2\Gamma\right) \to 1$ при $\theta \to \infty$. Отличие связано с тем, что более сильная частотная зависимость потерь (ω^4 вместо ω^2) может быть скомпенсирована усиленным притоком энергии к фронту, который обеспечивается

ростом V при $\theta \to \infty$. Но ограниченное стационарное решение также существует. Численное решение уравнения (2) показало, что асимптотический рост $V \to 1$ при $\theta \to \infty$ происходит не монотонно, а с затухающими осцилляциями [3].

В дальнейшем свойства симметрии модели (2) изучались методами теории групп Ли [6]. В работе [7] проведено детальное численное исследование уравнения (2), а также уравнения (1) шестого порядка. Компьютерный анализ подтвердил факт появления затуха-

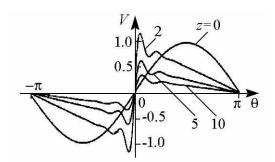


Рис. 2. Один период гармонического (при z=0) сигнала и диссипативное сглаживание осциллирующего ударного фронта [7]

Fig. 2. One period of a harmonic (at z=0) signal and dissipative smoothing of an oscillating shock front [7]

ющих осцилляций вблизи ударного фронта, которые усиливаются с ростом порядка уравнения. Такие осцилляции возникают при распространении исходного сигнала произвольной формы после того, как в результате его эволюции возникает крутой ударный фронт. На рис. 2 [7] показан осциллирующий фронт для исходного гармонического сигнала в модели (1) с n=6. Профили построены для значения числа $\Gamma=2.45\cdot 10^{-6}$ и различных расстояний z, указанных при кривых.

Известно, что осцилляции у фронта появляются и в других случаях, например, в модели Кортевега—де Вриза—Бюргерса [8]. Однако там и здесь механизм различен. В диспергирующей среде осцилляции появляются из-за «разбегания» (расфазировки) гармоник, формирующих фронт. В нашем же случае осцилляции есть следствие «явления Фурье». Затухание, пропорциональное ω^{2n} , убирает высокие гармоники из спектра сигнала, в результате чего формирование «монотонного» фронта при его достаточно высокой крутизне оказывается невозможным. Последовательность ω^{2n} при $n \to \infty$ сходится неравномерно: в области $0 \le \omega < 1$ – к нулю, а при $\omega > 1$ – к бесконечности. Таким образом, в волне «выживают» только те низшие гармоники, которые попадают в область $0 \le \omega < 1$; они-то и формируют осциллирующий сигнал.

2. Точно линеаризуемые уравнения с модульной, квадратичной и квадратично-кубичной нелинейностями

Нелинейные уравнения в частных производных второго порядка, допускающие линеаризацию, интересны как с точки зрения математической физики, так и для понимания нелинейных явлений. Особенно полезны уравнения, адекватные реальным системам. Рассмотрим такое уравнение

$$\frac{\partial V}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\alpha |V| + \frac{\beta}{2} V^2 + \frac{\gamma}{2} V |V| \right) + \Gamma \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2}. \tag{4}$$

Коэффициенты α , β , γ стоят при членах с нелинейностями, которые будем называть модульной (M), квадратичной (Q) и квадратично-кубичной (QC), соответственно. Нетрудно убедиться в том, что замена

$$V = \frac{2\Gamma}{\beta \pm \gamma} \frac{\partial}{\partial \theta} \ln U \tag{5}$$

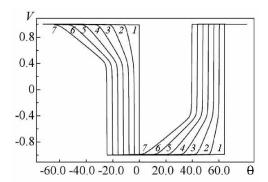


Рис. 3. Процесс формирования устойчивых ударных фронтов сжатия (правые кривые I–T) и разрежения (левые кривые I–T). Число $\Gamma=0.03$. Кривые I–T соответствуют расстояниям $z=0,\,10,\,20,\,30,\,40,\,50,\,60$ [11]

Fig. 3. The process of forming stable compression shock fronts (right-hand curves I-7) and rarefaction shock fronts (left curves I-7). Number $\Gamma=0.03$. Curves I-7 correspond to distances z=0,10,20,30,40,50,60 [11]

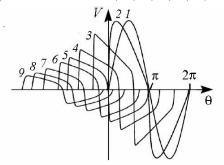


Рис. 4. Процесс формирования периодической трапециевидной пилообразной волны в QC-среде. Число $\Gamma=0.01$. Кривые I-9 соответствуют расстояниям z=0,1,4,8,12,16,24,32,40 [12]

Fig. 4. The process of forming a periodic trapezoidal sawtooth wave in a QC-medium. Number $\Gamma=0.01$. Curves I-9 correspond to distances z=0,1,4,8,12,16,24,32,40 [12]

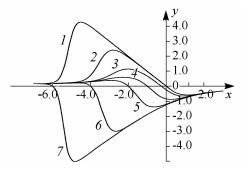


Рис. 5. Автомодельное решение QC-уравнения (4) в виде N-волны. Кривые I-7 соответствуют точкам: $(-x_*)=10^{-5},\,10^{-2},\,0.25,\,1,\,2,\,4,\,6\,$ [13]

Fig. 5. A self-similar solution of the QC-equation (4) in the form of an N-wave. Curves I-7 correspond to points: $(-x_*) = 10^{-5}, 10^{-2}, 0.25, 1, 2, 4, 6$ [13]

сводит (4) к линейному уравнению для вспомогательной функции U

$$\frac{\partial U}{\partial z} = \pm \alpha \frac{\partial U}{\partial \theta} + \Gamma \frac{\partial^2 U}{\partial \theta^2}.$$
 (6)

В формулах (5) и (6) верхние знаки берутся для V>0, а нижние — для V<0. Факт линеаризации позволяет найти множество решений, описывающих реальные явления.

Если есть только квадратичная нелинейность (Q-нелинейность, $\alpha = \gamma = 0$, $\beta \neq 0$), получаем из (4) обычное уравнение Бюргерса.

Недавно были начаты исследования квадратично-кубичного уравнения (QC-уравнения) (4), в котором $\alpha=\beta=0, \gamma\neq0$ [9–13]. Оно также линеаризуется и имеет важный физический смысл. QC-уравнение описывает: ударные волны сжатия и разрежения, устойчивые лишь при определенных значениях параметров скачка (рис. 3); превращение гармонической волны в «пилу» с зубцами трапециевидной формы (рис. 4); эффекты самовоздействия, нелинейного затухания и другие.

На рис. 5 [13] изображено автомодельное решение QC-уравнения (4) в виде N-волны. В соответствии с одной из симметрий уравнения (4) подстановкой

$$V = \sqrt{\frac{2\Gamma}{z}} y \left(x = \frac{\theta}{\sqrt{2\Gamma z}} \right)$$
 (7)

оно сводится к обыкновенному дифференциальному уравнению. Положительные и отрицательные ветви решения сшиваются в точке x_* . Заметим, что это решение обобщает автомодельное решение Q-уравнения [14, 15] и переходит в него в случае однополярного импульса. Укажем на несколько приложений QC-модели.

Пример 1. Известно, что при высоких уровнях звука отверстие в пластинке обнаруживает нелинейный отклик. Экспериментально показано [16], что связь между акустическим давлением и скоростью имеет вид $p' = \varsigma u |u|$. Аналогичный член появляется в интеграле Коши–Лагранжа при осциллирующем движении среды. Таблицы коэффициентов ς для различных обтекаемых препятствий даны в справочнике [17]. Добавляя указанный нелинейный член в уравнение состояния системы уравнений гидродинамики, нетрудно с помощью стандартных процедур упрощения вывести QC-уравнение (4). Метаматериал с нелинейностью $p' = \varsigma u |u|$ можно изготовить, размещая обтекаемые элементы в объеме жидкости. Эффект такой нелинейности проявляется в горле резонаторов Гельмгольца с волокнистым наполнителем, которые используются для поглощения интенсивного звука [18].

Пример 2. Поскольку параметры сред обычно находят по данным точных спектральных измерений, обсудим разложение в ряд по гармоникам решения QC-уравнения (4) для монохроматического исходного сигнала. Вначале генерируется низшая (третья) гармоника, которая на малых расстояниях пропорциональна квадрату амплитуды $p_0'^2$ волны основной частоты и растет с расстоянием пропорционально z^1 . С другой стороны, в обычной Q-среде эти зависимости таковы: $p_0'^3$ и z^2 , но часто наблюдаются отклонения от них. Например, в поликристаллах сплава алюминия отклонения от законов $p_0'^3$ и z^2 объяснялись нелинейным трением на межзеренных границах [19]. Поведение QC-модели описано также для сдвиговых волн (например, в мягких биотканях), симметрия которых не допускает квадратичных эффектов. В любом случае, зависимости третьей гармоники от расстояния (пропорциональная z^m для 1 < m < 2) и от амплитуды (пропорциональная $p_0'^2$ для 2 < k < 3) свидетельствуют о наличии QC-элементов в объеме среды. Другие приложения и эксперимент описаны в обзоре [10].

Исследования волн в средах с «модульной» нелинейностью ($\beta=\gamma=0,\,\alpha\neq0$) также были начаты сравнительно недавно [20–22]. М-среды, встречающиеся в механике, имеют различную упругость при деформациях растяжения и сжатия. Пример –

армированные полимеры и бетоны [23, гл. 1, п. 10]. Здесь М-уравнение еще проще, чем два указанные выше линеаризуемые уравнения Q- и QC-типа. Оно линейно для функции, сохраняющей знак, то есть для V > 0 или V < 0. Нелинейные эффекты проявляются лишь для знакопеременных решений.

Примером может служить процесс столкновения двух [9] или трех [24] импульсов разной полярности (рис. 6). Вначале (кривая 1) один положительный и два отрицательных импульса разнесены и начинают сближаться, не взаимодействуя друг с другом. В результате столкновения положительного и ближайшего к нему отрицательного

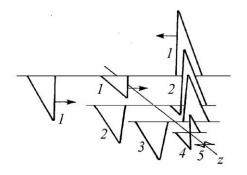


Рис. 6. Столкновение трех одиночных сигналов с нулевым суммарным количеством движения. Кривые $I{-}5$ изображают последовательные моменты процессов взаимного поглощения и аннигиляции сигналов. Число $\Gamma=0.003$ [24]

Fig. 6. The collision of three single signals with zero total momentum. Curves I-5 represent successive moments of processes of mutual absorption and annihilation of signals. Number $\Gamma=0.003$ [24]

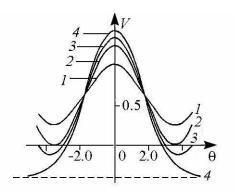


Рис. 7. Процесс превращения периодической волны (кривая *I*) в солитон (кривая *4*), происходящий с ростом амплитуды волны [25]

Fig. 7. The process of transformation of a periodic wave (curve I) into a soliton (curve 4), which occurs with increasing wave amplitude [25]

импульса образуется связанное состояние с общим ударным фронтом (кривая 2). В этот момент «включается» нелинейное затухание (ср. кривые 2 и 3), которое продолжается до исчезновения отрицательного импульса. Сформировавшийся положительный импульс задержан по фазе и имеет меньшую амплитуду по сравнению с исходным. В дальнейшем он распространяется без изменения формы и сталкивается со вторым импульсом отрицательной полярности. Происходит их взаимное поглощение и аннигиляция (ср. кривые 4 и 5).

Таким образом, взаимодействие уединенных волн в М-среде проявляет свойства, отличные от наблюдаемых при упругих столкновениях солитонов и неупругих слияниях ударных волн. Имеется аналогия с взаимодействием сгустков химически реагирующих веществ, например, горючего и окислителя. В результате реакции один (меньший) компонент исчезает, а масса второго (большего) уменьшается.

Интересные свойства демонстрируют решения М-уравнения КдВ [25]

$$\frac{\partial V}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial \theta} |V| = D \frac{\partial^3 V}{\partial \theta^3}.$$
 (8)

Заметим, что модульный солитон не может распространяться по невозмущенной среде, то есть иметь профиль, изображенный на рис. 7, для которого $V\left(\theta\right)\to0$, $|\theta|\to\infty$. Причиной является тот факт, что солитоны формируются в результате конкуренции между нелинейным «укручением» и диперсионным «расплыванием» волны, а в М-модели один из конкурирующих факторов (нелинейность) для возмущения, сохраняющего знак, отсутствует. В этом основное отличие от солитонных решений обычного Q-нелинейного уравнения КдВ; это отличие связано с исчезновением одной из симметрий для М-уравнения (8).

Эффекты модульной нелинейности наблюдались в экспериментах [26, 27]. Обнаружено, что зависимость амплитуды второй гармоники от амплитуды первой в структурно неоднородных твердых телах отличается от квадратичной зависимости $A_2 = KA_1^2$. Она имеет форму $A_2 = KA_1^m$, где показатель степени лежит в диапазоне 1 < m < 2. Разумно предположить, что помимо классической Q-нелинейности среда имеет нелинейность второго типа, которая отвечает за отклонение от m=2. Таковой может быть «модульная» нелинейность.

При наличии одновременно двух типов Q- и M-нелинейности решение уравнения

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} + \frac{1}{2c} \frac{\partial}{\partial \tau} \left(g |\sigma| + \delta \frac{\sigma^2}{c^2 \rho} \right) = 0 \tag{9}$$

методом возмущений для механического напряжения σ имеет вид

$$\sigma = -A_1 \sin(\omega \tau) - \frac{\omega}{c} x \left(\frac{4}{3\pi} g A_1 + \frac{\delta}{2c^2 \rho} A_1^2 \right) \sin(2\omega \tau). \tag{10}$$

Видим, что модульная нелинейность дает линейную зависимость амплитуды второй гармоники от амплитуды первой $(A_2 \sim A_1)$, в то время как квадратичная нелинейность дает иную зависимость $(A_2 \sim A_1^2)$. В общем случае, когда существенны обе нелинейности, показатель степени в формуле $A_2 = KA_1^m$ лежит в диапазоне 1 < m < 2. Проведя несколько измерений, можно решить обратную задачу [28] и восстановить модули g, δ . Нетрудно изготовить сосредоточенные М-нелинейные элементы искусственно [29], а затем включить их в матрицу метаматериала.

3. Неоднородные уравнения и волновой резонанс

Здесь обсуждается такое уравнение

$$\frac{\partial V}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\alpha |V| + \frac{\beta}{2} V^2 + \frac{\gamma}{2} V |V| \right) - \Gamma \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2} = F \left(\theta + \delta z \right). \tag{11}$$

Наличие в правой части (11) «внешних источников», то есть заданной функции $F(\theta)$, означает, что это уравнение может описывать не только волны, свободно распространяющиеся по диссипативной среде с тройной нелинейностью, но и «вынужденные» волны, включая процесс их возбуждения. Как и однородное уравнение $(F(\theta) \equiv 0)$, уравнение (11) удается линеаризовать. Модель (11) удобно использовать для упрошенного описания нелинейного волнового резонанса в системах различной физической природы. Вначале оно (при $\alpha = \gamma = 0$) было предложено как модель генерации интенсивного гиперзвука лазерным излучением и процесса вынужденного рассеяния Мандельштама-Бриллюэна с учетом акустической нелинейности [30]. В дальнейшем (11) использовалось для описания возбуждения: подводных сигналов тепловым оптоакустическим способом; волн на морской поверхности бегущей волной давления; аэродинамических возмущений при трансзвуковом обтекании лазерного луча или твердого профиля и во многих других прикладных задачах (библиография приведена в [31]). Позднее появились математические работы, посвященные свойствам неоднородного уравнения Бюргерса и приближенным методам его анализа (см., например, [32–34]).

Напомним, что линейный волновой резонанс наступает при равенстве скорости c движения «внешней силы» (возбуждающего волну источника) и скорости c_0 распространения собственной волны в среде. Условие $c \to c_0$ аналогично условию $\omega \to \omega_0$, при котором реализуется простейший колебательный резонанс.

Решение (11) в пренебрежении диссипативным и нелинейными членами имеет вид

$$V = \frac{1}{\delta} \left[\tilde{F} \left(\theta + \delta z \right) - \tilde{F} \left(\theta \right) \right], \quad V|_{\delta \to 0} = z F \left(\theta \right), \tag{12}$$

здесь \tilde{F} – первообразная от F. Решение (12) удовлетворяет условию V ($z=0,\theta$) =0, то есть рост волны начинается от нулевого уровня. При $\delta \to 0$, $c \to c_0$ в (12) возникает неопределенность. Это означает, что при точном линейном резонансе происходит неограниченный рост волны с расстоянием, пропорциональный z. При этом форма волны повторяет функцию F (θ). Когда имеется расстройка скоростей ($\delta \neq 0$), энергия вносится источником в область его локализации (где $F \neq 0$), а затем «вытекает» вправо или влево, поскольку возбуждаемая волна движется быстрее или медленнее

источников. В результате устанавливается стационарная форма волны. Например, для источника в виде «лоренцевского колокола» получается

$$F(\theta) = \frac{A}{1 + b^2 \theta^2}, \quad \tilde{F} = \frac{A}{b} \arctan(b\theta), \quad |V_{\text{max}}(\delta)|_{z \to \infty} = \frac{\pi A}{2 |\delta b|}. \tag{13}$$

Диссипация устраняет особенность резонансной кривой $|V_{\max}\left(\delta\right)|$ (13) при нулевой расстройке $\delta \to 0$, как и в обычной колебательной системе. Например, для гармонического возбуждения $F = A \sin\left(\theta\right)$ получается

$$|V_{\text{max}}| = \frac{A}{\omega_0 \sqrt{\Gamma^2 \omega_0^2 + \delta^2}}.$$
 (14)

Резонансная кривая (14) имеет конечный максимум при $\delta \to 0$, равный $|V_{\rm max}| = A/(\Gamma \omega_0^2)$. Очевидно, что при $\delta = 0$ и слабой диссипации ($\Gamma \to 0$) волна может вырасти до уровня, требующего нелинейного ограничения.

Стационарные резонансные профили $(z \to \infty)$ при нулевой расстройке $(\delta = 0)$ удается рассчитать аналитически. Для М-нелинейности $(\alpha = 1, \beta = \gamma = 0)$ и для источника $F = A \sin{(\theta)}$ в пределах одного периода $-\pi \le \theta \le \pi$ получается

$$V = \frac{A}{2} \frac{\operatorname{sgn}\theta}{(1+\Gamma^2)} \left[2 \frac{1 - \exp\left(-\left|\theta\right|/\Gamma\right)}{1 - \exp\left(-\pi/\Gamma\right)} + \cos\theta + \Gamma\left|\sin\theta\right| - 1 \right]. \tag{15}$$

Для Q-нелинейности ($\beta=1,\,\alpha=\gamma=0$) и тех же условий решение выражается через функцию Матье

$$V = 2\Gamma \frac{d}{d\theta} \ln c e_0 \left(\frac{\theta}{2}, \frac{A}{\Gamma^2} \right), \quad -\pi \le \theta \le \pi.$$
 (16)

Для QC-нелинейности результат получается более сложным, поскольку нечетная QC-нелинейность приводит к эффектам самовоздействия и дополнительному сдвигу резонансного условия [35].

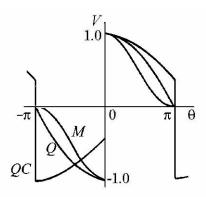


Рис. 8. Установившиеся профили одного периода волн в средах с М-, Q- и QC-нелинейностями при возбуждении гармоническими источниками

Fig. 8. The steady-state profiles of a one wave period in media with M-, Q- and QC-nonlinearities for excitation by harmonic sources

На рис. 8 изображены профили одного периода решений (15) и (16) для М- и Q-сред, а также для QC-среды при $\Gamma \to 0$. В первых двух случаях (нелинейность четная) образуется ударный фронт сжатия. В третьем случае (нечетная нелинейность) в каждом периоде образуется ударная волна сжатия и ударная волна разрежения. Формируется пилообразная волна с трапециевидными «зубцами». Интересно, что отношение меньшего и большего «скачков» разного знака на разрывах относительно уровня V=0 равно $(\sqrt{2}-1)$; оно имеет место и в волне, свободно распространяющейся по ОС-среде [10].

Процесс установления стационарного профиля волны происходит благодаря притоку энергии от источника, нелинейно-диссипативному поглощению и перераспределению ее по спектру и во времени (в пределах периода волны). Совместное влияние этих факторов можно изучить только путем численного моделирования.

На рис. 9 иллюстрирован процесс генерации периодического профиля в диссипативной среде с Мнелинейностью. При малых z профиль повторяет синусоиду, а при z=10 он близок к стационарной форме (см. рис. 8).

Заметим, что при построении кривых на рис. 9 расстройка б полагалась равной нулю. Такие же кривые, рассчитанные для Q-нелинейной среды, но при наличии расстройки, изображены на рис. 10. Расстройка приводит к тому, что новые порции энергии начинают поступать в бегущую волну в противофазе и гасить ее. Возникает процесс биений (зависимость максимума в профиле волны от расстояния), изображенный на рис. 11.

Профили волны, возбуждаемой в QC-среде, изображены на рис. 12 при нулевой расстройке ($\delta=0$) и тех же значениях параметров, что и на рис. 9 и 10. Сдвиг кривых по оси θ влево означает, что волна в среде движется быстрее, чем c_0 ; это результат самовоздействия на нечетной QC-нелинейности. При этом пространственные биения (см. рис. 11) будут возникать даже при $\delta=0$.

На рис. 13 изображены резонансные кривые для абсолютного максимума «амплитуды» волны и средней за период интенсивности. Эти кривые построены для среды с QС-нелинейностью, но аналогичные кривые получаются и для нелинейностей Q- и М-типа. Общим является сдвиг

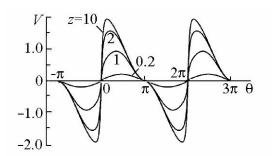


Рис. 9. Профили периодической волны, возбуждаемой синусоидальными бегущими источниками в М-нелинейной диссипативной среде при значениях чисел $\Gamma=0.1, A=1, \delta=0$

Fig. 9. Profiles of a periodic wave excited by sinusoidal running sources in an M-nonlinear dissipative medium at values of numbers $\Gamma=0.1,\ A=1,\ \delta=0$

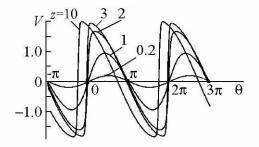


Рис. 10. Профили, возбуждаемые в Q-нелинейной среде при тех же значениях параметров, что и на рис. 9. Здесь учтена расстройка скоростей $\delta=0.1$

Fig. 10. Profiles excited in a Q-nonlinear medium with the same values of the parameters as in Fig. 9. Here, the speed detuning is taken into account, $\delta=0.1$

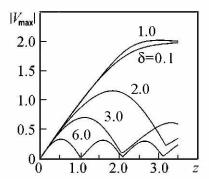


Рис. 11. Зависимости от расстояния максимальной «амплитуды» волны в Q-среде при $\Gamma=0.1$, A=1. С ростом расстройки пространственная частота биений растет, а их «размах» уменьшается

Fig. 11. Dependences on the distance of the maximum «amplitude» of the wave in the Q-medium at $\Gamma=0.1$, A=1. As the detuning increases, the spatial frequency of the beats increases, and their «swing» decreases

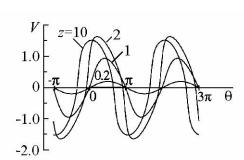


Рис. 12. Профили, возбуждаемые в QC-нелинейной среде при $\Gamma=0.1,\,A=1.$ Здесь расстройка скоростей $\delta=0$

Fig. 12. Profiles excited in a QC-nonlinear medium at $\Gamma=0.1,~A=1.$ Here the velocity detuning $\delta=0$

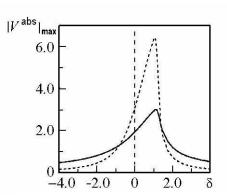


Рис. 13. Нелинейные резонансные кривые – зависимости от расстройки δ абсолютного максимума «амплитуды» в QC-среде (сплошная линия). Штриховая линия – резонансная кривая для средней интенсивности

Fig. 13. Nonlinear resonance curves – the dependence on the detuning δ of the absolute maximum of the «amplitude» in the QC-medium (solid line). The dashed line is a resonance curve for averaged intensity

максимума в область $c \to c_0$. Это явление хорошо известно в аэродинамике. Именно, в трансзвуковом полете самолет испытывает максимальное сопротивление излучения при небольшом превышении скорости звука. Этот эффект просто описывается моделью Хохлова–Заболотской (X3) или Линя–Рейсснера–Цзяна [2, 36].

Модель неоднородного уравнения (11) широко используется для сильно искаженных профилей волн, возбуждаемых в акустических резонаторах. При этом многие типы резонансных кривых удается рассчитать аналитически (см. обзор [37] и [38, гл. 11]). Такие резонаторы встречаются в приложениях аэроакустики и применяются для неразрушающего контроля твердых тел [39]. Уравнение (11) используется также в модельном описании турбулентности Бюргерса (Burgulence), поскольку наряду с нелинейным переносом энергии по спектру и высокочастотной диссипацией учитывает третий принципиальный фактор – приток энергии в низкочастотную область спектра [40].

4. Упрощенные уравнения для волновых пучков

Прогресс в понимании физики нелинейных дифрагирующих пучков в Q-средах [41] стимулирован вышеупомянутой моделью X3

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\varepsilon}{c^3 \rho} p \frac{\partial p}{\partial \tau} \right) = \frac{c}{2} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} \right). \tag{17}$$

Здесь p – акустическое давление; x – аксиальная координата; r – радиальная полярная координата; $\tau = t - x/c$ – время в системе отсчета, сопровождающей волну; ε – нелинейный параметр среды; ρ – плотность. История получения (17) и следующих из него результатов изложена в обзоре [2].

Физически интересных точных решений уравнения X3 не найдено, но большой объем информации получен путем численного интегрирования [42]. Эти данные помогли развить ряд приближенных аналитических методов.

Наиболее интересные нелинейные задачи связаны с получением предельно сильных полей в фокусе. При «острой» фокусировке волну до фокуса можно считать сферически сходящейся, а в фокальной области – плоской [43]. При этом область перетяжки имеет форму, близкую к цилиндрической. Для пучков, круглых в поперечном сечении, длина этого цилиндра равна l_* , а радиус основания – a_*

$$l_* = \frac{2R^2}{l_d} \ll R, \quad a_* = \frac{aR}{l_d} \ll a.$$
 (18)

В этой формуле $l_d = \omega a^2/(2c)$ – дифракционная длина, R – фокусное расстояние, a – исходный радиус пучка. Здесь и в дальнейшем фокусировка считается сильной, а дифракция – слабой. Именно в этом случае, когда $l_d \gg R$, можно сформировать наиболее интенсивные поля в фокусе.

На основе этих соображений в работе [44] сформулирована модель, описывающая волну в пределах перетяжки,

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\varepsilon}{c^3 \rho} p \frac{\partial p}{\partial \tau} \right) = -\frac{2c}{a_*^2} p. \tag{19}$$

Уравнение (19) можно получить из уравнения X3 (17), если формально положить, что акустическое поле вблизи оси (r=0) имеет параболическую зависимость от r

$$p(x, \tau, r) = \left(1 - \frac{r^2}{a_*^2}\right) p(x, \tau).$$
 (20)

Подставляя (20) в (17) и ограничиваясь параксиальной областью $(r \to 0)$, придем к модели (19). Она радикально упрощает анализ. Очевидно, что одномерное уравнение (19) гораздо проще двумерного (17) как для аналитического, так и для численного исследования.

Для краткости уравнение (19) используется далее в безразмерной форме

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial V}{\partial z} - V \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) = -\gamma^2 V. \tag{21}$$

Следует указать, что уравнение (21) – довольно общая модель в теории волн. Его называют уравнением Островского–Вахненко [45]. Оно получено также для задач океанологии (внутренние волны во вращающемся океане [46]) и математической физики (нахождение решений, похожих на солитоны [47]). Общность уравнения (21) очевидна: оно связано с универсальным законом низкочастотной дисперсии $k=\omega/c-\chi/\omega$ и соответствует, например, эволюционной версии уравнения Клейна–Гордона.

Стационарное решение уравнения (21) $V = V (\theta + \beta z)$

$$\frac{dV}{d\theta} = \pm \gamma \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\sqrt{V^3 - (3/2)V^2 + (\beta^3/2)(1 - C)}}{|\beta - V|}$$
(22)

выражается через эллиптические функции. Оно изображено на рис. 14, где обозначено

$$V = \beta U$$
, $T = \theta \gamma \sqrt{2/3}$.

Как следует из решения (22), максимальное и минимальное акустические давления даются формулой [44]

$$p_{\text{max}} = 2 |p_{\text{min}}| = \frac{\pi^2}{18} \frac{c^2 \rho}{\varepsilon} \left(\frac{a}{R}\right)^2.$$
 (23)

Предельное значение интенсивности достигается в поле стационарной волны, которая имеет не только специальную форму профиля, но и определенную амплитуду (23), не зависящую от исходной амплитуды и частоты. Это «явление насыщения» впервые исследовано в работе [48]. Для сильно сфокусированной волны в воде и угла фокусировки 60^o оценка (23) дает $p_{\rm max}\approx 100$ МРа и интенсивность $I\approx 50~{\rm kW/cm^2}$. Предельное значение фокальной интенсивности $96~{\rm kW/cm^2}$ найдено при численном моделировании, а значение $33~{\rm kW/cm^2}$ измерено экспериментально [49]. Интенсивности, близкие к пределу, уже достигнуты в современных медицинских устройствах [50].

Заметим, что в фокальной области часто наблюдаются асимметричные профили (см. рис. 14), но с разрывами. Однако эти волны не стационарны и меняют форму из-за потерь энергии на ударных фронтах. Именно стационарные волны доставляют энергию с минимальными потерями «по пути» от излучателя к фокусу.

Нестационарные волны вблизи фокуса исследованы с помощью модифицированной модели (19)

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{d \ln f}{dx} p - \frac{\varepsilon}{c^3 \rho} p \frac{\partial p}{\partial \tau} \right) = -\frac{2c}{a^2 f^2(x)} p, \quad f^2 = \left(1 - \frac{x}{R} \right)^2 + \left(\frac{x}{l_d} \right)^2. \quad (24)$$

Результаты расчета искажения формы при прохождении волны через фокальную область изображены на рис. 15 [51]. Использованы значения отношения фокусного расстояния к дифракционной длине $R/l_d=0.2$ и к длине образования разрыва $R/l_{sh}=0.4$. Кривые рис. 15, рассчитанные по модели (24), хорошо соответствуют результатам прямого расчета на основе модели X3 [42].

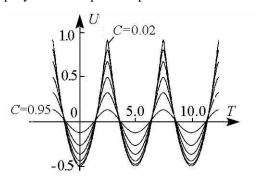


Рис. 14. Формы стационарных волн вблизи фокуса для различных значений $C=0.95,\,0.75,\,0.5,\,0.25,\,0.1,\,0.02.$ С увеличением амплитуды $(C\to 0)$ профиль искажается и положительный пик становится острым [44]

Fig. 14. Forms of stationary waves near the focus for different values C=0.95,0.75,0.5,0.25,0.1,0.02. With increasing amplitude $(C\rightarrow 0)$ the profile is distorted and the positive peak becomes sharp [44]

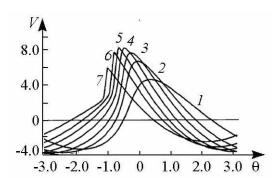


Рис. 15. Профили одного периода гармонической (при x=0) волны в окрестности фокуса. Кривые I-7 построены для расстояний $x/R=0.8,\,0.9,\,0.95,\,1.0,\,1.05,\,1.1,\,1.2$ [51]

Fig. 15. Profiles of one period of a harmonic (for x=0) wave in a neighborhood of the focus. Curves I-7 are constructed for distances x/R=0.8,0.9,0.95,1.0,1.05,1.1,1.2 [51]

Заметим, что уравнение (21) с переменными коэффициентами типа (24) много лет изучается как физиками, так и математиками [52]. Модели типа (21) обобщены недавно для сред с М-, кубичной и QC-нелинейностями в работах [53] и [54], соответственно.

Мы здесь не обсуждали модели нелинейной дифракции в неоднородных средах (см. обзор [55]). Такие модели еще более «экзотичны». Они очень сложны и почти всегда требуют численного анализа или существенных упрощений [56]. Исключение составляют системы уравнений, записанные в приближении нелинейной геометрической акустики. Эти 3D модели допускают точные решения и, в этом смысле, являются уникальными, как и «рекордное» 3D решение Ландау–Слезкина о затопленной струе [57] (см. исторический обзор [58]). Последнюю задачу тоже можно назвать «экзотической». Результат общеизвестен, но не стимулировал потока работ ввиду невозможности что-либо добавить.

5. Сильно нелинейные системы с голономными связями

Полезно различать сильно нелинейные волны и слабые волны с сильно выраженной нелинейностью [59]. В большинстве случаев мы имеем дело со слабыми волнами, для которых определяющие уравнения могут быть разложены в степенные или функциональные ряды. Пример – «акустическое разложение» адиабаты по степеням возмущений плотности и давления в окрестности равновесного состояния. Члены этого ряда соотносят с квадратичной, кубичной и нелинейностями высших порядков. В оптике вектор поляризации разлагают по степеням отношения электрического поля волны к внутриатомному полю. Однако такие разложения неудобно использовать, по крайней мере, в трех случаях: во-первых, когда определяющие соотношения содержат особенности; во-вторых, когда ряды расходятся в сильных полях; в-третьих, когда в разложениях отсутствует линейный член, зато доминируют высшие нелинейности.

Пример первого типа демонстрируют распределенные системы с М- и QC-нелинейностями. В них нет предельного перехода к линейным задачам даже для очень слабых сигналов. Обсуждаемые ниже системы с голономными связями можно отнести к третьему типу сильно нелинейных систем.

Примером такой структуры служит модель кристаллической решетки, изображенная на рис. 16. Важно подчеркнуть, что движение происходит с ограничением: узлы решетки могут смещаться только вдоль оси x. Такие системы со связями (ограничениями) можно изготовить искусственно, но они могут иметь и естественное происхожде-

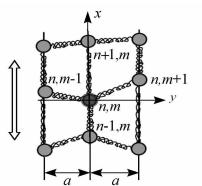


Рис. 16. Решетка из одинаковым масс, связанных с «ближайшими соседями» линейно деформируемыми ненатянутыми пружинами. Движение масс ограничено стержнями, параллельными оси \boldsymbol{x}

Fig. 16. Lattice of the same masses, connected with the «nearest neighbors» by linearly deformed unstretched springs. The motion of the masses is limited by rods parallel to the x-axis

ние. Пример – пластинки слюды, которые легче сместить параллельно плоскостям, чем в ортогональном направлении.

Рассмотрим ячейку решетки, нумеруемую парой чисел (n,m). Частица массы M в этой ячейке связана с четырьмя ближайшими соседями одинаковыми линейно деформируемыми (гуковскими) пружинками с коэффициентом жесткости γ . Обозначим смещение массы вдоль x из своего положения равновесия как $\xi_{n,m}$. Функция Лагранжа структуры (см. рис. 16), очевидно, равна

$$L = \sum_{n,m} \left\{ \frac{1}{2} M \dot{\xi}_{n,m}^2 - \frac{\gamma}{2} \left[\sqrt{a^2 + (\xi_{n,m} - \xi_{n,m-1})^2} - a \right]^2 - \frac{\gamma}{2} \left[\sqrt{a^2 + (\xi_{n,m} - \xi_{n,m+1})^2} - a \right]^2 - \frac{\gamma}{2} \left[\sqrt{a^2 + (\xi_{n,m} - \xi_{n,m+1})^2} - a \right]^2 - \frac{\gamma}{2} (\xi_{n,m} - \xi_{n-1,m})^2 \right\}.$$
(25)

Если смещения масс малы по сравнению с периодом решетки, то есть $(\xi_{n,m}-\xi_{n,m-1})^2 \ll 2a^2$, функция Лагранжа упрощается

$$L = \sum_{n,m} \left\{ \frac{1}{2} M \dot{\xi}_{n,m}^2 - \frac{\gamma}{8a^2} (\xi_{n,m} - \xi_{n,m-1})^4 - \frac{\gamma}{8a^2} (\xi_{n,m} - \xi_{n,m+1})^4 - \frac{\gamma}{2} (\xi_{n,m} - \xi_{n+1,m})^2 - \frac{\gamma}{2} (\xi_{n,m} - \xi_{n-1,m})^2 \right\}.$$
(26)

Цепочка уравнений движения для (26) получается такой

$$M\frac{d^2\xi_{i,j}}{dt^2} = -\frac{\gamma}{2a^2} \left[(\xi_{i,j} - \xi_{i,j-1})^3 + (\xi_{i,j} - \xi_{i,j+1})^3 \right] + \gamma \left(2\xi_{i,j} - \xi_{i+1,j} - \xi_{i-1,j} \right). \tag{27}$$

Как нетрудно видеть, соотношения (25)–(27) содержат сильную нелинейность. Например, если пружинки внутри вертикальных слоев (см. рис. 16) не деформируются, а соседи смещаются одинаково, но в противофазе ($\xi_{i,j-1} = \xi_{i,j+1} = -\xi_{i,j}$), из (27) получается уравнение, которое не содержит линейного члена $\sim \xi_{i,j}$,

$$\frac{d^2\xi_{i,j}}{dt^2} + \frac{8\gamma}{a^2M}\xi_{i,j}^3 = 0. {(28)}$$

Периодические решения уравнения (28) выражаются через эллиптические интегралы. С ростом амплитуды период колебаний величины $\xi_{i,j}$ растет, а с уменьшением амплитуды до нуля период обращается в бесконечность и колебания исчезают.

Дискретные системы типа (25)–(28) рассмотрены в работах [60, 61]. Кроме того, в [60] поставлен эксперимент с крутильными колебаниями связанных дисков с ограничениями их движения. Однако работ в этом направлении мало, их желательно продолжить.

Теперь перейдем к континуальному пределу, чтобы вместо дифференциальноразностных уравнений (27) вывести уравнение в частных производных

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} = \frac{c^2}{2} \frac{\partial^2 \zeta^3}{\partial y^2} + \frac{c^2 a^2}{12} \frac{\partial^4 \zeta}{\partial x^4}, \quad \zeta = \frac{\partial \xi}{\partial y}, \quad c^2 = \frac{\gamma a^2}{M}. \tag{29}$$

Безразмерная величина ς имеет смысл деформации вдоль оси y, а c^2 – квадрат скорости волны, бегущей вдоль оси x.

Уравнение (29) учитывает нелинейность, дисперсию и анизотропные свойства структуры, изображенной на рис. 16. Если зависимость деформации от координаты x отсутствует, для чисто поперечных волн получаем уравнение

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} = \frac{1}{2} c^2 \frac{\partial^2 \zeta^3}{\partial y^2}.$$
 (30)

Видно, что (30) является сильно нелинейным уравнением, поскольку в нем отсутствует предельный переход к линейной задаче при $\varsigma \to 0$. Уравнение (30) использовал В. Гейзенберг в своем варианте нелинейной квантовой теории поля [62]. Для сильно нелинейных волн модель (30) анализировалась в работах [10, 60]. Было показано, что уравнению (30) можно сопоставить эволюционное уравнение первого порядка

$$\frac{\partial \varsigma}{\partial t} = \pm \sqrt{\frac{3}{2}} \left| \varsigma \right| \frac{\partial \varsigma}{\partial y}. \tag{31}$$

Это уравнение содержит QC-нелинейность $|\varsigma| \varsigma$, рассмотренную в разделах 2–4.

Свойства анизотропии движений, описываемых уравнением (29), наглядно проявляются при наличии однородной статической деформации. Полагая в (29) $\varsigma = \varsigma_0 + \varsigma'$ и сохраняя линейный по малому возмущению ς' член, получим

$$\frac{\partial^2 \zeta'}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 \zeta'}{\partial x^2} = \frac{3}{2} c^2 \zeta_0^2 \frac{\partial^2 \zeta'}{\partial y^2} + \frac{1}{12} c^2 a^2 \frac{\partial^4 \zeta'}{\partial x^4}.$$
 (32)

Отыскивая решение уравнения (32) в виде плоской бегущей волны, найдем закон дисперсии

$$\frac{\omega^2}{c^2} = k^2 \left(1 - \frac{k^2 a^2}{12} \cos^2 \theta \right) \cos^2 \theta + \frac{3}{2} \varsigma_0^2 k^2 \sin^2 \theta.$$
 (33)

Здесь θ – угол между волновым вектором \vec{k} и осью x. При $\theta=0$ или $\theta=\pi/2$ имеем чистые продольную или поперечную волны, бегущие со скоростями

$$c_{||}^2 = c^2 - \frac{1}{12}\omega^2 a^2, \quad c_{\perp}^2 = \frac{3}{2}\varsigma_0^2.$$
 (34)

При малой статической деформации $c_\perp^2 \ll c_\parallel^2 \sim c^2$, то есть поперечная волна гораздо «медленнее» продольной. Если статической деформации нет и $\varsigma_0=0$, поперечные колебания вообще не могут распространяться, то есть волновой процесс не реализуется. Именно такая ситуация типична для мышечной ткани, в которой скорость распространения сдвиговых волн составляет единицы м/с, в то время как продольные волны бегут со скоростью порядка 1.5 км/с, примерно равной скорости звука в воде. Кроме того, скорости зависят от направления распространения волны по отношению к ориентации мышечных волокон и от натяжения мышцы [63]. Эти свойства положены в основу работы современных медицинских эластографов, используемых для диагностики состояния и патологий в мышцах и других мягких тканях [64].

При произвольных углах $\theta \neq 0$, $\theta \neq \pi/2$ уравнения (29) и (32) описывают волны, не являющиеся ни чисто продольными, ни чисто поперечными. Уравнение (29) имеет солитонные и другие интересные решения.

6. Нелинейные интегро-дифференциальные уравнения

Уравнения вида [65]

$$\frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{\partial V}{\partial z} - V \frac{\partial V}{\partial \theta} - \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \int_0^\infty K(s) V(\theta - s) \, ds \right] = \Delta_{\perp} V \tag{35}$$

имеют довольно общий смысл. Для вырожденных ядер K(s), представляющих собой дельта-функцию или комбинацию ее производных, из (35) получаются уравнения типа Хохлова–Заболотской (17), Кадомцева–Петвиашвили, Хохлова–Заболотской–Кузнецова и другие подобные уравнения для пучков, а в случае одномерных волн – уравнения типа (1). Дифференциальные уравнения следуют из (35) и для некоторых других ядер [66]. Наиболее известны уравнения с экспоненциальным ядром, которое предсказывается релаксационной моделью Мандельштама–Леонтовича [57]. В этом случае для плоских волн из (35) получается

$$\left(1 + \theta_{rel} \frac{\partial}{\partial \theta}\right) \left[\frac{\partial V}{\partial z} - V \frac{\partial V}{\partial \theta} \right] = D \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2}.$$
(36)

Уравнение в форме (36) выведено в работе [67], а в интегральной форме – в [68].

Разнообразные формы ядер, полезные для приложений, обсуждаются в работе [69]. В частности, степенные зависимости коэффициента затухания волны от частоты с дробными показателями степени, типичные для биологических тканей и геофизических структур, принципиально требуют интегро-дифференциального описания. То же относится к средам со сложной внутренней динамикой релаксационного типа.

Как находится ядро K(s) в каждом конкретном случае? Частотные зависимости дисперсии и поглощения (действительной и мнимой части волнового числа $k'(\omega), k''(\omega)$) измеряются или определяются из физической модели типа Мандельштама–Леонтовича. Затем решается обратная задача и ядро реконструируется стандартными методами, использующими принцип причинности и соотношения типа Крамерса–Кронига.

Например, показатель степени в частотной зависимости затухания в биотканях изменяется от 2.1 (кости черепа) и 1.7 (ткань яичка) до 1.1 (скелет) и 0.6 (кожа) [5]. Чаще всего в диапазоне единиц МГц (медицинский ультразвук) $k'' \sim \omega^{2-\nu}$, $0 < \nu < 1$. Для такой зависимости нетрудно показать, что $K(s) \sim s^{\nu-1}$. Особенность при s=0 часто оказывается несущественной, поскольку уравнение содержит «свертку» сингулярного ядра с осциллирующей функцией, описывающей поле волны.

Точных решений для уравнений (35) известно немного. Найдены стационарные решения для сред с Q- [67] и QC-типов [70].

Если интересоваться не конкретной средой, а общими свойствами нелинейных волн, удобен прием, сводящий интегро-дифференциальное уравнение к дифференциально-разностному или даже к простому отображению. Этот переход [69, 70] эффективен для ядер, отличных от нуля на конечном интервале. Простейший случай соответствует среде с постоянной «памятью»: K(s) = 1, 0 < s < 1; K(s) = 0,

s>1. Иными словами, до момента s=1 среда «все помнит», а в этот момент «все забывает». Для такого ядра уравнение (36) принимает вид

$$\frac{\partial V}{\partial z} - V \frac{\partial V}{\partial \theta} = D \frac{\partial}{\partial \theta} \left[V(z, \theta - 1) - V(z, \theta) \right]. \tag{37}$$

Для стационарной волны (37) превращается в разностное соотношение

$$V\left(\theta - 1\right) = V\left(\theta\right) + \frac{1}{2D}\left[1 - V^2\left(\theta\right)\right]. \tag{38}$$

Отображение (38) $V\left(\theta\right)\to V\left(\theta-1\right)$ описывает фронт ударной волны с шириной, растущей с увеличением числа D.

Физикам может показаться удивительным следующий факт. Согласно статистическим данным «Thomson Reuters», наиболее цитированными в области математики работами в 2013 году были статьи по нелинейным дифференциальным уравнениям с дробными производными. Это уравнения с интегральным членом, как в (35), но со специальным видом ядра. Дробная производная обычно понимается в смысле Римана–Лиувилля

$$(D_{0+}^{\alpha}u) = \frac{\partial^{\alpha}u}{\partial t^{\alpha}} = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)}\frac{\partial^{n}}{\partial t^{n}}\int_{0}^{t} \frac{u(s,x)\,ds}{(t-s)^{\alpha+1-n}}, \quad n-1 < \alpha < n, \quad n \in \mathbb{N}. \quad (39)$$

Такие ядра, по-видимому, и есть «экзотика». Чаще встречаются осциллирующие ядра (например, в оптике) или ядра релаксационного типа (в акустике и механике наследственных сред).

Таким образом, грань между «экзотическими» и «популярными» моделями – условна, подвижна и зависит от «раскрутки», то есть от коллективной активности достаточно большой группы авторов и энергичного перекрестного цитирования.

Заключение

Итак, в этом кратком обзоре обсуждены некоторые уравнения, не очень известные «нелинейному сообществу», некоторые аналитические решения и физические результаты. Наши знания во многом формировались под влиянием классических работ в области нелинейной физики и математики. Сегодня, по-видимому, имеет смысл чаще обращаться к «экзотике», а также конструировать модели с новым физическим содержанием. При их анализе, конечно, очень важен опыт, наработанный в прошлом. С точки зрения математики, кажется, полезно развивать групповые методы нахождения симметрий для моделей, содержащих обобщенные функции и сингулярности. Было бы интересно применить метод обратной задачи рассеяния для консервативных систем, например, с QC- и М-нелинейностями. Для физики, кажется, первоочередной интерес представляет изучение сильно нелинейных волновых процессов, а также их нелинейно-корпускулярных свойств. Надеемся на читательских интерес и поддержку работ в этом направлении.

Работа поддержана грантом РНФ № 14-22-00042.

Библиографический список

- 1. *Рабинович М.И., Трубецков Д.И.* Введение в теорию колебаний и волн. М.: Наука, 1984. 432 с.
- 2. *Rudenko O.V.* The 40th anniversary of the Khokhlov–Zabolotskaya equation // Acoust. Phys. 2010. Vol. 56, no. 4. Pp. 457–466. http://www.akzh.ru/pdf/2010 4 452-462.pdf
- 3. *Руденко О.В., Робсман В.А.* Уравнение нелинейных волн в рассеивающей среде // ДАН. 2002. Т. 384, № 6. С. 755–759.
- 4. *Gueguen Y., Palciauskas V.* Introduction to the Physics of Rocks. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1994.
- 5. *Хилл К., Бэмбер Дж., Тер Хаар Г.* Ультразвук в медицине. Физические основы применения. М.: Физматлит, 2009. 544 с.
- 6. *Boldea A.L.* Generalized and potential symmetries of the Rudenko–Robsman equation//Cent. Eur. J. Phys. 2010. Vol. 6, no. 6. Pp. 995–1000. https://www.degruyter.com/downloadpdf/j/phys.2010.8.issue-6/s11534-010-0013-0/s11534-010-0013-0.pdf
- 7. *Аверьянов М.В., Басова М.С., Хохлова В.А.* Стационарные и квазистационарные волны в диссипативных системах четного порядка // Акуст. Журн. 2005. Т. 51, № 5. С. 581–588. http://www.akzh.ru/pdf/2005 5 581-588.pdf
- 8. Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Шрейбер И.Р. Волновая динамика газо- и парожидкостных сред. М.: Энергоатомиздат, 1990. 248 с.
- 9. *Rudenko O.V.* Equation admitting linearization and describing waves in dissipative media with modular, quadratic, and quadratically cubic nonlinearities // Doklady Mathematics. 2016. Vol. 94, no. 3. Pp. 703–707.
- 10. *Руденко О.В.* Нелинейная динамика квадратично кубичных систем // УФН. 2013. Т. 183, № 7. С. 719–726. https://ufn.ru/ru/articles/2013/7/b/
- 11. *Руденко О.В., Хедберг К.М.* Квадратично кубичное уравнение Бюргерса точно решаемая модель математической физики // ДАН. 2015. Т. 461, № 6. С. 640–643.
- 12. *Rudenko O.V., Hedberg C.M.* The quadratically cubic Burgers equation: an exactly solvable nonlinear model for shocks, pulses and periodic waves // Nonlinear Dynamics. 2016. Vol. 85, no. 2. Pp. 767–776. https://link.springer.com/article/10.1007/s11071-016-2721-5
- 13. *Гусев В.А., Руденко О.В.* Автомодельные решения уравнения типа Бюргерса с квадратично-кубичной нелинейностью // ДАН. 2016. Т. 466, № 1. С. 25–29.
- 14. *Руденко О.В., Солуян С.И.* Некоторые нестационарные задачи теории волн конечной амплитуды в диссипативных средах // ДАН. 1970. Т. 190, № 4. С. 815–818.
- 15. Полянин А.Д., Вязьмин А.В., Журов А.И., Казенин Д.А. Справочник по точным решениям уравнений тепло- и массопереноса. М.: Факториал, 1998. С. 238.
- 16. *Ingard U*. Nonlinear distorsion of sound transmitted through an orifice // J. Acoust. Soc. Am. 1970. Vol. 48, no. 1. Pp. 32–33.
- 17. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.

- 18. *Руденко О.В., Хирных К.Л.* Модель резонатора Гельмгольца для поглощения интенсивного звука // Акуст. Журн. 1990. Т. 36, № 3. С. 527–534. http://www.akzh.ru/pdf/1990_3_527-534.pdf
- 19. *Коробов А.И., Изосимова М.Ю.* Нелинейные волны Лэмба в металлической пластинке с дефектами // Акуст. Журн. 2006. Т. 52, № 5. С. 683–692. http://www.akzh.ru/pdf/2006 5 683-692.pdf
- 20. *Назаров В.Е., Кияшко С.Б., Радостин А.В.* Волновые процессы в микронеоднородных средах с разномодульной нелинейностью и релаксацией // Известия вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 3. С. 275–285.
- 21. *Radostin A.V., Nazarov V.E., Kiyashko S.B.* Propagation of nonlinear acoustic waves in bimodular media with linear dissipation // Wave Motion. 2013. Vol. 50, no. 2. Pp. 191–196.
- 22. *Radostin A.V., Nazarov V.E., Kiyashko S.B.* Propagation of nonlinear acoustic waves in bimodular media with linear dissipation // Wave Motion. 2013. Vol. 50, no. 2. Pp. 191–196.
- 23. Амбарцумян С.А. Разномодульная теория упругости. М.: Наука, 1982. 318 с.
- 24. *Hedberg C.M.*, *Rudenko O.V.* Collisions, mutual losses and annihilation of pulses in a modular nonlinear medium // Nonlinear Dynamics. 2017. Vol. 90, no. 3. Pp. 2083–2091. https://link.springer.com/article/10.1007
- 25. Rudenko O.V. Modular solitons // Doklady Mathematics. 2016. Vol. 94, no. 3. Pp. 708–711.
- 26. *Коробов А.И., Прохоров В.М.* Нелинейные акустические свойства алюминиевого сплава B95 и композита B95/наноалмаз // Акуст. Журн. 2016. Т. 62, № 6. С. 661–667. http://www.akzh.ru/pdf/2016_6_661-667.pdf
- 27. Korobov A.I., Kokshaiskii A.I., Prokhorov V.M., Evdokimov I.A., Perfilov S.A., Volkov A.D. Mechanical and nonlinear elastic characteristics of polycrystalline AMg_6 aluminum alloy and $n-AMg_6/C_{60}$ nanocomposite // Phys. of Solid State. 2016. Vol. 58, no. 12. Pp. 2472–2480.
- 28. *Грэй А.Л., Руденко О.В.* Интенсивная волна в дефектных средах, содержащих одновременно квадратичную и модульную нелинейности: Ударные волны, гармоники и неразрушающий контроль // Акуст. Журн. 2018. Т. 64, № 4. С. 521–527.
- 29. *Mikhailov S.G., Rudenko O.V.* A simple nonlinear element model // Acoust. Phys. 2017. Vol. 63, no. 3. Pp. 270–274. http://www.akzh.ru/pdf/2017_3_246-250.pdf
- 30. *Karabutov A.A.*, *Lapshin E.A.*, *Rudenko O.V.* Interaction between light waves and sound under acoustic nonlinearity conditions // J. Exp.Theor. Physics. 1976. Vol. 44, no. 1. Pp. 58–63.
- 31. *Rudenko O.V.* Wave excitation in a dissipative medium with a double quadratically-modular nonlinearity: A generalization of the inhomogeneous Burgers equation // Doklady Mathematics. 2018. Vol. 97, no. 3. Pp. 721–724.
- 32. *Sinai Ya.G.* Asymptotic behavior of solutions of 1D-Burgers equation with quasiperiodic forcing // Topol. Methods Nonlinear Anal. 1998. Vol. 11, no. 2. Pp. 219–226.
- 33. Kudryavtsev A. G., Sapozhnikov O. A. Determination of the exact solutions to the

- inhomogeneous Burgers equation with the use of the Darboux transformation // Acoust. Phys. 2011. Vol. 57, no. 3. Pp. 311–319. http://www.akzh.ru/pdf/2011 3 313-322.pdf
- 34. *Pasmanter R.A.* Stability and Backlund transform of the forced Burgers equation // J. Math. Phys. 1986. Vol. 29. Pp. 2744–2746.
- 35. *Rudenko O.V., Hedberg C.M.* Wave resonance in media with modular, quadratic and quadratically-cubic nonlinearities described by inhomogeneous Burgers-type equations // Acoust. Phys. 2018. Vol. 64, no. 5. Pp. 645–657.
- 36. *Карабутов А.А., Руденко О.В.* Модифицированный метод Хохлова для исследования нестационарных трансзвуковых течений сжимаемого газа // ДАН. 1979. Т. 248, № 5. С. 1082-1085.
- 37. *Rudenko O.V.* Nonlinear standing waves, resonant phenomena and frequency characteristics of distributed systems // Acoust. Phys. 2009. Vol. 55, no. 1. Pp. 27–54.
- 38. Гурбатов С.Н., Руденко О.В., Саичев А.И. Волны и структуры в нелинейных средах без дисперсии. М.: Физматлит, 2008. 496 с.
- 39. *Руденко О.В.* Гигантские нелинейности структурно-неоднородных сред и основы методов нелинейной акустической диагностики // УФН. 2006. Т. 176, № 1. С. 77–95. https://ufn.ru/ru/articles/2006/1/e/
- 40. Frish U., Bec J. In: New Trends in Turbulence. Pp. 341–384. Springer, Berlin, Heidelberg, 2001.
- 41. *Заболотская Е.А., Хохлов Р.В.* Квазиплоские волны в нелинейной акустике ограниченных пучков // Акуст. Журн. 1969. Т. 15, № 1. С. 40–47. http://www.akzh.ru/pdf/1969 1 40-47.pdf
- 42. *Бахвалов Н.С., Жилейкин Я.М., Заболотская Е.А.* Нелинейная теория звуковых пучков. М.: Наука, 1982. 174 с.
- 43. *Ostrovskii L.A., Sutin A.M.* Focusing of acoustic waves of finite amplitude // Sov. Phys. Doklady. 1975. Vol. 221, no. 6. Pp. 1300–1303.
- 44. *Руденко О.В., Хедберг К.М.* Дифракция интенсивного поля в фокальной области как динамика нелинейной системы с низкочастотной дисперсией // Акуст. Журн. 2015. Т. 61, № 1. С. 30–39. http://www.akzh.ru/pdf/2015 1 30-39.pdf
- 45. *Brunelli J.C.*, *Sakovich S.* Hamiltonian structures for the Ostrovsky–Vakhnenko equation // Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simulat. 2013. Vol. 18. Pp. 56–62.
- 46. *Ostrovsky L.A.* Nonlinear internal waves in a rotating ocean // Okeanologia. 1978. Vol. 18, no. 2. Pp. 181–191.
- 47. *Vakhnenko V.A.* Solitons in a nonlinear model medium // J. Phys. A. 1992. Vol. 25A. Pp. 4181–4187.
- 48. *Naugol'nykh K.A.*, *Romanenko E.V.* Amplification factor of a focusing system as a function of sound intensity // Sov. Phys. Acoustics. 1959. Vol. 5, no. 2. Pp. 191–195. http://www.akzh.ru/pdf/1959 2 191-195.pdf
- 49. *Bessonova O.V., Khokhlova V.A., Bailey M.R., Canney M.R., Crum L.A.* // Focusing of high power ultrasound beams and limiting values of shock wave parameters // Acoust. Phys. 2009. Vol. 55, no. 4–5. Pp. 463–473. http://www.akzh.ru/pdf/2009 4 445-456.pdf

- 50. Wu F., Wang Z.B., Chen W.Z., et al. Extracorporeal focused ultrasound surgery for treatment of human solid carcinomas: Early Chinese clinical experience // Ultrasound Med. Biol. 2004. Vol. 30, no. 2. Pp. 245–260.
- 51. *Васильева О.А., Лапшин Е.А., Руденко О.В.* Проекция уравнения Хохлова–Заболотской на ось волнового пучка как модель нелинейной дифракции // ДАН. 2017. Т. 477, № 3. С. 282–286.
- 52. *Ibragimov N.H.*, *Rudenko O.V.* Principle of an A Priori use of symmetries in the theory of nonlinear waves // Acoust. Phys. 2004. Vol. 50, no. 4. Pp. 406–419. http://www.akzh.ru/pdf/2004 4 481-495.pdf
- 53. *Rudenko O.V., Hedberg C.M.* A new equation and exact solutions describing focal fields in media with modular nonlinearity // Nonlinear Dynamics. 2017. Vol. 89, no. 3. Pp. 1905–1913. https://link.springer.com/content/pdf/10.1007
- 54. *Руденко О.В.* Одномерная модель типа Хохлова–Заболотской для волн в фокальной области кубичной и квадратично-кубичной нелинейных сред // ДАН. 2017. Т. 475, № 5. С. 503–507.
- 55. *Руденко О.В.* Нелинейные пилообразные волны // УФН. 1995. Т. 165, № 9. С. 1011–1036. https://ufn.ru/ru/articles/1995/9/b/
- 56. *Panasenko G.P., Lapshin E.A.* Homogenization of high frequency nonlinear acoustics equations // Applicable Analysis. 2013. Vol. 74, no. 3. Pp. 311–331.
- 57. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
- 58. Г.И. Броман, О.В.Руденко. Затопленная струя Ландау: Точные решения, их смысл и приложения // УФН. 2010. Т. 180, № 1. С. 97–104. https://ufn.ru/ru/articles/2010/1/f/
- 59. *Руденко О.В.* О сильно нелинейных волнах и волнах с сильно выраженной слабой нелинейностью. В кн.: «Нелинейные волны 2012» / Под ред. А.В. Гапонова-Грехова и В.И. Некоркина. С. 83–97. Нижний Новгород: Изд-во ИПФ РАН, 2013.
- 60. *Rudenko O.V., Solodov E.V.* Strongly nonlinear shear perturbations in discrete and continuous cubic nonlinear systems // Acoust. Phys. 2011. Vol. 57, no. 1. Pp. 51–58. http://www.akzh.ru/pdf/2011 1 56-64.pdf
- 61. *Nikitenkova S.P., Pelinovskii E.N.* Analysis of the Rudenko–Solodov equation in the theory of highly nonlinear shear vibrations // Acoust. Phys. 2014. Vol. 60, no. 3. Pp. 258–260. http://www.akzh.ru/pdf/2014 3 240-242.pdf
- 62. *Heisenberg W.* Zur Quantisierung nichtlinearer Gleichungen. Nachr. Acad. Wiss. Goettingen. IIa. 1953. Pp. 111–127.
- 63. *Rudenko O.V., Tsyuryupa S.N., Sarvazyan A.P.* Velocity and attenuation of shear waves in the phantom of a muscle–soft tissue matrix with embedded stretched fibers // Acoust. Phys. 2016. Vol. 62, no. 5. Pp. 608–614.
- 64. Sarvazyan A.P., Rudenko O.V. United States Patent: 5,810,731. Date of Patent: Sep. 22, 1998. Method and apparatus for elasticity imaging using remotely induced shear wave.
- 65. *Руденко О.В., Солуян С.И., Хохлов Р.В.* Проблемы теории нелинейной акустики // Акуст. Журн. 1974. Т. 20, № 3. С. 871–876. http://www.akzh.ru/pdf/1974 3 449-457.pdf

- 66. *Ibragimov N.H.*, *Meleshko S.V.*, *Rudenko O.V.* Group analysis of evolutionary integrodifferential equations describing nonlinear waves: the general model // J. Physics A. Vol. 44, no.315201.
- 67. *Полякова А.Л., Солуян С.И., Хохлов Р.В.* К вопросу о распространении конечных возмущений в релаксирующей среде // Акуст. Журн. 1962. Т. 8, № 1. С. 107–112. http://www.akzh.ru/pdf/1962 1 107-112.pdf
- 68. *Руденко О.В., Солуян С.И*. К вопросу о рассеянии звука на звуке // Акуст.Журн. 1972. Т. 18, № 3. С. 421–425. http://www.akzh.ru/pdf/1972 3 421-425.pdf
- 69. *Руденко О.В.* Нелинейные интегро-дифференциальные модели для интенсивных волн в средах типа биотканей и геоструктур со сложной внутренней динамикой релаксационного типа // Акуст. Журн. 2014. Т. 60, № 4. С. 368–375. http://www.akzh.ru/pdf/2014 4 368-375.pdf
- 70. *Руденко О.В.* Точные решения интегро-дифференциального уравнения с квадратично-кубичной нелинейностью // ДАН. 2016. Т. 469, № 1. С. 30–33.

References

- 1. Rabinovich M.I., Trubetskov D.I. Oscillations and Waves in Linear and Nonlinear Systems. New York: Springer, 1989.
- 2. Rudenko O.V. The 40th anniversary of the Khokhlov–Zabolotskaya equation. *Acoust. Phys.*, 2010, vol. 56, no. 4, pp. 457–466.
- 3. Rudenko O.V., Robsman V.A. Equation of nonlinear waves in a scattering medium. *Doklady-Physics.*, 2002, vol. 47, no. 6, pp. 443–446.
- 4. Gueguen Y., Palciauskas V. Introduction to the Physics of Rocks. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1994.
- 5. Hill C.R., Bamber J.C., Ter Haar G.R. (Eds.). Physical Principles of Medical Ultrasonics. John Wiley & Sons, 2004.
- 6. Boldea A.L. Generalized and potential symmetries of the Rudenko-Robsman equation. *Cent. Eur. J. Phys.*, 2010, vol. 6, no. 6, pp. 995–1000.
- 7. Averiyanov M.V., Basova M.S., Khokhlova V.A. Stationary and quasi-stationary waves in even-order dissipative systems. *Acoust. Phys.*, 2005, vol. 51, no. 5, pp. 495–501.
- 8. Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G., Shreiber I.R. Wave Dynamics of Gas- and Vapour-Liquid Media. New York: Begell House Publishers, 1992.
- 9. Rudenko O.V. Equation admitting linearization and describing waves in dissipative media with modular, quadratic, and quadratically cubic nonlinearities. *Doklady Mathematics*, 2016, vol. 94, no. 3, pp. 703–707.
- 10. Rudenko O.V. Nonlinear dynamics of quadratically cubic systems. *Physics-Uspekhi*, 2013, vol. 56, no. 7, pp. 683–690.
- 11. Rudenko O.V., Hedberg C.M. Quadratically cubic Burgers' equation as exactly solvable model of mathematical physics. *Doklady Mathematics*, 2015, vol. 91, no. 2, pp. 232–235.
- 12. Rudenko O.V., Hedberg C.M. The quadratically cubic Burgers equation: An exactly

- solvable nonlinear model for shocks, pulses and periodic waves. *Nonlinear Dynamics*, 2016, Vol. 85, no. 2, pp. 767–776.
- 13. Rudenko O.V., Gusev V.A. Self-similar solutions of a Burgers-type equation with quadratically cubic nonlinearity. *Doklady Mathematics*, 2016, vol. 93, no. 1, pp. 94–98.
- 14. Rudenko O.V., Soluyan S.I. Some nonstationary problems of the theory of finite amplitude waves in dissipative media. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1970, vol. 190, no. 4, pp. 815–818.
- 15. Polyanin A.D., Vyaz'min A.V., Zhurov A.I., Kazenin D.A. Handbook of Exact Solutions to Heat and Mass transfer Equations. Moscow: Faktorial, 1998 [in Russian].
- 16. Ingard U. Nonlinear distorsion of sound transmitted through an orifice. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1970, vol. 48, no. 1, pp. 32–33.
- 17. Idelchik I.E. Flow Resistance: A Design Guide for Engineers. New York: Hemisphere, 1989.
- 18. Rudenko O.V., Khirnykh K.L. Model of Helmholtz resonator for absorption of high-intensity sound. *Sov. Phys. Acoust.*, vol. 36, no. 3, pp. 527–534.
- 19. Korobov A.I., Izosimova M.Yu. Nonlinear Lamb waves in a metal plate with defects. *Acoust. Phys.*, 2006, vol. 52, no. 5, pp. 683–692.
- 20. Nazarov V.E., Kiyashko S.B., Radostin A.V. The wave processes in micro-inhomogeneous media with different-modulus nonlinearity and relaxation. *Radiophys. and Quant. Electr.*, 2016, vol. 59, no. 3, pp. 246–256.
- 21. Nazarov V., Radostin A. Nonlinear Acoustic Waves in Micro-Inhomogeneous Solids. John Wiley & Sons, 2015.
- 22. Radostin A.V., Nazarov V.E., Kiyashko S.B. Propagation of nonlinear acoustic waves in bimodular media with linear dissipation. *Wave Motion*, 2013, vol. 50, no. 2, pp. 191–196.
- 23. Ambartsumyan S.A. Elasticity Theory of Different Moduli. Beijing: China Rail. Publ. House, 1986.
- 24. Hedberg C.M., Rudenko O.V. Collisions, mutual losses and annihilation of pulses in a modular nonlinear medium. *Nonlinear Dynamics*, 2017, vol. 90, no. 3, pp. 2083–2091.
- 25. Rudenko O.V. Modular solitons. *Doklady Mathematics*, 2016, vol. 94, no. 3, pp. 708–711.
- 26. Korobov A.I., Prokhorov V.M. Nonlinear acoustic properties of the B95 aluminum alloy and the B95/nanodiamond composite. *Acoust. Phys.*, 2016, vol. 62, no. 6, pp. 661–667.
- 27. Korobov A.I., Kokshaiskii A.I., Prokhorov V.M., Evdokimov I.A., Perfilov S.A., Volkov A.D. Mechanical and nonlinear elastic characteristics of polycrystalline aluminum alloy and nanocomposite. *Phys.of Solid State*, 2016, vol. 58, no. 12, pp. 2472–2480.
- 28. Gray A.L., Rudenko O.V. High-intensity wave in defected media containing both quadratic and modular nonlinearities: Shocks, harmonics and nondestructive testing. *Acoust. Phys.*, 2018, vol. 64, no. 4, pp. 402–407.

- 29. Mikhailov S.G., Rudenko O.V. A Simple nonlinear element model. *Acoust. Phys.*, 2017, vol. 63, no. 3, pp. 270–274.
- 30. Karabutov A.A., Lapshin E.A., Rudenko O.V. Interaction between light waves and sound under acoustic nonlinearity conditions. *J. Exp. Theor. Physics*, 1976, vol. 44, no. 1, pp. 58–63.
- 31. Rudenko O.V. Wave excitation in a dissipative medium with a double quadratically-modular nonlinearity: A generalization of the inhomogeneous Burgers equation. *Doklady Mathematics*, 2018, vol. 97, no. 3, pp. 721–724.
- 32. Sinai Ya.G. Asymptotic behavior of solutions of 1D-Burgers equation with quasiperiodic forcing. *Topol. Methods Nonlinear Anal.*, 1998, vol. 11, no. 2, pp. 219–226.
- 33. Kudryavtsev A. G., Sapozhnikov O. A. Determination of the exact solutions to the inhomogeneous Burgers equation with the use of the Darboux transformation. *Acoust. Phys.*, 2011, vol. 57, no. 3, pp. 311–319.
- 34. Pasmanter R.A. Stability and Backlund transform of the forced Burgers equation. *J. Math. Phys.*, 1986, vol. 29, pp. 2744–2746.
- 35. Rudenko O.V., Hedberg C.M. Wave resonance in media with modular, quadratic and quadratically-Cubic nonlinearities described by inhomogeneous Burgers-type equations. *Acoust. Phys.*, 2018, vol. 64, no. 4, pp. 422–431.
- 36. Karabutov A.A., Rudenko O.V. Modified Khokhlov's method for nonstationary trans-sonic flows of compressible gas. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1979, vol. 248, no. 5, pp. 1092–1085.
- 37. Rudenko O.V. Nonlinear standing waves, resonant phenomena and frequency characteristics of distributed systems. *Acoust. Phys.*, 2009, vol. 55, no. 1, pp. 27–54.
- 38. Gurbatov S.N., Rudenko O.V., Saichev A.I. Waves and Structures in Nonlinear Nondispersive Media. Berlin and Beijing: Springer and Higher Education Press, 2011
- 39. Rudenko O.V. Giant nonlinearities in structurally inhomogeneous media and the fundamentals of nonlinear acoustic diagnostic techniques. *Physics Uspekhi*, 2006, vol. 49, no. 1, pp. 69–87.
- 40. Frish U., Bec J. In: New Trends in Turbulence. Pp. 341–384. Berlin, Heidelberg, Springer, 2001.
- 41. Zabolotskaya E.A., Khokhlov R.V. Quasi-plane waves in the nonlinear acoustics of confined beams. *Sov. Phys. Acoust.*, 1969, vol. 15, no. 1, pp. 35–40.
- 42. Bakhvalov N. S., Zhileikin Ya. M., Zabolotskaya E.A. Nonlinear Theory of Sound Beams. New York: AIP, 1987.
- 43. Ostrovskii L.A., Sutin A.M. Focusing of acoustic waves of finite amplitude. *Sov. Phys. Doklady*, 1975, vol. 221, no. 6, pp. 1300–1303.
- 44. Rudenko O.V., Hedberg C.M. Diffraction of high-intensity field in focal region as dynamics of nonlinear system with low-frequency dispersion. *Acoust. Phys.*, 2015, vol. 61, no. 1, pp. 28–36.
- 45. Brunelli J.C., Sakovich S. Hamiltonian structures for the Ostrovsky-Vakhnenko equation. *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simulat.*, 2013, vol. 18, pp. 56–62.

- 46. Ostrovsky L.A. Nonlinear internal waves in a rotating ocean. *Okeanologia*, 1978, vol. 18, no. 2, pp. 181–191.
- 47. Vakhnenko V.A. Solitons in a nonlinear model medium. *J. Phys. A*, 1992, vol. 25A, pp. 4181–4187.
- 48. Naugol'nykh K.A., Romanenko E.V. Amplification factor of a focusing system as a function of sound intensity. *Sov. Phys. Acoustics*, 1959, vol. 5, no. 2, pp. 191–195.
- 49. Bessonova O.V., Khokhlova V.A., Bailey M.R., Canney M.R., Crum L.A. Focusing of high power ultrasound beams and limiting values of shock wave parameters. *Acoust. Phys.*, 2009, vol. 55, no. 4–5, pp. 463–473.
- 50. Wu F., Wang Z.B., Chen W.Z., et al. Extracorporeal focused ultrasound surgery for treatment of human solid carcinomas: Early Chinese clinical experience. *Ultrasound Med. Biol.*, 2004, vol. 30, no. 2, pp. 245-260.
- 51. Vasiljeva O.A., Lapshin E.A., Rudenko O.V. Projection of the Khokhlov–Zabolotskaya equation on the axis of wave beam as a model of nonlinear diffraction. *Doklady Mathematics*, 2017, vol. 96, no. 3, pp. 646–649.
- 52. Ibragimov N.H., Rudenko O.V. Principle of an A Priori use of symmetries in the theory of nonlinear waves. *Acoust. Phys.*, 2004, vol. 50, no. 4, pp. 406-419.
- 53. Rudenko O.V., Hedberg C.M. A new equation and exact solutions describing focal fields in media with modular nonlinearity. *Nonlinear Dynamics*, 2017, vol. 89, no. 3, pp. 1905–1913.
- 54. Rudenko O.V. One-dimensional model of KZ-type equations for waves in the focal region of cubic and quadratically-cubic nonlinear media. *Doklady Mathematics*, 2017, vol. 96, no. 1, pp. 399–402.
- 55. Rudenko O.V. Nonlinear sawtooth-shaped waves. *Physics Uspekhi*, 1995, vol. 38, no. 9, pp. 91-98.
- 56. Panasenko G.P., Lapshin E.A. Homogenization of high frequency nonlinear acousticts equations. *Applicable Analysis*, 2013, vol. 74, no. 3, pp. 311–331.
- 57. Landau L.D., Lifschitz E.M. Fluid Mechanics. New York: Pergamon Press, 1987.
- 58. Broman G.I., Rudenko O.V. Submerged Landau jet: Exact solutions, their meaning and application. *Physics Uspekhi*, 2010, vol. 53, no. 1, pp. 91–98.
- 59. Rudenko O.V. On strongly nonlinear waves and waves with strongly displayed weak nonlinearity. In: Nonlinear Waves 2012 / Ed. A.V. Gaponov-Grekhov and V.I. Nekorkin, pp. 83–97. Nizhny Novgorod: IAP RAS publishing House, 2013.
- 60. Rudenko O.V., Solodov E.V. Strongly nonlinear shear perturbations in discrete and continuous cubic nonlinear systems. *Acoust. Phys.*, 2011, vol. 57, no. 1, pp. 51–58.
- 61. Nikitenkova S.P., Pelinovskii E.N. Analysis of the Rudenko–Solodov equation in the theory of highly nonlinear shear vibrations. *Acoust. Phys.*, 2014, vol. 60, no. 3, pp. 258–260.
- 62. Heisenberg W. Zur Quantisierung nichtlinearer Gleichungen. Nachr. Acad. Wiss. Goettingen. IIa., 1953, pp. 111–127.
- 63. Rudenko O.V., Tsyuryupa S.N., Sarvazyan A.P. Velocity and attenuation of shear waves in the phantom of a muscle-soft tissue matrix with embedded stretched fibers. *Acoust. Phys.*, 2016, vol. 62, no. 5, pp. 608–614.

- 64. Sarvazyan A.P., Rudenko O.V. United States Patent: 5, 810, 731. Date of Patent: Sep. 22, 1998. Method and apparatus for elasticity imaging using remotely induced shear wave.
- 65. Rudenko O.V., Soluyan S.I., Khokhlov R.V. Problems of the theory of nonlinear acoustics. *Sov. Phys. Acoust.*, vol. 20, no. 4, pp. 356–359.
- 66. Ibragimov N.H., Meleshko S.V., Rudenko O.V. Group analysis of evolutionary integro-differential equations describing nonlinear waves: The general model. *J. Physics A*, vol. 44, no. 315201.
- 67. Polyakova A.L., Soluyan S.I., Khokhlov R.V. Propagation of finite disturbances in a relaxing medium. *Sov. Phys. Acoustics*, 1962, vol. 8, no. 1, pp. 78–82.
- 68. Rudenko O.V., Soluyan S.I. The scattering of sound by sound. *Sov. Phys. Acoustics*, 1973, vol. 18, no. 3, pp. 352–355.
- 69. Rudenko O.V. Nonlinear integro-differential models for intense waves in Media Like Biological Tissues and Geostructures with Complex Internal relaxation-type dynamics. *Acoust. Phys.*, 2014, vol. 60, no. 4, pp. 398–404.
- 70. Rudenko O.V. Exact solutions of an integro-differential equation with quadratically cubic nonlinearity. *Doklady Mathematics*, 2016, vol. 94, no. 1, pp. 468–471.

Руденко Олег Владимирович родился в Тбилиси (1947), Грузинская ССР, окончил физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова (1971). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1972, МГУ) и доктора физико-математических наук (1981, МГУ) в области теории волн, нелинейной акустики и ее приложений. Автор около 15 книг, среди них монографии: «Theoretical Foundations of Nonlinear Acoustics» (NY: Plenum, 1977; co-author S.I. Soluyan), «Nonlinear Underwater Acoustics» (NY: Am. Inst. Phys., 1987; co-authors B.K. Novikov and V.I. Timoshenko), «Waves and Structures in Nonlinear Nondispersive Media» (NY: Springer, 2011; Beijing: Higher Education Press, 2011; co-authors S.N. Gurbatov and A.I. Saichev), a также учебные пособия: «Теория волн», 3-е Изд. (М.: Ленанд, 2015; в соавторстве с М.Б. Виноградовой и А.П. Сухоруковым), «Nonlinear Acoustics through Problems and Examples» (Victoria, BC: Trafford, 2010; co-authors S.N.Gurbatov and С.М. Hedberg). Опубликовал около 500 журнальных статей по физике, математике, механике, геофизике, ультразвуковой медицинской и гидроакустической технике. Лауреат Государственных премий СССР и РФ, академик РАН. Главный редактор «Акустического Журнала», заместитель Главного редактора журнала «Успехи Физических Наук».



Россия, 119991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова 38 Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН Россия, 123242 Москва, Б. Грузинская ул. 10, стр. 1 Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН Blekinge Institute of Technology, Karlskrona, Sweden E-mail: rudenko@acs366.phys.msu.ru



УДК 517.9:537.86:621.373

ПРОСТЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ХАОСА И ИХ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

С. П. Кузнецов

Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, 38 E-mail: spkuz@yandex.ru
Поступила в редакцию 29.03.2018

Тема и цель исследования. Цель работы состоит в проведении обзора описанных в литературе и оригинальных схем генераторов хаоса. Для наглядности сопоставления различных устройств описание дается в едином стиле, опираясь на схемотехническое моделирование с использованием пакета NI Multisim. Исследуемые модели. Рассматривается несколько несложных по конструкции электронных генераторов хаоса, в том числе: генератор Колпитца; генератор Хартли; RC-генератор хаоса; варианты схемы Чуа; конструкции, предложенные литовской группой; аналоговый осциллятор Лоренца; генераторы гиперболического хаоса с передачей возбуждения между попеременно возбуждающимися элементами, а также кольцевой генератор с запаздыванием. Результаты. Представлены схемы электронных устройств - генераторов хаоса, обсуждены принципы их функционирования и проведено схемотехническое моделирование. Для всех рассмотренных систем хаотическая динамика иллюстрируется осциллограммами сигналов, фазовыми портретами аттракторов, спектрами колебаний. Специально отмечены генераторы робастного хаоса - электронный аналог модели Лоренца и схемы с гиперболическими аттракторами Смейла-Вильямса, которые представляются предпочтительными для возможных приложений в силу малой чувствительности характеристик хаоса к вариации параметров, несовершенствам изготовления, помехам и т.д. Обсуждение. Приведенные схемы отвечают низкочастотным устройствам, но некоторые из них могут быть полезны в плане разработки генераторов хаоса также на высоких и сверхвысоких частотах. Представленный материал может представлять интерес для постановки лабораторных и компьютерных практикумов, ориентированных на подготовку специалистов в области радиофизики и нелинейной динамики, а также для исследователей, заинтересованных в конструировании генераторов хаоса и их практическом использовании.

Ключевые слова: динамическая система, хаос, аттрактор, генератор хаоса, схемотехническое моделирование.

DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-3-35-61

Образец цитирования: Кузнецов С.П. Простые электронные генераторы хаоса и их схемотехническое моделирование // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2018. Т. 26, № 3. С. 35–61. DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-3-35-61

SIMPLE ELECTRONIC CHAOS GENERATORS AND THEIR CIRCUIT SIMULATION

S. P. Kuznetsov

Kotelnikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of RAS, Saratov Branch 38, Zelenaya, 410019 Saratov, Russia E-mail: spkuz@yandex.ru

Received 29.03.2018

Topic and aim. The aim of the work is to review circuits of chaos generators, those described in the literature and some original ones, in a unified style basing on circuit simulations with the NI Multisim package, which makes the comparison of the various devices apparent. Investigated models. A number of electronic chaos generators are considered including the Kolpitz oscillator, the Hartley oscillator, the RC chaos generator, variants of Chua circuit, the designs proposed by the Lithuanian group, Lorenz analog oscillator, generators of hyperbolic chaos with excitation transfer between alternately excited oscillators, as well as a ring generator with delayed feedback. Results. The circuit diagrams of chaos generators are presented, the principles of their operation are discussed, and circuit simulations are carried out using the NI Multisim package. For all considered systems the chaotic dynamics are illustrated consistently by waveforms of the signals, phase portraits of the attractors, spectra of the oscillations. Specially outlined are generators of robust chaos including the electronic analog of the Lorenz model and the circuits with Smale-Williams hyperbolic attractors, which seem preferable for possible applications due to low sensitivity of the chaos characteristics to parameter variations, manufacturing imperfections, interferences, etc. Discussion. The circuits collected in the paper correspond to low-frequency devices, but some of them may be useful in development of chaos generators also at high and ultrahigh frequencies. The material presented may be of interest for setting up laboratory and computer practical courses aimed at training specialists in the field of electronics and nonlinear dynamics, as well as for researchers interested in constructing chaos generators and their practical applications.

Key words: dynamic system, chaos, attractor, chaos generator, circuit simulation.

DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-3-35-61

References: Kuznetsov S.P. Simple electronic chaos generators and their circuit simulation. *Izvestiya VUZ, Applied Nonlinear Dynamics*, 2018, vol. 26, no. 3, pp. 35–61. DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-3-35-61

Введение

Исследование сложной динамики и хаоса в электронных системах – одно из главных направлений научной школы, созданной Д.И. Трубецковым. Во многом благодаря исследованиям именно этой школы, электроника сверхвысоких частот сыграла роль одной из определяющих составных частей сформировавшегося междисциплинарного направления, имеющего содержанием сложную динамику нелинейных систем различной природы, со своей методологией, инструментарием аналитических, численных и экспериментальных исследований, коллекцией обобщающих и частных моделей [1–4].

К настоящему времени имеется обширная литература, посвященная различным вариантам построения электронных генераторов хаоса, представляющих интерес в таких областях как информационно-коммуникационные системы [5, 6], систе-

мы радиопротиводействия [7] и шумовой локации [8], генерация случайных чисел [9, 10], криптографические приложения [11].

Цель предлагаемого обзора – представить с единых позиций определенную коллекцию схем генераторов хаоса с воспроизведением их функционирования с помощью программного пакета NI Multisim, представляющего собой удобное и популярное современное средство схемотехнического моделирования [12]. Работая с программой, пользователь составляет и изображает графически на экране компьютера электронную схему, следуя стандартным обозначениям, принятым в радиотехнике и электронике. Радиодетали берутся из имеющейся в распоряжении библиотеки электронных компонентов, содержащей резисторы, конденсаторы, индуктивности, диоды и транзисторы, а также элементы аналоговой техники – операционные усилители, умножители. Предусмотрено использование обширного набора виртуальных приборов, в том числе генераторы сигналов, осциллографы, анализатор спектра. Обращение с ними приближено к работе с реальными приборами в лаборатории: подключив виртуальный прибор к соответствующей точке схемы, можно получить информацию о характеристиках процессов, протекающих при функционировании схемы.

Рассматриваемые здесь конкретные схемы отвечают низкочастотным устройствам, но некоторые из них могут представлять интерес (при соответствующей модификации) также в плане реализации генераторов хаоса высоких и сверхвысоких частот.

Стоит подчеркнуть, что хаотическую динамику, имеющую место в тех или иных системах, далеко не во всех случаях можно отнести к ситуациям «настоящего» или, как говорят, робастного хаоса [13, 14], который характеризовался бы незначительной чувствительностью по отношению к разбросу параметров элементов, несовершенству изготовления и прочим мешающим факторам. К этой категории принадлежат, в первую очередь, системы с гиперболическими аттракторами (соленоид Смейла-Вильямса, аттрактор Плыкина), но они до не давнего времени были представлены только математическими конструкциями, а их физическая реализация, в том числе в виде электронных схем, требует специальных усилий [14]. Другой класс систем с робастным хаосом - это системы с так называемыми псевдогиперболическими аттракторами [15]. Хорошо известный и изученный представитель - это аттрактор Лоренца [16-18]. В более широком плане вопрос о реализуемости псевдогиперболических аттракторов в физических системах до сих пор не проработан в достаточной мере. В подавляющем большинстве случаев при рассмотрении схем генераторов хаоса приходится сталкиваться с ситуацией квазиаттрактора [19], когла с хаотическими траекториями в фазовом пространстве системы сосуществуют притягивающие периодические орбиты или же они появляются при сколь угодно малой вариации параметров. В пространстве параметров это проявляется в наличии неустранимых «окон периодичности», пронизывающих область хаоса, что, очевидно, нежелательно с точки зрения любых мыслимых приложений хаоса. С практической точки зрения, ситуация несколько облегчается тем, что «окна периодичности» нивелируются присутствующими в системе естественными шумами, так что в определенных случаях отличие квазиаттрактора от «настоящего» хаотического аттрактора незаметно.

1. Генератор Колпитца

Генератор Колпитца («емкостная трехточка») – электронная схема, особенностью которой является то обстоятельство, что сигнал в цепь обратной связи поступает с делителя напряжения на конденсаторах. Это удобное в реализации и часто используемое электронное устройство для генерации синусоидальных колебаний на радиочастотах. В 1990-е годы было установлено, что в определенной области параметров транзисторный генератор Колпитца демонстрирует хаотическое поведение, ассоциирующееся с присутствием странного аттрактора в фазовом пространстве. В сравнении с другими описанными в литературе электронными генераторами хаоса, генератор Колпитца имеет некоторые привлекательные особенности. Схема достаточно проста и без труда реализуется в разных частотных диапазонах от единиц герц до микроволновой области, так что генератор Колпитца рассматривается как один из наиболее подходящих элементов для коммуникации на основе хаоса [6].

На рис. 1, a показана составленная в среде Multisim схема, воспроизводящая систему из работы [20], где для описания динамики предложены уравнения

$$C_1\dot{V} = I - I_C, \quad C_2\dot{U} = -R_2^{-1}(V - E) - I - I_B, \quad L\dot{I} = E - V + U - IR_1.$$
 (1)

Здесь V и U — напряжения на конденсаторах C1 и C2; I — ток через индуктивность L; E — напряжение батарей V1 и V2. Токи коллектора и базы транзистора Q1, обозначенные I_C и I_B , выражаются следующим образом в соответствии с принятой моделью транзистора:

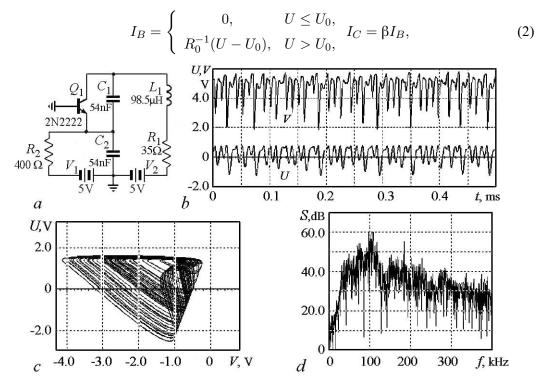


Рис. 1. Схема генератора хаоса Колпитца из [20] (a) и результаты моделирования в среде Multisim (b)–(d)

Fig. 1. Circuit diagram of the Kolpitz chaos generator from [20] (a) and simulation results in Multisim (b)–(d)

где U_0 пороговое напряжение (примерно 0.75 V), R_0 – малосигнальное сопротивление перехода база—эмиттер, β – параметр усиления. (В работе [20] принято $U_0=0.75$ V, $R_0=100$ Ом, $\beta=200$.)

На рис. 1, b показаны зависимости от времени напряжений на конденсаторах С1 и С2, V и U, соответственно, скопированные с виртуального осциллографа при моделировании схемы в среде Multisim. На рис. 1, c показан портрет аттрактора в проекции на плоскость этих двух переменных. На рис. 1, d приводится спектр сигнала, отвечающего напряжению V. Можно видеть, что схема функционирует как генератор хаоса: реализации демонстрируют явно непериодический процесс, аттрактор выглядит как характерный портрет странного аттрактора («клубок ниток»), спектр сплошной – не содержит выраженных дискретных составляющих.

2. Генератор Хартли

Генератор Хартли («индуктивная трёхточка») — одна из классических схем электронных генераторов, отличающаяся тем, что положительная обратная связь осуществляется через отвод от части катушки индуктивности параллельного LC-контура. Как и в случае генератора Колпитца, традиционное использование схемы — генерация синусоидальных колебаний. Однако в 1990-е годы было показано, что в определенной области параметров имеет место хаос, ассоциирующийся с присутствием странного аттрактора.

На рис. 2, a показана составленная в среде Multisim схема, воспроизводящая систему, описанную в работе [21], где для описания ее динамики предложены уравнения

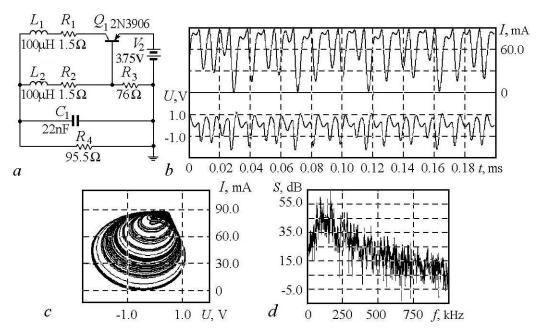


Рис. 2. Схема генератора хаоса Хартли из [21] (a) и результаты моделирования в среде Multisim (b)–(d) Fig. 2. Circuit diagram of the Hartley chaos generator from [21] (a) and simulation results in Multisim (b)–(d)

$$C_1\dot{V} = I_1 - I_2 - VR_4^{-1}, \quad L_1\dot{I}_1 = E - V_{EC} - V - I_1R_1, \quad L_2\dot{I}_2 = V - I_2R_2 - (I_2 - I_B)R_3.$$
 (3)

Здесь V – напряжение на конденсаторе C1; I_1 и I_2 – токи через индуктивности L1 и L2; E – напряжение батареи V. Ток базы и напряжение эмиттер–коллектор транзистора Q1, выражаются следующим образом в соответствии с принятой моделью транзистора:

$$I_{B} = \begin{cases} 0, & V_{EB} \leq U_{0}, \\ R_{0}^{-1}(V_{EB} - U_{0}), & V_{EB} > U_{0}, \end{cases} \quad V_{EC} = \begin{cases} k(V_{EB} - U_{0}), & V_{EB} > U_{0}, \\ V_{EC0}, & V_{EB} < U_{0}, \end{cases}$$
(4)

где U_0, R_0, k параметры транзистора. (В работе [21] приняты параметры $U_0=0.75$ V, $R_0=100~\Omega,\,k=900$.)

На рис. 2, b показаны зависимости напряжения U на индуктивности L2 и тока через нее от времени, полученные при моделировании схемы в среде Multisim. На рис. 2, c показан портрет аттрактора в проекции на плоскость этих двух переменных. На рис. 2, d приводится спектр сигнала, отвечающего напряжению U. Можно видеть, что схема функционирует как генератор хаоса: реализации демонстрируют явно непериодический процесс, спектр сплошной – не содержит выраженных дискретных составляющих.

3. Простой RC-генератор хаоса на двух транзисторах

В работе [22] предложена схема RC-генератора хаотических автоколебаний, в которой используется два транзистора, нет катушек индуктивности, и питание осуществляется от единственного источника. Как полагают авторы, это привлекательный и недорогой источник хаотических колебаний для возможных приложений. Схема получила широкую известность благодаря тому, что была представлена и популяризована в сети Интернет («Постройте генератор хаоса за 5 минут»: http://www.instructables.com/id/A-Simple-Chaos-Generator/). Схема приводится на рис. 3, а.

Приняв $C=C_1=C_2=C_3$, можно записать уравнения, описывающие динамику, в виде

$$RC\frac{dU_1}{dt} = -U_1\left(1 + \frac{R}{R_1} - \frac{RR_3}{R_1(2R_3 + R_1)}\right) + U_2 + \frac{RR_3}{2R_3 + R_1}\left(\frac{E}{R_1} - i_{C1} + \frac{v_{BE2}}{R_3}\right), (5)$$

$$RC\frac{dU_2}{dt} = -2U_2 + U_1 + v_{BE1} - i_{C2}R, (6)$$

$$RC\frac{dv_{BE1}}{dt} = -v_{BE1} + U_2 - i_{B1}R, (7)$$

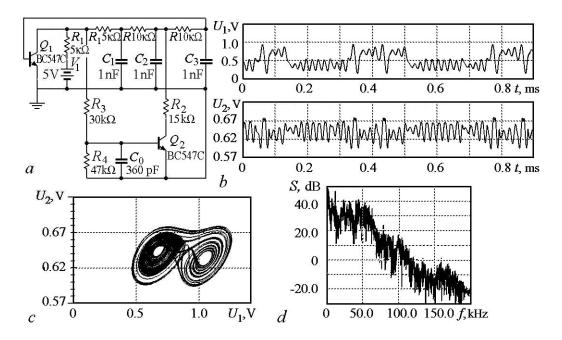


Рис. 3. Схема генератора хаоса из работы [22] (a) и результаты моделирования в среде Multisim (b)–(d) Fig. 3. The scheme of the chaos generator from [22] (a) and the results of modeling in Multisim (b)–(d)

$$(2R_3+R_1)C_0\frac{dv_{BE2}}{dt} = -v_{BE2}\frac{R_1+2R_3+2R_4}{R_4} + U_1 + E - i_{C1}R_1 - i_{B2}(R_1+2R_3), (8)$$

где $U_{1,2}$ – напряжения на конденсаторах C1, C2; токи $i_{B1}, i_{B2}, i_{C1}, i_{C2}$ определяются моделью транзистора, как функции напряжений база–эмиттер и коллектор–эмиттер $v_{BE1}, v_{BE2}, v_{CE1}, v_{CE2}$.

На рис. 3, b показаны осциллограммы напряжений $U_{1,2}$, полученные при моделировании схемы в среде Multisim. На рис. 3, c показан портрет аттрактора в проекции на плоскость этих двух переменных. На рис. 3, d приводится спектр сигнала, отвечающего напряжению U_1 .

4. Схема Чуа

Одной из первых конструкций электронной системы с хаотической динамикой была схема Чуа, изначальной мотивацией построения которой было намерение реализовать электронный аналог системы Лоренца [23]. В дальнейшем эта система была подвергнута всестороннему теоретическому и экспериментальному исследованию и на сегодняшний день является в нелинейной динамике одной из наиболее хорошо исследованных моделей.

Схема содержит индуктивность L, резистор R, два конденсатора C1 и C2 и специальный элемент с кусочно-линейной вольтамперной характеристикой – «диод Чуа». Один из конкретных вариантов схемы показан на рис. 4, *a* [24]. «Диод Чуа» в данном случае представляет собой блок, обозначенный на схеме пунктирным прямоугольником, и реализован на операционных усилителях OA1, OA2.

Записывая уравнения Кирхгофа и переходя к безразмерным переменным, можно получить для схемы Чуа следующую систему уравнений:

$$\dot{x} = \alpha \left(y - h(x) \right), \quad \dot{y} = x + y - z, \quad \dot{z} = -\beta y, \tag{9}$$

где переменные $x,\ y,\ z$ пропорциональны, соответственно, напряжению на нелинейном элементе, напряжению на индуктивности и току через индуктивность, $\alpha = C_1C_2^{-1}$ и $\beta = R^2C_1L^{-1}$, а функция h(x) определяется характеристикой нелинейного элемента и для рассматриваемого конкретного случая показана на рис. 4, b.

На рис. 5, a показаны осциллограммы напряжений на конденсаторах C1 и C2, соответственно. Результаты для V и U, полученные при моделировании схемы в среде Multisim. На рис. 5, b показан портрет аттрактора в проекции на плоскость этих двух переменных. На рис. 5, c приводится спектр сигнала, отвечающего напряжению V. Можно видеть, что схема функционирует как генератор хаоса: реализации демонстрируют явно непериодический процесс. Спектр, очевидно, сплошной и не содержит выраженных дискретных составляющих.

На рис. 6 показан другой вариант схемы генератора хаоса [25], использующего диод Чуа, где индуктивность заменена элементом на основе моста Вина, содержащим операционный усилитель ОАЗ. На рис. 7 представлены результаты моделирования динамики схемы в среде Multisim.

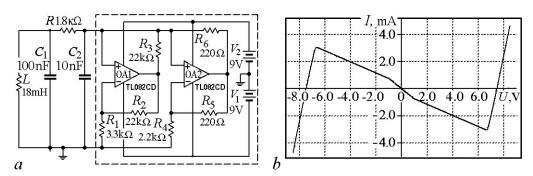


Рис. 4. Схема Чуа из работы [24] (a), реализованная в среде Multisim, и вольт–амперная характеристика диода Чуа (b), представляющего собой блок, выделенный на схеме пунктирным контуром

Fig. 4. Chua circuit from [24] (a) implemented in Multisim and the current-voltage characteristic of the Chua diode (b), which is a block marked in the circuit diagram with a dotted contour

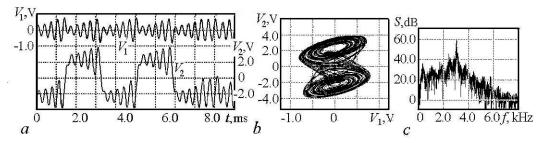


Рис. 5. Результаты моделирования динамики схемы, показанной на рис. 3: осциллограммы напряжений на конденсаторах C1 и C2 (a); портрет аттрактора в проекции на плоскость этих переменных (b); спектр сигнала, отвечающего напряжению на конденсаторе C1 (c)

Fig. 5. Results of simulating the dynamics of the circuit of Fig. 3: waveforms of voltages on the capacitors C1 and C2 (a); portrait of the attractor in projection onto the plane of these variables (b); spectrum of the signal corresponding to voltage on the capacitor C1 (c)

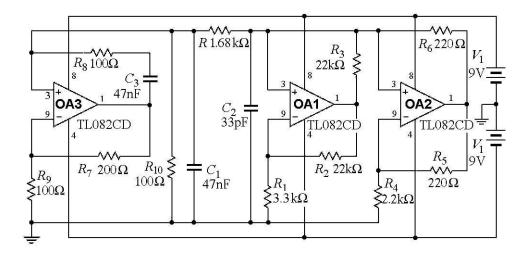


Рис. 6. Схема генератора хаоса, использующего мост Вина и диод Чуа [25]

Fig. 6. Circuit diagram of the chaos generator using the Wien bridge and the Chua diode [25]

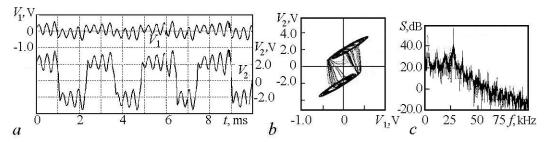


Рис. 7. Результаты моделирования динамики схемы, показанной на рис. 4: осциллограммы напряжений на конденсаторах C1 и C2 (a); портрет аттрактора в проекции на плоскость этих переменных (b); спектр сигнала, отвечающего напряжению на конденсаторе C1 (c)

Fig. 7. Results of simulating dynamics of the circuit shown in Fig. 4: waveforms of voltages on the capacitors C1 and C2 (a); portrait of the attractor in projection onto the plane of these variables (b), and spectrum of the signal corresponding to voltage on the capacitor C1 (c)

5. Генераторы, предложенные литовской группой

Несколько интересных схем генераторов хаоса на операционных усилителях были предложены группой исследователей из Института физики полупроводников в Вильнюсе.

В статье [26] авторы предлагают способ создания автономных хаотических генераторов хаоса на основе простой схемы третьего порядка (рис. 8), постулируя, что для этого достаточно в стандартный генератор синусоидальных колебаний добавить дополнительный элемент накопления энергии (например, индуктивность или емкость) и подходящий нелинейный элемент (например, диод).

Схема включает в себя неинвертирующий усилитель OA1 и резонансную последовательную цепь LCR с положительной обратной связью. Кроме того, в схему добавлен конденсатор C2 и диод D.

Уравнения, описывающие динамику системы, имеют вид

$$C\dot{V} = I, \quad L\dot{I} = (k-1)RI - V - W, \quad C_2 W = E/R_0 + I - I_D.$$
 (10)

Здесь V и W напряжения на конденсаторах C и C2, соответственно; I — ток через индуктивность; I_D — ток через диод, выражающийся через напряжение на диоде V_D соотношением

$$I_D = I_S(\exp(eV_D/k_BT) - 1) \tag{11}$$

где I_S , e, k_B , T – константы. С использованием безразмерных величин

$$x = eV/k_BT, \quad y = \sqrt{L/C}eI/k_BT, \quad z = eW/k_BT,$$

$$\tau = t/\sqrt{LC}, \quad a = (k-1)R\sqrt{C/L}, \quad b = \sqrt{L/C}eE/(k_BTR_0),$$

$$c = eI_S\sqrt{L/C}/(k_BT), \quad \varepsilon = C_2/C$$
(12)

уравнения принимают вид

$$\dot{x} = y, \quad \dot{y} = ay - x - z, \quad \varepsilon \dot{z} = b + y - c(e^z - 1).$$
 (13)

На рис. 8, b–d представлены результаты моделирования схемы в среде Multisim, подтверждающие хаотическую природу возникающих в ней автоколебаний. На рис. 8, b показаны зависимости напряжения U и тока I через индуктивность L, а на рис. 8, c портрет аттрактора в проекции на плоскость этих двух переменных. На рис. 8, d приводится спектр сигнала, отвечающего напряжению U.

В работе [27] предложена схема RC-генератора хаоса на операционных усилителях, показанная на рис. 9, a. В предположении, что $R_1 = R_2 = R_3 + R_4 = R$,

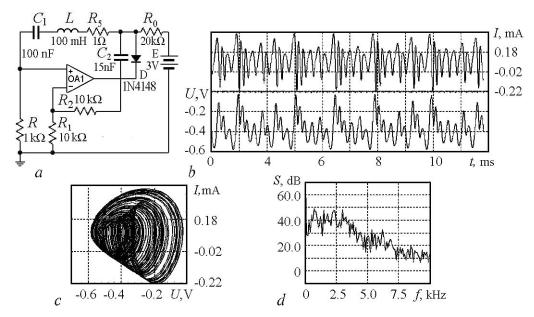


Рис. 8. Схема генератора хаоса из работы [26] (a) и результаты моделирования в среде Multisim (b)–(d) Fig. 8. Circuit diagram the chaos generator from [26] (a) and results of simulating in Multisim (b)–(d)

 $C_{1,2,3} = C$, с использованием обозначений

$$x = U/U_*, \quad y = V/U_*, \quad z = W/U_*, \quad U_* = U_0/(k_2 - 1),$$

 $\tau = t/RC, \quad \alpha = R/R_6, \quad \beta = R/R_8,$
(14)

где U, V, W напряжения на конденсаторах C1, C2, C3, k_1 , k_2 – коэффициенты усиления элементов на операционных усилителях OA1 и OA2, уравнения принимают вил

$$\dot{x} = -x + (k_1 - 1)(y - z),
\dot{y} = -x + (k_1 - 1)y - (k_1 - 1)z,
\dot{z} = k_1 y - (k_1 + \alpha)z + \beta(z - 1)H(z - 1),$$
(15)

где H – функция Хевисайда.

На рис. 9, b–d представлены результаты моделирования схемы в среде Multisim. На рис. 9, b показаны осциллограммы напряжений на выходе операционных усилителей, а на рис. 9, c портрет аттрактора в проекции на плоскость этих двух переменных. На рис. 9, d приводится спектр сигнала, отвечающего напряжению на выходе усилителя OA1.

В работе [28] предложен автономный генератор хаотических сигналов, построенный на основе модификации неавтономной системы (осциллятора Дуффинга—Холмса с периодическим внешним воздействием). Система описывается уравнениями

$$\dot{x} = y, \quad \dot{y} = x - x^3 + by - kz, \quad \dot{z} = \omega(y - z).$$
 (16)

Вместо внешнего воздействия введена дополнительная переменная z и добавлено уравнение для нее. Схема, реализующая динамику данной модели, показана на рис. 10, a.

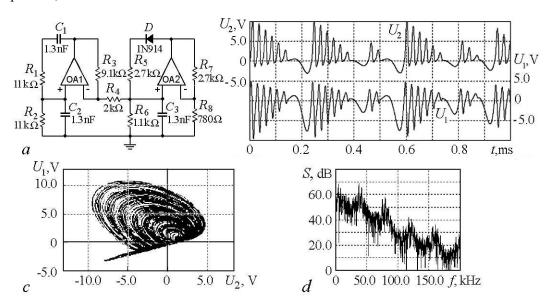


Рис. 9. Схема генератора хаоса из работы [27] (a) и результаты моделирования в среде Multisim (b)–(d) Fig. 9. Circuit diagram the chaos generator from [27] (a) and results of simulating in Multisim (b)–(d)

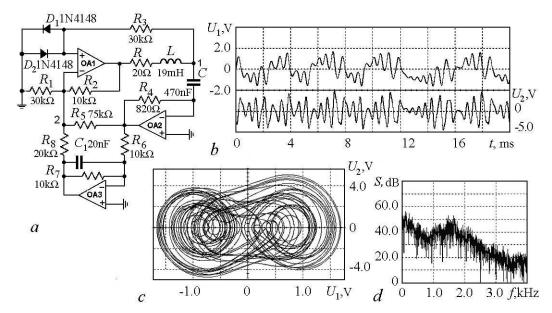


Рис. 10. Схема генератора хаоса из работы [28] (a) и результаты моделирования в среде Multisim (b)–(d) Fig. 10. Circuit diagram the chaos generator from [28] (a) and results of simulating in Multisim (b)–(d)

На рис. 10, b–d представлены результаты моделирования схемы в среде Multisim. На рис. 10, b показаны осциллограммы напряжений в узлах, обозначенных на схеме цифрами 1 и 2, а на рис. 10, c портрет аттрактора в проекции на плоскость этих двух переменных. На рис. 10, d приводится спектр сигнала, отвечающего напряжению в точке 1.

6. Система Лоренца

Аттрактор Лоренца – популярный и хорошо изученный пример странного хаотического аттрактора в системе трех дифференциальных уравнений первого порядка [16–18]

$$\dot{x} = \sigma(y - x), \quad \dot{y} = rx - y - xz, \quad \dot{z} = -bz + xy. \tag{17}$$

«Классический» набор параметров в уравнениях $\sigma=10,\,b=8/3,\,r=28$. Первоначально эта модель была рассмотрена для задачи о конвекции жидкости в подогреваемом снизу слое, но в дальнейшем оказалась применима к описанию множества систем различной физической природы [29–33]. Аттрактор Лоренца относится к классу псевдогиперболических (квазигиперболических) аттракторов [15] и порождает робастный хаос, не разрушающийся при малом смешении по параметрам. Поэтому электронные генераторы, воспроизводящие соответствующую динамику, возможно, представляют интерес в свете принципов, обсуждавшихся во Введении. (Аттрактор Лоренца, впрочем, не обладает свойством структурной устойчивости в том смысле, что не имеет места эквивалентность топологического устройства при смещении по параметрам, как это свойственно равномерно гиперболическим аттракторам.)

Схемотехническую реализацию системы Лоренца на трех операционных усилителях и двух аналоговых умножителях представил в Интернет–публикации автор известного ставшего классикой двухтомника «Искусство схемотехники» Пауль Хоро-

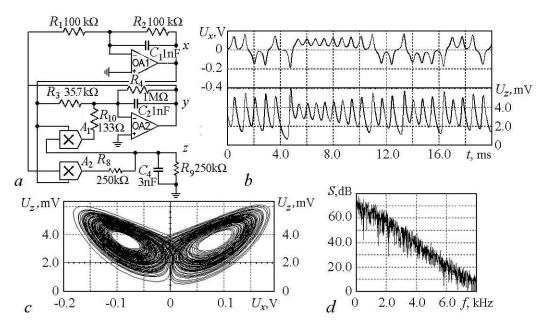


Рис. 11. Схема, реализующая систему Лоренца (a), и результаты моделирования в среде Multisim (b)–(d). А1 и A2 – аналоговые умножители с коэффициентом передачи 1 V⁻¹

Fig. 11. A circuit implementing the Lorentz system (a) and results of its simulating in Multisim (b)–(d). A1 and A2 are analog multipliers with the transmission coefficient $1 V^{-1}$

виц [34]. Здесь рассмотрен упрощенный вариант этой схемы, где количество операционных усилителей уменьшено до двух (рис. 11, a). Узлы, где напряжение пропорционально переменным x,y,z, обозначены соответствующими буквами. На рис. 11, b показаны осциллограммы напряжений U_x и U_z в узлах x и z, а на рис. 11, c — портрет аттрактора в проекции на плоскость этих двух переменных. На рис. 11, d приводится спектр сигнала U_x .

7. Две системы с грубым гиперболическим хаосом

Первый пример физически реализуемой системы с гиперболическим аттрактором, обеспечивающим свойство структурной устойчивости (грубости) хаоса, был предложен в работе [35]. Это система двух осцилляторов ван дер Поля с частотами ω_0 и $2\omega_0$, возбуждающихся по очереди благодаря медленной модуляции параметра, так что за полный цикл передачи возбуждения от одного элемента к другому фаза колебаний претерпевает двукратно растягивающее отображение (отображение Бернулли). Передача возбуждения осуществлялась резонансным образом: от первого осциллятора ко второму с удвоением частоты, а обратно – с возвращением в область частот около ω_0 благодаря смешению с опорным сигналом частоты ω_0 . В дальнейшем такая система была реализована схемотехнически [36] и экспериментально [37, 38]. Заметим, что использование опорного сигнала представляет очевидное неудобство с точки зрения приложений.

На рис. 12, a показана схема устройства, функционирующего без опорного сигнала, в условиях нерезонансной передачи возбуждения от второго осциллятора к

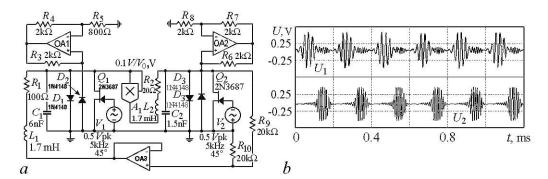


Рис. 12. Схемотехническая реализация (a) системы двух попеременно активных генераторов с нерезонансной передачей возбуждения, где имеет место гиперболический хаотический аттрактор Смейла—Вильямса и осциллограммы (b) напряжений на конденсаторах C1 и C2, полученные при моделировании динамики в среде Multisim. A1 – аналоговый умножитель с коэффициентом передачи 0.1 V^{-1}

Fig. 12. Circuit implementation (a) of a system of two alternately active oscillators with non-resonance transfer of excitation, where hyperbolic chaotic Smale–Williams attractor occurs, and waveforms (b) of the voltages on capacitors C1 and C2 as obtained in simulating the dynamics in Multisim. A1 is analog multiplier with the transmission coefficient $0.1 \, \mathrm{V}^{-1}$

первому. (Такая возможность на уровне численного моделирования была отмечена в работе [39].) Имеется две подсистемы в виде осцилляторов ван дер Поля на основе колебательных контуров, один из которых образован катушкой индуктивности L1 и емкостью С1, а второй – L2 и С2, соответственно. Поскольку индуктивности одинаковы, а емкость во втором контуре в 4 раза меньше, собственные частоты f_0 и $2f_0$ находятся в отношении 1:2, составляя приблизительно 50 kHz и 100 kHz. Отрицательное сопротивление в каждый контур вносится элементом на основе операционного усилителя ОА1 и ОА2, соответственно. Нелинейная проводимость, обеспечивающая увеличение потерь энергии с ростом амплитуды колебаний, вводится элементом, составленным из полупроводниковых диодов (D1, D2 и D3, D4). Для модуляции параметра, ответственного за возникновение автоколебаний, в каждый из контуров включен полевой транзистор, у которого проводимость «сток-исток» управляется подаваемым на затвор переменным напряжением на частоте 5 kHz источниками V1 и V2, имеющими противоположную полярность мгновенного напряжения. Первый генератор действует на второй через посредство умножителя А1, выдающего на выходе квадрат входного сигнала. Порождаемая при этом вторая гармоника сигнала служит для стимуляции возбуждения второго генератора в диапазоне частот вблизи $2\omega_{0}$, когда он выходит за порог генерации.

В свою очередь, второй генератор действует на первый через посредство повторителя напряжения на операционном усилителе ОАЗ. Передача возбуждения происходит в силу присутствия спектральных составляющих с частотами в окрестности f_0 , амплитуда которых не мала благодаря тому, что соотношение периода модуляции и высокочастотного периода не очень большое (порядка 10). На рис. 12, b показаны графики реализаций напряжения на конденсаторах С1 и С2, полученные при моделировании в среде Multisim. Как можно видеть, в соответствии с приведенным выше качественным описанием, имеет место поочередное возбуждение колебаний в контурах L1, С1 и L2, С2.

Убедимся, что переход к каждой новой стадии активности сопровождается удвоением фазы. Для этого подключим осциллограф так, чтобы один луч управлялся

напряжением на конденсаторе С1, а второй — напряжением на резисторе R1. В среде Multisim с помощью приложения Grapher предусмотрена запись в файл данных, получаемых в процессе моделирования. Шаг выборки по времени надо установить равным периоду модуляции ($T=0.2\,$ ms). Моменты выборки подберем так, чтобы они отвечали стадиям активности первого генратора. Затем файл обрабатывается специальной программой. Сначала оба временных ряда — для напряжений на конденсаторе и резисторе U_C и U_R — нормируются так, чтобы сумма квадратов элементов была для них одинакова. Затем для каждой пары величин U_C^n , U_R^n , относящихся к одному и тому же моменту времени nT, определяем фазу как $\theta_n = \arg(U_C^n + iU_R^n)$, приведя ее к интервалу от 0 до 2π . На рис. 13, a показан график, где представлены обработанные таким образом данные. Видно, что график соответствует растягивающему отображению окружности типа Бернулли, то есть требуемое для аттрактора Смейла—Вильямса условие выполняется.

То же самое подключение осциллографа можно использовать для получения портрета аттрактора в проекции на фазовую плоскость первого генератора, если перевести его в режим, в котором развертка по времени не производится, а отклонение луча по горизонтали и вертикали управляется входными напряжениями U_C и U_R . Для построения аттрактора в стробоскопическом сечении можно воспользоваться записанными в файл данными, использованными при построении диаграммы для фаз, представив их графически в координатах U_C , U_R . Полученный таким образом портрет аттрактора показан на рис. 13, b; он соответствует по виду соленоиду Смейла–Вильямса, с характерной образуемой его витками поперечной канторовой структурой.

На рис. 14 показаны спектры сигналов, генерируемых обеими подсистемами, полученные в среде Multisim с помощью виртуального анализатора спектра. Панель (a) отвечает спектру сигнала от первого генератора (напряжение на конденсаторе C1), а панель (b) – сигналу от второго генератора (напряжение на конденсаторе C2). Спектр сплошной, как это и должно быть для случайного сигнала. Для пер-

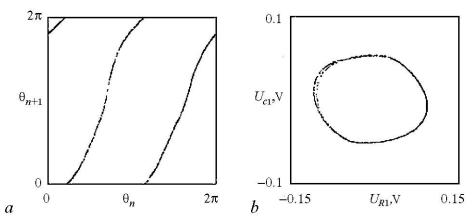


Рис. 13. Диаграмма изменения фаз одного из осцилляторов за период модуляции (a) и портрет аттрактора (b) в стробоскопическом сечении в проекции на плоскость переменных, отвечающих напряжению на резисторе R1 и конденсаторе C1

Fig. 13. Phase transformation diagram of one of the oscillators during the modulation period (a) and portrait of the attractor (b) in the stroboscopic section projected on the plane of variables corresponding to the voltages across the resistor R1 and the capacitor C1

вого генератора он сосредоточен по большей части в окрестности его собственной частоты 50 kHz, а для второго – в окрестности удвоенной частоты 100 kHz. В низкочастотной части спектра заметны дискретные компоненты на частоте 5 kHz и ее гармониках, обусловленные присутствием периодической модуляции параметров с этой частотой.

Недавно в работе [40] была указана интересная возможность реализовать гиперболический хаос в системе попеременно возбуждающихся (благодаря внешней модуляции параметров) двух симметричных автоколебательных элементов Бонхоффера – ван дер Поля. В данном случае имеет место резонансная передача возбуждения с удвоением фазы благодаря использованию второй гармоники релаксационных колебаний, возникающих на развитой стадии активности. Обратимся к схемотехнической реализации этой идеи.

На рис. 15 показана схема, составленная из двух одинаковых автоколебательных элементов на основе контуров L_1C_1 и L_2C_2 . Внесение отрицательного сопротивления в один и другой контур обеспечивается операционными усилителями OA1 и OA2. Величина вносимого сопротивления в каждый момент времени зависит от мгновенного сопротивления сток-исток полевых транзисторов Q1 и Q2. Подавае-

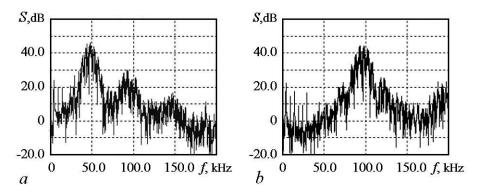
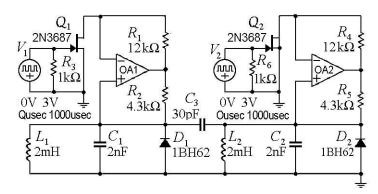


Рис. 14. Спектры сигналов первого (a) и второго (b) генератора, полученные при моделировании в среде Multisim подачей на виртуальный анализатор спектра напряжений, соответственно, на конденсаторе C1 и C2

Fig. 14. Spectra of the first (a) and second (b) oscillators obtained in the Multisim simulation by means of the virtual spectrum analyzer, respectively, on the capacitors C1 and C2



Puc. 15. Система двух связанных автоколебательных элементов, реализующая гиперболический хаос Fig. 15. A system of two coupled self-oscillating elements realizing hyperbolic chaos

мое на затворы управляющее напряжение от источников V1 и V2 остается нулевым на протяжении определенной части периода модуляции (при этом осциллятор активен), а на остальной части периода напряжение меньше нуля, и его временная зависимость имеет вид треугольной функции (колебания подавляются). Для первого и второго осцилляторов управляющие напряжения сдвинуты друг относительно друга по времени. Параметры элементов отрицательного сопротивления подобраны так, что нулевое напряжение затвора отвечает установлению релаксационных колебаний с частотой вдвое меньшей частоты линейных колебаний осциллятора. В каждый колебательный контур включен диод (D1 и D2), что обеспечивает ограничение уровня колебаний и наличие интенсивной второй гармоники при большой амплитуде колебаний. Когда наступает очередная стадия активности осциллятора, развитие колебаний в нем, начиная от малой амплитуды, эффективно стимулируется резонансным образом благодаря связи через конденсатор СЗ за счет второй гармоники колебаний осциллятора-партнера, который как раз пребывает на стадии развитых релаксационных колебаний. Далее второй осциллятор оказывается подавленным, тогда как в первом развиваются релаксационные колебания, а затем процесс повторяется с поочередной сменой ролей обоих осцилляторов. Поскольку передача возбуждения от одного осциллятора к другому осуществляется через посредство второй гармоники, это должно сопровождаться удвоением фазы, что при наличии сжатия по остальным направлениям в пространстве состояний будет отвечать аттрактору типа Смейла-Вильямса в стробоскопическом отображении, определяющем эволюцию системы за период.

Рис. 16, где представлены осциллограммы, полученные при моделировании в среде Multisim, иллюстрирует функционирование схемы в соответствии с описанным механизмом. Подтверждение гиперболической природы хаоса требует проверить, что последовательные стадии активности отвечают преобразованию фазы, согласно растягивающему отображению. В данном случае, однако, в области развитых колебаний их форма существенно отличается от синусоидальной, поэтому вычисление фазы через арктангенс отношения переменной и ее производной не приводит к удовлетворительным результатам. Альтернативой является использование величины, определяющей временной сдвиг относительно заданного начала отсчета, нормированный на характерный период релаксационных колебаний. Пусть t — момент

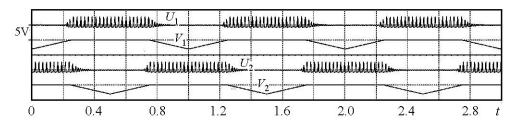


Рис. 16. Зависимости от времени напряжений U_1 и U_2 на конденсаторах C1 и C2 и управляющих напряжений на затворе полевых транзисторов V_1 и V_2 , полученные с помощью виртуального четырехлучевого осциллографа при моделировании в среде Multisim. Номиналы элементов схемы соответствуют рис. 15

Fig. 16. Waveforms of voltages U_1 and U_2 on capacitors C1 and C2 and control voltages on the gate of field effect transistors V_1 and V_2 , obtained with the help of a virtual four-beam oscilloscope in the Multisim simulation. The nominal values of the circuit elements correspond to Fig. 15

времени, фиксированный относительно профиля управляющего сигнала в области активности одного из осцилляторов, а t_1 и t_2 – предшествующие моменты изменения знака напряжения в колебательном контуре с плюса на минус, причем $t_2 > t_1$. Тогда можно определить угловую (фазовую) переменную, принадлежащую интервалу [0,1] согласно соотношению $\varphi = (t-t_2)(t_2-t_1)^{-1}$.

Чтобы построить график для величин, относящихся к последовательным стадиям активности φ_n и φ_{n+1} , можно использовать записанные в файл данные моделирования в среде Multisim на достаточно большом времени с малым шагом выборки (на порядок меньше периода малых колебаний). Полученный обработкой этих данных график показан на рис. 17, a. Поскольку удвоение фазовой переменной осуществляется при каждой передаче возбуждения от первого осциллятора ко второму и от второго к первому, то за период модуляции растяжение по фазе четырехкратное, и график состоит из ветвей, имеющих коэффициент наклона близкий к 4. На рис. 17, b, c показан спектр сигнала, порождаемого одним из осцилляторов, в линейном и логарифмическом масштабе. Спектр изрезан в силу того, что сигнал имеет вид периодически следующих цугов колебаний, однако из-за хаотичности изменения фазы на последовательных стадиях активности, спектр, безусловно, сплошной.

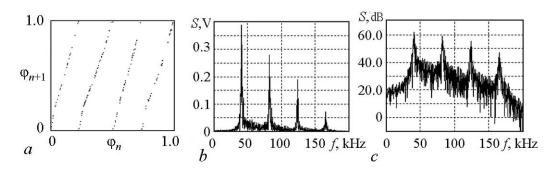


Рис. 17. Диаграмма, иллюстрирующая трансформацию фаз на последовательных стадиях активности (a) и спектры колебаний в линейном (b) и логарифмическом масштабе (c) для одного из осцилляторов, полученные при моделировании в среде Multisim схемы рис. 15

Fig. 17. Diagram illustrating the phase transformation in successive stages of activity (a) and the oscillation spectra in linear (b) and logarithmic scale (c) for one of the oscillators as obtained in the Multisim simulation of the circuit in Fig. 15

8. Генератор с запаздывающей обратной связью

Системы, в которых взаимодействие элементов осуществляется с запаздыванием во времени, распространены в природе и технике и встречаются, например, в теории автоматического управления, нелинейной оптике, физиологии и т.д. [41–45].

Системы с запаздыванием следует классифицировать как распределенные системы с бесконечномерным фазовым пространством, где роль виртуальной пространственной координаты играет время, отсчитываемое в пределах интервала запаздывания; при достаточно сильной нелинейности они часто порождают хаотическую динамику. В электронике на этой основе возможна реализация генераторов хаоса, к категории которых относится шумотрон – устройство в виде кольцевой схемы из

двух ламп бегущей волны (усилителя и нелинейного элемента), разработанное для систем радиопротиводействия в ИРЭ АН СССР под руководством В.Я. Кислова в 1960-е годы [46, 7].

Для генерации хаоса в системах кольцевого типа существенным является присутствие нелинейного элемента, у которого зависимость уровня выходного сигнала от уровня входного имеет насыщение и падающий участок. Ниже рассматривается вариант схемы генератора с запаздыванием, где в качестве нелинейного элемента используется блок на основе двух полевых транзисторов – так называемый «лямбдадиод» [5, 6].

На рис. 18, a показана схема, составленная в среде Multisim. Схема включает низкочастотный RC-фильтр (конденсатор C1, резисторы R1, R2), операционный усилитель OA1, обеспечивающий усиление с коэффициентом $K=1+R_3/R_4$, и нелинейный элемент на диоде D1 и двух полевых транзисторах Q1, Q2. Вольтамперная характеристика нелинейного элемента I=f(U) показана отдельно на панели (b). Выходным сигналом его служит ток, поступающий на вход линии задержки T, волновое сопротивление которой выбрано равным R_3 , чтобы избежать отражений сигнала. Выходной сигнал из линии задержки через повторитель напряжения на операционном усилителе OA2 подается на вход RC-фильтра, что замыкает кольцевую цепь.

Если пренебречь изменением напряжения на нелинейном элементе в сравнении с падением напряжения на входных клеммах линии задержки, что при выбранных параметрах дает достаточно хорошее приближение, то динамика схемы описывается уравнениями

$$C_1 \frac{dU}{dt} + \frac{U}{R_2} = \frac{V - U}{R_1}, \quad I = f(KU), \quad V = R_3 I(t - T).$$

Заменой переменных

$$x = U, \quad t = t'RC_1, \quad \tau = T/RC_1, \quad F(x) = \frac{R_3 f(KU)}{1 + R_1 R_2^{-1}}$$

$$Q_1 \quad 1BH62 \quad XSC1 \quad R_4 58k\Omega \quad R_5 \quad 1k\Omega$$

$$Q_2 \quad 1N2608 \quad R_3 \quad R_1 1k\Omega$$

$$S0\Omega 20 \text{ usec} \quad R_3 \quad C_1 \quad R_2 \quad 1.0$$

$$D_1 \quad 1BH62 \quad 1.0$$

$$Q_2 \quad 1NF \quad 20k\Omega$$

Рис. 18. Схема генератора с запаздывающей обратной связью (a) и вольт-амперная характеристика использованного в ней нелинейного элемента (b)

Fig. 18. Circuit diagram of the generator with delayed feedback (a) and the current-voltage characteristic of the nonlinear element used (b)

$$\dot{x} + x = F(x(t - \tau)),$$

где точка означает производную по безразмерному времени, и штрих в обозначении времени опущен. Это уравнение при разной форме функции F встречается в различных приложениях. Можно упомянуть уравнение МакКея–Гласса, рассматриваемое в контексте физиологических систем [43], уравнения, предложенные для оптических, электрооптических и акустооптических систем с запаздыванием, а также для химических систем [41, 42, 43, 47–50].

На рис. 19, *а* показана зависимость напряжения на выходе линейного усилителя ОА1 от времени, полученная при моделировании схемы в среде Multisim с помощью виртуального осциллографа. На рис. 19, *b* приводится изображение, скопированное с виртуального осциллографа, подключенного, как показано на схеме рис. 19, *a*, так что горизонтальное отклонение луча отвечает напряжению на входе, а вертикальное – на выходе линии задержки. Это двумерная проекция аттрактора из бесконечномерного фазового пространства системы с запаздыванием. Как можно судить визуально, аттрактор в данном режиме хаотический. На панелях (*c*) и (*d*) показан спектр мощности, полученный с помощью виртуального анализатора спектра в среде Multisim, где в одном случае использован линейный, а во втором – логарифмический масштаб по оси ординат.

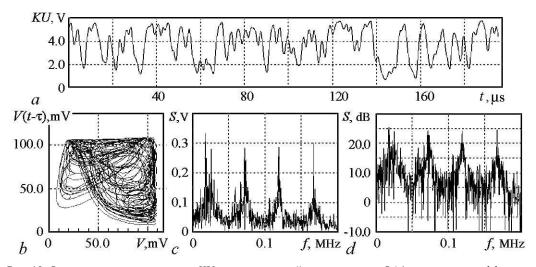


Рис. 19. Осциллограмма напряжения KU на выходе линейного усилителя ОА1, имеющего коэффициент усиления K (a); фазовый портрет в проекции из бесконечномерного фазового пространства системы с запаздыванием на двумерную плоскость, где по осям координат отложены напряжения на входе и выходе линии задержки (b); спектры сигнала, представленные в линейном (c) и логарифмическом (d) масштабах. Моделирование проведено при номиналах компонентов схемы, указанных на рис. 18, a

Fig. 19. Waveform of the voltage KU at the output of the linear amplifier OA1 having the transmission coefficient K(a); phase portrait in projection from the infinite-dimensional phase space of the system with delay to a two-dimensional plane of the input and output of the delay line (b); spectra in the linear (c) and logarithmic scale (d). The simulation was carried out at nominal values of the circuit components as shown in Fig. 18, a

Заключение

В статье представлена коллекция схемотехнических решений электронных генераторов хаоса, динамика которых проиллюстрирована единообразно с использованием пакета NI Multisim. Рассмотрены как известные из литературы схемы (генератор Колпитца, генератор Хартли, RC-генератор хаоса, варианты схемы Чуа, конструкции, предложенные литовской группой), так и оригинальные или модифицированные схемы (аналоговый осциллятор Лоренца, генераторы гиперболического хаоса с передачей возбуждения между попеременно возбуждающимися элементами, кольцевой генератор с запаздыванием). Для всех рассмотренных систем динамика иллюстрируется осциллограммами сигналов, фазовыми портретами аттракторов, спектрами колебаний. Среди представленных конструкций следует специально отметить те, где генерируемых хаос робастный, то есть не разрушается при вариации параметров, что существенно для возможных приложений хаоса. Сюда относится электронный аналог модели Лоренца, а также обладающие более сильным свойством структурной устойчивости (грубости) схемы с гиперболическими аттракторами Смейла-Вильямса. Хотя в настоящей статье все схемы иллюстрируются только на уровне низкочастотных устройств, некоторые из них, как представляется, могут быть модифицированы и проработаны для использования в качестве генераторов хаоса также на высоких и сверхвысоких частотах. Собранный здесь материал может представлять интерес для постановки компьютерных практикумов, ориентированных на проведение численного и схемотехнического моделирования сложной нелинейной динамики электронных устройств, и лабораторных работ, нацеленных на их экспериментальное исследование и выработку соответствующих навыков у студентов и аспирантов в области радиофизики и теории колебаний. Также этот материал может быть полезен для исследователей, имеющих дело с конструированием, анализом и практическим использованием электронных систем со сложной динамикой.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 16-02-00135.

Библиографический список

- 1. Электроника ламп с обратной волной / Ред. Шевчик В.Н. и Трубецков Д.И. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1975.
- 2. *Безручко Б.П., Кузнецов С.П., Трубецков Д.И.* Экспериментальное наблюдение стохастических автоколебаний в динамической системе электронный потокобратная электромагнитная волна // Письма в ЖЭТФ. 1979. Т. 29, № 3. С. 180–184.
- 3. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. М.: Наука, 1984.
- 4. *Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. М.: Физматлит, Т. 1, 2003, Т. 2, 2004.
- 5. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А., Панас А.И. Генерация хаоса М.: Техносфера, 2012.
- 6. *Дмитриев А.С., Панас А.И.* Динамический хаос. Новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002.

- 7. *Мясин Е.А.* Исследования генерации СВЧ шума в ИРЭ АН СССР 1962–1967 годов Начало нового научного направления // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2014. Т. 22, № 1. С. 104–122.
- 8. *Lukin K.A.* Noise radar technology //Telecommunications and Radio Engineering. 2001. Vol. 55, № 12. Pp. 8–16.
- 9. Stojanovski T., Kocarev L. Chaos-based random number generators Part I: Analysis //IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications. 2001. Vol. 48, № 3. Pp. 281–288.
- 10. *Stojanovski T., Pihl J., Kocarev L.* Chaos-based random number generators Part II: Practical realization //IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications. 2001. Vol. 48, № 3. Pp. 382–385.
- 11. *Baptista M*. Cryptography with chaos //Physics Letters A. 1998. Vol. 240, № 1–2. Pp. 50–54.
- 12. *Хернитер М.Е.* Multisim. Современная система компьютерного моделирования и анализа схем электронных устройств. М.: Издательский Дом «ДМК-пресс», 2006.
- 13. Zeraoulia E., Sprott J.C. Robust Chaos and its Applications. Singapore: World Scientific, 2012.
- 14. Кузнецов С. П. Динамический хаос и однородно гиперболические аттракторы: От математики к физике //Успехи физических наук. 2011. Т. 181, № 2. С. 121–149.
- 15. *Гонченко А.С., Гонченко С.В., Казаков А.О., Козлов А.Д.* Математическая теория динамического хаоса и её приложения: Обзор. Часть 1. Псевдогиперболические аттракторы // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2017. Т. 25, № 2. С. 4–36.
- 16. *Lorenz E.N.* Deterministic nonperiodic flow //Journal of the Atmospheric Sciences. 1963. Vol. 20, № 2. Pp. 130–141.
- 17. *Sparrow C*. The Lorenz Equations: Bifurcations, Chaos, and Strange Attractors. Springer Science & Business Media, 2012.
- 18. Кузнецов С.П. Динамический хаос. М.: Физматлит, 2001.
- 19. *Shilnikov L*. Mathematical problems of nonlinear dynamics: A tutorial //International Journal of Bifurcation and Chaos. 1997. Vol. 7, № 9. Pp. 1953–2001.
- 20. *Kennedy M.P.* Chaos in the Colpitts oscillator //IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications. 1994. Vol. 41, № 11. Pp. 771–774.
- 21. *Peter K*. Chaos in Hartley's oscillator //International Journal of Bifurcation and Chaos. 2002. Vol. 12, № 10. Pp. 2229–2232.
- 22. *Keuninckx L., Van der Sande G., Danckaert J.* Simple two-transistor single-supply resistor–capacitor chaotic oscillator //IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. 2015. Vol. 62, № 9. Pp. 891–895.
- 23. Chua L.O., Wu C.W., Huang A., Zhong G.Q. A universal circuit for studying and generating chaos. I. Routes to chaos //IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications. 1993. Vol. 40, № 10. Pp. 732–744.

- 24. *Kennedy M.P.* Robust op amp realization of Chua's circuit // Frequenz. Journal of RF-Engineering and Telecommunications. 1992. Vol. 46, № 3–4. Pp. 66–80.
- 25. *Morgul O.* Wien bridge based RC chaos generator // Electronics Letters. 1995. Vol. 31, № 24. Pp. 2058–2059.
- 26. *Tamaševičius A., Mykolaitis G., Pyragas V., Pyragas K.* A simple chaotic oscillator for educational purposes // European Journal of Physics. 2004. Vol. 26, № 1. Pp. 61–63.
- 27. *Namajunas A., Tamasevicius A.* Simple RC chaotic oscillator //Electronics Letters. 1996. Vol. 32, № 11. Pp. 945–946.
- 28. *Tamaševičius A., Bumelienė S., Kirvaitis R., Mykolaitis G., Tamaševičiūtė E.* Autonomous Duffing–Holmes type chaotic oscillator // Elektronika ir Elektrotechnika. 2009. Vol. 93, № 5. Pp. 43–46.
- 29. *Ораевский А.Н.* Мазеры, лазеры и странные аттракторы // Квантовая электроника. 1981. Т. 8, № 1. С. 130–142.
- 30. *Kolář M., Gumbs G.* Theory for the experimental observation of chaos in a rotating waterwheel // Physical Review A. 1992. Vol. 45, № 2. Pp. 626–637.
- 31. *Глуховский А.Б.* Нелинейные системы, являющиеся суперпозициями гиростатов // ДАН СССР. 1982. Т. 266, № 4. С. 816–820.
- 32. Doroshin A. V. Modeling of chaotic motion of gyrostats in resistant environment on the base of dynamical systems with strange attractors // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2011. Vol. 16, № 8. Pp. 3188–3202.
- 33. *Кузнецов С.П.* Аттрактор типа Лоренца в электронном параметрическом генераторе и его трансформация при нарушении точных условий параметрического резонанса // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2016. Т. 24, № 3. С. 68–87.
- 34. Horowitz P. Build a Lorenz attractor: http://frank.harvard.edu/paulh/misc/lorenz.htm
- 35. *Kuznetsov S.P.* Example of a physical system with a hyperbolic attractor of the Smale–Williams type // Physical Review Letters. 2005. Vol. 95, № 14. 144101.
- 36. *Кузнецов С.П.* Схемы электронных устройств с гиперболическим хаосом и моделирование их динамики в программной среде Multisim // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19, № 5. С. 98–115.
- 37. *Кузнецов С.П., Селезнев Е.П.* Хаотическая динамика в физической системе со странным аттрактором типа Смейла–Вильямса // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2006. Т. 129, № 2. С. 400–412.
- 38. *Isaeva O.B.*, *Kuznetsov S.P.*, *Sataev I.R.*, *Savin D.V.*, *Seleznev E.P.* Hyperbolic chaos and other phenomena of complex dynamics depending on parameters in a nonautonomous system of two alternately activated oscillators // International Journal of Bifurcation and Chaos. 2015. Vol. 25, № 12. Pp. 1530033.
- 39. *Кузнецов А.П., Кузнецов С.П., Пиковский А.С., Тюрюкина Л.В.* Хаотическая динамика в системах связанных неавтономных осцилляторов с резонансным и нерезонансным механизмом передачи возбуждения // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2007. Т. 15, № 6. С. 75–85.

- 40. *Круглов В.П., Дорошенко В.М., Кузнецов С.П.* Гиперболический хаос в связанных осцилляторах Бонхоффера—Ван дер Поля, функционирующих с возбуждением релаксационных автоколебаний // Нелинейные волны—2018. XVIII научная школа. 26 февраля—4 марта 2018. Тезисы докладов молодых ученых. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2018. С. 87–89.
- 41. *Кузнецов С.П*. Сложная динамика генераторов с запаздывающей обратной связью. //Известия вузов. Радиофизика. 1982. Т. 25, № 12. С. 1410–1428.
- 42. *Vallée R., Delisle C., Chrostowski J.* Noise versus chaos in acousto-optic bistability. Physical Review A. 1984. Vol. 30, № 1. Pp. 336–342.
- 43. *Mackey M.C.*, *Glass L*. Oscillation and chaos in physiological control systems // Science, 1977. Vol. 97, №4 300. Pp. 287–289.
- 44. *Hu H.Y. and Wang Z.H.* Dynamics of Controlled Mechanical Systems with Delayed Feedback. Springerő 2002.
- 45. *Chiasson J.N. and Loiseaum J.J.* (eds.): Applications of Time Delay Systems. Springer, 2007.
- 46. *Кислов В.Я., Залогин Н.Н., Мясин Е.А.* Исследование стохастических автоколебательных процессов в автогенераторах с запаздыванием //Радиотехника и электроника. 1979. Т. 24, № 6. С. 1118–1130.
- 47. *Ikeda K., Daido H., Akimoto O.* Optical turbulence: chaotic behavior of transmitted light from a ring cavity //Physical Review Letters. 1980. Vol. 45, № 9. Pp. 709–712.
- 48. *Farmer J.D.* Chaotic attractors of an infinite-dimensional dynamical system // Physica D: Nonlinear Phenomena. 1982. Vol. 4, № 3. Pp. 366–393.
- 49. *Chrostowski J., Vallee R., Delisle C.* Self-pulsing and chaos in acoustooptic bistability // Canadian Journal of Physics. 1983. Vol. 61, № 8. Pp. 1143–1148.
- 50. Chevalier T., Freund A., Ross J. The effects of a nonlinear delayed feedback on a chemical reaction // The Journal of Chemical Physics. 1991. Vol. 95, № 1. C. 308–316.

References

- 1. Electronics of Backward-Wave Tubes / Eds Shevchik V.N., Trubetskov D.I. Saratov: Saratov University, 1975 (in Russian.)
- 2. Bezruchko B.P., Kuznetsov S.P., Trubetskov D.I. Experimental observation of stochastic self-oscillations in the electron beam – backscattered electromagnetic wave dynamic system. *JETP Lett*, 1979, vol. 29, no. 3, pp. 162–165.
- 3. Rabinovich M.I., Trubetskov D.I. Oscillations and waves: in linear and nonlinear systems. Springer Science & Business Media, 2012.
- 4. Trubetskov D.I., Hramov A.E. Lectures on Microwave Electronics for Physicists. Moscow: Fizmatlit, 2003. (In Russian.)
- 5. Dmitriev A.S., Efremova E.V., Maksimov N.A., Panas A.I. Generation of chaos. Moscow, Technosfera, 2012. 432 p. (In Russian.)
- 6. Dmitriev A.S., Panas A.I. Dynamic Chaos: New Information Carriers for Communications Systems. Moscow: Fizmatlit, 2002. (In Russian.)
- 7. Myasin E.A. Investigations of the hf noise generation in IRE of Academy of

- Sciences of USSR at 1962–1967 years The beginning of the new science direction. *Izvestiya VUZ, Applied Nonlinear Dynamics*, 2014, vol. 22, no. 1, pp. 104–122. (In Russian.)
- 8. Lukin K.A. Noise radar technology. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2001, vol. 55, no. 12, pp. 8–16.
- 9. Stojanovski T., Kocarev L. Chaos-based random number generators-part I: analysis. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 2001, vol. 48, no 3, pp. 281–288.
- Stojanovski T., Pihl J., Kocarev L. Chaos-based random number generators. Part II: practical realization. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 2001, vol. 48, no. 3, pp. 382–385.
- 11. Baptista M.S. Cryptography with chaos. *Physics Letters A*, 1998, vol. 240, no. 1–2, pp. 50–54.
- 12. Herniter M.E. Schematic Capture with Multisim. Prentice Hall, 2004.
- 13. Zeraoulia E., Sprott J. C. Robust chaos and its applications. Singapore: World Scientific, 2012.
- 14. Kuznetsov S.P. Dynamical chaos and uniformly hyperbolic attractors: from mathematics to physics. *Physics-Uspekhi*, 2011, vol. 54, no. 2, pp. 119–144.
- 15. Gonchenko A.S., Gonchenko S.V., Kazakov A.O., Kozlov A.D. Mathematical theory of dynamical chaos and its applications: Review. Part 1. Pseudohyperbolic attractors. *Izvestiya VUZ, Applied Nonlinear Dynamics*, 2017, vol. 25, no. 2, pp. 4–36. (In Russian.)
- 16. Lorenz E.N. Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1963, vol. 20, no. 2, pp. 130–141.
- 17. Sparrow C. The Lorenz equations: bifurcations, chaos, and strange attractors. Springer Science & Business Media, 2012.
- 18. Kuznetsov S.P. Dynamical chaos. M., Fizmatlit, 2001. (In Russian.)
- 19. Shilnikov L. Mathematical problems of nonlinear dynamics: a tutorial. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 1997, vol. 7, no. 9, pp. 1953–2001.
- 20. Kennedy M. P. Chaos in the Colpitts oscillator. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 1994, vol. 41, no. 11, pp. 771–774.
- 21. Peter K. Chaos in Hartley's Oscillator. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2002, vol. 12, no. 10, pp. 2229–2232.
- 22. Keuninckx L., Van der Sande G., Danckaert J. Simple Two-Transistor Single-Supply Resistor–Capacitor Chaotic Oscillator. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2015, vol. 62, no. 9, pp. 891–895.
- 23. Chua L.O., Wu C.W., Huang A., Zhong G.Q. A universal circuit for studying and generating chaos. I. Routes to chaos. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 1993, vol. 40, no. 10, pp. 732–744.
- 24. Kennedy M. P. Robust op amp realization of Chua's circuit. Frequenz. *Journal of RF-Engineering and Telecommunications*, 1992, vol. 46, no. 3–4, pp. 66–80.

- 25. Morgul O. Wien bridge based RC chaos generator. *Electronics Letters*, 1995, vol. 31, no. 24, pp. 2058–2059.
- 26. Tamaševičius A., Mykolaitis G., Pyragas V., Pyragas K. A simple chaotic oscillator for educational purposes. *European Journal of Physics*, 2004, vol. 26, no. 1, pp. 61–63.
- 27. Namajunas A., Tamasevicius A. Simple RC chaotic oscillator. *Electronics Letters*. 1996. Vol. 32, No. 11. Pp. 945–946.
- 28. Tamaševičius A., Bumelienė S., Kirvaitis R., Mykolaitis G., Tamaševičiūtė E. Autonomous Duffing-Holmes type chaotic oscillator. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 2009, vol. 93, no. 5, pp. 43–46.
- 29. Oraevskii A.N. Masers, lasers, and strange attractors. *Quantum electronics*, 1981, vol. 11, no. 1, pp. 71–78.
- 30. Kolář M., Gumbs G. Theory for the experimental observation of chaos in a rotating waterwheel. *Physical Review A*, 1992, vol. 45, no. 2, pp. 626–637.
- 31. Glukhovskii A.B. Nonlinear systems that are superpositions of gyrostats. *Soviet Physics Doklady*, 1982, vol. 27, pp. 823–827.
- 32. Doroshin A.V. Modeling of chaotic motion of gyrostats in resistant environment on the base of dynamical systems with strange attractors. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2011. vol. 16, no. 8, pp. 3188–3202.
- 33. Kuznetsov S.P. Lorenz type attractor in electronic parametric generator and its transformation outside the accurate parametric resonance. *Izvestiya VUZ, Applied Nonlinear Dynamics*, 2016, vol. 24, no. 3, pp. 68–87.
- 34. Horowitz P. Build a Lorenz attractor: http://frank.harvard.edu/paulh/misc/lorenz.htm
- 35. Kuznetsov S.P. Example of a physical system with a hyperbolic attractor of the Smale-Williams type. *Physical Review Letters*, 2005, vol. 95, no. 14, 144101.
- 36. Kuznetsov S.P. Electronic circuits manifesting hyperbolic chaos and simulation of their dynamics using software package MULTISIM. *Izvestiya VUZ, Applied Nonlinear Dynamics*, 2011, vol. 19, no. 5, pp. 98–115.
- 37. Kuznetsov S.P., Seleznev E.P. A strange attractor of the Smale–Williams type in the chaotic dynamics of a physical system. *JETP*, 2006, vol. 102, no. 2, pp. 355–364.
- 38. Isaeva O.B., Kuznetsov S.P., Sataev I.R., Savin D.V., Seleznev E.P. Hyperbolic chaos and other phenomena of complex dynamics depending on parameters in a nonautonomous system of two alternately activated oscillators. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2015, vol. 25, no. 12, pp. 1530033.
- 39. Kuznetsov A.P., Kuznetsov S.P., Pikovski A.S., Turukina L.V. Chaotic dynamics in the systems of coupling nonautonomous oscillators with resonance and nonresonance communicator of the signal. *Izvestiya VUZ, Applied Nonlinear Dynamics*, 2007, vol. 15, no. 6, pp. 75–85. (In Russian.)
- 40. Kruglov V.P., Doroshenko V.M., Kuznetsov S.P. Hyperbolic chaos in the coupled Bonhoeffer van der Pol oscillators operating with excitation of relaxation self-oscillations. Nonlinear waves 2018. XVIII Scientific School. February 26 March 4, 2018. Abstracts of reports of young scientists. Nizhny Novgorod: IAP RAS, 2018. P. 87–89.

- 41. Kuznetsov S. P. Complex dynamics of oscillators with delayed feedback. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 1982, vol. 25, no. 12, pp. 996–1009.
- 42. Vallée R., Delisle C., Chrostowski J. Noise versus chaos in acousto-optic bistability. *Physical Review A*, 1984, vol. 30, no. 1, pp. 336–342.
- 43. Mackey M.C., Glass L. Oscillation and chaos in physiological control systems. *Science*, 1977, vol. 197, no. 4300, pp. 287–289.
- 44. Hu, H.Y. and Wang, Z.H.: Dynamics of Controlled Mechanical Systems with Delayed Feedback. Springer, 2002.
- 45. Chiasson J.N. and Loiseaum J.J. (eds.): Applications of Time Delay Systems. Springer, 2007.
- 46. Kislov V.Ya., Zalogin N.N., Myasin E.A. Study of stochastic self-oscillating processes in self-excited oscillators with delay. *Radiotekhnika i elektronika*, 1979, vol. 24, no. 6, pp. 1118–1130. (In Russian.)
- 47. Ikeda K., Daido H., Akimoto O. Optical turbulence: chaotic behavior of transmitted light from a ring cavity. *Physical Review Letters*, 1980, vol. 45, no. 9, pp. 709–712.
- 48. Farmer J.D. Chaotic attractors of an infinite-dimensional dynamical system. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1982, vol. 4, no. 3, pp. 366–393.
- 49. Chrostowski J., Vallee R., Delisle C. Self-pulsing and chaos in acoustooptic bistability. *Canadian Journal of Physics*, 1983, vol. 61, no. 8, pp. 1143–1148.
- 50. Chevalier T., Freund A., Ross J. The effects of a nonlinear delayed feedback on a chemical reaction. *The Journal of Chemical Physics*, 1991, vol. 95, no. 1, p. 308–316.

Кузнецов Сергей Петрович - родился в Москве (1951). Окончил Саратовский государственный университет (1973). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в СГУ (1977) и доктора наук (1987) по специальности радиофизика. Сотрудник Саратовского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (с 1988), где в настоящее время руководит лабораторией теоретической нелинейной динамики. Главный научный сотрудник лаборатории нелинейного анализа и конструирования новых средств передвижения Удмуртского государственного университета. Профессор базовой кафедры факультета нелинейных процессов Саратовского государственного университета. Автор монографий «Strange Nonchaotic Attractors» (совместно с А. Пиковским и У. Фойдель), «Динамический хаос и гиперболические аттракторы: От математики к физике» и «Hyperbolic Chaos: a Physicist's View». Автор учебно-научных монографий «Динамический хаос» и «Нелинейные колебания» (в соавторстве с А.П. Кузнецовым и Н.М. Рыскиным). Опубликовал свыше 200 научных статей по нелинейной динамике, радиофизике и электронике. Под руководством С.П. Кузнецова защищены двенадцать кандидатских диссертаций. Лауреат государственной научной стипендии для ученых России (1994-1996). Член редакционной коллегии журналов «Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика», «Regular and Chaotic Dynamics», «Нелинейная динамика», «Известия Саратовского университета - Новая серия. Серия Физика».



410019 Саратов, ул. Зеленая, 38 Саратовский филиал ИРЭ имени В.А. Котельникова РАН E-mail: spkuz@yandex.ru



УДК 62-133.3

АНАЛИЗ СИНХРОННЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЦЕПОЧКИ СВЯЗАННЫХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ ЭНЕРГОСЕТЕЙ

П. А. Аринушкин, В. С. Анищенко

Саратовский национальный исследовательский государственный университет Россия, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83 E-mail: arinushkin.pavel@gmail.com, wadim@info.sgu.ru

Поступила в редакцию 12.03.2018

Цель исследования - формулировка эффективной модели энергосети, определение устойчивых режимов ее работы, выявление различий рассматриваемых режимов и проведение тестов на устойчивость системы к изменениям управляющих параметров, начальных условий и к различным типам внешнего воздействия. Метод. Рассматривается введенная авторами эффективная модель энергосети, состоящая из трех связанных осцилляторов, при различных способах задания начальных условий и вариации управляющих параметров. Численное моделирование энергосистем позволяет выявить устойчивые состояния осцилляторов, при которых наблюдается стабильная работа энергосистем. Данный подход дает возможность произвести оптимизацию энергосистем, определить механизмы повышения стабильности системы и выявить участки энергосистем, которые более подвержены негативным факторам. В рамках исследования было проведено сравнение режимов работы энергосети в условиях воздействий внешнего шума различной интенсивности и прямоугольных импульсов, которые моделируют скачки мощности в энергосети. Результаты. Предложена и численно исследована эффективная модель энергосистемы, состоящая из трех связанных генераторов. Показано, что при изменении выходной мощности генератора можно получить режим, устойчивый к вариациям начальных условий. Установлено, что функционирование такой системы оказывается менее чувствительным к различным внешним факторам. В частности, режим с синхронизацией фазовых скоростей всех осцилляторов является более устойчивым к перепадам потребляемой мощности, шумовым эффектам и к разрывам линий передач в сравнении с режимом синхронизации с различающимися фазовыми скоростями. Обсуждение. Исследование энергосети трех связанных генераторов продемонстрировало поведение ключевых режимов работы энергосетей и показало возможность оптимизации сети посредством регулировки параметра выходной мощности генератора. В данной работе рассмотрена синхронизация энергосетей всего лишь для одной модели сети. В качестве дальнейшего изучения сетей необходимо провести сравнительный анализ режимов синхронизации нескольких моделей энергосетей.

Ключевые слова: энергосети, синхронные машины, фазовые осцилляторы, синхронизация связанных генераторов, устойчивость динамического режима.

DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-3-62-77

Образец цитирования: Аринушкин П.А., Анищенко В.С. Анализ синхронных режимов работы цепочки связанных осцилляторов энергосетей // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2018. Т. 26, № 3. С. 62–77. DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-3-62-77

ANALYSIS OF SYNCHRONOUS MODES OF COUPLED OSCILLATORS IN POWER GRIDS

P. A. Arinushkin, V. S. Anishchenko

Saratov State University 83, Astrakhanskaya, 410012 Saratov, Russia E-mail: arinushkin.pavel@gmail.com, wadim@info.sgu.ru Received 12.03.2018

Aim. The aim of the study is to formulate an effective model of the power grid, to determine the stable modes of its operation, to identify differences in the considered modes and to test the stability of the system to changes in control parameters, initial conditions and to various types of external influence. Method. The effective model of the energy network, which consists of three coupled oscillators, is considered for different methods of setting the initial conditions and variation of the control parameters. Numerical simulation of power systems allows to reveal the steady states of the oscillators, at which the stable operation of power systems is observed. This approach makes it possible to optimize power systems, to determine the mechanisms for improving the stability of the system and to identify the parts of power systems, that are more prone to negative factors. In the framework of our study, the operating modes of the power grid are compared under the influence of external noise of different intensities and rectangular pulses, which simulate power surges in the power grid. Results. The effective model of the power system consisting of three coupled generators has been proposed and numerically explored. It is shown that when the output power of the generator is changed, a regime which is resistant to variations of the initial conditions can be obtained. It is found that the functioning of such a system is less sensitive to various external factors. In particular, the mode with synchronization of phase velocities of all the oscillators is more resistant to power consumption changes, noise effects and transmission line breaks in comparison with the mode of synchronization with different phase velocities. Discussion. The study of the power grid of three coupled generators has demonstrated the behavior of the key modes of operation of the power grids and has shown the possibility for optimizing the network by adjusting the generator output power parameter. In this paper, we have considered the synchronization of power grid for only one model of the network. As a further study of networks, it is necessary to conduct a comparative analysis of synchronization modes of several power grid models.

Key words: power grids, synchronous machines, phase oscillators, synchronization of coupled generators, stability of dynamic modes.

DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-3-62-77

Reference: Arinushkin P.A., Anishchenko V.S. Analysis of synchronous modes of coupled oscillators in power grids. *Izvestiya VUZ, Applied Nonlinear Dynamics*, 2018, vol. 26, no. 3, pp. 62–77. DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-3-62-77

Введение и постановка задачи

Стабильность энергосетей является приоритетной задачей, требующей углубленных познаний как в области электротехники и конструирования, так и в области динамики процессов, протекающих между связанными электростанциями и потребителями. Увеличение роста потребителей влечет за собой рост источников электроэнергии, тем самым усложняя задачу обеспечения стабильной работы энергосетей. Более того, появление возобновляемых источников энергии формирует задачу интеграции такого рода объектов с более мощными энергосетями, содержащими турбогидрогенераторы [1]. Контроль энергосети производится за счет сбора информации и работы оператора, принимающего те или иные решения. Такой подход является менее эффективным по сравнению с непрерывным мониторингом сетей и компьютерной автоматизацией операций. Скорость принятия решений и адаптация сети в

аварийном режиме являются ключевыми факторами в решении проблем энергосетей. Аналогичным подходом к решению проблемы может служить компьютерное моделирование и оптимизация энергосетей, включающие в себя также набор стресстестов, позволяющий найти уязвимости и проверить устойчивость сети.

С появлением синхронных машин в качестве источника энергии электросети сформировались определенные задачи, направленные на анализ устойчивости и бесперебойности работы электрогенераторов. Синхронные машины являются базовыми элементами в конструкции электростанций. В связи с ограничением выходной мощности данных объектов и увеличением числа потребителей, возникает необходимость в дополнительных источниках электроэнергии. Таким образом, энергосеть представляет собой сложную систему, состоящую из множества генераторов и потребителей. Также стоит отметить особую роль возобновляемых источников энергии, которые дополнительно вносят неоднородность в топологию энергосетей [2]. Представление такого рода сетей затрудняет нахождение устойчивого состояния работы синхронных машин. Более того, формируется задача минимизации потерь и рационального распределения электроэнергии от разных источников между потребителями [3-5]. Таким образом, основными целями исследования энергосетей являются оптимизация распределения энергии между потребителями и устойчивость к аварийным режимам и другим негативным факторам, влияющим на работу генераторов электросети.

Рассмотрим простейшую модель энергосистемы [6], состоящую из эквивалентного генератора (синхронной машины), выходного узла генератора (трансформатора) и линии электропередач (рис. 1, a).

Введем условие, при котором линия передач связана с остальной частью массивной энергосистемы через шину бесконечной мощности, что позволит считать

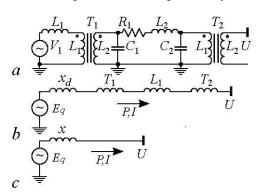


Рис. 1. Схема энергосети для одной синхронной машины: (a) принципиальная схема одномашинной системы; (b) упрощение принципиальной схемы при исключении влияния емкости и активного сопротивления линии передач; (c) принципиальная схема с обобщением всех индуктивностей в единую индуктивность

Fig. 1. Network layout for one synchronous machine: (a) schematic diagram of the one-machine system; (b) simplification of the circuit while eliminating the effect of capacitance and active resistance of the transmission line; (c) schematic diagram with a generalization of all inductances into a single inductance

модуль выходного напряжения и частоту этого напряжения неизменными. Упростим схему, исключая емкость и активное сопротивление линии передач (рис. 1, b). Рассмотрим синхронную ЭДС генератора E_q , связанную с источником напряжения U через эквивалентное индуктивное сопротивление x (рис. 1, c). Индуктивное сопротивление является суммой индуктивных сопротивлений всех элементов, входящих в эту схему:

$$x = x_d + x_{T1} + x_L + x_{T2},$$
 (1)

где x_d — переходное индуктивное сопротивление генератора; $x_{\rm T1}$ и $x_{\rm T2}$ — индуктивные сопротивления трансформаторов T_1 и T_2 , соответственно; $x_{\rm L}$ — индуктивное сопротивление линии передач.

Рассмотрим взаимосвязь мощности P и величин E_q и U на векторной диаграмме напряжений и токов (рис. 2).

Представим на диаграмме E_q и U в виде величин, зависящих от угла δ между ними. Дополним диаграмму активными $I_{\rm a}$ и реактивными $I_{\rm p}$ составляющими тока I и активными $I_{\rm a}jx$ и реактивными $I_{\rm p}jx$ составляющими падения напряжения Ijx на эквивалентном сопротивлении x. Из полученной диаграммы определим равенство

$$I_{\mathbf{a}}x = E_q \sin \delta. \tag{2}$$

Умножая обе части равенства (2) на величину 3U/x и учитывая, что трехфазная мощность равна $P=3UI_{\rm a}$, для однофазной мощности $P_{\rm e}$ имеем:

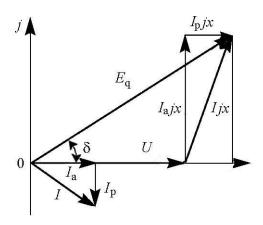


Рис. 2. Векторная диаграмма параметров синхронной машины

Fig. 2. Vector diagram of the synchronous machine parameters

$$P_{\rm e} = \frac{E_q U}{x} \sin \delta. \tag{3}$$

При постоянных значениях $E_q={\rm const}$ и $U={\rm const}$ выражение (2) является синусоидальной функцией активной мощности генератора, которая зависит от величины угла. Перепишем уравнение движения ротора (см. Приложение), добавив выражение для $P_{\rm e}$:

$$\frac{2H}{\omega_B}\ddot{\delta} + \frac{D}{\omega_B}\dot{\delta} = P_{\rm m} - \frac{E_q U}{x_d}\sin\delta. \tag{4}$$

Уравнение (4) представляет электромеханическое описание небаланса мощностей уравнения движения ротора (см. (П.4)), именно такое представление модели мы будем использовать при исследовании единичной или коллективной динамики синхронных машин.

1. Уравнения модели эффективной сети для цепочки трех связанных осцилляторов

Рассмотрим структуру и параметры сети, которая состоит из девяти элементов (рис. 3, a). Общее количество элементов определяется как $N=2n_g+n_l$, где n_g – это элементы, которые относятся к генераторам (так как генераторы всегда представлены через выходные узлы трансформаторов, общее количество генераторов умножается на два); n_l – общее количество элементов нагрузок. В исследуемой сети $n_g=3$, $n_l=3$.

Для упрощения дифференциальных уравнений воспользуемся методом эффективной сети, представленным в работе [7]. Основная идея данного метода состоит в устранении из рассмотрения нагрузок сети с условием, что мощность потребления нагрузок не изменяется с течением времени $P_i + jQ_i = \text{const.}$ Применяя данный метод к физической сети, мы получаем эффективную сеть, топология которой не содержит нагрузок. Это позволяет нам рассматривать исключительно взаимодействие

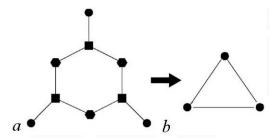


Рис. 3. Схема преобразования физической сети в модель эффективной сети: топология физической сети (a); топология модели эффективной сети (b); кругом обозначаются генераторы, квадратом – выходные узлы (трансформаторы) и шестиугольником обозначены постоянные нагрузки энергосети

Fig. 3. Scheme of transformation of a physical network to an effective network model: topology of the physical network (a); topology of the effective network model (b); the generators are denoted by a circle, the output nodes (transformers) – by a square and the constant power grid loads – by a hexagon

связанных генераторов (рис. 3, *b*). Трансформация такой сети производится с помощью матричного преобразования Крона первоначальной матрицы проводимости физической сети [8].

Алгоритм формирования матрицы проводимости описан в программном комплексе MATPOWER [9]. Линии передач между узлами физической сети рассматриваются в виде набора величин полных проводимостей. В нашем случае связь между узлами является неоднородной и учитывается при вычислении матрицы проводимости. Далее с помощью программного комплекса были сформированы параметры активной мощности генератора

 P_{gi} , реактивной мощности генератора Q_{gi} , напряжения выходного узла трансформатора V_i и его фазы ϕ_i . В результате получаем полную конфигурацию физической сети, необходимую для формирования упрощённой топологии, и параметры модели эффективной сети. Модель эффективной сети представим в следующем виде:

$$\frac{2H_i}{\omega_R}\ddot{\delta_i} + \frac{D_i}{\omega_R}\dot{\delta_i} = A_i^{\text{EN}} - \sum_{j=1, j \neq i}^{n_g} K_{ij}^{\text{EN}} \sin(\delta_i - \delta_j - \gamma_{ij}^{\text{EN}}), \quad i = 1, \dots, n_g \quad (5)$$

$$A_i^{\text{EN}} = P_{g,i} - |E_i|^2 G_{ii}^{\text{EN}}, \quad K_{ij}^{\text{EN}} = |E_i E_j Y_{ij}^{\text{EN}}|, \quad \gamma_{ij}^{\text{EN}} = \alpha_{ij}^{\text{EN}} - \frac{\pi}{2},$$
 (6)

где ω_R – опорная угловая частота для системы; H_i и D_i – константы инерции и затухания осцилляторов, соответственно; A_i – параметры собственных мощностей генераторов; параметры K_{ij} представляют собой силы динамических связей между осцилляторами i и j или максимумы взаимных мощностей генераторов и приемных систем; γ_{ij} – фазовые сдвиги между соответствующими осцилляторами. Все представленные параметры системы приведены в безразмерном виде. В качестве нормирующей величины используется базовая мощность $P_R=100$ MVA.

Опорной частотой системы была принята частота сети $\omega_R=50$ Hz или 314.1593 rad/s. Параметры инерционной постоянной и переходного индуктивного сопротивления генератора находятся приближенно по формулам $H_i=0.04P_i$ и $x_d=92.8P_i^{-1.3}$, соответственно. Далее вычислим обобщенный параметр диссипации как $D_i=(D_{\rm m}i+D_{\rm e}i+1/R_i)(\omega_R/P_R)$, пренебрежем в данной формуле механическим трением на валу ротора $(D_{\rm m}i=0)$ и электрическим паразитным эффектом обмоток статора генератора $(D_{\rm e}i=0)$. Остается рассмотреть параметр, регулирующий поведение опорной частоты генератора, который определяется как $R_i=0.02\omega_R/P_R=0.0628$. Подставляя это значение в обобщённый параметр диссипации, получаем значение $D_i=50$. Рассмотрим пример, в котором полностью отсутствует демпфирующий параметр, то есть $D_i=0$. Тогда опорная частота генератора не контролируется управляющей системой и ее значение может сильно отличаться от частоты

сети. В то же время ротор синхронной машины будет проявлять эффект самовозбуждения, который приведет к постоянному изменению скорости вращения ротора и, как правило, к выходу из устойчивого синхронного режима работы генератора [10].

Далее определим параметры правой части уравнения A_i , K_{ij} и γ_{ij} . Для этого необходимо преобразовать матрицу проводимости физической сети

$$Y_0 = \begin{pmatrix} Y^{gg} & Y^{gl} \\ Y^{lg} & Y^{ll} \end{pmatrix} \tag{7}$$

в матрицу эффективной сети Y^{EN} . Здесь Y^{gg} , Y^{gl} , Y^{lg} и Y^{ll} – наборы проводимостей элементов сети, сгруппированные относительно собственных и взаимных проводимостей линии передач генераторов и нагрузок. Дополним данную матрицу компонентом Y_d , состоящим из диагональных элементов переходных сопротивлений индуктивностей генераторов $(jx_d,1)^{-1}\cdots(jx_d,n_g)^{-1}$, где n_g – общее количество генераторов. Учитывая, что шунтирующая проводимость $Y^{l,i}$ эквивалентна нагрузкам $Y^{l,i}=(P^{l,i}-jQ^{li})/|V_i|^2$, находя компоненты \bar{Y}^{gg} и \bar{Y}^{ll} как $\bar{Y}^{gg}=Y^{gg}+Y^{li}$ и $\bar{Y}^{ll}=Y^{ll}+Y^{li}$, получим конечный вид матрицы:

$$Y_{0} = \begin{pmatrix} Y_{d} & -Y_{d} & 0\\ -Y_{d} & \bar{Y}^{gg} + Y_{d} & Y^{gl}\\ 0 & Y^{lg} & \bar{Y}^{ll} \end{pmatrix}.$$
 (8)

Наконец, определим искомые элементы эффективной матрицы, используя метод сокращения Крона, по формуле $Y^{\rm EN}=Y'(1+Y_d^{-1}Y')^{-1}$, где $Y'=\bar{Y}^{gg}-Y^{gl}(\bar{Y}^{ll})^{-1}Y^{lg}$. С помощью данной матрицы определим параметры для трех исследуемых узлов генераторов, полученных в ходе применения метода эффективной сети:

$$A_1^{\text{EN}} = P_{g1} - |E_1|^2 G_{11}^{\text{EN}}, \quad A_2^{\text{EN}} = P_{g2} - |E_2|^2 G_{22}^{\text{EN}}, \quad A_3^{\text{EN}} = P_{g3} - |E_3|^2 G_{33}^{\text{EN}}, \quad (9)$$

$$K_{12}^{\text{EN}} = |E_1 E_2 Y_{12}^{\text{EN}}|, \quad K_{13}^{\text{EN}} = |E_1 E_3 Y_{13}^{\text{EN}}|, \quad K_{23}^{\text{EN}} = |E_2 E_3 Y_{23}^{\text{EN}}|,$$
 (10)

$$\gamma_{12}^{\text{EN}} = \alpha_{12}^{\text{EN}} - \frac{\pi}{2}, \quad \gamma_{13}^{\text{EN}} = \alpha_{13}^{\text{EN}} - \frac{\pi}{2}, \quad \gamma_{23}^{\text{EN}} = \alpha_{23}^{\text{EN}} - \frac{\pi}{2}, \tag{11}$$

где P_{gi} – активная мощность i генератора; $G_{ii}^{\rm EN}$ – действительная часть диагональных элементов эффективной матрицы $Y^{\rm EN}$; E_i и E_j – синхронные ЭДС генераторов, участвующих в связи; $\alpha_{ij}^{\rm EN}$ – фазовый угол $|Y_{ij}^{\rm EN}|e^{j\alpha}$, участвующий в смещении рабочей точки угловой характеристики синхронной машины.

Окончательно получим систему уравнений рассматриваемой системы:

$$\begin{cases}
\frac{2H_1}{\omega_R} \ddot{\delta}_1 + \frac{D_1}{\omega_R} \dot{\delta}_1 = A_1^{\text{EN}} - K_{12}^{\text{EN}} \sin(\delta_1 - \delta_2 - \gamma_{12}^{\text{EN}}) - K_{13}^{\text{EN}} \sin(\delta_1 - \delta_3 - \gamma_{13}^{\text{EN}}), \\
\frac{2H_2}{\omega_R} \ddot{\delta}_2 + \frac{D_2}{\omega_R} \dot{\delta}_2 = A_2^{\text{EN}} - K_{12}^{\text{EN}} \sin(\delta_1 - \delta_2 - \gamma_{12}^{\text{EN}}) - K_{23}^{\text{EN}} \sin(\delta_2 - \delta_3 - \gamma_{23}^{\text{EN}}), \\
\frac{2H_3}{\omega_R} \ddot{\delta}_3 + \frac{D_3}{\omega_R} \dot{\delta}_3 = A_3^{\text{EN}} - K_{13}^{\text{EN}} \sin(\delta_1 - \delta_3 - \gamma_{13}^{\text{EN}}) - K_{23}^{\text{EN}} \sin(\delta_2 - \delta_3 - \gamma_{23}^{\text{EN}}).
\end{cases} (12)$$

2. Численные результаты

Перепишем систему уравнений (12) в следующем виде:

$$\begin{cases}
\dot{x}_{1} = y_{1}, \\
\dot{y}_{1} = (A_{1} - K_{12}\sin(x_{1} - x_{2} - \gamma_{12}) - K_{13}\sin(x_{1} - x_{3} - \gamma_{13}) - \frac{D_{1}}{\omega_{R}}y_{1})\frac{\omega_{R}}{2H_{1}}, \\
\dot{x}_{2} = y_{2}, \\
\dot{y}_{2} = (A_{2} - K_{12}\sin(x_{1} - x_{2} - \gamma_{12}) - K_{23}\sin(x_{2} - x_{3} - \gamma_{23}) - \frac{D_{2}}{\omega_{R}}y_{2})\frac{\omega_{R}}{2H_{2}}, \\
\dot{x}_{3} = y_{3}, \\
\dot{y}_{3} = (A_{3} - K_{13}\sin(x_{1} - x_{3} - \gamma_{13}) - K_{23}\sin(x_{2} - x_{3} - \gamma_{23}) - \frac{D_{3}}{\omega_{R}}y_{3})\frac{\omega_{R}}{2H_{3}}.
\end{cases}$$
(13)

Здесь x_n и y_n характеризуют, соответственно, фазы и скорости изменения фазы n осциллятора (n=1,2,3). Так как фазы рассматриваемых осцилляторов постоянно растут во времени, для исследования системы удобно использовать периодические координаты в промежутке от 0 до 2π .

Рассмотрим первый случай работы энергосистем, в котором синхронные машины находятся в состоянии равновесия, но условие синхронизации фазовых скоростей $y_1=y_2=y_3$ не выполняется. С помощью программы MATPOWER определим параметры физической сети, такие как полная выходная мощность генератора P_{gi}, Q_{gi} и полная мощность потребления нагрузки P_{li}, Q_{li} . Параметры выходной мощности генераторов, MW: $P_{g1}=71.64, Q_{g1}=27.05, P_{g2}=163, Q_{g2}=6.65, P_{g3}=85, Q_{g3}=-10.86$. Параметры полной мощности потребления нагрузок, MW: $P_{l1}=125, Q_{l1}=50, P_{l2}=90, Q_{l2}=30, P_{l3}=100, Q_{l3}=35$. Параметры модели эффективной сети: $A_1=-0.2276, A_2=1.1668, A_3=0.5635, K_{12}=1.7089, K_{13}=1.3361, K_{23}=1.184, \gamma_{12}=-0.1875, \gamma_{13}=-0.1694, \gamma_{23}=-0.1964, H_{1}=23.64, H_{2}=6.4, H_{3}=3.01, D_{1,2,3}=50, \omega_{R}=314.1593$.

В качестве инструмента анализа будем использовать метод стробоскопического сечения, который заключается в наблюдении угловой фазы $X_{2,3}$ осцилляторов относительно фазы выбранного осциллятора x_1 . Для этого выбирается некоторый мапеременной интервал значений x_1 на периодической плоскости $(0\leqslant x_1\leqslant 2\pi)$ вблизи $x_1=x_1^*$. Если траектория в проекции на x_1 попадает в этот интервал $(x_1^* - \varepsilon; x_1^* + \varepsilon)$ $(\varepsilon \approx 1 \cdot 10^{-6})$, то соответствующие значения $X_{2,3}$ наносятся на график временной зависимости X(t). Другими словами, когда фаза осциллятора попадает в выбранный интервал значений $(x_1^* - \varepsilon; x_1^* + \varepsilon)$, производится фиксация значений фаз остальных осцилляторов. Полученные значения фаз строятся в зависимости от времени $X_{2,3}(t)$. Анализируя полученные данные, мы также можем судить об изменении фазовой скорости исследуемых осцилляторов относительно заданного.

Положим далее значение $x_1^*=3$ и будем наблюдать за изменением фаз второго и третьего осцилляторов относительно первого, выполняя построения зависимостей их стробоскопических сечений от времени. В случае синхронизации фазы осцилляторов $X_{2,3}$ остаются неизменными в стробоскопическом сечении. При этом существует два типичных случая синхронизации осцилляторов: случай, когда скорости

изменения фаз всех осцилляторов равны, и случай, когда они находятся в кратном соотношении. На графике стробоскопического сечения режиму синхронизации соответствует прямая линия, параллельная оси абсцисс. Совпадение скоростей изменения фаз нужно проверять отдельно. При отсутствии синхронизации фазы в стробоскопическом сечении будут изменяться. Таким образом мы можем исследовать устойчивость режима синхронизации при помощи стробоскопического сечения.

Рассмотрим теперь поведение системы при изменении начальных условий. Рис. 4, a свидетельствует о том, что система (13) устанавливается в режим устойчивой работы энергосети с течением времени при начальных условиях $x_1=0,\,y_1=0,\,x_2=2.0944,\,y_2=0,\,x_3=4.1889,\,y_3=0.$ Можно задать начальные условия (например, $x_1=0.1745,\,y_1=0,\,x_2=2.0944,\,y_2=0,\,x_3=4.1889,\,y_3=0$ на рис. 4, b) так, что система не придет в режим устройчивой работы с течением времени. Приведем также временные реализации изменения скоростей фаз выбранного осциллятора для иллюстрации процесса установления устойчивой работы энергосети (рис. 4, c) и неустойчивой работы (рис. 4, d). По рисункам видно, что в случае устойчивого режима скорости постоянны, а в случае неустойчивого скорости меняются периодически.

Теперь произведем сравнение режимов работы энергосети для различных параметров осцилляторов. Для этого изменим значения выходной мощности. Увели-

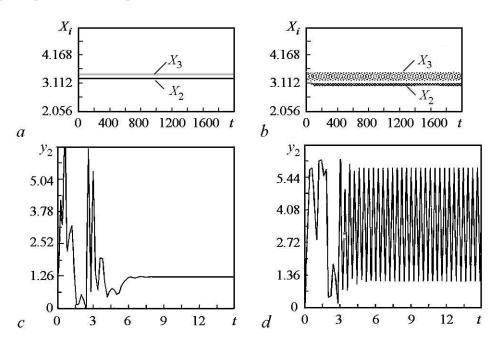


Рис. 4. Стробоскопическое сечение X(t) при $X_1^*=3$ для начальных условий $x_1=0,\ y_1=0,\ x_2=2.0944,\ y_2=0,\ x_3=4.1889,\ y_3=0$ (a), при изменении начальных условий для $x_1=0.1745$ (b). Временные реализации изменения фазовой скорости второго осциллятора при начальных условиях $x_1=0,\ y_1=0,\ x_2=2.0944,\ y_2=0,\ x_3=4.1889,\ y_3=0$ (c); и при изменении начальных условий для $x_1=0.1745$ (d)

Fig. 4. Stroboscopic section of X(t) for $X_1^*=3$ for initial conditions $x_1=0$, $y_1=0$, $x_2=2.0944$, $y_2=0$, $x_3=4.1889$, $y_3=0$ (a), when initial conditions change for $x_1=0.1745$ (b). The time series of the change in the phase velocity of the second oscillator for initial conditions $x_1=0$, $y_1=0$, $x_2=2.0944$, $y_2=0$, $x_3=4.1889$, $y_3=0$ (c), and when the initial conditions change for $x_1=0.1745$ (d)

чим выходную активную мощность второго генератора P_{g2} от 163 до 219 MW. Новые параметры модели эффективной сети будут выглядеть следующим образом: $A_1 = -0.2276, A_2 = 1.7238, A_3 = 0.5635, K_{12} = 1.7274, K_{13} = 1.333, K_{23} = 1.1982, \gamma_{12} = -0.1912, \gamma_{13} = -0.1726, \gamma_{23} = -0.1959, H_1 = 23.64, H_2 = 6.4, H_3 = 3.01, D_{1,2,3} = 50, \omega_R = 314.1593$. Проведем исследование при наборе начальных условий, рассматриваемых выше и приводящих к устойчивому режиму. Анализ показал, что система остается в устойчивом режиме работы фазовых осцилляторов при изменении активной мощности. Более того, режим синхронизации не нарушается даже при изменении начальных условий (рис. 5, a). Временная реализация (рис. 5, b) показывает, что фазовые скорости осцилляторов за очень короткий промежуток времени становятся постоянными и равными между собой $y_1 = y_2 = y_3 = 1.1769$. То есть в системе связанных осцилляторов происходит синхронизация.

Для сравнения собственных частот осцилляторов рассмотрим их девиацию относительно опорной частоты 50 Hz. Произведем вычисления собственных частот для обоих режимов работы энергосистемы по формуле $f_i=(1+A_i/D_i)\omega_R/(2\pi)$. Для первого рассматриваемого случая синхронизации с разными скоростями эти частоты имели следующие значения: $f_1=49.77,\ f_2=51.17,\ f_3=50.56$ Hz. Для последнего синхронного режима с одинаковыми скоростями $f_1=49.77,\ f_2=51.72,\ f_3=50.56$ Hz. Важно заметить, что в обоих случаях частоты f_1 и f_3 соответствующих осцилляторов были выбраны близкими к опорной частоте, тогда как частота f_2 второго осциллятора отличается значительно. Увеличение выходной мощности генератора привело к увеличению его собственной частоты вращения. Такой рост частоты, вообще говоря, вызывает дополнительное выделение тепла в синхронной машине. При проектировании подобной сети нужно обращать внимание на этот факт, поскольку это может вызвать перегрев генератора.

Проведем несколько различных тестов, чтобы показать более детально различия между двумя синхронными режимами работы энергосетей. Во-первых, рассмот-

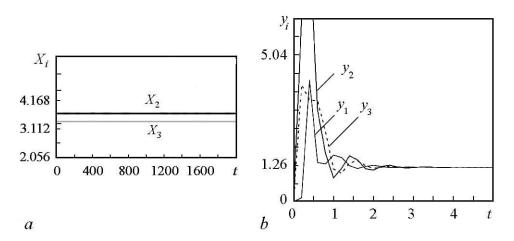


Рис. 5. Стробоскопическое сечение X(t) при $X_1^*=3$ для различных начальных условий (a), временная реализация изменения фазовой скорости для различных начальных условий (b)

Fig. 5. Stroboscopic section X(t) for $X_1^* = 3$ for any initial conditions (a), time series of the phase velocity change for any initial conditions (b)

рим систему при воздействии аддитивного белого гауссовского шума. Добавим шум в каждое уравнение системы (13) и получим следующие уравнения:

$$\begin{cases} \dot{x}_{1} = y_{1}, \\ \dot{y}_{1} = (A_{1} - K_{12} \sin(x_{1} - x_{2} - \gamma_{12}) - K_{13} \sin(x_{1} - x_{3} - \gamma_{13}) - \frac{D_{1}}{\omega_{R}} y_{1} + \sqrt{2\sigma_{1}} \xi_{1}(t)) \frac{\omega_{R}}{2H_{1}}, \\ \dot{x}_{2} = y_{2}, \\ \dot{y}_{2} = (A_{2} - K_{12} \sin(x_{1} - x_{2} - \gamma_{12}) - K_{23} \sin(x_{2} - x_{3} - \gamma_{23}) - \frac{D_{2}}{\omega_{R}} y_{2} + \sqrt{2\sigma_{2}} \xi_{2}(t)) \frac{\omega_{R}}{2H_{2}}, \\ \dot{x}_{3} = y_{3}, \\ \dot{y}_{3} = (A_{3} - K_{13} \sin(x_{1} - x_{3} - \gamma_{13}) - K_{23} \sin(x_{2} - x_{3} - \gamma_{23}) - \frac{D_{3}}{\omega_{R}} y_{3} + \sqrt{2\sigma_{3}} \xi_{3}(t)) \frac{\omega_{R}}{2H_{3}}, \\ (14) \end{cases}$$

где σ_i – интенсивность шума, ξ_i – независимый источник шума.

Выберем для воздействия шума на систему промежуток времени от $t_1=500$ до $t_2=1500$ ($\sigma_{1,2,3}=\sigma_0$ при $T\in[t_1,t_2]$, и $\sigma_{1,2,3}=0$ при $t\notin[t_1,t_2]$) и исследуем режимы при высокой интенсивности шума $\sigma_{1,2,3}\sim0.1$. На рис. 6, a для случая

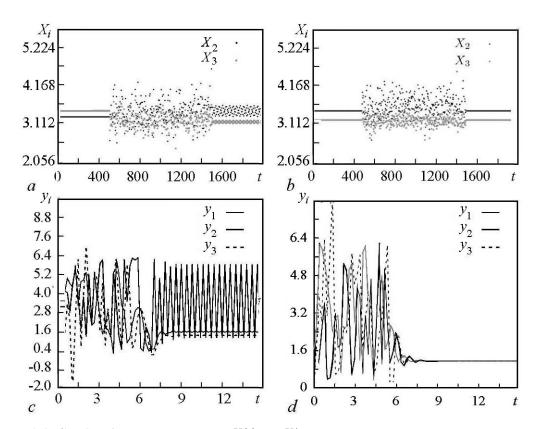


Рис. 6. (a,b) – Стробоскопические сечения X(t) при $X_1^*=3$ для устойчивых режимов с различными и одинаковыми фазовыми скоростями, соответственно, черные точки – стробоскопическое сечение для X_2 , серые – для X_3 , (c,d) – временные реализации фазовых скоростей устойчивых режимов с различными и одинаковыми фазовыми скоростями, соответственно

Fig. 6. (a, b) – Stroboscopic sections X(t) for $X_1^* = 3$ for synchronous modes with different and identical phase velocities, respectively, black dots – stroboscopic section for X_2 , gray – for X_3 , (c, d) are the time series of the phase velocities of stable regimes with different and identical phase velocities, respectively

устойчивого режима с различающимися фазовыми скоростями видно, что после отключения воздействия шума возможна потеря устойчивости осцилляторов. Данное явление можно наблюдать и при достаточно низких интенсивностях шума. При этом с увеличением шума в системе вероятность потери устойчивого режима возрастает. Синхронный режим показал очень высокую устойчивость к шуму (рис. 6, b). Отметим, что этот режим является устойчивым к воздействию шума даже в начальный период времени (рис. 6, d), когда фазовая скорость претерпевает значительные изменения, но стремится в равновесное состояние. Воздействие шума в начальный момент времени на синхронный режим с разными фазовыми скоростями влечет за собой потерю устойчивости в осцилляторах (рис. 6, c).

Интересно также рассмотреть поведение системы при воздействии на нее прямоугольного импульса, который моделирует скачок мощности в энергосети. Будем воздействовать импульсом на второе уравнение рассматриваемой системы для обоих синхронных режимов (с различным поведением фазовых скоростей). Уравнения системы (13) примут вид:

$$\begin{cases} \dot{x_1} = y_1, \\ \dot{y_1} = (A_1 - K_{12}\sin(x_1 - x_2 - \gamma_{12}) - K_{13}\sin(x_1 - x_3 - \gamma_{13}) - \frac{D_1}{\omega_R}y_1)\frac{\omega_R}{2H_1}, \\ \dot{x_2} = y_2, \\ \dot{y_2} = (A_2 - K_{12}\sin(x_1 - x_2 - \gamma_{12}) - K_{23}\sin(x_2 - x_3 - \gamma_{23}) - \frac{D_2}{\omega_R}y_2 + f_1(\tau))\frac{\omega_R}{2H_2}, \\ \dot{x_3} = y_3, \\ \dot{y_3} = (A_3 - K_{13}\sin(x_1 - x_3 - \gamma_{13}) - K_{23}\sin(x_2 - x_3 - \gamma_{23}) - \frac{D_3}{\omega_R}y_3)\frac{\omega_R}{2H_3}, \end{cases}$$

где $f_1(\tau)$ – прямоугольный импульс с заданной амплитудой и длительностью. Установим длительность импульса $\tau=1000$, время включения импульса t=500 и амплитуду воздействия A=1.9.

При воздействии прямоугольным импульсом на систему, в которой фазовые скорости не равны между собой, система теряет устойчивый режим и фазовые скорости всех осцилляторов меняются по периодическому закону. После прекращения воздействия система не восстанавливается в своё первоначальное состояние и продолжает работать в асинхронном режиме (рис. 7, a). Возмущение системы в синхронном режиме приводит к иному поведению осцилляторов. На начальном этапе времени возмущения система претерпевает короткую пертурбацию фазовых скоростей и переходит в новое состояние равновесия. То есть формируется новый синхронный режим (рис. 7, b). После прекращения воздействия на систему энергосеть переходит в первоначальный устойчивый режим работы.

В реальных энергосетях необходимо учитывать случаи разрыва связей между генераторами. Моделируя такую ситуацию, будем устранять одну из связей в системе уравнений (13). Устраним связь в промежутке времени от $t_1=500$ до $t_2=1500$, демонстрируя таким образом аварийный режим, обусловленный неисправностью в линии передач. Момент включения слагаемого связи соответствует восстановлению линии передач.

Как видно из рис. 8, оба устойчивых режима проявили себя одинаковым образом: при устранении одной из связей осцилляторы переходят на новый устойчивый режим и после восстановления связи возвращаются обратно в прежнее устойчивое состояние. Также было обнаружено, что при отсутствии связей K_{12} или K_{13} (рис. 8, a, c) происходит синхронизация фазовых скоростей. То есть режим с одинаковыми фазовыми скоростями приходит на смену исходному на время отсутствия одной из рассматриваемых связей.

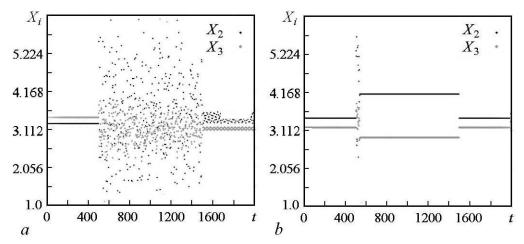


Рис. 7. Стробоскопические сечения X(t) для $X_1^*=3$ для устойчивых режимов в случае различных (a) и одинаковых (b) фазовых скоростей. Черным обозначены точки стробоскопического сечения X_2 , серым – X_3

Fig. 7. Stroboscopic sections X(t) for $X_1^* = 3$ for stable regimes in the case of different (a) and identical (b) phase velocities. Black points of the stroboscopic section mark X_2 , gray points $-X_3$

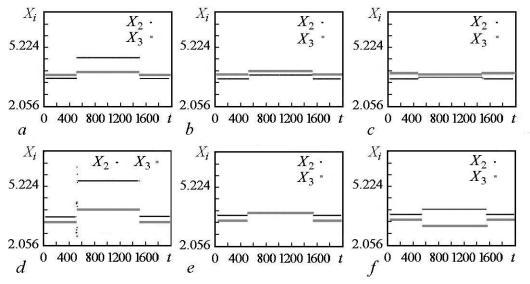


Рис. 8. Стробоскопические сечения X(t) для $X_1^*=3$ для устойчивого режима с различными фазовыми скоростями $(a,\ b,\ c)$ и одинаковыми $(d,\ e,\ f)$ при удалении следующих связей: K_{12} $(a,\ d)$; K_{13} $(b,\ e)$; K_{23} $(c,\ f)$. Черным обозначены точки стробоскопического сечения X_2 , а серым – X_3

Fig. 8. Stroboscopic sections X(t) for $X_1^*=3$ for synchronous operation with different (a,b,c) and identical (d,e,f) phase velocities when removed the next links: K_{12} (a,d); K_{13} (b,e); K_{23} (c,f). Black dots denote the stroboscopic section for X_2 , and gray ones for X_3

Заключение

Рассмотрена модель эффективной сети, которая позволяет сфокусировать внимание на поведении связанных между собой генераторов, исключая при этом моделирование сложного поведения нагрузки. Цель исследования заключается в анализе поведения устойчивых режимов энергосети в присутствии различного рода внешних факторов. Во-первых, рассматриваемая модель может демонстрировать различные режимы работы в зависимости от начальных условий. Показано, что при изменении выходной мощности генератора можно получить систему, устойчивую к начальным условиям. Кроме того, такая система оказывается более грубой к внешним факторам. Во-вторых, рассматривается влияние на два типичных режима – синхронного и несинхронного – различных внешних факторов. Исследовано влияние аддитивного белого шума и прямоугольного импульса, включенных на заданном интервале времени. Кроме того, изучено влияние изменения топологии на установившиеся режимы.

Таким образом, энергосеть в синхронном режиме показывает независимость динамики от начальных условий и устойчивость к негативным факторам сети. Тогда как энергосеть в устойчивом режиме с различными фазовыми скоростями оказывается негрубой по отношению ко всем рассмотренным факторам. Стоит также обратить внимание на девиацию собственных частот генераторов относительно опорной частоты. При разности частот более ± 2 Hz в синхронной машине происходит повышенное накопление тепла, что приводит к выходу из строя генератора и уменьшению срока его эксплуатации. В исследованных устойчивых режимах разность частот находится в пределах не более 4% от опорной частоты 50 Hz. Таким образом, при исследовании энергосети трех связанных генераторов продемонстрировано поведение ключевых режимов работы энергосетей и произведена оптимизация сети посредством регулировки параметра выходной мощности генератора.

Приложение

Рассмотрим уравнение движения ротора, предложенное в статье [7]. Чтобы вывести уравнение движения, определяющее динамику такого генератора, запишем следующее уравнение для скорости вращения ротора (эта скорость равна крутящему моменту, действующему на ротор):

$$J\ddot{\delta} = \bar{T}_{\rm m} - D_{\rm m}\omega - \frac{1}{R}\Delta\omega - D_{\rm e}\Delta\omega - T_{\rm e}, \tag{\Pi.1}$$

где J представляет собой момент инерции, [kg·m²]; δ является углом ротора относительно синхронной оси вращающегося на опорной частоте ω_R , [rad/s]; $\bar{T}_{\rm m}$ – механический момент привода ротора, [N·m]; $D_{\rm m}$ является коэффициентом затухания механического трения, [N·m·s]; ω – угловая частота ротора, [rad/s]; R – параметр регулирования, [rad/ (N·m·s)], характеризующий пропорциональное управление частотой на регуляторе при отклонении частоты $\Delta\omega=\omega-\omega_R$; $D_{\rm e}$ – коэффициент затухания, [N·m·s], характеризующий электрический эффект обмоток генератора; $T_{\rm e}$ – замедляющий крутящий момент, связанный с электрической

нагрузкой сети. Учитывая отклонение частоты $\omega - \omega_R = \Delta \omega$, мы можем переписать уравнение (П. 1) как

$$J\ddot{\delta} + \bar{D}\delta = \bar{T}_{\rm m} - T_{\rm e},\tag{\Pi.2}$$

где $\bar{D}=D_{\rm m}+D_{\rm e}+1/R$ – потери, создаваемые трением на опорной частоте, а $\bar{T}_{\rm m}=T_{\rm m}-D_{\rm m}\omega_R$ – чисто механический момент. Умножая обе стороны на ω и учитывая тот факт, что крутящий момент в ньютон-метрах, умноженный на угловую скорость в радианах в секунду, дает мощность в ваттах, запишем уравнение (П.2) в терминах мощности:

$$J\omega_R \ddot{\delta} + \bar{D}\omega_R \dot{\delta} = \frac{\omega_R}{\omega} (T_m \omega - T_e \omega) \approx \bar{P}_m - \bar{P}_e.$$
 (II.3)

Далее мы представим правую часть уравнения через мощность: $\bar{P}_{\rm m}=T_{\rm m}\omega$ и $\bar{P}_{\rm e}=T_{\rm e}\omega$. Затем предположим, что отношение ω_R/ω почти равно единице, то есть частота ω генератора близка к опорной частоте ω_R . Теперь разделим обе части уравнения (П.3) на номинальную мощность P_R (используемую в качестве базовой мощности), чтобы произвести нормировку величин $P_{\rm m}$ и $P_{\rm e}$ к безразмерному виду. Тогда множитель $J\omega_R$ становится равным $2H/\omega_R$, откуда имеем постоянную инерции $H=W/P_R$ (в секундах) и кинетическую энергию ротора $W=J\omega_R^2/2$ (в джоулях). Коэффициент демпфирования определяется как $D=\omega_R/P_R$ (в секундах). В конечном итоге получаем искомое уравнение, известное как уравнение качания (swing equation):

$$\frac{2H}{\omega_R}\ddot{\delta} + \frac{D}{\omega_R}\dot{\delta} = P_{\rm m} - P_{\rm e},\tag{\Pi.4}$$

которое является основным уравнением движения для генератора. Переменная $P_{\rm m}$ представляет собой чисто механическую мощность, подаваемую на ротор, тогда как $P_{\rm e}$ – электрическая мощность, которая потребляется сетью и включает в себя переменные, явно зависящие от δ , и переменные состояния других генераторов и нагрузок в сети. В литературе по энергосистемам [12] особая роль уделяется моделированию динамического поведения внутреннего магнитного потока генератора, которое оказывает значительное влияние на величину $P_{\rm e}$. Также следует учитывать нелинейную динамику регулятора, который производит контроль частоты генератора и управляет величиной напряжения возбуждающей обмотки ротора. Таким образом, величина $P_{\rm e}$ является динамической величиной, которую необходимо учитывать при моделировании энергосистем.

Библиографический список

- 1. Stadler I. Power grid balancing of energy systems with high renewable energy penetration by demand response // Utilities Policy. 2008. Vol. 16, no. 2. p. 90–98.
- 2. Anvari M., Lohmann G., Wächter M. Short term fluctuations of wind and solar power systems // New Journal of Physics. 2016. Vol. 18, no. 6. p. 063027.
- 3. *Menck P.J.*, *Heitzig J.* How dead ends undermine power grid stability // Nature communications. 2014. Vol. 5. p. 3969.
- 4. *Pedersen R., Findrik M., Sloth C.* Network condition based adaptive control and its application to power balancing in electrical grids // Sustainable Energy, Grids and Networks. 2017. Vol. 10. p. 118–127.

- 5. Rohden M., Witthaut D., Timme M. Curing critical links in oscillator networks as power grid models // New Journal of Physics. 2017. Vol. 19, no. 1. p. 013002.
- 6. *Усольцев А.А.* Общая электротехника: Учебное пособие. СПб: СПбГУ. ИТМО. 2009. 301 с.
- 7. *Nishikawa T., Motter A.E.* Comparative analysis of existing models for power-grid synchronization // New Journal of Physics. 2015. Vol. 17, no. 1. p. 015012.
- 8. *Dorfler F., Bullo F.* Kron reduction of graphs with applications to electrical networks // IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. 2013. Vol. 60, no. 1. p. 150–163.
- 9. Zimmerman R.D., Murillo-Sánchez C.E., Thomas R.J. MATPOWER: Steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education // IEEE Transactions on power systems. 2011. Vol. 26, no. 1. p. 12–19.
- 10. *Мелешкин Г.А., Меркурьев Г.В.* Устойчивость энергосистем. Теория: Монография. СПб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики». 2006. 350 с.
- 11. Rohden M., Sorge A., Witthaut D. Impact of network topology on synchrony of oscillatory power grids // Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. 2014. Vol. 24, no. 1. p. 013123.
- 12. *Хрущев Ю.В., Заподовников К.И., Юшков А.Ю.* Электромеханические переходные процессы в электро-энергетических системах: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010.

References

- 1. Stadler I. Power grid balancing of energy systems with high renewable energy penetration by demand response. *Utilities Policy*, 2008, vol. 16, no. 2, pp. 90–98.
- 2. Anvari M., Lohmann G., Wächter M. Short term fluctuations of wind and solar power systems. *New Journal of Physics*, 2016, vol. 18, no. 6, p. 063027.
- 3. Menck P.J., Heitzig J. How dead ends undermine power grid stability. *Nature communications*, 2014, vol. 5, p. 3969.
- 4. Pedersen R., Findrik M., Sloth C. Network condition based adaptive control and its application to power balancing in electrical grids. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2017, vol. 10, pp. 118–127.
- 5. Rohden M., Witthaut D., Timme M. Curing critical links in oscillator networks as power grid models. *New Journal of Physics*, 2017, vol. 19, no. 1, p. 013002.
- 6. Usoltsev A.A. General Electrical Engineering: Textbook. St. Petersburg: St. Petersburg State University. ITMO. 2009. 301 s. (in Russian).
- 7. Nishikawa T., Motter A.E. Comparative analysis of existing models for power-grid synchronization. *New Journal of Physics*, 2015, vol. 17, no. 1, p. 015012.
- 8. Dorfler F., Bullo F. Kron reduction of graphs with applications to electrical networks. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2013, vol. 60, no. 1, pp. 150–163.
- 9. Zimmerman R.D., Murillo-Sánchez C.E., Thomas R.J. MATPOWER: Steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education. *IEEE Transactions on power systems*, 2011, vol. 26, no. 1, pp. 12–19.

- 10. Meleshkin G.A., Merkuriev G.V. Stability of Power Systems. Theory: Monograph. SPb.: NOU «Center for the Training of Energy Personnel», 2006, 350 s. (in Russian).
- 11. Rohden M., Sorge A., Witthaut D. Impact of network topology on synchrony of oscillatory power grids. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 2014, vol.24, no.1, p.013123.
- 12. Khrushchev Yu.V., Zapodovnikov K.I., Yushkov A.Yu. Electromechanical Transitive Processes in Electro-Energy Systems: Training manual. Tomsk: Publishing house of Tomsk Polytechnic University. 2010 (in Russian).



Аринушкин Павел Алексеевич – родился в Ртищеве Саратовской обл. (1994), окончил Саратовский государственный университет им. Чернышевского (2017). Имеет диплом бакалавра по направлнению 03.03.03 «Радиофизика» и диплом магистра по направлению 03.04.03 «Радиофизика». Аспирант кафедры радиофизики и нелинейной динамики. Круг научный интересов – теория колебаний и волн, мемристоры и мемристорные цепи, мультифрактальные множества, энергосети и синхронные машины.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83 Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского E-mail: arinushkin.pavel@gmail.com



Анищенко Вадим Семенович – родился в Саратове (1943). Окончил физический факультет СГУ (1966). Защитил диссертации на степень кандидата (1970) и доктора (1986) физико-математических наук по специальности радиофизика. С 1988 года – заведующий кафедрой радиофизики и нелинейной динамики, профессор СГУ. Специализируется в области теории нелинейных колебаний, статистической радиофизики, теории динамического хаоса и нелинейной динамики. Автор 420 научных статей и 24 монографий и учебников, 6 из которых были опубликованы на английском языке. Приглашался на работу профессором Гумбольдтского университета Берлина для чтения курса лекций по теории динамического хаоса (1987), а также в ряд университетов США, Англии, Испании, Германии,Польши и др. для научной работы. Заслуженный деятель науки РФ (1995), академик РАЕН (1995), почетный профессор СГУ (2012), лауреат премии Международного научного фонда им. Александра фон Гумбольдта (1999), Соросовский профессор (1994–2000).

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83 Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского E-mail: wadim@info.sgu.ru Новое в прикладной физике



УДК 621.385.69

АВТОМОДУЛЯЦИОННЫЕ И ХАОТИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ГЕНЕРАЦИИ В ДВУХРЕЗОНАТОРНОМ ГИРОКЛИСТРОНЕ С ЗАПАЗДЫВАЮЩЕЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ*

 $P.\ M.\ Pозенталь^1,\ O.\ Б.\ Исаева^2,\ H.\ C.\ Гинзбург^1,$ И. В. $3omoвa^1,\ A.\ C.\ Cepzees^1,\ A.\ \Gamma.\ Poжнеs^2,\ B.\ П.\ Тараканов^{3,4}$

¹ Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН Россия, 603950 Н. Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, д. 46

²Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, д. 38

 3 Объединенный институт высоких температур РАН, Россия, 125412 Москва, ул. Ижорская, д. 13 4 НИЯУ «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31

E-mail: rrz@appl.sci-nnov.ru, isaevao@rambler.ru, ginzburg@appl.sci-nnov.ru, zotova@appl.sci-nnov.ru, sergeev@appl.sci-nnov.ru, rozhnevag@info.sgu.ru, karat@tarak.msk.su
Поступила в редакцию 26.03.2018

Тема и цель исследования. Исследована динамика двухрезонаторного гироклистрона диапазона 93 ГГц с запаздывающей обратной связью. Проведен сравнительный анализ динамических режимов, получаемых в численном эксперименте как на основе усредненных уравнений, так и в рамках моделирования методом «крупных частиц» с помощью программного комплекса KARAT. Методы. Для выявления динамических свойств, полученных при моделировании режимов, применен спектр статистических методов теории хаоса: расчет фрактальных размерностей, показателей Ляпунова и др. Для нахождения ляпуновских показателей использован способ оценки их по временным рядам. Этот способ крайне удобен, так как требует лишь одной скалярной временной реализации в фиксированной точке пространственно распределенной системы, например, для амплитуды выходного излучения. Кроме того, способ воспроизводит обработку данных, которые могут быть получены в натурном эксперименте. Результаты. Анализ полученных при численном моделировании временных рядов показал существование гиперхаотических режимов генерации для обоих подходов к моделированию гироклистрона. Таким режимам отвечают аттракторы с высокой корреляционной размерностью и более чем одним положительным ляпуновским показателем. Обнаружено, что указанные гиперхаотические режимы возникают, например, с увеличением коэффициента передачи для цепи обратной связи. Многомодовый «сильный» гиперхаос развивается из хаоса, возникающего в результате последовательности бифуркаций удвоения периода регулярной автомодуляции интенсивности выходного излучения гироклистрона. Обсуждение. Хаотические генераторы и шумотроны СВЧ диапазона крайне ценны для различных технических приложений, например, в радиолокации и широкополосной коммуникации. В связи с этим, получение многомодовых, хаотических и гиперхаотических режимов генерации гироусилителей является приоритетным направлением СВЧ электроники. Предложенные в работе методы моделирования демонстрируют сложные режимы для гироклистрона. Описанные подходы к анализу генераций усилителя могут быть в будущем применены в натурном эксперименте.

^{*}Статья написана по материалам доклада на XVII международной зимней школе-семинаре по радиофизике и электронике СВЧ. Россия, Саратов, 5–10.02.2018

Ключевые слова: гироклистрон, запаздывающая обратная связь, развитый хаос.

DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-3-78-98

Образец цитирования: Розенталь Р.М., Исаева О.Б., Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Сергеев А.С., Рожнев А.Г., Тараканов В.П. Автомодуляционные и хаотические режимы генерации в двухрезонаторном гироклистроне с запаздывающей обратной связью // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2018. Т. 26, № 3. С. 78–98. DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-3-78-98

AUTOMODULATION AND CHAOTIC REGIMES OF GENERATION IN A TWO-RESONATOR GYROKLYSTRON WITH DELAYED FEEDBACK

R. M. Rozental¹, O. B. Isaeva², N. S. Ginzburg¹, I. V. Zotova¹, A. S. Sergeev¹, A. G. Rozhnev², V. P. Tarakanov^{3,4}

¹Federal Research Center The Institute of Applied Physics of RAS 46, Ul'yanova str., Box-120, 603950 N. Novgorod, Russia

²Kotelnikov Institute of Radio-Engineering and Electronics of RAS, Saratov Branch 38, Zelenaya str., 410019 Saratov, Russia

³Joint Institute for High Temperatures of RAS

13, Izhorskaya str., build 2, 125412 Moscow, Russia

⁴National Research Nuclear University «MEPhI»

31, Kashirskoye avenue, 115409 Moscow, Russia

E-mail: rrz@appl.sci-nnov.ru, isaevao@rambler.ru, ginzburg@appl.sci-nnov.ru, zotova@appl.sci-nnov.ru, sergeev@appl.sci-nnov.ru, rozhnevag@info.sgu.ru, karat@tarak.msk.su Received 26.03.2018

Topic and aim. The dynamics of a double-resonator gyroklystron of the 93 GHz band with delayed feedback is studied. A comparative analysis of the dynamical regimes of amplifier generation obtained in the numerical experiment both on the basis of averaged equations and in the framework of direct numerical simulation by the «particle-in-cells» method using the KARAT code is carried out. **Method**. To identify the dynamical properties of system behavior we apply the spectrum of of statistical methods from the theory of chaos: the calculation of fractal dimensions, Lyapunov exponents, etc. To find the Lyapunov exponents we apply a method of estimating them from dynamical time series. This method is extremely convenient, since it requires only the single scalar time realization in a fixed in space point of spatially distributed system, for example, the amplitude of output radiation. Moreover, this method imitates the processing of the data that can be obtained in natural experiment. Results. The analysis of the time series obtained in numerical simulation showed the existence of hyperchaotic regimes for both approaches to the modeling of gyroklystron. Such regimes correspond to attractors with a high correlation dimension and more than one positive Lyapunov exponents. It was found that mentioned hyperchaotic regimes occur, for example, with an increase in the transmission factor for the feedback loop. The multimode «strong» hyper-chaos arises from chaos resulting from the sequence of period doubling bifurcations of the periodic automodulation mode intensity of output radiation gyroklystron. Discussion. UHF chaotic and noise generators are extremely important for various technical applications. One can note, for example, radars and wideband communication. Thus, the production of multimode, chaotic and hyper-chaotic regimes of gyro-amplifiers generation is a priority branch of microwave electronics. Being proposed in this paper the mathematical modeling methods allow to detect complex regimes for gyroklystron. Being proposed in this paper the approaches to amplifier generations analysis can be applied in a physical experiment.

Key words: gyroklystron, delayed feedback, strong chaos.

DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-3-78-98

Reference: Pozental R.M., Isaeva O.V., Ginzburg N.S., Zotova I.V., Sergeev A.S., Rozhnev A.G., Tarakanov V.P. Automodulation and chaotic regimes of generation in a two-resonator gyroklystron with delayed feedback. *Izvestiya VUZ, Applied Nonlinear Dynamics*, 2018, vol. 26, no. 3, pp. 78–98. DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-3-78-98

Введение

Гироклистроны относятся к одному наиболее хорошо исследованному типу гироусилителей, характеризующемуся комбинацией высокого КПД и коэффициента усиления [1–3]. Так, в диапазоне 95 ГГц в гироклистронах достигнута выходная мощность более 300 кВт [4], а в диапазоне 35 ГГц – до 12 МВт [5]. В настоящее время ведутся разработки, направленные на дальнейшее повышение выходной мощности и рабочей частоты данных приборов [6, 7]. При этом определенный интерес представляет получение многочастотных, в том числе хаотических режимов генерации, что может быть достигнуто введением внешней запаздывающей обратной связи. Подобный метод широко используется применительно к обычным клистронам, начиная с работы [8] вплоть до настоящего времени [9, 10].

В рамках приближения фиксированной продольной структуры высокочастотного поля нестационарные режимы работы гироклистрона с запаздывающей обратной связью исследовались в работах [11,12]. Вместе с тем, как будет показано ниже, модель с самосогласованной продольной структурой оказывается более адекватной для описания развитых хаотических режимов генерации. В рамках такой модели (см. [13]) пространственно-временная эволюция амплитуды поля описывается параболическим уравнением, дополненным усредненными уравнениями движения частиц. Этот подход позволяет описать усиление и генерацию многочастотных широкополосных сигналов с учетом реальной дисперсии электродинамической системы, конечности полосы усиления, а также эффектов нелинейного насыщения.

1. Нестационарная самосогласованная модель гироклистрона с дифракционным вводом и выводом излучения

Рассмотрим процесс электронно-волнового взаимодействия в гироклистроне, ввод и вывод излучения в котором осуществляется дифракционным образом, что соответствует целому ряду экспериментально реализованных систем [14–16]. Будем считать, что пространство взаимодействия гироклистрона длиной $z_{\rm out}$ включает в себя входной и выходной резонаторы, а также пространство дрейфа между ними (рис. 1). Профиль резонаторов и пространства дрейфа опишем функцией r(z). Будем

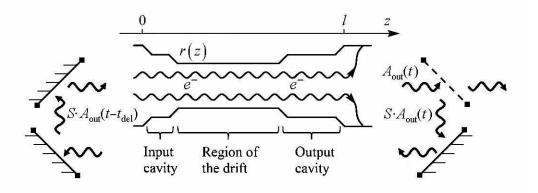


Рис. 1. Модель двухрезонаторного гироклистрона с дифракционным вводом/выводом излучения и цепью запаздывающей обратной связи

Fig. 1. Model of a two-cavity gyroklystron with diffraction input/output of radiation and a delayed feedback

считать также, что в обоих резонаторах возбуждается одна и та же мода ${\rm TE}_{mp}$ на частоте близкой к частоте отсечки.

В этом случае процесс электронно-волнового взаимодействия на основной гармонике циклотронного резонанса можно описать следующей системой уравнений [13]:

$$i\frac{\partial^{2} a}{\partial Z^{2}} + \frac{\partial a}{\partial \tau} + (\sigma(Z) + i\delta(Z)) a = \frac{I_{0}}{2\pi} \int_{0}^{2\pi} p d\theta_{0},$$

$$\frac{\partial p}{\partial Z} + \frac{g^{2}}{4} \frac{\partial p}{\partial \tau} + ip \left(\Delta_{H} - 1 + |p|^{2}\right) = -a.$$
(1)

Здесь использованы следующие нормированные переменные:

$$\tau = \frac{\omega_c t \beta_{\perp 0}^4}{8\beta_{||0}^2}, \qquad Z = \frac{\beta_{||0}^2 \omega_c z}{2\beta_{||0} c}, \qquad p = \frac{(p_x + i p_y) e^{-i\omega_c t + i(m-1)\phi}}{p_{\perp 0}},$$

$$a = \frac{eAJ_{m-1}(R_0 \omega_c / c)}{mc\omega_c \gamma_0 \beta_{\perp 0}^3}, \qquad I_0 = 16 \frac{eI_b}{mc^3} \frac{\beta_{||0}}{\beta_{\perp 0}^6 \gamma_0} \frac{J_{m-1}^2(R_0 \omega_c / c)}{(\mathbf{v}_p^2 - m^2) J_m^2(\mathbf{v}_p)}.$$

 I_b — ток электронного пучка, J_m — функция Бесселя, \mathbf{v}_p — p-й корень уравнения $J_m'(\mathbf{v})=0$, R_0 — радиус инжекции винтового электронного пучка, $g=\beta_{\perp 0}/\beta_{||0}$ — питч-фактор, $V_{\perp 0}=\beta_{\perp 0}c$ и $V_{||0}=\beta_{||0}c$ — начальные значения поперечной и продольной скорости электронов, $\Delta_H=2(\omega_c-\omega_H)/\omega_c\beta_{\perp 0}^2$ — параметр расстройки между критической частотой рабочей моды и невозмущенным значением гирочастоты. Функция $\delta(Z)=8\beta_{||0}^2(\omega_c-\omega_c(Z))/\beta_{\perp 0}^4\omega_c$ описывает профиль электродинамической системы, где $\omega_c(Z)=c\mathbf{v}_p/r(Z)$.

Будем считать, что на входе в пространство взаимодействия электроны равномерно распределены по фазам циклотронного вращения $p(Z=0)=\exp(i\theta_0)$, $\theta_0=[0,2\pi)$. На выходе системы в сечении Z=L, где $L=\beta_{\perp 0}^2\omega_c z_k/2\beta_{||0}c$ – нормированная длина резонатора, ставится излучательное граничное условие [17]

$$a(L,\tau) + \frac{1}{\sqrt{\pi i}} \int_{0}^{\tau} \frac{1}{\sqrt{\tau - \tau'}} \frac{\partial a(L,\tau)}{\partial Z} d\tau' = 0.$$
 (2)

В сечении Z=0 используется модифицированное граничное условие с учетом поступления на вход начального сигнала F (см. [18])

$$a(0,\tau) - \frac{1}{\sqrt{\pi i}} \int_{0}^{\tau} \frac{1}{\sqrt{\tau - \tau'}} \frac{\partial a(0,\tau)}{\partial Z} d\tau' = 2F(0,\tau). \tag{3}$$

На основе развитой модели исследуем динамику двухрезонаторного гироклистрона с рабочей частотой 93 ГГц, экспериментально исследованного в работе [4]. Будем считать, что винтовой электронный пучок с питч-фактором 1.3, энергией 70 кэВ и током 15 A взаимодействует с модой TE_{02} во входном и выходном резонаторах на основной гармонике гирочастоты.

Будем считать, что обратная связь реализуется за счет подачи части излучения с коэффициентом передачи S и временем задержки $t_{\rm del}$ с выхода усилителя на его

вход. В этом случае сигнал в правой части граничного условия (3) можно представить в виде

$$F(0,\tau) = S \cdot a(Z_{\text{out}}, \tau - T), \tag{4}$$

где $T=\omega_c t_{\rm del} \beta_{\perp 0}^4/8\beta_{\parallel 0}^2$ – нормированное время задержки. В последующем моделировании время прохождения сигнала по цепи обратной связи T выбиралось из следующих соображений. Как известно, в схемах на основе маломощных СВЧ-усилителей могут быть реализованы цепи обратной связи с временами запаздывания в сотни наносекунд на основе акустических [19] или электрооптических [20] линий задержки. В то же время, в приборах с уровнем мощности в десятки и более киловатт, к которым относится исследуемый гироклистрон диапазона 3 мм, можно рассчитывать только на линии задержки волноводного типа. В этом случае характерные времена запаздывания определяются временем, за которое волна проходит расстояние, сравнимое с физической длиной усилителя. По этой причине при моделировании использовалось нормированное значение задержки T=20, соответствующее прохождению сигнала по цепи обратной связи длиной около 50 см.

2. Динамика гироклистрона с запаздывающей обратной связью

Моделирование показывает, что самовозбуждение генератора происходит при S=0.05. При этом с ростом S вплоть до значений $S\approx 1$ режимы генерации остаются стационарными, что может быть объяснено узкой полосой усиления гироклистрона, которая при относительно коротком времени запаздывания T=20 оказывается меньше расстояния между продольными модами. Частоты продольных мод в первом приближении определяются выражением

$$\omega_n \approx \frac{2\pi n}{t_{\rm del} + t_{\rm trans}},$$
(5)

где n – номер моды, $t_{\rm trans}=z_{\rm out}/\nu_{||}$ – время пролета электронов через пространство взаимодействия гироклистрона. При выбранных параметрах разность частот между соседними продольными модами ($\omega_n-\omega_{n-1}$) составляет порядка 500 МГц,

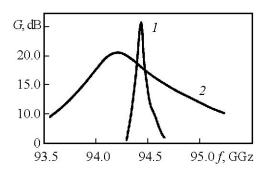


Рис. 2. Полоса усиления гироклистрона: I – выходной резонатор с оптимальной добротностью; 2 – выходной резонатор со сниженной добротностью

Fig. 2. The gyroklistron gain band: I – output resonator with the optimal quality factor; 2 – output resonator with a reduced quality factor

в то время как полная ширина полосы усиления составляет около 300 МГц (рис. 2, кривая 1).

Значительно увеличить ширину полосы усиления гироклистрона возможно за счет снижения добротности выходного резонатора до значений, близких к минимальной дифракционной добротности $Q \approx Q_{min} \approx 4\pi (l/\lambda)^2$, где l – длина выходного резонатора, λ – рабочая длина волны [21]. В результате этого полная полоса усиления расширяется до значений порядка 5 ГГц (рис. 2, *кривая 2*), так что в полосе усиления оказывается порядка десяти продольных мод кольцевого резонатора.

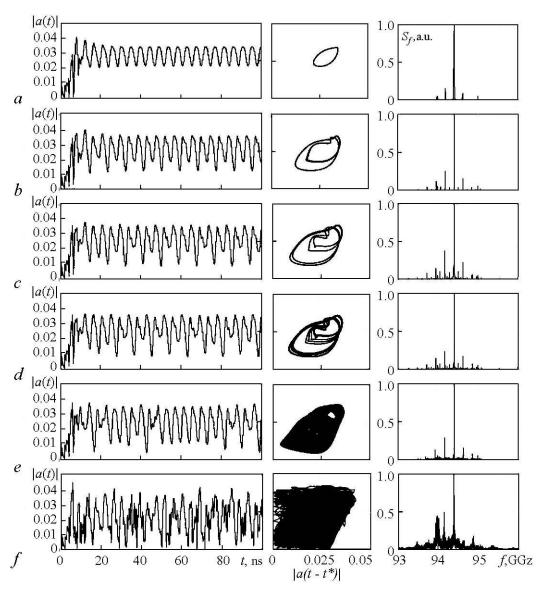


Рис. 3. Зависимость от времени амплитуды излучения на выходе гироклистрона с обратной связью (слева), фазовый портрет (в центре) и спектр выходного излучения (справа) для различных значений коэффициента передачи S: a – 0.56, b – 0.62, c – 0.64, d – 0.644, e – 0.67, f – 0.8. Величина $t^* \approx 0.6$ ns

Fig. 3. Time series of the amplitude of output radiation of the gyroklystron with feedback (left), phase portrait (center) and the spectrum of the output radiation (right) for the different values of the transmission coefficient S: a-0.56, b-0.62, c-0.64, d-0.644, e-0.67, f-0.8. The value of $t^* \approx 0.6$ ns

В конфигурации со сниженной добротностью выходного резонатора при значении коэффициента передачи $S\approx 0.52$ в системе возникает периодическая автомодуляция (рис. 3, a). При этом реализуется так называемый амплитудный сценарий [22], когда период автомодуляции близок к удвоенному времени прохождения сигнала по цепи обратной связи. Соответственно, частота автомодуляции ω_{AM} , составляющая порядка 216 МГц, примерно равна половине расстояния между собственными продольными модами $(\omega_n-\omega_{n-1})/2\approx 250$ МГц. При увеличении коэффициента передачи в интервале S=0.53-0.64 наблюдается последовательность нескольких бифуркаций удвоения периода (рис. 3, b-d), что также характерно для амплитудного

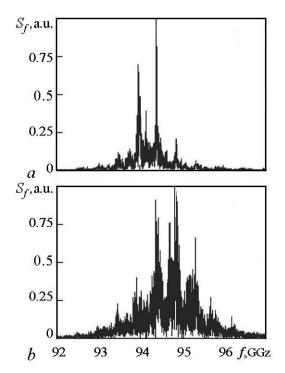


Рис. 4. Спектр излучения гироклистрона в режиме развитого хаоса: a – при нормальной длине выходного резонатора; b – в случае укороченного выходного резонатора

Fig. 4.The radiation spectrum of gyroklystron in the regime of stronge chaos: a – with normal length of the output cavity; b – in the case of a shortened output cavity

сценария, а затем — при $S\approx 0.65$ — переход к хаотической автомодуляции (рис. 3, e). Спектр генерации при этом представляет собой набор изолированных спектральных линий с частотами 93.7, 93.93, 94.16, 94.39 и 94.64 ГГц и шумового пьедестала на уровне -40 дБ. Отметим, что подобный механизм переход к хаосу в целом характерен для систем с запаздывающей обратной связью [23].

При дальнейшем увеличении коэффициента передачи в диапазоне вплоть до $S\approx 0.76$ нерегулярные режимы генерации продолжают существовать, чередуясь с достаточно широкими окнами периодической автомодуляции. Такое чередование режимов генерации характерно и для модели классического клистрона с запаздывающей связью, что было продемонстрировано в работе [24]. Еще больший рост коэффициента передачи в распределенной модели гироклистрона (1) приводит к реализации режимов «развитого» хаоса, при которых на фазовом портрете отсутствуют какие-либо крупномасштабные структу-

ры (как это изображено на рис. 3, f). Одновременно существенно меняется спектр выходного сигнала: шумовой пьедестал поднимается до уровня (-15)–(-20) дБ, а отдельные линии излучения практически перестают выделяться.

Ширина спектра генерации в гироклистроне с запаздывающей обратной связью ограничена полосой, определяемой добротностью выходного резонатора $\Delta f \approx f/Q$, где f – центральная частота излучения. С учетом того, что $Q \approx Q_{min} \approx 130$, относительная ширина полосы излучения даже в хаотических режимах составляет менее 0.8% (рис. 4, a). Средний уровень выходной мощности при этом составляет около $20~{\rm kBr}$. Увеличение ширины спектра может быть достигнуто путем дальнейшего снижения добротности выходного резонатора за счет уменьшения его длины. При этом для компенсации снижения коэффициента усиления необходимо наращивать длину пространства дрейфа. Расчеты показывают, что таким образом можно практически в три раза увеличить относительную ширину спектра излучения до значений примерно 1.5% (рис. 4, b). Однако при этом средняя эффективность генерации снижается до уровня примерно 3.5%.

3. РІС-моделирование гироклистрона с запаздывающей обратной связью

Моделирование электронно-волнового взаимодействия было также проведено на основе метода крупных частиц. Параметры моделирования соответствовали характеристикам экспериментального стенда импульсного гироклистрона диапазо-

на 93 ГГц с рабочей модой TE_{02} на первой гармонике гирочастоты [4]. В силу аксиальной симметрии пространства взаимодействия для моделирования использовалась 2.5-мерная версия РІС кода KARAT [25,26]. Геометрия пространства взаимодействия и мгновенное положение макрочастиц представлены на рис. 5. Винтовой электронный пучок с энергией 70 keV, током 15 A, питчфактором 1.3 инжектировался в резонатор гиротрона с радиусом встрела, соответствующим максимуму коэффициента связи с рабочей модой. После окончания взаимодействия электроны высаживались на стенку электродинамической системы за счет введения спадающего участка магнитного поля.

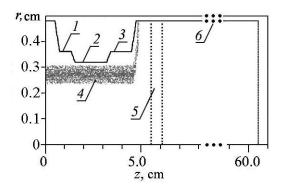


Рис. 5. Геометрия пространства взаимодействия в РІС-моделировании: I – входной резонатор, 2 – участок дрейфа, 3 – выходной резонатор, 4 – электронный пучок, 5 – поглощающий слой, 6 – волноведущий тракт линии задержки

Fig. 5. Geometry of the interaction domain in PIC-simulation: I – input cavity, 2 – drift region, 3 – output resonator, 4 – electron beam, 5 – absorbing layer, 6 – waveguide delay line

Линия запаздывающей обратной связи создавалась за счет добавления на выходе системы участка однородного волновода длиной 55 см. Для замыкания цепи обратной связи использовалась специальная опция кода KARAT формирования циклических граничных условий. Коэффициент передачи S регулировался путем введения в волноводной линии задержки слоя с переменной проводимостью, коэффициент поглощения которого регулировался путем изменения его геометрических размеров. Размерность счетной сетки составляла 40×2000 узлов, общее число макрочастиц в моделировании достигало $3.5 \cdot 10^4$. Контрольные счета с увеличенным в десять раз числом частиц не показали существенных изменений в динамике системы.

Возбуждение автоколебаний в данной системе происходило при $S\,>\,0.2$ (рис. 6, a). Периодическая автомодуляция возникала при $S \approx 0.63$ (рис. 6, b), при этом сценарий возникновения соответствовал частотному механизму, при котором происходит одновременное возбуждение нескольких продольных мод кольцевого резонатора, что подтверждается близостью $\omega_{AM} \approx 514~\mathrm{MF}$ ц к расчетному расстоянию между модами $\omega_n - \omega_{n-1} \approx 500$ МГц. При увеличении коэффициента передачи до $S \approx 0.7$ происходил переход к режиму хаотической генерации (рис. 6, c), при котором спектр состоял из изолированных линий и шумового пьедестала на уровне -50 дБ. Дискретность задания геометрических параметров поглотителя не позволяла задавать малые изменения параметра глубины обратной связи, в силу этого в моделировании не удалось проследить детали перехода к хаотическим режимам генерации. Дальнейшее увеличение коэффициента передачи приводило к размыванию спектральных линий (рис. 6, d), что качественно соответствует поведению системы в рамках моделирования усредненных уравнений (см. рис. 3, f). Среднее значение полезной выходной мощности в режиме хаотической генерации, рассчитанное по формуле $P_{\mathrm{out}}=(1-S^2)P$, где P – мощность, регистрируемая на выходе гироклистрона, достигало 10 кВт. Меньшее значение среднего уровня выходной мощности может быть объяснено учетом в РІС-моделировании начального разброса электронов по поперечным скоростям, которое оказывает заметное влияние на эффективность энергообмена в гироклистронах [27–29].

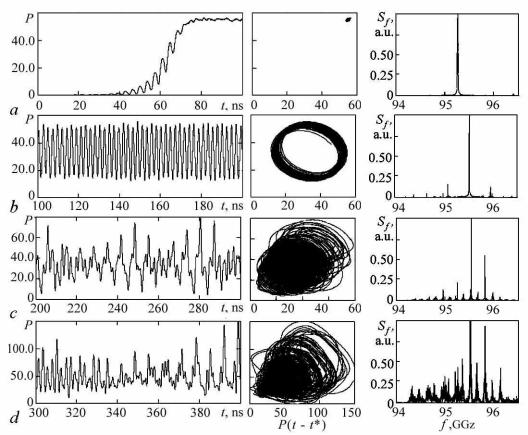


Рис. 6. Зависимость от времени мощности излучения на выходе гироклистрона (слева), фазовый портрет (в центре) и спектр выходного излучения (справа) для различных значений коэффициента передачи S: a-0.22, b-0.63, c-0.7, d-0.84. Величина $t^*\approx 0.6$ ns

Fig. 6. The time evolution of the output radiation power of the gyroklystron (left), phase portrait (center) and the spectrum of the output radiation (right) for the different values of the transmission coefficient S: a - 0.22, b - 0.63, c - 0.7, d - 0.84. The value of $t^* \approx 0.6$ ns

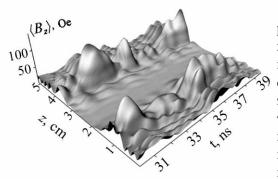


Рис. 7. Пространственно-временное распределение продольной компоненты магнитного поля, усредненной по периоду высокочастотных колебаний, при $S\approx 0.84$

Fig. 7. The space-time distribution of the longitudinal component of the magnetic field, averaged over a period of high-frequency oscillations, with $S\approx 0.84$

Важно отметить, что РІС-моделирование наглядно демонстрирует необходимость использования для описания хаотических режимов в гироклистроне с запаздывающей обратной связью моделей с нефиксированной структурой поля. Это подтверждает рис. 7, на котором показано пространственновременное распределение продольной компоненты магнитного поля, усредненной по периоду высокочастотных колебаний, при значении $S \approx 0.84$. Видно, что продольная структура поля существенно варьирует с течением времени, что оправдывает применение подхода, рассмотренного в разделе 2.

4. Оценка характеристик хаотических режимов работы гироклистрона

Обнаруженные в ходе численного моделирования гироклистрона с запаздывающей обратной связью режимы развитого хаоса (см. рис. 3, f и рис. 6, c, d) требуют дополнительных исследований их динамических свойств. Действительно, обратимся к рис. 8. На рис. 8, a представлена бифуркационная диаграмма для распределенной модели (1). Это зависимость от параметра S (коэффициента передачи) значений медленной амплитуды выходного излучения, совпадающих в различающиеся на величину t^* моменты времени. Как видно, крона бифуркационного дерева при больших S не имеет ярко выраженных окон, что свидетельствует о большей грубости отвечающих ей аттракторов. Можно сравнить дерево с диаграммой распределения автокорреляционной функции в зависимости от коэффициента передачи, изменяющегося в тех же пределах (рис. 8, b). В области развитого хаоса функция

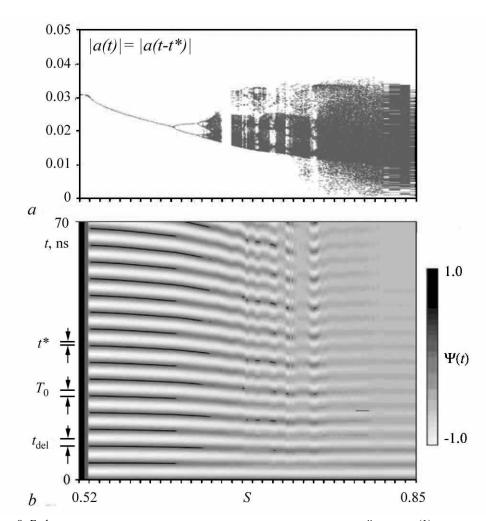


Рис. 8. Бифуркационная диаграмма для пространственно распределенной модели (1) гироклистрона с запаздывающей обратной связью (a). Распределение автокорреляционной функции в зависимости от коэффициента передачи (b)

Fig. 8. The bifurcation diagram for the spatially distributed model (1) of the gyroklystron with the delayed feedback (a). The distribution of the autocorrelation functions depending on the transmission coefficient (b)

спадает гораздо быстрее, чем для хаотического режима, возникшего сразу после последовательности удвоений. Одной из причин указанных явлений может служить качественное изменение топологии аттрактора с переходом его в класс гиперхаотических. Для подтверждения этой гипотезы требуется вычисление корреляционной размерности и, главное, спектра ляпуновских показателей аттрактора [30–32].

Характеристические показатели Ляпунова имеют смысл скоростей экспоненциального роста или убывания возмущения относительно инвариантной фазовой траектории в различных направлениях. Спектр из d показателей вычисляется следующим образом [30,33,34]:

$$\Lambda_{i} = \lim_{t \to \infty} \Sigma_{i}(t), \quad \Sigma_{i}(t) = \frac{1}{MT_{0}} \sum_{m=1}^{M} \ln \left\| \mathbf{b}^{(T_{0})}(t = mT_{0}) \mathbf{e}_{i}(t = mT_{0}) \right\|, \quad i = 1, 2, ..., d.$$
(6)

Здесь значение d не превышает размерности фазового пространства и будет определено ниже; $(\mathbf{e}_1,...,\mathbf{e}_d)$ – набор векторов возмущения; матрица \mathbf{b} – линейный оператор эволюции. Векторы возмущения берутся ортогональными на начальный момент времени. Во избежание схождения их к единственному самому неустойчивому направлению, они ортогонализуются после каждого вычисления очередного вклада в накапливающиеся усредненные суммы Σ_i . Ортогонализация по Граму–Шмидту выстраивает векторы в порядке убывания неустойчивости отвечающих им направлений.

Спектр ляпуновских показателей динамических режимов СВЧ приборов вычислялся ранее, например, для ЛОВ [35, 36], гиротрона [37, 38], клистрона [39]. Во всех случаях применялся алгоритм Бенеттина [40,41]. В настоящей работе применен иной подход. Ляпуновские показатели вычислены по полученным численно временным рядам. При этом использована более удачная, на наш взгляд, по сравнению с наиболее известной [42–44], методика Сано–Савада [45], которая экономит машинное время и подходит для относительно коротких рядов [46]. Одновременно этот подход более точен по сравнению с приближенным алгоритмом Бенеттина, использующим «близкие» траектории для оценки линейного оператора, точное вычисление которого в системах рассматриваемого типа затруднено. Кроме того, вычисление характеристик выходного излучения по временным рядам имитирует анализ результатов натурного эксперимента. Более подробно о преимуществах выбранного метода и особенностях его применения см. в работе [47].

На рис. 9, a представлены результаты вычисления спектра ляпуновских показателей пространственно распределенной модели гироклистрона (1). Графики зависимости от коэффициента передачи пяти ляпуновских показателей подтверждают возникновение гиперхаоса при больших S, а именно, два старших показателя становятся положительными. При этом совершает скачок и превышает значение 3 и корреляционная размерность (рис. 9, b). Под корреляционной размерностью подразумевается значение, к которому стремится величина D_2 при увеличении размерности d реконструированного методом задержки пространства векторов состояния $\mathbf{a}(t) = (|a(t)|, |a(t-T_0)|, ..., |a(t-(d-1)T_0)|)$. При этом D_2 имеет смысл угола наклона построенного в логарифмическом масштабе графика корреляционного интеграла $C(\delta) = \lim_{t\to\infty} \frac{1}{t^2} \int_0^t \int_0^t \theta(\delta - \|\mathbf{a}(t') - \mathbf{a}(t'')\|) dt' dt''$ (здесь θ – ступенчатая функция Хевисайда). В качестве T_0 использовано время спадания до нуля автокорреляционной функции (приблизительно 1ns). Величина d=5, при которой значение D_2

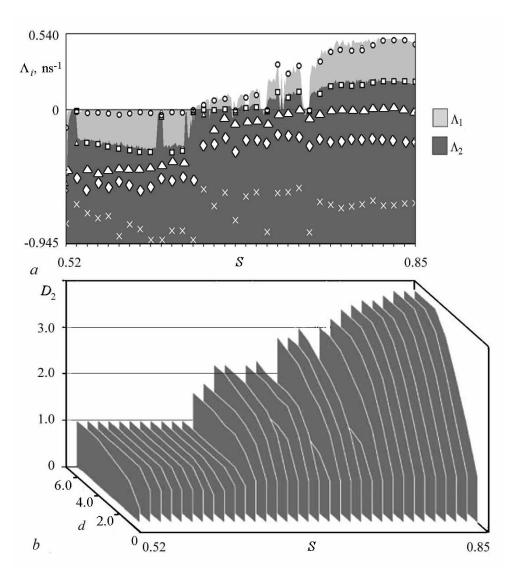


Рис. 9. Зависимость от коэффициента передачи спектра пяти ляпуновских показателей (i=1 – круги, 2 – квадраты, 3 – треугольники, 4 – ромбы, 5 – кресты) (a) и распределения корреляционной размерности D_2 от размерности реконструированного фазового пространства d (b) для модели гироклистрона на основе усредненных уравнений

Fig. 9. For the slow amplitude model of gyroklystron the transmission coefficient dependences of the spectrum of five Lyapunov exponents (i = 1 – circles, 2 – squares, 3 – triangles, 4 – diamonds, 5 – asterisks) (a) and the distribution of correlation dimension D_2 on the reconstructed phase space dimension d (b)

стабилизируется, служила оценкой размерности реконструированного фазового пространства: в него аттрактор может быть вложен без самопересечений.

Аналогичные вычисления были проведены и для временных реализаций, полученных при численном моделировании методом крупных частиц. Результаты по расчету ляпуновских показателей и фрактальных размерностей (корреляционной D_2 и хорошо с ней согласующейся ляпуновской D_λ) для нескольких значений коэффициента передачи приведены в Таблице. Ляпуновская размерность определялась как $D_\lambda = k + \sum_{i=1}^k \Lambda_i/|\Lambda_{k+1}|$, где k — минимальное количество старших показателей, сумма которых положительна.

Ляпуновские показатели и фрактальные размерности аттракторов, полученных при PIC моделировании Lyapunov exponents and fractal dimensions of attractors obtained in PIC numerical simulation

S	$\Lambda_1,\mathrm{ns}^{-1}$	Λ_2 , ns ⁻¹	Λ_3 , ns ⁻¹	Λ_4 , ns ⁻¹	$\Lambda_5,\mathrm{ns}^{-1}$	D_2	D_{λ}
0.54	-0.028	-0.185	-0.237	-0.312	-0.431	0.0	0.0
0.63	0.066	0.000	-0.052	-0.161	-0.364	3.0	3.1
0.70	0.322	0.137	0.009	-0.099	-0.298	4.5	5.2
0.77	0.199	0.080	-0.009	-0.128	-0.355	4.1	4.4
0.84	0.237	0.095	-0.009	-0.118	-0.336	4.6	4.6
0.91	0.241	0.090	-0.009	-0.137	-0.331	4.4	4.6

Пример расчета накапливающихся к характеристическим показателям усредненных сумм Σ_i представлен для этого случая на рис. 10, a. Суммы быстро сходятся. В их окрестности колеблются локальные ляпуновские показатели, усредненные в относительно узком временном окне вдоль фазовой траектории и характеризующие развитие вдоль нее неустойчивости. Значения корреляционной размерности D_2 достигают насыщения при d=5 и принимают значение, превышающее 4 (см. рис. 10, b).

Результаты анализа временных реализаций интенсивности выходного излучения при РІС-моделировании также подтверждают наличие гиперхаоса в динамике гироклистрона: два положительных показателя Ляпунова и высокая корреляционная размерность имеют место при $S=0.91,\,0.84,\,0.77$ и 0.7. Расчеты для случая S=0.54 показывают отсутствие автомодуляции. Не слишком большое положительное значение одного из показателей Ляпунова при S=0.63 может быть в некоторой степени обусловлено влиянием численной ошибки при расчете реализаций и, вместе с тем, свидетельствует о зарождающемся хаосе.

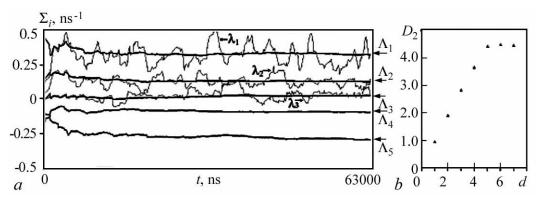


Рис. 10. Характеристики гиперхаотического аттрактора, полученного при РІС моделировании гироклистрона при S=0.70. Усредненные накапливающиеся суммы, сходящиеся к пяти ляпуновским показателям, и три старших локальных показателя (a). Зависимость корреляционной размерности от размерности фазового пространства (b)

Fig. 10. The characteristics of the hyperchaotic attractor obtained in the PIC simulation of gyroklystron with S=0.70. The averaged accumulated sums, converging to the five senior Lyapunov exponents, and the three senior local exponents (a). The correlation dimension vs the dimension of the phase space (b)

Выводы

Использованная в работе нестационарная распределенная модель гироклистрона с запаздывающей обратной связью позволяет, в отличие от ранее используемых моделей [48,49], проводить исследования динамики системы при произвольных соотношениях между добротностями резонаторов, времени задержки сигнала и коэффициентом передачи цепи обратной связи. Это позволяет адекватно описывать режимы развитого хаоса, характеризующиеся, в том числе, существенными изменениями продольного структуры электромагнитного поля.

Следует отметить, что в настоящее время ведется целый ряд работ по исследованию шумовых источников в миллиметровом диапазоне на основе винтовой гиро-ЛБВ с запаздывающей обратной связью [48] «нановиркаторов» [49] и гиротронов [50]. С учетом современных перспектив продвижения гироклистронов в области больших рабочих частот и мощностей понимание особенностей характеристик хаотических режимов представляется весьма актуальной задачей.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 16-02-00745. О.Б. Исаева благодарит также РФФИ, грант № 16-02-00135 (в части работы по расчету ля-пуновских показателей).

Библиографический список

- 1. Andronov A.A., Flyagin V.A., Gaponov A.V., Gol'denberg A.L., Petelin M.I., Usov V.G., Yulpatov V.K. The gyrotron: High-power source of millimetre and submillimetre waves // Infrared Phys. 1978. Vol. 18, no. 5-6. Pp. 385–393.
- 2. *Nusinovich G.S.* Introduction to the Physics of Gyrotrons. Baltimore: J. Hopkins Univ. Press, 2004. 341 p.
- 3. *Thumm M.* State-of-the-art of high power gyro-devices and free electron masers. Update 2016 // KIT Scientific Reports. 2017. Band-Nr. 7735.
- 4. Засылкин Е.В., Гачев И.Г., Антаков И.И. Экспериментальное исследование гироклистрона с высшим типом колебаний TE_{021} в резонаторах в коротковолновой части миллиметрового диапазона // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, $N ext{0.} 5$. С. 341-350.
- 5. Зайцев Н.И., Гвоздев А.К., Запевалов С.А., Кузиков С.В., Мануилов В.Н., Моисеев М.А., Плоткин М.Е. Экспериментальное исследование мультимегаваттного импульсного гироклистрона // Радиотехника и электроника. 2014. Т. 59, № 2. С. 179–183.
- 6. Зайцев Н.И., Абубакиров Э.Б., Гузнов Ю.М., Денисов Г.Г., Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Запевалов С.А., Планкин О.П., Розенталь Р.М., Седов А С., Семенов Е.С., Чирков А.В., Шевченко А.С. Разработка компонентов релятивистского гироклистрона 3-мм диапазона // Материалы 25-й международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2015). Севастополь, 6–12 сентября 2015. С. 781–782.
- 7. Swati M.V., Chauhan M.S., Jain P.K. Design methodology and beam-wave interaction study of a second-harmonic D-band gyroklystron amplifier // IEEE Trans. Plasma Sci. 2016. Vol. 44, no. 11. Pp. 2844–2851.

- 8. *Кузнецов С.П., Перельман А.Ю., Трубецков Д.И.* Автомодуляция и стохастические режимы в клистроне бегущей волны с внешней обратной связью // ЖТФ. 1983. Т. 53, № 1. С. 163–166.
- 9. Гришин С.В., Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Скороходов В.Н., Шараевский Ю.П. Генерация хаотических СВЧ-импульсов в кольцевой системе на основе клистронного усилителя мощности и нелинейной линии задержки на магнитостатических волнах // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36, вып. 2. С. 62–69.
- 10. *Emelyanov V.V., Girevoy R.A., Yakovlev A.V., Ryskin N.M.* Time-domain particle-incell modeling of delayed feedback klystron oscillators // IEEE Trans. Electron. Dev. 2014. Vol. 61, no. 6. Pp. 1842–1847.
- 11. Ергаков В.С., Моисеев М.А. Двухрезонаторный генератор с запаздывающей обратной связью // Радиотехника и электроника. 1986. Т. 31, вып. 5. С. 962–967.
- 12. *Афанасьева В.В., Лазерсон А.Г.* Динамический хаос в двухрезонаторных клистронных автогенераторах с запаздывающей обратной связью // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1995. Т. 3, № 5. С. 88–99.
- 13. *Ginzburg N.S., Rozental R.M., Sergeev A.S., Zotova I.V.* Time-domain model of gyroklystrons with diffraction power input and output // Physics of Plasmas. 2016. Vol. 23. 033108–033112.
- 14. Zasypkin E.V., Moiseev M.A., Gachev I.G., Antakov I.I. Study of high-power Kaband second-harmonic gyroklystron amplifier // IEEE Trans. Plasma Sci. 1996. Vol. 24, no. 3. Pp. 666–670.
- 15. *Tolkachev A.A.*, *Levitan B.A.*, *Solovjev G.K.*, *Veytsel V.V.*, *Farber V.E.* A megawatt power millimeter-wave phased-array radar // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 2000. Vol. 15. Pp. 25–31.
- 16. *Антаков И.И.*, *Гачев И.Г.*, *Засыпкин Е.В.* Экспериментальное исследование гироклистрона, работающего в поле постоянного магнита // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 3. С. 185–194.
- 17. *Ginzburg N.S., Zavolsky N.A., Nusinovich G.S.* Theory of non-stationary processes in gyrotrons with low-Q resonators // Int. J. Electron. 1986. Vol. 61. Pp. 881–894.
- 18. *Ginzburg N.S.*, *Sergeev A.S.*, *Zotova I.V.* Time-domain self-consistent theory of frequency-locking regimes in gyrotrons with low-Q resonators // Phys. Plasmas. 2015. Vol. 22. 033101–033105.
- 19. *Кац В.А.* Возникновение хаоса и его эволюция в распределенном генераторе с запаздыванием (эксперимент) // Изв.вузов. Радиофизика. 1985. Т. 28, № 2. С. 161–176.
- 20. *Устинов А.Б., Кондрашов А.В., Калиникос Б.А.* Радиофотонный генератор хаотического и шумового сигналов // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42, № 8. С. 28–36.
- 21. Власов С.Н., Жислин Г.М., Орлова И.М., Петелин М.И., Рогачева Г.Г. Открытые резонаторы в виде волноводов переменного сечения // Изв.вузов. Радиофизика. 1969. Т. 12, № 8. С. 1236–1244.
- 22. *Рыскин Н.М.* Исследование нелинейной динамики ЛБВ-генератора с запаздывающей обратной связью//Изв.вузов. Радиофизика. 2004. Т. 47, №2. С. 129–142.
- 23. *Кузнецов С.П.* Сложная динамика генераторов с запаздывающей обратной связью (обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. 1982. Т. 25, № 12. С. 1410–1428.
- 24. Дмитриева Т.В., Рыскин Н.М., Титов В.Н., Шигаев А.М. Сложная динамика

- простых моделей распределенных электронно-волновых систем // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1999. Т. 7, № 6. С. 66–81.
- 25. *Тараканов В.П.* Универсальный электромагнитный код КАРАТ / в кн.: Математическое Моделирование. Проблемы и Результаты. М.: Наука, 2003. 456 с.
- 26. *Tarakanov V.P.* Code KARAT in simulations of power microwave sources including Cherenkov plasma devices, vircators, orotron, E-fieldsensor, calorimeter etc // EPJ Web of Conferences. 2017. Vol. 149. P. 04024.
- 27. *Ергаков В.С., Моисеев М.А.* Влияние разброса скоростей электронов на КПД двухрезонаторного МЦР-клистрона // Электронная техника. Серия І. Электроника СВЧ. 1977. № 5. С. 9–15.
- 28. *Ергаков В.С., Моисеев М.А., Эрм Р.Э.* Влияние разброса скоростей электронов на характеристики двухрезонаторного МЦР-усилителя // Электронная техника. Серия І. Электроника СВЧ. 1980. № 4. С. 29–37.
- 29. *Засыпкин Е.В., Моисеев М.А.* Повышение КПД в гироклистронах с неоднородным статическим магнитным полем // Изв. вузов. Радиофизика. 1994. Т. 37, № 10. С. 1321–1334.
- 30. *Кузнецов С.П., Трубецков Д.И.* Хаос и гиперхаос в лампе обратной волны // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. 47, № 5–6. С. 383–398.
- 31. *Bezruchko B.P., Smirnov D.A.* Extracting Knowledge from Time Series. An Introduction to Nonlinear Empirical Modeling. Heidelberg–Dordrecht–London–New York: Springer, 2010. 420 p.
- 32. *Bradley E., Kantz H.* Nonlinear time-series analysis revisited // Chaos. 2015. Vol. 25. 097610–097619.
- 33. *Ляпунов А.М.* Общая задача об устойчивости движения. М.-Л.: ГИТТЛ, 1950. 472 с.
- 34. *Eckmann J.-P.*, *Ruelle D.* Fundamental limitations for estimating dimensions and Lyapunov exponents in dynamical systems//Physica D. 1992. Vol. 56. Pp. 185–187.
- 35. *Безручко Б.П., Булгакова Л.В., Кузнецов С.П., Трубецков Д.И.* Стохастические автоколебания и неустойчивость в лампе обратной волны // Радиотехника и электроника. 1983. Т. 28, № 6. С. 1136–1139.
- 36. *Кузнецов С.П., Трубецков Д.И.* Хаос и гиперхаос в лампе обратной волны // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. 47, № 5. С. 1–17.
- 37. *Блохина Е.В., Рожнев А.Г.* Хаос и гиперхаос в гиротроне // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 10. С. 887–899.
- 38. *Blokhina E.V., Kuznetsov S.P., Rozhnev A.G.* High-dimensional chaos in a gyrotron // IEEE Trans. Electron. Dev. 2007. Vol. 54, no. 2. Pp. 188–193.
- 39. *Балякин А.А.*, *Рыскин Н.М.* Особенности расчета спектров показателей Ляпунова в распределенных автоколебательных системах с запаздывающей обратной связью // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2007. Т. 15, № 6. С. 3–21.
- 40. Benettin G., Galgani L., Giorgilli A., Strelcyn J.-M. Lyapunov characteristic exponents for smooth dynamical systems and for Hamiltonian systems; A method for computing all of them. Part 1: Theory // Meccanica. 1980. Vol. 15. Pp. 9–20.
- 41. Benettin G., Galgani L., Giorgilli A., Strelcyn J.-M. Lyapunov characteristic exponents for smooth dynamical systems and for Hamiltonian systems; A method for

- computing all of them. Part 2: Numerical application // Meccanica. 1980. Vol. 15. Pp. 21–30.
- 42. Wolf A., J.Swift B., Swinney H.L., Vastano J.A. Determining Lyapunov exponents from a time series // Physica D. 1985. Vol. 16. Pp. 285–317.
- 43. Eckmann J.-P., Kamphorst S.O., Ruelle D., Gilberto D. Lyapunov exponents from a time series // Phys. Rev. A. 1986. Vol. 34. Pp. 4971–4979.
- 44. *Brown R., Bryant P., Abarbanel H.D.I.* Computing the Lyapunov spectrum of a dynamical system from an observed time series // Phys. Rev. A. 1991. Vol. 43. Pp. 2787–2806.
- 45. Sano M., Sawada Y. Measurement of the Lyapunov spectrum from a chaotic time series // Phys. Rev. Lett. 1985. Vol. 55. Pp. 1082–1085.
- 46. Zeng X., Eykholt R., Pielke R.A. Estimating the Lyapunov exponent spectrum from short time series of low precision // Phys. Rev. Lett. 1991. Vol. 66. Pp. 3229–3232.
- 47. Rozental R.M., Isaeva O.B., Ginzburg N.S., Zotova I.V., Sergeev A.S., Rozhnev A.G. Characteristics of chaotic regimes in a space-distributed gyroklystron model with delayed feedback // Rus. J. Nonlin. Dyn. 2018. No. 2. (in press).
- 48. Гинзбург Н.С., Розенталь Р.М., Сергеев А.С., Зотова И.В. Генерация хаотических сигналов миллиметрового диапазона на основе широкополосных гироусилителей с винтовым гофрированным волноводом // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43, вып. 3. С. 50–56.
- 49. Frolov N.S., Kurkin S.A., Koronovskii A.A., Hramov A.E. Nonlinear dynamics and bifurcation mechanisms in intense electron beam with virtual cathode // Phys. Lett. A. 2017. Vol. 381, no. 28. Pp. 2250–2255.
- 50. Розенталь Р.М., Гинзбург Н.С., Сергеев А.С., Зотова И.В., Федотов А.Э., Тараканов В.П. Генерация широкополосного хаотического излучения в гиротронах в режиме перекрытия высокочастотного и низкочастотного резонансов // ЖТФ. 2017. Т. 87, вып. 10. С. 1555–1561.

References

- 1. Andronov A.A., Flyagin V.A., Gaponov A.V., Gol'denberg A.L., Petelin M.I., Usov V.G., Yulpatov V.K. The gyrotron: High-power source of millimetre and submillimetre waves. *Infrared Phys.*, 1978, vol. 18, no. 5–6, pp. 385–393.
- 2. Nusinovich G.S. Introduction to the Physics of Gyrotrons. Baltimore: J. Hopkins Univ. Press, 2004, 341 p.
- 3. Thumm M. State-of-the-art of high power gyro-devices and free electron masers, Update 2016. *KIT Scientific Reports*, 2017, Band-Nr, 7735.
- 4. Zasypkin E.V., Gachev I.G., Antakov I.I. Experimental study of a W-band gyroklystron amplifier operated in the high order TE₀₂₁ cavity mode. *Radiophys. Quant. El.*, 2012, vol. 55, no. 5, pp. 309–317.
- Zaitsev N.I., Gvozdev A.K., Zapevalov S.A., Kuzikov S.V., Manuilov V.N., Moiseev M.A., Plotkin M.E. Experimental study of a multimegawatt pulsed gyroklystron. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2014, vol.59, no.2, pp.164–168.
- 6. Zaitsev N.I., Abubakirov E.B., Guznov Yu.M., Denisov G.G., Zavolskii N.A., Zapevalov V.E., Zapevalov S.A., Plankin O.P., Rozental R.M., Sedov A S., Semenov E.S., Chirkov A.V., Shevchenko A.S. *Book of abstracts of 25th Int. Crimean Conf.*

- *«UHF-technics and Telecommunication Technologies»*, Sevastopol, September 6–12 2015, pp. 781–782.
- 7. Swati M.V., Chauhan M.S., Jain P.K. Design methodology and beam-wave interaction study of a second-harmonic D-band gyroklystron amplifier. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2016, vol. 44, no. 11, pp. 2844–2851.
- 8. Kuznetsov S.P., Perelman A.Yu., Trubetskov D.I. *Technical Physics*, 1983, vol. 53, no. 1, pp. 163–166.
- 9. Grishin S.V., Dmitriev B.S., Zharkov Y.D., Skorohodov V.N., Sharaevskii Y.P. Generation of chaotic microwave pulses in a ring system based on a klystron power amplifier and a nonlinear delay line on magnetostatic waves. *Technical Physics Letters*, 2010, vol. 36, iss. 2, pp. 76–79.
- 10. Emelyanov V.V., Girevoy R.A., Yakovlev A.V., Ryskin N.M. Time-domain particle-in-cell modeling of delayed feedback klystron oscillators. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, 2014, vol. 61, no. 6, pp. 1842–1847.
- 11. Ergakov V.S., Moiseev M.A. Two-cavity oscillator with external delay feedback. *Radiotekhnica i Electronica*, 1986, vol. 31, iss. 5, pp. 962–967 (in Russian).
- 12. Afanasieva V.V., Lazerson A.G. Chaotic dynamics of two-cavity clystron oscillators with delayed feedback. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 1995, vol. 3, no. 5, pp. 88–99. (in Russian).
- 13. Ginzburg N.S., Rozental R.M., Sergeev A.S., Zotova I.V. Time-domain model of gyroklystrons with diffraction power input and output. *Physics of Plasmas*, 2016, vol. 23, 033108–033112.
- 14. Zasypkin E.V., Moiseev M.A., Gachev I.G., Antakov I.I. Study of high-power Ka-band second-harmonic gyroklystron amplifier. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 1996, vol. 24, no. 3, pp. 666–670.
- 15. Tolkachev A.A., Levitan B.A., Solovjev G.K., Veytsel V.V., Farber V.E. A megawatt power millimeter-wave phased-array radar. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2000, vol. 15, pp. 25–31.
- 16. Antakov I.I., Gachev I.G., Zasypkin E.V. Experimental studies of a gyroklystron operating in the field of a permanent magnet. *Radiophys. Quant. El.*, 2011, vol. 54, no. 3, pp. 166–173.
- 17. Ginzburg N.S., Zavolsky N.A., Nusinovich G.S. Theory of non-stationary processes in gyrotrons with low-Q resonators. *Int. J. Electron.*, 1986, vol. 61, pp. 881–894.
- 18. Ginzburg N.S., Sergeev A.S., Zotova I.V. Time-domain self-consistent theory of frequency-locking regimes in gyrotrons with low-Q resonators. *Phys. Plasmas*, 2015, vol. 22, 033101–033105.
- 19. Katz V.A. Appearance of chaos and its evolution in a distributed oscillator with delay (experiment). *Radiophys. Quant. El.*, 1985, vol. 28, no. 2, pp. 107–119.
- 20. Ustinov A.B., Kondrashov A.V., Kalinikos B.A. A microwave photonic generator of chaotic and noise signals. *Technical Physics Letters*, 2016, vol.42, no.4, pp.403–406.
- 21. Vlasov S.N., Zhislin G.M., Orlova I.M., Petelin M.I., Rogacheva G.G. Irregular waveguides as open resonators. *Radiophys. Quant. El.*, 1969, vol.12, no.8, pp.972–978.
- 22. Ryskin N.M. Study of the nonlinear dynamics of a traveling-wave-tube oscillator

- with delayed feedback. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2004, vol. 47, no. 2, pp. 116–128.
- 23. Kuznetsov S.P. Complex dynamics of oscillators with delayed feedback (review). *Radiophys. Quant. El.*, 1982, vol. 25, no. 12, pp. 996–1009.
- 24. Dmitrieva T.V., Ryskin N.M., Titov V.N., Shigaev A.M. Complex dynamics of the simple models of distributed electron-wave systems. *Izvestiya VUZ, Applied Nonlinear Dynamics*, 1999, vol. 7, no. 6, pp. 66–81 (in Russian).
- 25. Tarakanov V.P. The Universal Electromagnetic Code KARAT. Math. Modeling. Problems and Results. Moscow: Nauka, 2003, 456 p. (in Russian).
- 26. Tarakanov V.P. Code KARAT in simulations of power microwave sources including Cherenkov plasma devices, vircators, orotron, E-fieldsensor, calorimeter etc. *EPJ Web of Conferences*, 2017, vol. 149, 04024.
- 27. Ergakov V.S., Moiseev M.A. *Electronnaya Tekhnica, Ser I, Electronica SVCH*, 1977, no. 5, pp. 9–15 (in Russian).
- 28. Ergakov V.S., Moiseev M.A., Erm R.E. *Electronnaya Tekhnica. Ser I. Electronica SVCH*, 1980, no. 4, pp. 29–37 (in Russian).
- 29. Zasypkin E.V., Moiseev M.A. Efficiency enhancement in gyroklystrons with a nonuniform static magnetic field. *Radiophys. Quant. El.*, 1994, vol.37, no.10, pp.853–862.
- 30. Kuznetsov S.P. Dynamical Chaos. Moscow: Fizmatlit, 2006. 356 p. (in Russian).
- 31. Bezruchko B.P., Smirnov D.A. Extracting Knowledge from Time Series. An Introduction to Nonlinear Empirical Modeling. Heidelberg–Dordrecht–London–New York: Springer, 2010. 420 p.
- 32. Bradley E., Kantz H. Nonlinear time-series analysis revisited. *Chaos*, 2015, vol. 25, 097610–097619.
- 33. Lyapunov A.M. General Problem of the Motion Stability. Moscow–Leningrad: GITTL, 1950, 472 p. (in Russian).
- 34. Eckmann J.-P., Ruelle D. Fundamental limitations for estimating dimensions and Lyapunov exponents in dynamical systems. *Physica D*, 1992, vol. 56, pp. 185–187.
- 35. Bezruchko B.P., Bulgakova L.V., Kuznetsov S.P., Trubetskov D.I. *Radiotekhnica i Electronica*, 1983, vol. 28, no. 6, pp. 1136–1139 (in Russian).
- 36. Kuznetsov S.P., Trubetskov D.I. Chaos and hyperchaos in a backward-wave oscillator. *Radiophys. Quant. El.*, 2004, vol. 47, no. 5–6, pp. 341–355.
- 37. Blokhina E.V., Rozhnev A.G. Chaos and hyperchaos in a gyrotron. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2006, vol. 49, no. 10, pp. 799–810.
- 38. Blokhina E.V., Kuznetsov S.P., Rozhnev A.G. High-dimensional chaos in a gyrotron. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, 2007, vol. 54, no. 2, pp. 188–193.
- 39. Balyakin A.A., Ryskin N.M. Peculiarities of calculation of the Lyapunov exponents set in distributed self-oscillated systems with delayed feedback. *Izv. VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2007, vol. 15, no. 6, pp. 3–21 (in Russian).
- 40. Benettin G., Galgani L., Giorgilli A., Strelcyn J.-M. Lyapunov characteristic exponents for smooth dynamical systems and for Hamiltonian systems; A method for computing all of them. Part 1: Theory. *Meccanica*, 1980, vol. 15, pp. 9–20.
- 41. Benettin G., Galgani L., Giorgilli A., Strelcyn J.-M. Lyapunov characteristic exponents for smooth dynamical systems and for Hamiltonian systems; A method for

- computing all of them. Part 2: Numerical application. *Meccanica*, 1980, vol. 15, pp. 21–30.
- 42. Wolf A., J.Swift B., Swinney H.L., Vastano J.A. Determining Lyapunov exponents from a time series. *Physica D*, 1985, vol. 16, pp. 285–317.
- 43. Eckmann J.-P., Kamphorst S.O., Ruelle D., Gilberto D. Lyapunov exponents from a time series. *Phys. Rev. A*, 1986, vol. 34, pp. 4971–4979.
- 44. Brown R., Bryant P., Abarbanel H.D.I. Computing the Lyapunov spectrum of a dynamical system from an observed time series. *Phys. Rev. A*, 1991, vol. 43, pp. 2787–2806.
- 45. Sano M., Sawada Y. Measurement of the Lyapunov spectrum from a chaotic time series. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, vol. 55, pp. 1082–1085.
- 46. Zeng X., Eykholt R., Pielke R.A. Estimating the Lyapunov exponent spectrum from short time series of low precision. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, vol. 66, pp. 3229–3232.
- 47. Rozental R.M., Isaeva O.B., Ginzburg N.S., Zotova I.V., Sergeev A.S., Rozhnev A.G. Characteristics of chaotic regimes in a space-distributed gyroklystron model with delayed feedback. *Rus. J. Nonlin. Dyn.*, 2018, no. 2 (in press).
- 48. Ginzburg N.S., Rozental R.M., Sergeev A.S., Zotova I.V. Generation of ultrashort microwave pulses in the sub-THz and THz range based on the cyclotron superradiance effect. *Technical Physics Letters*, 2017, vol. 43, no. 9, pp. 831–834.
- 49. Frolov N.S., Kurkin S.A., Koronovskii A.A., Hramov A.E. Nonlinear dynamics and bifurcation mechanisms in intense electron beam with virtual cathode. *Phys. Lett. A*, 2017, vol. 381, no. 28, pp. 2250–2255.
- Rozental R.M., Ginzburg N.S., Sergeev A.S., Zotova I.V., Fedotov A.E., Tarakanov V.P. Gyrotron generation of broadband chaotic radiation under overlapping of high- and low-frequency resonances. *Technical Physics*, 2017, vol. 62, no. 10, pp. 1562–1568.



Розенталь Роман Маркович родился (1977) в Горьком. Окончил радиофизический факультет ННГУ (1999). С 1998 года работает в ИПФ РАН научным сотрудником. Основная область научных интересов – нестационарные процессы в мощных приборах вакуумной СВЧ-электроники.

Россия, 603950 Н. Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46 Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики РАН» E-mail: rrz@appl.sci-nnov.ru



Исаева Ольга Борисовна родилась в Баку (1977). Окончила Саратовский государственный университет (1999). С момента окончания вуза работает в Саратовском филиале Института радиотехники и электроники РАН (в настоящее время – старший научный сотрудник). Доцент кафедры динамических систем Саратовского госуниверситета, к.ф.-м.н. (с 2003). Область интересов – нелинейная динамика и теория хаоса.

Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, 38 Саратовский филиал ИРЭ имени В.А. Котельникова РАН E-mail: isaevao@rambler.ru



Гинзбург Наум Самуилович родился в 1952 году, доктор физикоматематических наук, профессор, заведующий отделом высокочастотной релятивистской электроники Института прикладной физики РАН. Область интересов − лазеры на свободных электронах, мазеры на циклотронном резонансе, релятивистские гиротроны, многочастотные процессы в электронных СВЧ-приборах с распределенным взаимодействием, эффекты канализации и сверхизлучения, плазменные и пучковые неустойчивости. Лауреат премии им. Ленинского комсомола (1980), Государственной премии РФ (2003). Автор более 250 статей и обзоров по указанной проблематике.

Россия, 603950 Н. Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, 46 Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики РАН», E-mail: ginzburg@appl.sci-nnov.ru



Зотова Ирина Валерьевна родилась в Горьком (1968). Окончила радиофизический факультет Горьковского государственного университета (1990). После окончания ГГУ начала работать в Институте прикладной физики РАН. Защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата (1999) и доктора (2016) физико-математических наук. В настоящее время – ведущий научный сотрудник ИПФ РАН.

Россия, 603950 Н. Новгород, БОКС-120, Ульянова, 46 Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики РАН», E-mail: zotova@appl.sci-nnov.ru



Сергеев Александр Сергеевич родился в 1957 году. Окончил механикоматематический факультет Горьковского государственного университета (1980), работает в Институте прикладной физики РАН, старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией вычислительной физики плазмы и электроники. Область научных интересов – математическое моделирование сложной динамики в приборах электроники больших мощностей. Автор более 150 статей в отечественных и зарубежных журналах.

Россия, 603950 Н. Новгород, БОКС-120, Ульянова, 46 Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики РАН», E-mail: sergeev@appl.sci-nnov.ru



Рожнев Андрей Георгиевич родился в Саратове (1959). Окончил физический факультет СГУ (1981). С этого же года работал в различных должностях на кафедре электроники СГУ а также в НИИ механики и физики СГУ. В настоящее время – старший научный сотрудник СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Область научных интересов – вакуумная СВЧ электроника, вакуумная микроэлектроника, вычислительная электродинамика, оптика, теория колебаний и волн. Автор более 100 статей и соавтор нескольких учебных пособий для физических специальностей вузов.

Россия, 410019 Саратов, ул. Зеленая, 38 Саратовский филиал ИРЭ имени В.А. Котельникова РАН E-mail: RozhnevAG@gmail.com



Тараканов Владимир Павлович родился в Москве (1948). Окончил физический факультет МГУ (1972). Защитил кандидатскую (1978) и докторскую (2011) диссертации. С 1988 года работает над 1D, 2D и 3D кодом КАRAT, предназначенным для решения широкого круга нестационарных электродинамических задач со сложной геометрией, в том числе моделирования микроволновых генераторов, плазменных устройств и явлений, с учетом ионизации и поверхностных взаимодействий. Код используется в России и за рубежом. Автор более 250 статей. Сотрудник ОИВТ РАН и МИФИ.

Россия, 125412 Москва, Ижорская, 13, стр.2 Объединенный институт высоких температур РАН Россия, 115409 Москва, Каширское шоссе, 31 Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» E-mail: karat@tarak.msk.su

Новое в прикладной физике



УДК 621.373.9; 621.382.2.09.64

ВОЗДЕЙСТВИЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО ШУМОВОГО СИГНАЛА НА СВЧ-ГЕНЕРАТОР ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ КОЛЕБАНИЙ НА Si-Ge ТРАНЗИСТОРЕ*

Е. А. Мясин, Н. А. Максимов, В. Д. Котов

ФГБУН Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал Россия, 141190 Фрязино Московской обл., пл. Введенского, д. 1 E-mail: eam168@ms.ire.rssi.ru, maksna49@mail.ru

Поступила в редакцию 13.04.2018

Цель данной работы – показать возможность хаотизации колебаний при воздействии низкочастотным (0.1...3.0 MHz) шумовым сигналом на цепь питания транзистора в одночастотном транзисторном генераторе. Предполагается подтвердить высказанное ранее предположение о том, что этот эффект, впервые обнаруженный нами в ЛПД-генераторе, может иметь место в любых генераторах с полупроводниковым активным элементом, имеющим хотя бы один p-n-переход. **Метод.** Для решения этой задачи был создан транзисторный СВЧ-генератор Колпитца упрощённой структуры. В качестве активного элемента в нём использовался биполярный Si-Ge *n-p-n*-транзистор. Тот же генератор низкочастотного шумового сигнала (0.1...3.0 МНz), что и в эксперименте с ЛПД-генератором, был использован для воздействия на его цепь питания. Вначале были исследованы режимы детерминированных колебаний СВЧ-генератора Колпитца (одночастотный и двухчастотный). Затем исследовано воздействие низкочастотного шумового сигнала на цепь питания его транзистора и проведено сравнение спектров СВЧ-генерации без воздействия шумового сигнала и с ним. Это сравнение впервые показало, что спектры детерминированных колебаний в СВЧ-генераторе Колпитца при воздействии низкочастотного шумового сигнала на цепь питания транзистора трансформируются в спектры шумовых колебаний. Результат эксперимента полностью подтвердил наше предположение. Поэтому такой способ хаотизации колебаний может быть использован для любых полупроводниковых генераторов с активным элементом, имеющим хотя бы один p-n-переход, точнее, его нелинейную вольт-амперную характеристику.

Ключевые слова: СВЧ-генератор Колпитца, транзистор, воздействие, низкочастотный шумовой сигнал (0.01...3.0 MHz), хаотизация колебаний, ЛПД-генератор, *p*–*n*-переход.

DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-3-99-108

Образец цитирования: Мясин Е.А., Максимов Н.А., Котов В.Д. Воздействие низкочастотного шумового сигнала на СВЧ-генератор детерминированных колебаний на Si–Ge транзисторе // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2018. Т. 26, № 3. С. 99–108. DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-3-99-108

^{*}Статья написана по материалам докладов на XVII международной зимней школесеминаре по радиофизике и электронике СВЧ. Россия, Саратов, 5–10.02.2018.

EFFECT OF LOW-FREQUENCY NOISE SIGNAL ON MICROWAVE OSCILLATOR OF DETERMINISTIC OSCILLATION AT Si–Ge TRANSISTOR

E. A. Myasin, N. A. Maksimov, V. D. Kotov

Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS, Fryazino branch
1, Vvedenskogo Square, 141190 Fryazino, Moscow Region, Russia
E-mail: eam168@ms.ire.rssi.ru, maksna49@mail.ru

Received 13.04.2018

Aim of this work – to show the possibility of oscillation chaotization at the effect of low-frequency (0.1...3.0 MHz) noise signal both on feed circuit of IMPATT diode in one-frequency IMPATT diode oscillator (IMPATT-DO) and on feed circuit of transistor in one-frequency transistor oscillator. It supposed to confirm the assumption, said early, that this effect, found by us in first time for one-frequency IMPATT-DO, can take place for any semiconductor oscillators with p–n-transition, more exactly, it's nonlinear current-voltage characteristic. **Method**. The microwave Colpitts oscillator with a simplified structure was created for decision of this problem. The Si–Ge p–n–p-transistor was used in the oscillator as an active element. The same (0.1...3.0 MHz) noise signal oscillator was used for the effect on it's feed circuit as in experiment with IMPATT-DO.

The deterministic oscillation regimes (one-frequency and two-frequencies) of the microwave Colpitts oscillator were investigated. Subsequently the low-frequency noise signal effect on the feed circuit of transistor was investigated and the spectra comparison of the microwave generation was leaded without an effect and with it. This comparison has shown in first time the deterministic oscillation spectra has transformed to chaotic oscillation spectra in microwave Colpitts oscillator at the low-frequency noise signal effect on the transistor feed circuit. **Result** has full confirmed our assumption. Therefore this effect can take place for any semiconductor oscillators with an active element, which has *p*–*n*-transition, more exactly, it's nonlinear current-voltage characteristic.

Key words: microwave Colpitts oscillator, effect, low-frequency (0.1...3.0 MHz) noise signal, oscillation chaotization, IMPATT diode oscillator, *p–n*-transition.

DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-3-99-108

Reference: Myasin E.A., Maksimov N.A., Kotov V.D. Effect of low-frequency noise signal on microwave oscillator of deterministic oscillation at Si–Ge transistor. *Izvestiya VUZ, Applied Nonlinear Dynamics*, 2018, vol. 26, no. 3, pp. 99–108. DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-3-99-108

Введение

Впервые возможность генерации хаотических колебаний с широким спектром мощности в СВЧ-диапазоне за счёт нелинейного взаимодействия многих собственных частот многорезонансной автоколебательной системы была показана в автогенераторе из двух ЛБВ, замкнутых в кольцо, в котором одна из ламп выполняла функцию нелинейного элемента, вторая – усилителя мощности [1, 2]. В 2017 году исполнилось 50 лет этому событию. Оно послужило отправной точкой для развития нового направления не только в электронике и радиофизике, но и в других областях физики и получило общее название нелинейной хаотической динамики автоколебательных систем. К настоящему времени исследовано множество самых разнообразных систем, демонстрирующих хаотическую динамику [3]. Так, с развитием твердотельной СВЧ-электроники оказалось возможным создавать в микроволновом диапазоне системы даже с большей шириной спектра, чем в ЛБВ [4–6], с использованием, на-

пример, транзисторов. Однако в миллиметровом диапазоне, который транзисторы только начинают осваивать, в твердотельных генераторах приходится использовать лавинно-пролётные диоды (ЛПД) и диоды Ганна, а для реализации в них режима хаотических колебаний, например в генераторах на основе ЛПД (ГЛПД), использовать волноводно-коаксиальные камеры [7, 8], несколько изменив их конструкцию [9, 10]. В настоящее время генераторы шума микроволнового и миллиметрового диапазона, использующие хаотическую динамику активных автоколебательных систем, востребованы для самых разнообразных областей науки и техники. Исследовались и другие методы для получения режимов хаотизации колебаний в ГЛПД.

1. Хаотизация колебаний в ГЛПД при внешнем воздействии

В работе [11] была показана возможность превращения генератора одночастотных колебаний на лавинно-пролётном диоде 7-миллиметрового диапазона волн в генератор шумовых колебаний при воздействии внешнего узкополосного низкочастотного (0.01...3.0 МНz) шумового сигнала на цепь питания ЛПД. Что касается исследования этого вопроса в зарубежной литературе, то, как показал проведенный в работе [11] поиск, в открытом доступе аналогов обнаружено не было. В контексте объяснения этого эффекта в [11] можно утверждать, что этот эффект должен «работать» для всех генераторов с активным элементом, содержащим р-п-переход. Имеются в виду транзисторы (биполярные, полевые, МОП-транзисторы), ЛПД, ИПД, туннельные диоды и т.д. Но, прежде всего, этот эффект важен для транзисторных генераторов.

Действительно, в ГЛПД этот эффект был связан с возможностью добавления небольшого шумового напряжения (0.1...0.5 V) к постоянному напряжению, определяющему рабочую точку на вольт-амперной характеристике (ВАХ) обратносмещённого *p-n*-перехода ЛПД. Суть этого воздействия заключается в том, что оно обеспечивает существенный разброс числа носителей тока в пролётном пространстве диода, необходимого для генерации только на одной частоте, обеспечивая генерацию на соседних частотах в пределах полосы частот, определяемых добротностью электродинамической системы генератора. Эта ситуация вполне аналогична по существу разбросу носителей тока по скоростям, что обеспечивает разрушение сгустка электронов, сгруппированного автоколебательной системой одночастотного сигнала в генераторах с приборами, использующими электронные потоки. Особенно наглядно результат этого процесса, впервые наблюдавшегося вблизи пускового тока ЛПД-генератора 7-миллиметрового диапазона волн при увеличении уровня воздействия узкополосного НЧ шумового сигнала [11], показывает изменение характера спектра

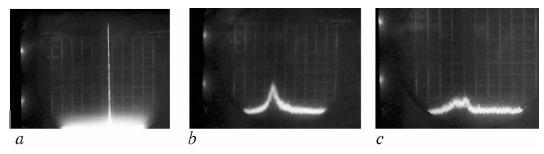


Рис. 1. Изменение спектра ВЧ-сигнала от уровня воздействия, V: 0 (a), 0.02 (b), 0.1 (c)

Fig. 1. Transformation of the HF signal spectra from the influence level, V: 0 (a), 0.02 (b), 0.1 (c)

высокочастотного (ВЧ) сигнала, представленное на рис. 1.

Поэтому можно утверждать, что этот эффект должен «работать» и на прямой ветви ВАХ, то есть для всех генераторов с активным элементом, содержащим p-n-переход.

2. Поиск известных публикаций по этому вопросу

Для проверки этого утверждения было проведено исследование публикаций в зарубежной литературе. Однако, как показал поиск аналогичных публикаций в поисковой системе Google, подобные работы в открытом доступе за рубежом отсутствуют. Теоретические работы, как и экспериментальные, в основном, относятся к трансформации собственных НЧ-шумов транзисторов в частотные ВЧ-шумы генераторов, например, на полевых транзисторах [12], или введению внешнего сигнала на вход такого генератора для стабилизации одночастотной генерации [13].

То, что высказанное ранее утверждение справедливо, подтверждают исследования воздействия узкополосного НЧШ-генератора (0.01...6.0 МНz) на систему связанных СВЧ-генераторов [14], показавшие возможность разрушения синхронных колебаний в этой системе при таком воздействии. В эксперименте, который был поставлен для проверки развитой теоретической модели, использовались биполярные транзисторы. В результате предсказанное в теории разрушение режима синхронных колебаний внешним НЧ-шумом было проиллюстрировано соответствующими спектрограммами превращения многочастотного спектра в непрерывный спектр, перекрывающий всю занятую им полосу частот. Однако никаких выводов относительно физических процессов в транзисторе, приводящих к такому результату, не было сделано. Была констатация факта, подтверждающая результат теоретического исследования.

Но при этом было зафиксировано, что «частотный диапазон воздействующего шума занимает полосу частот порядка 0.6% от частоты f сигнала автономной генерации и мощность его составляет 0.07P от мощности P автономной генерации». Таким образом, этот факт также подтверждает правомерность высказанного ранее утверждения относительно генераторов с полупроводниковыми приборами, имеющими p-n-переход, в частности, для биполярных транзисторов. Позднее результаты этого теоретического исследования были использованы в работе [15] при создании широкополосного генератора шума для маскировки излучения персональных компьютеров.

3. Хаотизация детерминированных колебаний в генераторе на Si-Ge транзисторе

В данной работе эффект хаотизации детерминированных колебаний продемонстрирован на примере воздействия узкополосного НЧШ-сигнала на упрощённую схему генератора Колпитца [6] на сосредоточенных элементах, в котором использовался Si-Ge n-p-n-транзистор. Как и во всех генераторах, в которых мог быть реализован режим генерации хаотических колебаний, в генераторе работы [6] ему предшествовал режим одночастотных колебаний.

Для проведения эксперимента по воздействию узкополосного НЧШ-сигнала

на цепь питания транзистора был создан генератор НЧШ-сигнала, спектр которого занимал полосу частот от нескольких килогерц до 3 МНz по уровню -3 dB и около 10 МHz по уровню -10 dB. Исследованы реализации процесса с выхода этого генератора с помощью осциллографа C1-75. Было установлено, что плотность распределения вероятности амплитуды напряжения U подчиняется Гауссову (нормальному) закону с нулевым средним. Отклонение о определялось по засветке экрана и служило оценкой амплитуды НЧШ-сигнала.

Для наблюдения спектра СВЧ-сигнала использовался анализатор спектра Hewlett Packard 8569 с диапазоном измерения частоты от 0.01 до 22 GHz.

Сначала экспериментально было установлено, что в автономном режиме генерации при постоянном напряжении эмиттера $U_9=-2.2~{\rm V}$ (база заземлена) при изменении напряжения коллектора от 0 до 1.35 V частота одночастотной генерации изменяется следующим образом: при $U_{\rm K}=0$ частота была $f_1=4.122~{\rm GHz}$, при $U_{\rm K}=+0.75{\rm V}$ частота $f_2=4.667~{\rm GHz}$ и при $U_{\rm K}=+1.35{\rm V}$ частота $f_3=4.867~{\rm GHz}$. Изменения частоты происходили скачкообразно.

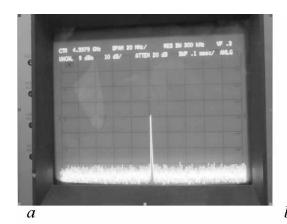
При подключении внешнего шумового сигнала минимальной величины к питанию эмиттера при $U_{\rm K}=0$ частота генерации скачком сместилась вверх на частоту 4.667 GHz. Это означает, что в результате воздействия изменились (улучшились) условия для возбуждения более высокой частоты по сравнению с автономным режимом генерации, так как «сместилась» часть распределения носителей в сторону оптимальной величины для её возбуждения.

Новый режим потребовал увеличения напряжения коллектора до $U_{\rm K}=0.28~{
m V}$, но напряжение эмиттера осталось тем же $U_{\rm 3}=-2.2~{
m V},\,f_2=4.5979~\approx 4.6~{
m GHz}.$

На рис. 2, a, b представлена генерация на частоте f=4.6 GHz без внешнего сигнала и с максимальным (0.1 V) внешним шумовым сигналом, соответственно.

Как видно из рисунка, при воздействии внешнего НЧ шумового сигнала генерация одночастотного СВЧ-сигнала превращается в генерацию узкополосного шумового сигнала с шириной спектра порядка $60~\mathrm{MHz}$ по уровню $-15~\mathrm{dB}$ с максимумом на частоте $f=4.6~\mathrm{GHz}$ и, судя по распределению яркости в спектре, с нормальным законом распределения.

При увеличении напряжения коллектора частота одночастотной генерации плав-



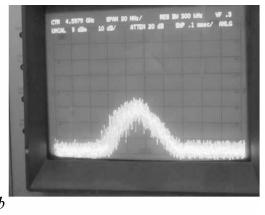


Рис. 2. Изменение спектра ВЧ-сигнала от уровня воздействия, V: 0 (a), 0.1 (b); $U_{\kappa}=0.28~\mathrm{V}$

Fig. 2. Transformation of the HF signal spectra from the influence level, V: 0 (a), 0.1 (b); $U_{\rm g} = 0.28$ V

но смещается вверх. При изменении напряжения до $U_{\rm k}=4.4~{\rm V}$ частота изменяется плавно до $f=4.7~{\rm GHz};$ при $U_{\rm k}=4.75~{\rm V}$ происходит «перескок» на частоту $f=4.9~{\rm GHz}.$ На рис. 3, a,b представлена генерация на частоте $f=4.9~{\rm GHz}.$ без внешнего сигнала и с максимальным (0.1 V) внешним шумовым сигналом, соответственно. Как видно из рисунка, при воздействии внешнего НЧ шумового сигнала генерация одночастотного СВЧ-сигнала превращается в генерацию узкополосного шумового сигнала с шириной спектра порядка 30 MHz по уровню $-15~{\rm dB}$ с максимумом на частоте $f=4.9~{\rm GHz}$ и, судя по распределению яркости в спектре, с нормальным законом распределения.

Затем без внешнего сигнала был найден режим двухчастотной генерации $f_1\approx 4.7$ и $f_2\approx 4.9$ GHz при $U_{\rm K}=0.28$ V. Но этот режим существует в узкой области параметров. Поэтому при увеличении напряжения коллектора генерация на частоте $f_2\approx 4.9$ GHz срывается.

Перестройка напряжения коллектора вверх с включённым внешним НЧ шумовым сигналом среднего уровня (0.05 V) приводит к тому, что при $U_{\rm K}=4.4$ V возбуждается вторая частота на $f_2\approx 4.9$ GHz и сразу вместе с ней возникает шумовой режим. При этом нижняя частота в спектре $f_1\approx 4.7$ GHz, а верхняя – прежняя

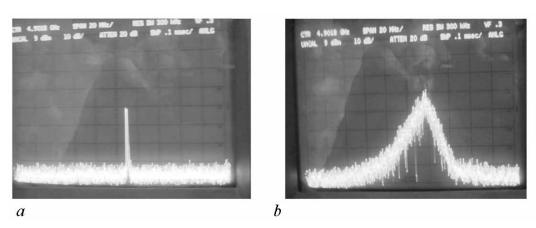


Рис. 3. Изменение спектра ВЧ-сигнала от уровня воздействия, V: 0 (a), 0.1 (b); $U_{\rm K}=4.4~{\rm V}$ Fig. 3. Transformation of the HF signal spectra from the influence level, V: 0 (a), 0.1 (b); $U_{\rm K}=4.4~{\rm V}$

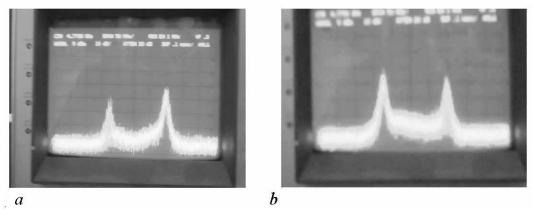


Рис. 4. Изменение спектра ВЧ-сигнала от уровня воздействия, V: 0.05 (a), 0.1 (b); $U_{\rm K}=4.4~{\rm V}$ Fig. 4. Transformation of the HF signal spectra from influence level, V: 0.05 (a), 0.1 (b); $U_{\rm K}=4.4~{\rm V}$

 $f_2 \approx 4.9~{
m GHz}$, и вид спектра представлен на рис. 4, a. Спектр после увеличения уровня воздействия НЧ шумового сигнала до максимальной (0.1 V) величины представлен на рис. 4, b.

Как видно из рис. 4, a, b, воздействие НЧ шумового сигнала приводит в СВЧ-диапазоне к перекрытию соседних резонансов на частотах f_1 и f_2 . Увеличение уровня воздействия приводит к «перекачке» мощности СВЧ шумового сигнала из резонанса f_2 в резонанс на f_1 и некоторому выравниванию неравномерности спектра между ними. Однако максимальной мощности НЧ шумового сигнала не хватает, чтобы «провал» между резонансными частотами в спектре СВЧ-сигнала отсутствовал.

Заключение

Таким образом, предложен и продемонстрирован новый способ перевода режима генерации детерминированных колебаний транзисторного СВЧ-генератора в режим шумовой генерации, причём при слабой нелинейности её активного полупроводникового элемента. При этом, если условия генерации выполнены только для генерации одной частоты, то даже при максимальном уровне воздействующего НЧ шумового сигнала ширина спектра полученного шумового сигнала ограничена узкой полосой, определяемой добротностью автоколебательной системы на этой частоте. В случае возбуждения в генераторе двух соседних частот, того же максимального уровня воздействия НЧ шумового сигнала достаточно для одновременной хаотизации колебаний обеих частот с перекрытием их «индивидуальных» спектров шума. Однако для полного перекрытия этих спектров уровень внешнего НЧ шумового сигнала должен быть больше, чем 0.1 V.

Библиографический список

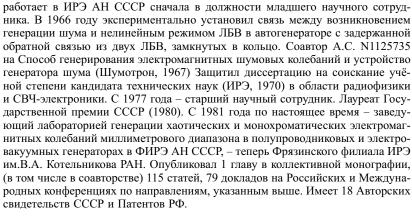
- 1. *Мясин Е.А., Кислов В.Я., Богданов Э.В.* Способ генерирования электромагнитных шумовых колебаний. А.С. №1125735, опубл. 23.11.1984. БЛ №43 с приоритетом от 22.06.1967 г.
- 2. *Кислов В.Я.* Теоретический анализ шумоподобных колебаний в электронноволновых системах и автогенераторах с запаздыванием и сильной нелинейностью // РЭ. 1980. Т. 25, №8. С. 1683.
- 3. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Максимов Н.А., Панас А.И. Генерация хаоса / Под общей редакцией д.ф.-м.н. А.С. Дмитриева. Сер. «МИР физики и техники». М.: Техносфера, 2012. 424 с.
- 4. *Tamasevicius A., Bumeliene S., Lindberg E.* Improved chaotic Colpitts oscillator for ultrahigh frequencies // Electron. Lett. 2004. Vol. 40. P. 1569–1570.
- 5. *Li J.X.*, *Wang Y.C.*, *Ma F.C.* Experimental demonstration of 1.5 GHz chaos generation using an improved Colpitts oscillator // Nonlinear Dyn. 2013. Vol. 72. P. 575–580.
- 6. *Максимов Н.А., Панас А.И.* Твердотельная хаотическая автоколебательная система микроволнового диапазона упрощённой структуры // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43, вып. 3. С. 88–94.
- 7. Misawa T., Kenyon N.D. An oscillator circuit with cap structure for millimeter wave

- IMPATT diodes // IEEE Trans. MTT. 1970. MTT-18. P. 969.
- 8. *Kenyon N.D.* A circuit design for mm-wave IMPATT oscillators // IEEE GMTT International Microwave Symposium Digest. 1970. P. 300–303.
- 9. *Мясин Е.А., Котов В.Д.* Широкополосные диодные генераторы шума миллиметрового диапазона волн // Радиотехника. 2005. № 3. С. 46–50.
- 10. *Мясин Е.А., Котов В.Д*. Генератор СВЧ шумовых колебаний. Патент № 2614925 РФ, по Заявке № 2015154277 от 17.12. 2015. Опубл. 30.03.2017. Бюл. № 10.
- 11. *Котов В.Д., Мясин Е.А.* Воздействие низкочастотного шумового сигнала на генератор одночастотных колебаний миллиметрового диапазона волн на лавинно-пролётном диоде // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43, вып. 22. С. 68–74.
- 12. Verdier J., Liopis O., Plana R., Graffeuil J. Analysis of noise up-conversion in microwave field-effect transistor oscillators // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. August 1996. Vol. 44. no. 8. P. 1478–1483.
- 13. *Hiroshi Okamoto, Mutsuo Ikeda*. Injection-locked ultra-high frequency solid-state oscillator. Patent US 4099144 A. 26.04.1976. Publication date 04.07.1978.
- 14. *Кальянов Э.В., Иванов В.П., Лебедев М.Н.* Принудительная и взаимная синхронизация генераторов при наличии внешнего шума // РЭ. 1990. Т. 35, вып. 8. С. 1682–1687.
- 15. *Лебедев М.Н., Иванов В.П.* Генераторы с хаотической динамикой // Приборы и техника эксперимента. 2002. № 2. С. 94–99.

References

- 1. Myasin E.A., Kislov V.Ya., Bogdanov E.V. Method of the electromagnetic noise oscillation generation. USSA Inventor's Certificate no.1125735, publ. 23.11.84, *Invention Byull.* no. 43, priority at 22.06.1967 (in Russian).
- 2. Kislov V.Ya. *Radio Engineering and Electronics*, 1980, vol. 25, no. 8, p. 1683 (in Russian).
- 3. Dmitriev A.S., Efremova E.V., Maksimov N.A., Panas A.I. Generation of Chaos. Moscow: Tekhnosfera, 2012, 424 p. (in Russian).
- 4. Tamasevicius A., Bumeliene S., Lindberg E. Improved chaotic Colpitts oscillator for ultrahigh frequencies. *Electron. Lett.*, 2004, vol. 40, pp. 1569–1570.
- 5. Li J.X., Wang Y.C., Ma F.C. Experimental demonstration of 1.5 GHz chaos generation using an improved Colpitts oscillator. *Nonlinear Dyn.*, 2013, vol. 72, pp. 575–580.
- 6. Maksimov N.A., Panas A.I. A solid-state microwave-range self-oscillating chaotic system with a simplified structure. *Technical Physics Letters*, 2017, vol. 43, no. 2, pp. 180–182.
- 7. Misawa T., Kenyon N.D. An oscillator circuit with cap structure for millimeter wave IMPATT diodes. *IEEE Trans. MTT*, 1970, MTT-18, p. 969.
- 8. Kenyon N.D. A circuit design for mm-wave IMPATT oscillators. *IEEE GMTT International Microwave Symposium Digest*, 1970, pp. 300–303.
- 9. Myasin E.A., Kotov V.D. Radio Engineering, 2005, no. 3, pp. 46–50.

- Myasin E.A., Kotov V.D. Oscillator of a Microwave Noise Oscillations. Patent RF no. 2614925, priority on invention application no. 2015154277 at 17.12.2015. Publ. 30.03.2017. Bull. no. 10.
- 11. Kotov V.D., Myasin E.A. The effect of a low-frequency noise signal on a single-frequency millimeter-band oscillator based on an avalanche-transit diode. *Technical Physics Letters*, 2017, vol. 43, no.11, pp. 1030–1032.
- 12. Verdier J., Liopis O., Plana R., Graffeuil J. Analysis of noise up-conversion in microwave field-effect transistor oscillators. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, August 1996, vol. 44, no. 8, pp. 1478–1483.
- 13. Hiroshi Okamoto, Mutsuo Ikeda. Injection-locked ultra-high frequency solid-state oscillator. Patent US 4099144 A. 26.04.1976. Publication date 04.07.1978.
- 14. Kalyanov E.V., Ivanov V.P., Lebedev M.H. *Radio Engineering and Electronics*, 1990, vol. 35, no. 8, pp. 1682–1687 (in Russian).
- 15. Lebedev M.H., Ivanov V.P. Chaotic Oscillators. *Instruments and Experimental Techniques*, 2002, vol. 45, no. 2, pp. 231–236.



Мясин Евгений Анатольевич – родился в Новосибирске (23.01.1938), окончил Московский инженерно-физический институт (МИФИ, 1961). С 1962 года



141190 РФ, Московская обл., г. Фрязино, площадь им. Введенского д. 1 ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН E-mail: eam168@ms.ire.rssi.ru



Максимов Николай Андреевич – родился в Глухове, Сумской обл.(1949). Окончил физический факультет МГУ им. Ломоносова (1973). Два года отслужил в армии. С 1975 года по настоящее время работает в ФИРЭ им. Котельникова РАН. Должность – ведущий научный сотрудник. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1989) в области радиофизики и электроники. Автор 35 статей в реферируемых журналах. Автор монографии «Генерация хаоса» (в соавторстве с Дмитриевым А.С., Панасом А.И., Ефремовой Е.В.). Лауреат премии Совета министров СССР.

141190 РФ, Московская обл., г. Фрязино, площадь им. Введенского д. 1 ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН E-mail: maksna49@mail.ru

Котов Виктор Дмитриевич - родился в Щёлкове Московской области (1947). Окончил ВТУЗ Московского Ордена Ленина энергетического института по специальности конструирование и производство радиоаппаратуры (1971). С 1972 года работает в ИРЭ АН СССР (теперь Фрязинский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН) в должности инженера, затем старшего инженера и занимается разработкой, созданием и исследованием работы макетов мощного оротрона сантиметрового диапазона. В 1978 году стал соавтором основополагающей статьи по исследованию возможности получения в оротроне высокого КПД. С 1984 года согласился принять участие в разработке, создании и исследовании широкополосного генератора шума (ГШ) на лавинно-пролётном диоде (ГШЛПД) 8-миллиметрового диапазона волн. В начале 1985 года впервые в СССР такой генератор с шириной спектра более 1000 МГц был создан для использования в шумовом радиолокаторе. Затем, через год (1986) был создан генератор в 3-миллиметровом диапазоне волн с шириной полосы около 3000 МГц. Созданные макеты ГШ использовались для различных применений и передавались в режиме know-how в другие организации. Работы велись по закрытому плану. Тем не менее о передатчике с дискретным изменением уровня выходной мощности, созданном В.Д. Котовым на основе разработанных ГШ, был сделан доклад на Международной конференции в США. Полностью опубликовать полученные результаты стало возможным только в 2005 году, а Патент РФ получен на эту конструкцию ГШ в 2017 году с приоритетом от 2015 г. В 1990-е годы узкополосные ГШЛПД были использованы для КВЧ-терапии в рамках работ ООО «Шлем» и помогли сохранить эту тематику в лаборатории. В настоящее время проводит исследования по генерации хаотических колебаний не только в ГШЛПД, но и в ГШ на транзисторах. В.Д. Котов является высококвалифицированным специалистом в радиотехнике и СВЧ-электронике. Участник публикации 40 статей, 20 докладов на Российских и Международных конференциях, 2 авторских свидетельств СССР и 3 патентов РФ.



141190 Московская обл., Фрязино, площадь им. Введенского д. 1 Фрязинский филиал ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН

Новое в прикладной физике



УДК 537.5

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕВЫХ ЭМИТТЕРОВ ДЛЯ КОРОТКОВОЛНОВЫХ СВЧ ПРИБОРОВ В СП6ПУ: ПОСЛЕДНИЕ ДОСТИЖЕНИЯ*

Г.Г. Соминский, В.Е. Сезонов, Т.А. Тумарева, Е.П. Тарадаев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого Россия, 195251 Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.29 E-mail: sominski@rphf.spbstu.ru, sezonovve@mail.ru, tumareva@rphf.spbstu.ru, evgeny_tar@hotmail.com

Поступила в редакцию 5.04.2018

Тема и цель исследования. Приведены данные о последних достижениях авторов по разработке и исследованию полевых эмиттеров для электроннопучковых СВЧ приборов миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн. Методы. Описаны методы создания и характеристики представляющих большой практический интерес катодов нового типа: многоострийных кремниевых катодов с двухслойными металлфуллереновыми покрытиями, а также многослойных нано-структурированных катодов, эмиссия которых определяется полями у контакта материалов с разной работой выхода. Для оптимизации катодов и определения их эмиссионных характеристик проводились численные расчеты и экспериментальные исследования. Важнейшие отличительные черты использованных экспериментальных установок: • возможно оперативное изменение давления от минимального 10^{-9} – 10^{-10} Тогг до 10^{-6} Тогг и обратно; • возможно проведение ряда технологических операций непосредственно в вакуумной камере, в том числе, по нанесению и обработке покрытий; • возможно исследование эмиссионных характеристик катодов в непрерывном и импульсном режимах в широком интервале напряжений (до 15–25 kV) и токов (до 0.5 A). **Результаты.** Получено большое количество новых результатов, в том числе: • отработаны достаточно простые и воспроизводимые технологии создания многоострийных и многослойных эмиттеров; • определен механизм функционирования защитных фуллереновых покрытий; • определены оптимальные структура и морфология поверхности многоострийных катодов с металл-фуллереновыми покрытиями и продемонстрирована возможность получения с их помощью токов полевой эмиссии приблизительно до 100 mA при плотности тока до 0.4 A/cm²; • определена оптимальная структура многослойных гафний-платиновых катодов и продемонстрирована возможность получения с их помощью токов эмиссии около 2 mA при чрезвычайно большой плотности тока около 200 A/cm²; • продемонстрирована возможность длительной стабильной работы созданных катодов при отборе больших токов в условиях технического вакуума. Обсуждение. Созданные и исследованные катоды перспективны для использования в миниатюрных высоковольтных электронно-пучковых СВЧ устройствах миллиметрового и субмиллиметрового диапазона.

^{*}Статья написана по материалам доклада на XVII международной зимней школе-семинаре по радиофизике и электронике СВЧ. Россия, Саратов, 5–10.02.2018

Ключевые слова: полевая эмиссия, многоострийные катоды, многослойные катоды, технический вакуум, ионная бомбардировка, двухслойные металл-фуллереновые покрытия, поля контактной разности потенциалов, коротковолновые электронно-пучковые СВЧ приборы.

DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-3-109-126

Образец цитирования: Соминский Г.Г., Сезонов В.Е., Тумарева Т.А., Тарадаев Е.П. Разработка и исследование полевых эмиттеров для коротковолновых СВЧ приборов в СПбПУ: Последние достижения // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2018. Т. 26, № 3. С. 109-126. DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-3-109-126

DEVELOPMENT OF FIELD EMITTERS FOR SHORT WAVE MICROWAVE DEVICES AND THEIR INVESTIGATION IN SPBPU: THE LAST ACHIEVEMENTS

G. G. Sominskii, V. E. Sezonov, T. A. Tumareva, E. P. Taradaev

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University 29, Polytechnic Str., 195251 St. Petersburg, Russia E-mail: sominski@rphf.spbstu.ru, sezonovve@mail.ru, tumareva@rphf.spbstu.ru, evgeny_tar@hotmail.com

Received 5.04.2018

Topic and aim. The data on the latest achievements of authors on the development and investigation of field emitters for electron-beam microwave devices of millimeter and submillimeter wavelengths range are presented. Methods. The methods for creating and characteristics of new type cathodes, that are of great practical interest, are described: multi-tip silicon cathodes with two-layer metal-fullerene coatings and multilayer nano-structured cathodes, whose emission is determined by the fields at the contacts of materials with a different work function. Numerical calculations and experimental investigation were carried out to optimize the cathodes and to determine their emission characteristics. The most important features of the experimental setup used are as follows. \bullet The operative change of the pressure from the minimal value 10^{-9} – 10^{-10} Torr up to 10^{-6} Torr and back is possible. \bullet It is possible to carry out a number of technological operations directly in the vacuum chamber, including the deposition and treatment of coatings. • It is possible to study the emission characteristics of cathodes in the continuous and pulsed modes over a wide range of voltages (up to 15-25 kV) and currents (up to 0.5 A). Results, A large number of new results have been obtained which particularly include: • fairly simple and reproducible technologies for creating multi-tip and multilayer emitters have been worked out; • the mechanism of functioning of protective fullerene coatings has been defined; • the optimal structure and morphology of the surface of multi-tip cathodes with metal-fullerene coatings have been determined and the possibility of obtaining the field emission currents up to about 100 mA with the current density up to 0.4 A/cm² has been demonstrated; • the optimal structure of multilayer hafnium-platinum cathodes was determined and the possibility of obtaining the emission currents of about 2 mA at an extremely high current density of about 200 A/cm² has been demonstrated; • the possibility of a long-term stable operation of the created cathodes at large currents in the conditions of at technical vacuum has been demonstrated. Discussion. Summarizing, it can be said that the created and studied cathodes are promising for use in miniature high-voltage electron-beam microwave devices of the millimeter and submillimeter wavelength range.

Key words: field emission, multitip cathodes, multilayer cathodes, technical vacuum, ion bombardment, two-layered metal-fullerene coatings, fields of contact potential difference, shortwave electron-beam microwave devices.

DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-3-109-126

Reference: Sominskii G.G., Sezonov V.E., Tumareva T.A., Taradaev E.P. Development of field emitters for short wave microwave devices and their investigation in SPbPU: The last achievements. *Izvestiya VUZ, Applied Nonlinear Dynamics*, 2018, vol. 26, no. 3, pp. 109–126. DOI: 10.18500/0869-6632-202018-26-3-109-126

Ввеление

До недавнего времени полевые эмиттеры использовались преимущественно в сверхвысоковакуумных и низкоточных электронных приборах, функционирующих при умеренных рабочих напряжениях. Между тем, существуют и привлекают к себе все больший интерес миниатюрные, но высоковольтные СВЧ приборы, где трудно использовать накаливаемые термокатоды. К таковым можно отнести, например, электронно-лучевые устройства коротковолнового миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн [1, 2].

Разработаны эффективные полевые эмиттеры (см., например, [3–6]), позволяющие получать необходимые для указанных приложений токи порядка десятков миллиампер и плотности токов полевой эмиссии свыше или равных 100–200 mA/cm². Но, к сожалению, до сих пор не доказана возможность длительной эксплуатации созданных эмиттеров в высоковольтных электронных приборах при отборе больших токов в условиях технического вакуума. В существующих «распределенных» многоострийных или лезвийных полевых эмиттерах удается уменьшить токовую нагрузку на отдельный эмиссионный центр и таким образом снизить воздействие на эмиттер тепловых эффектов, связанных с протеканием токов через эмиссионные центры. Однако пока не удается исключить разрушающее действие интенсивной в техническом вакууме ионной бомбардировки.

При использовании катодов Спиндта [3] делались попытки уменьшить интенсивность ионной бомбардировки катода с помощью специальных электроннооптических систем, препятствующих попаданию на его поверхность ионов из канала транспортировки сформированного с использованием полевого эмиттера электронного пучка. Но при этом не исключалась бомбардировка катода быстрыми ионами, рожденными на участке ускорения электронов перед входом в канал транспортировки. В последние годы были разработаны конструкции миниатюрных автоэлектронных структур с ионной защитой эмиттера [7]. Электронно-оптическая система таких структур по замыслу разработчиков должна исключить попадание на катод ионов, образованных в самой структуре, но сомнительно, что электрические поля в таких структурах малого размера могут эффективно защитить эмиттер от бомбардировки ионами с энергией больше нескольких сотен вольт, возникающих на участке ускорения электронов вне катодной структуры.

В данной работе будут рассмотрены полевые эмиттеры нового типа, перспективные для использования в высоковольтных электронных приборах, работающих в условиях технического вакуума.

1. Полевые эмиттеры с защитным фуллереновым покрытием

1.1. Защита одноострийных вольфрамовых эмиттеров. Авторами были разработаны специальные покрытия, способные защитить полевой эмиттер от разрушающего действия ионной бомбардировки [9–10]. Для этих целей использовалось покрытие из молекул фуллерена C_{60} толщиной 2–3 монослоя (ml). Исследование работы одноострийных вольфрамовых эмиттеров с фуллереновыми покрытиями, выполненное в полевом эмиссионном проекторе, описано в работах [8–10]. Фуллере-

новое покрытие обеспечивало длительную стабильную работу одноострийных эмиттеров из вольфрама при их эксплуатации в высоковольтных режимах (5–10 kV) в техническом вакууме $(10^{-7}-10^{-8}\ \text{Torr})$.

Фуллереновые покрытия обладают большой работой выхода (примерно 5.3 eV) [9]. Понизить работу выхода покрытия можно, нанося на его поверхность тонкие покрытия (порядка монослоя) из вещества с меньшей работой выхода. Исследования показали, что напыление атомов калия ведет к падению до 3.5–4 раз величины характерного напряжения, необходимого для отбора фиксированного тока. Однако после завершения процесса активирования характерные напряжения увеличиваются в течение 15–20 часов практически до исходного значения из-за ухода атомов калия с поверхности в сторону подложки. Долговременного снижения работы выхода удавалось добиться, активируя фуллереновое покрытие не атомами, а потоком медленных (40–100 eV) ионов калия [9, 10]. При таком способе активирования в покрытии образуются металлофуллерены типа эндоэдралов ($K@C_{60}$) и/или экзоэдралов ($C_{60}@K$) [11], присутствие которых в покрытии уменьшает работу выхода его поверхности. Максимальное снижение работы выхода покрытия при активировании потоком ионов достигало приблизительно 1.5 eV.

Молекулы металлофуллеренов обладают большим дипольным моментом и в неоднородных электрических полях в присутствии даже малых неоднородностей покрытия не уходят с покрытия к подложке, а перемещаются в сторону больших электрических полей, формируя множество (десятки) нано-выступов на поверхности субмикронного острия. Эта структура выступов дает дополнительное усиление поля у поверхности острийного эмиттера.

Проведенные опыты продемонстрировали своеобразный процесс саморегуляции структуры защитного фуллеренового слоя в присутствии интенсивной ионной бомбардировки. Быстрые ионы, бомбардирующие эмиттер, практически не разрушают и не десорбируют молекулы покрытия, а большую часть своей энергии выделяют в подложке. По дороге к подложке они разрушают некоторые выступы на поверхности покрытия, но поляризованные молекулы фуллеренов и металлофуллеренов, высвободившиеся из выступов, перемещаются по поверхности эмиттера под действием сильно неоднородных полей и быстро захватываются соседними выступами или формируют новые. В результате токи эмиссии флюктуируют, но средние их значения меняются во времени слабо. Быстрые перемещения дипольных молекул по поверхности ведут к мерцанию изображения эмитирующей поверхности острия, которое регистрируется на экране полевого эмиссионного проектора.

Таким образом, полученные нами ранее данные свидетельствуют, что тонкие фуллереновые покрытия позволяют защитить острийный полевой эмиттер из вольфрама от разрушающего действия ионной бомбардировки. Этот метод защиты достаточно прост и воспроизводим. Однако одноострийные полевые эмиттеры с субмикронным радиусом вершины, даже из такого прочного и тугоплавкого материала, как вольфрам, не могут обеспечить токов полевой эмиссии свыше 100–200 µА. Поэтому представляет большой интерес рассмотрение возможности создания распределенных многоострийных катодов с фуллереновыми покрытиями.

1.2. Многоострийные кремниевые полевые эмиттеры с защитными покрытиями. Как показывает опыт исследования полевых эмиттеров, получить токи порядка десятков миллиампер, необходимые во многих приложениях, удается только с распределенных систем достаточно большой площади. Поэтому было решено определить возможности создания и использования многоострийных полевых эмиттеров с защитными покрытиями.

Уже давно хорошо отработана достаточно простая технология создания упорядоченных многоострийных систем из кремния (см., например, [12]). Однако применение таких систем в качестве эмиттеров затруднено, причем не только потому, что они разрушаются под действием ионной бомбардировки, но также и по той причине, что кремниевые острия имеют, обычно, малую проводимость. Кроме того, кремниевые эмиттеры зачастую недостаточно прочны и разрушаются под действием пондеромоторных сил уже при умеренных значениях электрического поля и отбираемого тока эмиссии. Использование острийных кремниевых полевых эмиттеров в высоковольтных электронных приборах, работающих в техническом вакууме, становится возможным, если одновременно повысить их проводимость и прочность, а также устойчивость к воздействию ионной бомбардировки.

Очевидно, что проводимость поверхности кремниевого острия может быть повышена, если на нее нанести даже тонкий (порядка 4–5 nm) слой металла (см., например, [13]). Создание более толстого слоя металла на поверхности острия может увеличить и его прочность. Однако металлизация не способна долговременно защитить эмиттер от разрушающего действия ионной бомбардировки. Было решено опробовать возможность одновременного решения всех основных проблем, препятствующих использованию многоострийных катодов из кремния, с помощью двухслойных металл-фуллереновых покрытий [14–16].

Исследованы созданные на основе плоских кремниевых многоострийных структур катоды, необходимые для формирования однородных по сечению и кольцевых электронных потоков с осевой симметрией, то есть потоков, предназначенных для использования в основных типах электронно-пучковых СВЧ приборов, таких, например, как гиротроны, ЛБВ и ЛОВ. У однородных по сечению катодов варьировали в широких пределах их внешний диаметр и площадь эмитирующей поверхности. У кольцевых эмиттеров меняли, кроме того, ширину Δ пояска острий, эмитирующего электроны.

Наряду с экспериментальным исследованием многоострийных катодов, проводились расчеты, нацеленные на оптимизацию морфологии их поверхности. В расче-

тах определялось влияние на величину тока полевой эмиссии высоты h и радиуса R вершины острий, а также расстояния L между ними. Расчеты выполнялись для диодной системы с бесконечно протяженными плоскими катодом и анодом, расположенными на расстоянии 1.5 mm друг от друга. Напряжение U между катодом и анодом диодной структуры менялось в расчетах в пределах $1 \le U \le 20$ kV. В расчетах задавалась коническая форма острий с фиксированным радиусом основания 5 μ m. Для катодов с активированным металл-фуллереновым покрытием работа выхода острий задавалась в диапазоне от 4.0 eV до 4.7 eV. Для неактивированных покрытий работа выхода принималась равной 5.3 eV.

В заданной геометрии, при разных значениях напряжения U численно решалось трехмерное уравнение Лапласа с помощью метода конечных элементов с использованием пакета программ COMSOL Multiphysics [17]. На основании полученных данных о распределении потенциала определялось распределение электрического поля E у поверхности острий, а затем с помощью формулы Фаулера—Нордгейма рассчитывались распределение плотности тока полевой эмиссии с их поверхности и ток с каждого острия. Для получения полного тока с катода производилось суммирование полного тока по всем остриям, с которых электроны попадают на коллектор.

Экспериментально были исследованы два типа однородных по поверхности многоострийных катодов: катоды малой площади (КМП) и катоды большой площади (КБП). Многоострийные структуры КМП формировались на обращенной к аноду торцевой поверхности стержня из кремния диаметром 1 mm и имели площадь $0.002~{\rm cm}^2$. КБП формировались на плоских подложках из кремния площадью от $0.1~{\rm дo}~1.0~{\rm cm}^2$. КМП включали от $1~{\rm do}~300~{\rm octpuй}$. Количество острий на поверхности КБП достигало приблизительно 10^5 . Полученное в растровом электронном микроскопе изображение участка поверхности КБП и изображение отдельного острия показаны на рис. 1.

Исследованные кольцевые эмиттеры имели приблизительно одинаковые площадь $(0.3~{\rm cm}^2)$ и морфологию эмитирующей поверхности и отличались средним диаметром и шириной многоострийного пояска.

Все покрытия наносились на многоострийные структуры непосредственно в экспериментальном приборе. Здесь же производилось активирование фуллереновых покрытий потоком ионов калия с энергией 40 eV. Морфология поверхности полевых эмиттеров контролировалась с использованием растрового электронного микроскопа типа Supra 45 WDXC до установки в экспериментальный прибор и после окончания экспериментов.

Вакуумная камера, в которой проводились экспериментальные исследования, подвергалась непрерывной откачке с помощью магниторазрядного насоса. Она была оснащена системой напуска азота. Напуск азота позволял оперативно менять давление в камере от минимального порядка 10^{-10} – 10^{-9} Torr до 10^{-6} Torr и обратно. Формирование покрытий производилось, как правило, при давлениях порядка 10^{-9} Torr. Для получения информации о функционировании катодов в техническом вакууме измерение эмиссионных характеристик катодов проводилось при повышенных давлениях примерно 10^{-7} Torr.

Характеристики КМП экспериментально исследовались в полевом эмиссионном микроскопе-проекторе с расстоянием между катодом и анодом-коллектором 12–15 mm. Из-за «расфокусировки» электронного потока на пути от острийной струк-

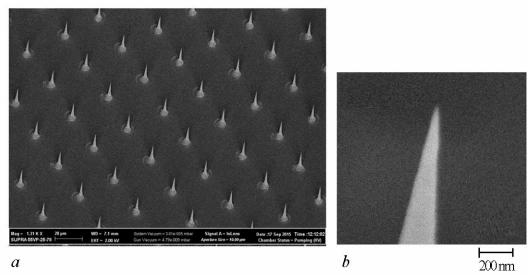


Рис. 1. a – изображение участка поверхности катода большой площади, полученное с помощью растрового электронного микроскопа (зарегистрировано под углом 45° к нормали поверхности эмиттера). Расстояние между остриями 30 μ m, высота острий $\approx 30~\mu$ m. b – изображение отдельного острия

Fig. 1. a – an image of a part of the surface of a large area cathode, obtained with a scanning electron microscope (recorded at an angle of 45° to the normal of the emitter surface). The distance between the tips is 30 μ m, the height of the tips is 30 μ m. b – image of the single tip

туры до коллектора плотность электронного тока на коллектор не превышала примерно 10^{-3} – 10^{-4} средней по поверхности плотности тока с катода. В связи с этим при исследовании КМП можно было определить возможность длительной эксплуатации катодов в непрерывном режиме при отборе с их поверхности тока достаточно больших плотностей, сведя к минимуму интенсивность электронной бомбардировки коллектора и тепловые эффекты на коллекторе, а также десорбцию частиц с его поверхности.

Измерение эмиссионных характеристик КБП и кольцевых эмиттеров проводилось в диоде с расстоянием 1.5 mm между катодом и анодом-коллектором. Плотности регистрируемых токов на коллектор в таких измерениях близки к плотности тока с катода. Поэтому, чтобы избежать перегрева коллектора, основные измерения характеристик КБП и кольцевых эмиттеров в непрерывном режиме проводились при токах эмиссии, не превышающих 1–2 mA. Измерения при больших токах выполнялись в импульсном режиме при длительности импульсов 1–2 µs и частотах их следования 50–500 Hz.

Типичные характеристики КМП показаны на рис. 2. Исследованные КМП имели примерно 300 кремниевых острий с покрытием, включающим слой молибдена толщиной примерно 10 nm и нанесенное поверх металлизации фуллереновое покрытие толщиной 2 ml, активированное в результате бомбардировки ионами калия. Радиус вершины острий с учетом покрытия был примерно равен 20 nm.

Вольт-амперная характеристика I(U), измеренная в импульсном режиме, по-казана на рис. 2, a. Средняя по поверхности КМП плотность тока эмиссии при предельном токе ориентировочно 2 mA была порядка $1~{\rm A/cm^2}$. Типичная зависимость тока эмиссии КМП от времени работы катода I(t), измеренная при напряжении $U=6.3~{\rm kV}$ и начальном токе 240 ${\rm \mu A}$, приведена на рис. 2, b.

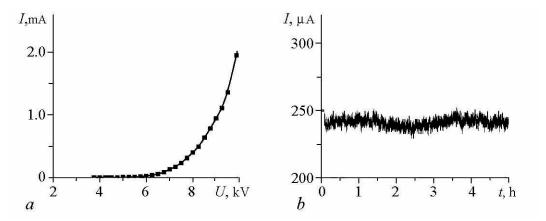


Рис. 2. Характеристики катода малой площади с металл-фуллереновым покрытием: a – вольт-амперная характеристика катода, полученная в импульсном режиме (2 μ s, 100 Hz); b – зависимость тока эмиссии от времени работы в статическом режиме при напряжении $U=6.3~{\rm kV}$

Fig. 2. Characteristics of a small area cathode with a metal fullerene coating: a – current-voltage characteristic of a cathode obtained in a pulsed mode (2 μ s, 100 Hz); b – the dependence of the emission current on the operating time in the static mode at a voltage U=6.3 kV

Эксперименты с катодами малой площади подтвердили возможность защиты полевых эмиттеров с помощью металл-фуллереновых покрытий от разрушающего действия ионной бомбардировки. В условиях технического вакуума на уровне 10^{-7} Тогг флюктуации тока не превышали приблизительно ± 2 –3%. При измерении характеристик I(t) наибольший интервал времени работы КМП в течение одного дня не превышал 5–7 часов. Однако высокую долговечность созданных острийных полевых эмиттеров при эксплуатации в техническом вакууме подтверждают многократные длительные измерения характеристик I(t) данного катода, выполненные в разные дни.

Полученные данные об эмиссионных характеристиках КМП с двухслойными покрытиями свидетельствуют, что эмиттеры такого типа могут стабильно работать в непрерывном режиме при плотностях тока эмиссии, достаточных для некоторых типов коротковолновых (миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн) СВЧ приборов. Например, даже при токе эмиссии 240 μ A, существенно меньшем предельного значения (примерно 2 mA), средняя по поверхности эмиттера плотность тока эмиссии была около 1.2×10^{-1} A/cm².

В экспериментах с КМП были оценены максимальные значения тока эмиссии, которые может выдержать одиночное кремниевое острие с двухслойным металлфуллереновым покрытием. Было установлено, что типичное острие с покрытием, имеющим суммарный радиус вершины (с учетом толщины покрытия) 20–25 nm, выдерживает отбор тока не более 5–6 µA. Возможности получения больших токов были исследованы для катодов большой площади.

Полученные при исследовании КМП данные были использованы при определении в расчетах оптимальной морфологии поверхности многоострийных катодов. Учитывая тот факт, что острия существующих кремниевых катодов выдерживают отбор токов, не превышающих некоторое предельное значение $I_{\rm extrem}$, при выборе оптимальной морфологии поверхности многоострийных катодов для высоковольтных приборов приходится принимать компромиссное решение. С одной стороны, для получения тока I с катода на его поверхности должно быть создано достаточно большое количество острий N, удовлетворяющих соотношению $N \geq I/I_{\rm extrem}$,

а с другой стороны, должна быть обеспечена работа электронного прибора при повышенном рабочем напряжении. Для принятия такого компромиссного решения необходимы данные о влиянии морфологии поверхности многоострийных катодов на отбор тока с их поверхности. На рис. 3 приведено семейство рассчитанных вольтамперных характеристик для многоострийных эмиттеров с неактивированным металл-фуллереновым покрытием $(e\varphi = 5.3 \text{ eV})$ с остриями высотой $h = 30 \, \mu m \, u \, c \, pадиусом вершины$ R = 10 nm, полученных для разных значений расстояния L между остриями.

Из полученных данных следует, что в условиях, когда практически отсутствует взаимная экранировка острий (при $L=2h=60~\mu m$), эмиттер площадью $0.2~cm^2$ может обеспечить токи не более 50~mA. Большие токи могут быть получены с эмиттера той же плошали

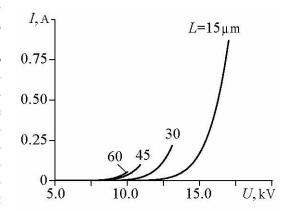


Рис. 3. Семейство вольтамперных характеристик многоострийных эмиттеров с неактивированным металл-фуллереновым покрытием ($e\phi=5.3$ eV). Расчёт выполнен для структур с разными значениями расстояния L между остриями при h=30 μm и R=10 nm

Fig. 3. A family of current-voltage characteristics of emitters with a non-activated metal-fullerene coating ($e\phi=5.3~{\rm eV}$). Calculation were made for emitters with $h=30~{\rm \mu m}$ and $R=10~{\rm nm}$ having the structures with different values of the distance L between the tips

получены с эмиттера той же площади, но с большим количеством острий на поверхности и при большем напряжении между катодом и анодом. Определяет выбор соотношения высоты острий и расстояния между ними допустимое значение напряжения U при эксплуатации катода. Проведенные расчеты свидетельствуют, что, например, при $U=17~{\rm kV}$ структура острий высотой 30 ${\rm \mu m}$ при L=0.5h может обеспечить токи полевой эмиссии примерно $0.8~{\rm A}$.

Уменьшить рабочие напряжения, необходимые для получения фиксированных значений токов, можно, если использовать активированные металл-фуллероновые покрытия. На рис. 4, a показано семейство вольт-амперных характеристик для эмиттеров с R=10 nm, h=30 µm и различными значениями L, полученные для активированного металл-фуллеренового покрытия с работой выхода 4.0 eV. На рис. 4, b показано семейство характеристик, полученное для активированного покрытия со значением $e\phi=4.7$ eV. Согласно проведенным расчетам, при использовании активированного покрытия можно снизить напряжение, необходимое для получения фиксированного значения тока эмиссии, в 1.5 раза.

В данных расчетах не учитывались возможные ограничения тока эмиссии многоострийных катодов, обусловленные, например, конечной прочностью острий и тепловыми эффектами (конечной их теплопроводностью). Для таких сложных нано-структурированных систем, какими являются острия с двухслойными металлфуллереновыми покрытиями, практически невозможно достаточно точно определить эти характеристики. В расчётах трудно также учесть тонкую структуру выступов на поверхности фуллеренового покрытия, формирование которых может заметно изменить усиление поля. Получить информацию о влиянии указанных факторов можно практически только в экспериментах.

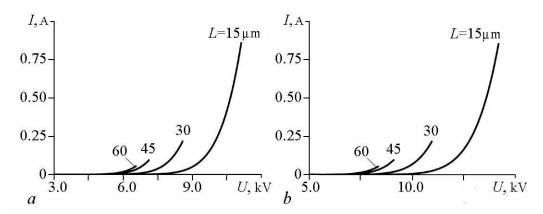


Рис. 4. Семейство вольтамперных характеристик эмиттеров с активированным металл-фуллереновым покрытием: $a-e\phi=4.0$ eV; $b-e\phi=4.7$ eV. Расчёт выполнен для эмиттеров с h=30 μ m и R=10 nm для структур с разными значениями расстояния L между остриями

Fig. 4. A family of current-voltage characteristics of emitters with an activated metal-fullerene coating: $a-e\phi=4.0$ eV; $b-e\phi=4.7$ eV. Calculation were performed for emitters with h=30 μm and R=10 nm for structures with different values of the distance L between the tips

Результаты экспериментального исследования КБП и кольцевых эмиттеров удовлетворительно согласуются с результатами расчетов. Наилучшие эмиссионные характеристики были получены для КБП и кольцевых эмиттеров с остриями высотой $h=30~\mu m$ и радиусом вершины R=20–25 nm, расположенными на расстоянии $L\approx h$, то есть в условиях частичной взаимной экранировки острий. Была экспериментально исследована работа катодов с активированными и с неактивированными покрытиями. После проведения продолжительной (нескольких часов) тренировки катодов с отбором тока, однородные по поверхности КБП и кольцевые эмиттеры стабильно работали в условиях технического вакуума. Предельные токи эмиссии неактивированных КБП площадью 0.2– $0.3~cm^2~u$ кольцевых катодов такой же площади достигали значений 100–110~mA. На рис. 5 приведены типичные

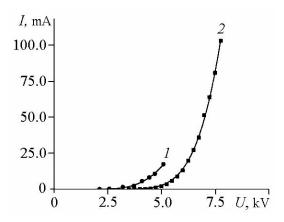


Рис. 5. Типичные вольт-амперные характеристики катода большой площади с активированным (кривая *I*) и с неактивированным (кривая *2*) покрытием

Fig. 5. Typical current-voltage characteristics of the large area cathode with activated (curve *I*) and with non-activated (curve *2*) coating

вольт-амперные характеристики КБП площадью 0.25 cm² с активированным (кривая *I*) и с неактивированным (кривая *2*) покрытием. Предельные токи КБП с активированным покрытием были существенно меньше, чем при работе с неактивированным покрытием. С нашей точки зрения, падение предельных токов связано с тем обстоятельством, что при активировании покрытия часть атомов калия, не захваченная молекулами фуллерена, интеркалирует под фуллереновое покрытие и уменьшает его связь с подложкой.

О высокой стабильности работы КБП и кольцевых эмиттеров свидетельствуют измеренные для этих катодов зависимости тока эмиссии от времени их работы. На рис. 6, *а* приведены типич-

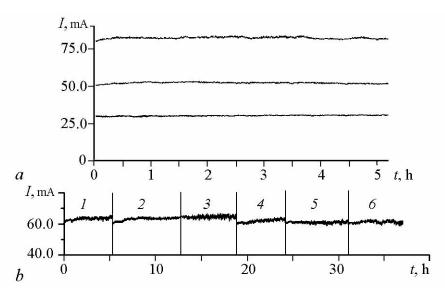


Рис. 6. Измеренные в импульсном режиме (1 µs, 500 Hz) зависимости тока эмиссии I кольцевого катода с внешним диаметром 8.3 mm и внутренним диаметром 5.7 mm от времени работы (t, час): a – характеристики, измеренные при разных значениях начального тока эмиссии; b – типичная последовательность зависимостей I(t), измеренных для одного эмиттера в течение 6 дней (1-6) при напряжении 9.9 kV и приблизительно одинаковых значениях начального тока эмиссии

Fig. 6. Measured in the pulsed mode (1 μ s, 500 Hz) the dependences of the emission current I of the annular cathode with an external diameter of 8.3 mm and an internal diameter of 5.7 mm on the operating time (t, hour): a – the characteristics measured at different initial emission current values; b – a typical sequence of I(t) curves measured for one emitter for 6 days (I-6) at the voltage of 9.9 kV and approximately the same values of the initial emission current

ные зависимости I(t), измеренные для одного из кольцевых эмиттеров площадью 0.3 cm 2 . Как и в случае катодов малой площади высокую стабильность работы КБП подтверждают измерения характеристик I(t) таких катодов, выполненные в разные дни. На рис. 6, b приведена типичная последовательность зависимостей I(t), измеренных для одного кольцевого эмиттера в течение 6 дней. Вертикальными линиями отмечен момент начала измерений, а над кривыми пронумерованы дни, в течение которых проведены измерения.

Таким образом, подытоживая результаты исследования многоострийных кремниевых катодов с двухслойными металл-фуллереновыми покрытиями, отметим главное.

- Отработана достаточно простая в реализации технология создания металлфуллереновых покрытий на поверхности многоострийных кремниевых структур.
- В проведенных расчетах выработаны критерии оптимизации морфологии поверхности структур.
- В экспериментах продемонстрирована возможность стабильной работы моногоострийных катодов с металл-фуллереновыми покрытиями в высоковольтных электронных приборах в условиях технического вакуума на уровне 10^{-7} Torr.
- С оптимизированных многоостроийных катодов, площадью 0.2–0.3 cm² с защитными металл-фуллереновыми покрытиями, получены токи эмиссии примерно 100 mA, достаточные для обеспечения работы некоторых типов СВЧ устройств коротковолнового миллиметрового и субмиллиметрового диапазона, а также миниатюрных источников рентгеновского излучения.

2. Многослойные катоды – новый тип эмиттеров, полевая эмиссия которых определяется полями у контакта материалов с разной работой выхода

Для получения интенсивной полевой эмиссии необходимо создавать у поверхности твердого тела чрезвычайно большие электрические поля порядка или более $2–5~10^7~V/cm$. Обычно для получения таких полей при умеренных напряжениях на поверхности катодов создают усиливающие поле выступы или структуры выступов. Формирование структуры выступов, обеспечивающих достаточное усиление поля, – сложная технологическая задача. К тому же, они разрушаются под действием пондеромоторных сил и/или ионной бомбардировкой в первую очередь. Между тем, известно (см., например, [18]), что большие электрические поля существуют у контакта материалов с разной работой выхода $e\varphi$. Принято считать, что действие таких полей вредно влияют на эмиссию катодов. Например, «поля пятен», существующие на поверхности неоднородных по химическому составу материалов, уменьшают эффективную эмитирующую поверхность, препятствуя выходу термо-электронов с катода в областях контакта разных материалов [18].

Нами было решено опробовать возможность получения полевой эмиссии под действием контактных полей. Были исследованы композиты из гранул гексаборида лантана ($e\phi \approx 2.5$ –3.8 eV) в пирографите ($e\phi \approx 4.7$ eV), а также простейшие системы из приведенных в контакт слоев индия ($e\phi \approx 3.7$ –4.1 eV) [19] и фуллеренов ($e\phi \approx 5.3$ eV) [8]. Эти исследования продемонстрировали возможность получения полевой эмиссии из контакта материалов с разной работой выхода. Полученные в них результаты послужили основой для разработки многослойных эмиттеров нового типа [15, 20].

Многослойные системы, включающие большое количество (до 40) приведенных в контакт пар слоев материалов с разной работой выхода, казались перспективными для получения больших токов полевой эмиссии. Были исследованы многослойные катоды из двух пар материалов: из иттербия ($e\phi \approx 3.1 \text{ eV}$) и углерода ($e\phi \approx 4.7 \text{ eV}$), а также из гафния ($e\phi \approx 3.5 \text{ eV}$) и платины ($e\phi \approx 5.3 \text{ eV}$). Слоистые катоды создавались с использованием магнетронного напыления.

Приведем здесь результаты последних исследований наиболее эффективных слоистых Hf-Pt катодов. Для выработки правил построения слоистых катодов и определения их эмиссионных характеристик проводились специальные расчеты и эксперименты. В расчетах, выполненных с использованием программы COMSOL Multiphysics, определялись распределения полей в диодной системе со слоистым катодом, строились траектории электронов и определялись токи на анод. При расчете полей учитывалось существование переходных зон между приведенными в контакт слоями, где при последовательном магнетронном их напылении существует смесь материалов.

В расчетах было определено влияние на эмиссионные характеристики слоистых катодов толщины d приведенных в контакт слоев и разницы их работы выхода $\Delta e \varphi$, а также числа пар слоев N. На рис. 7 показаны рассчитанные характеристики катода содержащего 20 пар слоев гафния и платины. Расчеты показали, что увеличение толщины слоев платины $d_{\rm Pt}$ при фиксированной толщине слоев гафния $d_{\rm Hf}$ ведет к быстрому падению эмиссионного тока (рис. 7, a). Увеличение же толщины слоев гафния в интервале $d_{\rm Hf} \leq 20$ –25 nm при $d_{\rm Pt} = {\rm const}$ сопровождается быстрым

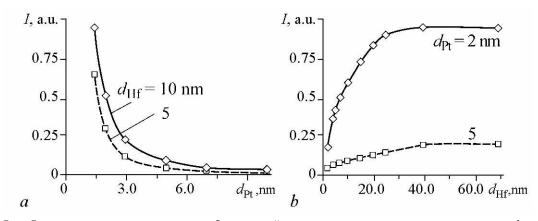


Рис. 7. a — зависимости тока эмиссии I многослойного эмиттера от толщины слоев платины $d_{\rm Pt}$, рассчитанные при фиксированных значения толщины слоев гафния $d_{\rm Hf}$. b — зависимости тока эмиссии от толщины слоев гафния при фиксированных значения толщины слоев платины. Расчеты выполнены при анодном напряжении $U=6~{\rm kV}$ для катода, включающего 20 пар слоев гафния и платины

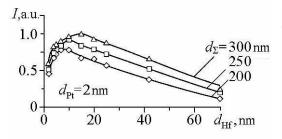
Fig. 7. a – dependences of the emission current I on the thickness $d_{\rm Pt}$ of platinum layers at fixed values of the hafnium layers thickness $d_{\rm Hf}$. b – dependences of the emission current on the thickness of hafnium layers at fixed thickness of platinum layers. The calculations were performed at the anode voltage $U=6~{\rm kV}$ for the cathode including 20 pairs of layers of hafnium and platinum

ростом эмиссионного тока (рис. 7, b). Затем рост тока замедляется и зависимость $I(d_{\mathrm{Hf}})$ выходит в насыщение.

Из расчетов следует (рис. 8), что при заданной суммарной толшине d_{Σ} слоистого катода и минимальной толщине слоев платины $d_{\rm Pt}=2$ nm для получения максимального тока эмиссии необходима оптимизация толщины слоев гафния. Так при $d_{\Sigma}=250$ nm оптимальна толщина слоев гафния составляет 10–12 nm.

Проведенное экспериментальное исследование работы многослойных катодов подтвердило основные выводы, следующие из расчетов. Измерение эмиссионных характеристик проводилось в диоде с расстоянием 1 mm между катодом и анодом. На рис. 9, a показаны типичные вольт-амперная характеристика и характеристика Фаулера—Нордгейма Hf—Pt катода. На рис. 9, b приведена зависимость тока эмиссии I этого же катода от времени t его эксплуатации. Катод включал 20 пар слоев платины и гафния с толщинами соответственно 2 и 10 nm. Такой катод обеспечивал в непрерывном режиме ток полевой эмиссии примерно до 2 mA при средней с поверхности катода плотности тока примерно 200 A/cm².

При работе со слоистыми катодами невозможно использовать какое-либо покрытие, защищающее эмиттер от разрушающего действия ионной бомбардировки. Однако эксперименты показали, что даже при указанных чрезвычайно больших плотностях тока эмиссии в условиях технического вакуума в пределах 10^{-7} – 10^{-8} Torr Hf–Pt катоды работают практически так же стабильно, как многоострийные кремниевые катоды с защитными металл-фуллереновыми покрытиями. Как и в случае многоострийных катодов с металл-фуллереновыми покрытиями испытания стабильности работы многослойных катодов проводились в течение интервала времени не более 5–7 часов в сутки. Однако измерения, выполненные в течение нескольких суток, свидетельствуют, что эмиссионные характеристики слоистых катодов практически не меняются, во всяком случае, в течение нескольких десятков часов их эксплуатации. Столь стабильная работа слоистых катодов в условиях ин-



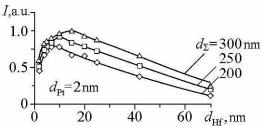


Рис. 8. Зависимости тока эмиссии многослойного катода от толщины слоев гафния $d_{\rm Hf}$, рассчитанные для катодов разной суммарной толщины d_{Σ} при фиксированной толщине слоев платины $d_{\rm Pt}=2$ nm. Анодное напряжение U=6 kV

Fig. 8. Dependences of the emission current of a multilayer cathode on the thickness of hafnium layers $d_{\rm Hf}$, calculated for cathodes of different total thickness d_{Σ} at a fixed thickness of platinum layers $d_{\rm Pt}=2$ nm. Anode voltage U=6 kV

Рис. 9. Характеристики многослойного катода, включающего 20 пар слоев гафния и платины: a – вольт-амперная характеристика и характеристика Фаулера—Нордгейма; b – типичная зависимость эмиссионного тока от времени работы

Fig. 9. Characteristics of a multilayer cathode including 20 pairs of hafnium and platinum layers: a — the current-voltage and Fowler–Nordheim characteristics; b — typical dependence of the emission current on the operating time

тенсивной ионной бомбардировки может быть объяснена тем, что распыление поверхности исследованной слоистой структуры практически не меняет размеров контактной области нанесенных материалов, а также их работы выхода. Связанное же с распылением изменение расстояния между эмитирующей поверхностью слоистой структуры и анодом пренебрежимо мало по сравнению с исходной величиной этого расстояния $d=1\,$ mm.

Заключение

Подводя итоги работы, отметим следующее.

- Во многих лабораториях мира разрабатываются и исследуются полевые эмиттеры. В настоящее время уже существуют катоды, способные обеспечить достаточно большие токи и плотности токов полевой эмиссии, необходимые для ряда приложений в СВЧ электронике. Однако пока для большинства существующих катодов не доказана возможность их практического использования в высоковольтных электронных приборах, работающих в техническом вакууме. Перспективными для таких приложений представляются разработанные в СПбПУ многоострийные кремниевые катоды с двухслойными металл-фуллереновыми покрытиями, а также многослойные катоды из приведенных в контакт материалов с разной работой выхода.
- Полученные в СПбПУ данные свидетельствуют о возможности использования исследованных многоострийных катодов в миниатюрных высоковольтных приборах, работающих в техническом вакууме. Созданные многоострийные катоды с защитными металл-фуллереновыми покрытиями обеспечивают стабильную эмиссию, достаточную для диагностических гиротронов [1]. Многослойные катоды не позволяют пока получать токи, необходимые для функционирования такого типа СВЧ приборов, но по сделанным оценкам имеют боль-

шие резервы повышения токов эмиссии. Оба типа катодов, разрабатываемых и исследуемых в СПбПУ, уже на данном этапе перспективны для использования в миниатюрных источниках рентгеновского излучения.

Авторы выражают глубокую признательность сотрудникам ООО «Топскан», изготовившим кремниевые структуры, необходимые для создания исследованных в работе многоострийных катодов.

Данная работа финансировалась из средств гранта Российского научного фонда № 16-12-10010.

Библиографический список

- 1. Glyavin M.Yu., Manuilov V.N., Sominskii G.G., Taradaev E.P., Tumareva T.A. The concept of an electron-optical system with field emitter for a spectroscopic gyrotron // Infrared Physics & Technology. 2016. Vol. 78. Pp. 185–189.
- 2. *Бурцев А.А.*, *Григорьев Ю.А.*, *Данилушкин А.В.*, *Навроцкий И.А.*, *Павлов А.А.*, *Шумихин К.В.* Особенности разработки электронно-оптических систем для импульсных терагерцовых ламп бегущей волны: Обзор // ЖТФ/ 2018. Т. 88, № 3. С. 464–470.
- 3. Whaley D.R., Duggal R., Armstrong C.M., Bellew C.L., Holland C.E., Spindt C.A. 100 W operation of a cold cathode TWT // IEEE Transactions on Electron Devices. 2009. Vol. 56, no. 5. Pp. 896–905.
- 4. *Spindt C., Holland C.E., Schwoebel P.R.* A reliable improved Spindt cathode design for high currents // Vacuum Electronics Conference 2010 (IVEC–2010). IEEE International. 2010. May. Pp. 201–202.
- 5. Chen Z., Zhang Q., Lan P., Zhu B., Yu T., Cao G., den Engelsen D. Ultrahigh-current field emission from sandwich-grown well-aligned uniform multi-walled carbon nanotube arrays with high adherence strength // Nanotechnology. 2007. Vol. 18. Pp. 265702.
- 6. *Бушуев Н.А., Глухова О.Е., Григорьев Ю.А., Иванов Д.В., Колесникова А.С., Николаев А.А., Шалаев П.Д., Шестеркин В.И.* Исследование эмиссионных характеристик многолучевой электронной пушки с автоэмиссионным катодом из стеклоуглерода // ЖТФ. 2016. Т. 86, № 2. С. 134–139.
- 7. *Абаньшин Б.И., Горфинкель Б.И., Морев С.П., Мосияш Д.С., Якунин А.Н.* Исследование процесса формирования углеродной наноразмерной автоэмиссионной структуры с ионной защитой // ПЖТФ. 2014. Т. 40, № 9. С. 86–94.
- 8. *Тумарева Т.А., Соминский Г.Г., Ефремов А.А., Поляков А.С.* Острийные полевые эмиттеры с фуллереновым покрытием // ЖТФ. 2002. Т. 72, № 2. С. 105–110.
- 9. *Тумарева Т.А., Соминский Г.Г., Бондаренко А.К., Веселов А.А., Светлов И.А.* Активирование фуллереновых покрытий полевых эмиттеров потоками атомов и ионов калия // ЖТФ. 2006. Т. 76, № 7. С. 81–84.
- 10. *Тумарева Т.А., Соминский Г.Г., Светлов И.А., Морозов А.Н.* Активированные потоком ионов калия полевые эмиттеры с фуллереновыми покрытиями в сильных электрических полях // ЖТФ. 2008. Т. 78, № 11. С. 119.

- 11. Campbell E.E.B., Tellgmann R., Krawez N., Hertel I.V. Production and LDMS characterisation of endohedral alkalifullerene films // Journal of Physics and Chemistry of Solids. 1997. Vol. 58, iss. 11. Pp. 1763–1769.
- 12. *Гиваргизов Е.И*. Кристаллические вискеры и наноострия // Природа. 2003. № 11. С. 20–25.
- 13. Karabutov A.V., Konov V.I., Pimenov S.M., Frolov V.D., Obraztsova E.D., Polyakov V.I., Rossukanyi N.M. Peculiarities of field electron emission from CVD diamond films // J. De Physique IV. 1996. Vol. 6, iss. 5. Pp. C5113–C5118.
- 14. Соминский Г.Г., Тумарева Т.А., Тарадаев Е.П., Мишин М.В., Степанова А.Н. Многоострийные полупроводниковые полевые эмиттеры с двухслойными защитными покрытиями нового типа // ЖТФ. 2015. Т. 85, № 1. С. 138–142.
- 15. Соминский Г.Г., Сезонов В.Е., Тарадаев Е.П., Тумарева Т.А., Задиранов Ю.М., Корнишин С.Ю., Степанова А.Н. Полевые эмиттеры нового типа для высоковольтных электронных устройств // Известия вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 7. С. 568–576.
- 16. Соминский Г.Г., Тарадаев Е.П., Тумарева Т.А., Гиваргизов М.Е., Степанова А.Н. Полевая эмиссия многоострийных кремниевых структур с защитными покрытиями // ЖТФ. 2016. Т. 86, № 11. С. 108–111.
- 17. COMSOL Multiphysics. Платформа для моделирования физических процессов [Электронный ресурс]. https://www.comsol.ru/comsol-multiphysics.
- 18. Добрецов Л.Н., Гомоюнова М.В. Эмиссионая электроника. М.: Наука, 1966. 564 с.
- 19. *Фоменко В.С.* Эмиссионные свойства материалов: Справочник. Киев: Наукова думка, 1981. 339 с.
- 20. Sominskii G.G., Sezonov V.E., Tumareva T.A., Taradaev E.P. Field Emitter // Patent of the Russian Federation N₀ 118119 for utility model. Published on 10.07.2012.

References

- 1. Glyavin M.Yu., Manuilov V.N., Sominskii G.G., Taradaev E.P., Tumareva T.A. The concept of an electron-optical system with field emitter for a spectro-scopic gyrotron. *Infrared Physics & Technology*, 2016, vol. 78, pp. 185–189.
- 2. Burtsev A.A., Grigor'ev Yu.A., Danilushkin A.V., Navrotskii I.A., Pavlov A.A., Shumikhin K.V. Features of the development of electron-optical systems for pulsed terahertz traveling wave lamps: Review. *Tech. Phys.*, 2018, vol. 63, iss. 3, pp. 452–459.
- 3. Whaley D.R., Duggal R., Armstrong C.M., Bellew C.L., Holland C.E., Spindt C.A. 100 W operation of a cold cathode TWT. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2009, vol. 56, no. 5, pp. 896–905.
- 4. Spindt C., Holland C. E., Schwoebel P. R.. A reliable improved Spindt cathode design for high currents. *Vacuum Electronics Conference*, 2010 (IVEC-2010), IEEE International, 2010, May, pp. 201-202.
- 5. Chen Z., Zhang Q., Lan P., Zhu B., Yu T., Cao G., den Engelsen D. Ultrahigh-current field emission from sandwich-grown well-aligned uniform multi-walled carbon

- nanotube arrays with high adherence strength. *Nanotechnology*, 2007, vol. 18, pp. 265702.
- 6. Bushuev N. A., Glukhova O. E., Grigor'ev Yu. A., Ivanov D. V., Kolesnikova A.S., Nikolaev A.A., Shalaev P.D., Shesterkin V.I. Emissivity of a multibeam electron gun with a glassy carbon field-emission cathode. *Tech. Phys.*, 2016, vol. 61, iss. 2, pp. 290–295.
- 7. Aban'shin N. P., Gorfinkel' B. I., Morev S. P., Mosiyash D.S., Yakunin A.N. Autoemission structures of nanosized carbon with ionic protection. Studying the prospects of reliable control in forming structures. *Tech. Phys. Letters*, 2014, vol. 40, iss. 5, pp. 404–407.
- 8. Tumareva T. A., Sominskii G. G., Efremov A. A., Polyakov A. S. Tip field emitters coated with fullerenes. *Tech. Phys.*, 2002, vol. 47, iss. 2, pp. 244–249.
- 9. Tumareva T. A., Sominskii G. G., Bondarenko A.K., Veselov A.A., Svetlov I.A. Activation of fullerene coatings on field emitters by potassium atom and ion fluxes. *Tech. Phys.*, 2006, vol. 51, iss. 7, pp. 898–901.
- 10. Tumareva T.A., Sominskii G. G., Svetlov I. A., Morozov A. N. Fullerene-coated field emitters activated by a potassium ion flux in high electric fields. *Tech. Phys.*, 2008, vol. 53, iss. 11, pp. 1504–1507.
- 11. Campbell E.E.B., Tellgmann R., Krawez N., Hertel I.V. Production and LDMS characterisation of endohedral alkalifullerene films. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 1997, vol. 58, iss. 11, pp. 1763–1769.
- 12. Givargizov E.I. Crystal whiskers and nano-tips. *Nature*, 2003, iss. 11, pp. 20–25 (in Russian).
- 13. Karabutov A.V., Konov V.I., Pimenov S.M., Frolov V.D., Obraztsova E.D., Polyakov V.I., Rossukanyi N.M. Peculiarities of field electron emission from CVD diamond films. *J. De Physique IV*, 1996, vol. 6, iss. 5, pp. C5113–C5118.
- 14. Sominskii G.G., Tumareva T.A., Taradaev E.P., Mishin M.V., Stepanova A.N. Multitip semiconductor field emitters with new-type bilayer protecting coatings. *Tech. Phys.*, 2015, vol. 60, iss. 1, pp. 133–141.
- 15. Sominskii G.G., Sezonov V.E., Taradaev E.P., Tumareva T.A., Zadiranov Y.M., Kornishin S.Y., Stepanova A.N. Innovative field emitters for high-voltage electronic devices. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2015, vol. 58, iss. 7, pp. 511–519.
- 16. Sominskii G.G., Taradaev E.P., Tumareva T.A., Mishin M.V., Stepanova A.N. Field emission of multitip silicon structures with protection coatings. *Tech. Phys.*, 2016, vol. 61, iss. 11, pp. 1711–1714.
- 17. COMSOL Multiphysics. Platform for modeling physical processes [Electronic resource]. https://www.comsol.ru/comsol-multiphysics.
- 18. Dobretsov L.N., Gomoyunova M.V. Emission Electronics. Moskow: Nauka, 1966, 564 p. (in Russian).
- 19. Fomenko V.S. Emission Properties of Materials: A Hand book. Kiev: Naukova Dumka, 1981, 339 p. (in Russian).
- 20. Sominskii G.G., Sezonov V.E., Tumareva T.A., Taradaev E.P. Field Emitter. Patent of the Russian Federation N₀ 118119 for utility model. Published on 10.07.2012.



Соминский Геннадий Гиршевич – родился в Ленинграде (1935). Окончил в 1960 году Ленинградский политехнический институт им. М.И. Калинина (ныне Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, СПбПУ). Защитил кандидатскую диссертацию (1967) и диссертацию на соискание ученой степени д.ф.-м.н. (1984) по исследованию и разработке мощных СВЧ устройств со скрещенными полями. Работает на кафедре «Физическая электроника» СПбПУ (с 1960), профессором (с 1991). В 1968 году организовал на кафедре лабораторию сильноточной и СВЧ электроники и руководит ею по настоящее время. Научные интересы: процессы в пространственном заряде и их влияние на работу сильноточных электронных устройств, разработка и совершенствование полевых эмиттеров для формирования интенсивных электронных потоков. Руководитель работ по гранту Российского научного фонда № 16-12-10010. Автор около 300 печатных работ и 22 изобретений.

Россия, 195251 Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.29 Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого E-mail: sominski@rphf.spbstu.ru



Сезонов Вячеслав Евгеньевич – родился в Ленинграде (1988). Окончил (2011) Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ) и поступил в том же году в аспирантуру на кафедру «Физическая электроника» СПбПУ. Работает младшим научным сотрудником кафедры (с 2016). Активно участвует в выполнении научных исследований на кафедре. Разрабатывает и исследует многослойные нано-структурированные полевые эмиттеры нового типа. Является одним из основных исполнителей работ по гранту Российского научного фонда № 16-12-10010. Автор 14 печатных работ и одного изобретения.

Россия, 195251 Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.29 Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого E-mail: sezonovve@mail.ru



Тумарева Татьяна Алексеевна — родилась в Ленинграде (1937). Окончила (1960) Ленинградский политехнический институт им. М.И. Калинина (ныне Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, СПбПУ). После окончания института работала в Государственном оптическом институте, а затем в Ленинградском Политехническом институте (с 1964). Защитила диссертацию на соискание ученой степени к.ф.-м. н. (1972), посвященную созданию и исследованию полевых эмиттеров с разнообразными активирующими покрытиями. В настоящее время — старший научный сотрудник кафедры «Физическая электроника» СПбПУ. Научные интересы связаны с разработкой и исследованием долговечных и эффективных полевых эмиттеров. Разработала оригинальные методы диагностики полевых эмиттеров и формируемых ими электронных потоков. Разработала перспективные полевые эмиттеры с фуллереновыми покрытиями. Является основным исполнителем работ по гранту Российского научного фонда № 16-12-10010. Автор около 150 печатных работ и 4 изобретений.

Россия, 195251 Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.29 Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого E-mail: tumareva@rphf.spbstu.ru



Тарадаев Евгений Петрович родился в Ленинграде (1990). Окончил (2013) Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ) и поступил в том же году в аспирантуру на кафедру «Физическая электроника» СПбПУ. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физ.мат. наук (2017) и в настоящее время работает инженером кафедры. Активно участвует в выполнении научных исследований. Является одним из основных исполнителей работ по гранту Российского научного фонда № 16-12-10010. Разрабатывает и исследует многоострийные полевые эмиттеры нового типа с двухслойными металл-фуллереновыми покрытиями. Автор 22 печатных работ и 2 изобретений.

Россия, 195251 Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.29 Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого E-mail: evgeny tar@hotmail.com

Нелинейная динамика

в лицах. Personalia



УДК 001.3; 001.82; 16; 316.628

НОММАСЕ ДМИТРИЮ ИВАНОВИЧУ ТРУБЕЦКОВУ, ИЛИ УЧЁНЫЙ И ВРЕМЕНА: ТИПОЛОГИЯ ОТНОШЕНИЙ

Б. Н. Пойзнер

Национальный исследовательский Томский государственный университет Россия, 634050 Томск, пр. Ленина, 36 E-mail: pznr@mail.tsu.ru

Поступила в редакцию 24.04.2018

Цель. Целью работы является модель отношений учёного с эволюционирующей социальной системой. Модель описывает ключевые компоненты творческой деятельности, особенности социокультурной ситуации и факторы, способные повлиять на творческую продуктивность. Метод. Метод исследования объединяет принципы описания целеустремлённой системы деятельности (В.И. Корогодин, 1991), шкалу творческих субъектов (Э.А. Соснин, 2011), неологизмы «креатема», «соисторичность», «хронема» (М.Н. Эпштейн, 2017). Результаты. Введено рабочее понятие «творческий контекст», раскрывающее условия, в которых действует учёный. Контексты отличаются степенью мотивации (демотивации) учёного. Предложен принцип упорядочения творческих контекстов. Составлена таблица из 16 контекстов, которая может служить эвристикой начинающему исследователю. Содержание таблицы позволяет исследователю: рефлексировать компоненты своей деятельности, оценивать творческий уровень; диагностировать текущую стадию эволюции творческого коллектива; соотносить уровни своего творчества с этой стадией; соотносить свои творческие притязания с этапом эволюции социальной системы. Обсуждение. Обоснованы допущения, при которых построена таблица контекстов, даны комментарии к ней. Отдельные творческие контексты из таблицы могут быть верифицированы на историко-научных сюжетах в книгах Д.И. Трубецкова, С.Э. Шноля, М. Перутца. В порядке дискуссии выдвинуты понятия: «дизергия» (антоним синергии) и «недостоверное настоящее» (характеристика стадии деградации социальной системы). Анализируется тезис: степень мотивации (демотивации) учёного зависит от меры синергии (дизергии) между уровнем его творчества и стадией жизненного цикла социальной

Ключевые слова: структура творческой деятельности и её рефлексия, мотивация и демотивация творчества, жизненный цикл социальной системы, постсоветский проект, Новейшее средневековье, Д.И. Трубецков.

DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-3-127-153

Образец цитирования: Пойзнер Б.Н. Ноттаде Дмитрию Ивановичу Трубецкову, или Учёный и времена: Типология отношений // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2018. Т. 26, № 3. С. 127–153. DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-3-127-153

HOMMAGE DMITRY IVANOVICH TRUBETSKOV, OR SCIENTIST AND TIMES: TYPOLOGY OF RELATIONS

B. N. Poizner

National Research Tomsk State University 36, Lenin Avenue, 634050 Tomsk, Russia E-mail: pznr@mail.tsu.ru Received 24.04.2018

Aim of the work is the model of relations between the scientist and the evolving social system. The model describes the key components of creative activity, the features of the sociocultural situation and the factors that can affect creative productivity. Method of the study combines principles of the description of a purposeful activity system by V. I. Korogodin, scale of creative subjects by E. A. Sosnin, as well as introduced by M.N. Epstein the concepts of createme, cohistoricity, chroneme, etc. Results. The working concept «creative context», revealing the conditions in which the scientist operates, is introduced. Contexts differ in the motivation (or demotivation) degree of the scientist. The principle of creative contexts ordering is proposed. A table containing 16 contexts of creativity is constructed (under the assumptions made). The table and comments to it can serve as a heuristic to a novice researcher. In particular, he is capable of: reflecting the components of the purposeful activity system; evaluating the creative level; diagnose the current stage of the evolution of the creative team; to correlate the levels of his creativity with this stage; to correlate his creative claims with the evolution stage of the social system. Discussion. The assumptions under which the table of contexts is constructed are substantiated, and comments to it are given. Some creative contexts from the table can be verified on historical and scientific subjects in the books of D. I. Trubetskov, S. E. Shnol, M. Perutz. As a matter for discussions concepts «dysergy» (the antonym of synergy) and the «false present» or the «unreliable present» (characteristic of the stage of degradation of the social system) are proposed. The thesis is analyzed: the degree of motivation (or demotivation) of a scientist depends on the measure of synergy (or dysergy) between the level of his creativity and the stage of the life cycle of the social system.

Key words: structure of creative activity and its reflection, motivation and demotivation of creativity, life cycle of the social system, post-Soviet project, The Newest Middle Ages, D.I. Trubetskov.

DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-3-127-153

Reference: Poizner B.N. Hommage Dmitry Ivanovich Trubetskov, or Scientist and times: Typology of relations. *Izvestiya VUZ, Applied Nonlinear Dynamics*, 2018, vol. 26, no. 3, pp. 127–153. DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-3-127-153

С развитием цивилизация становится всё сложней и запутанней. Проблемы, которые она сегодня ставит, архитрудны. И всё меньше людей, чей разум на высоте этих проблем.

Хосе Ортега-и-Гассет

В Германии мысль нужна, чтобы её обдумать, во Франции – чтобы высказать, в Англии – чтобы исполнить, у нас – ни на что.

Пётр Чаадаев

0. Кажется, любой юбилей напоминает (пусть и смутно) о Сатурналиях – карнавальных празднествах в честь бога Сатурна (*Saturnus*), отца Юпитера. Известно, что римляне воспринимали его как символ неумолимого времени. Нынче почти в каждом нашем областном музее выставлены каминные либо настольные часы XIX

(а то и XVIII) столетия с фигурой Сатурна и его атрибутами. При этом в сознании римских крестьян Сатурн олицетворял благополучную постбифуркационную альтернативу, говоря на нашем диалекте. Народная молва производила его имя от латинского слова *sat* – сеять. Ему родственны глаголы *satio, saturo* – насыщать, накармливать досыта (откуда, например, английский термин *saturation* в контексте описания формы передаточной характеристики). То есть для античных земледельцев Сатурн – ещё и бог посева, семян, будущего урожая, дающего хлеб насущный, *etc*. У древних греков Сатурну предшествовал Крон, или Кронос (Кро́vоς). Считается, что народная этимология сблизила имя Кроноса с греческим словом χρόvоς, обозначавшим время, то есть переименовала бога в Хроноса (Χρόvоς). Ему были посвящены Кронии – весёлый праздник урожая, имевший признаки карнавала.

Юбилейная атмосфера вызывает также образ древнегреческой богини счастья и случая. Её зовут Ти́ха, или Ти́хе: Tислучайность, то, что выпало по жребию. Знаток античности филолог Аза Тахо-Годи уточняет, что Тиха не встречается в классической мифологии, а выдвинута в эпоху эллинизма «как сознательное противопоставление древнему представлению о неизменной судьбе». Тиха символизирует изменчивость мира, его неустойчивость, случайность любого факта личной и общественной жизни [1, с. 515]. Само же существительное 0 богато значениями: случай, приключение (всякого рода); (не)счастье; участь, жребий, доля, судьба; случайность; формула 0 сутору равноценна пожеланиям: счастливо! 0 богом! в добрый час! [2, стлб. 1265–1266].

У римлян перемены во времени символизировала аллегорическая фигура Фортуны — богини счастья, случая и удачи. Fortuna — случайное действие и определение высших сил о начале, счастливом или неудачном ходе и результате человеческих предприятий, отношений, положений. По латыни Fortuna — случайность; (не)счастье; судьба, жребий, участь; исход; богатство как случайное благо, пожитки [3, с. 263]. Первоначально Fortuna — богиня урожая (этимон имени — глагол ferre — носить), материнства, женщин. Введение культа Фортуны связывают с царём Сервием Туллием, по происхождению сыном рабыни, получившим высокое положение благодаря любви Фортуны. Для почитавших её Fortuna — судьба сегодняшнего дня, данного места частных (или общественных) дел, доброй (или злой) судьбы, мужской судьбы еtс. Её культу близки культы: Felicitas — персонификации счастья, Bonus Eventus — хорошего исхода, Mens Bona — стойкости духа [1, с. 571]. В искусстве Фортуна (как и Тихе) изображалась с рогом изобилия, колесом и рулевым веслом на катящемся либо парящем шаре [1, с. 571; 4, с. 615].

Согласно немецкому историку Алейде Ассман, современное представление о времени «как движущей силе перемен, порождающей "новое", существенно трансформировало в эпоху Ренессанса и образ самой Фортуны. Именно это "революционное" переосмысление дало позже название всей эпохе: Новое время». Чтобы подчеркнуть изменение отношения к фазам времени в общественном сознании той поры, Ассман говорит о «новом темпоральном режиме» эпохи. Его отличает отдаление прошлого или даже разрыв с ним – в пользу будущего. «Вместе с тем готовность к риску новизны чревата кризисами» [5, с. 111–112].

Коснувшись культурной родословной нашей нелинейной динамики, заметим, что юбилейный контекст реабилитирует тягу к ретроспективе, часто возникающую с возрастом. О таком душевном состоянии сказал Евгений Рейн (в «Подписи к разо-

рванному портрету»). Сказал просто, но не обыденно, а метафорой экспозиции, которая обычно ассоциируется с музеем:

Мне открывается хронос протяжный И выставляет ушедшие годы.

После Октябрьской революции русская культура юбилея, проводимого в родственно-творческой среде, испытала каскад искажений. Одним из первых это осознал Борис Пастернак. Перечитаем его послание «Брюсову» (1923), имевшее программный характер. Поэт афористически выразил противоречие между ценностью личных творческих достижений и основанием для официального признания заслуг, которое подчинено социально-политической конъюнктуре. Противоречие это было особенно злободневным в те годы. Но оно, наверное, универсально? Пастернак побуждает каждого увидеть себя в юбилейной проекции, в юбилейной экспозиции:

Вас чествуют. Чуть-чуть страшит обряд, Где вас, как вещь, со всех сторон покажут И золото судьбы посеребрят, И, может, серебрить в ответ обяжут.

1. Моральное право писать о профессоре Дмитрии Ивановиче Трубецкове даёт мне относительно давнее знакомство с ним. Впервые мы встретились осенью 1972 г. в Томске на Всесоюзной конференции по СВЧ-электронике. Тогда мне показалось, что Д.И. Трубецков много старше меня. И ещё запомнилось его дружелюбие, которое распространялось, по-моему, на всех. В дальнейшем, общаясь с Дмитрием Ивановичем лично (очень редко, к большому сожалению) и в письмах (чуть регулярнее), а также через его статьи и книги (наиболее основательная форма связи с Д.И.) я уточнил своё первое впечатление. Как ни самонадеянно пытаться выразить главную черту конкретной персоны, всё же, рискну. Чертой этой у Дмитрия Ивановича мне видится практический гуманизм. Что именно под этим подразумевается?

Бережное отношение к чужой натуре; готовность разрешить ей быть не похожей на остальных; спектр действенных проявлений нравственного императива, по которым обычно удаётся распознавать его носителя; трепетно-уважительное отношение к истине; last but not least: дальновидность, предусмотрительность, находчивость в выборе достойных средств для достижения благородных целей (что в (пост)советском обществе очень трудно, на мой взгляд). Насколько могу судить, в дореволюционной России лицо, обладающее такими качествами, – тем более в учёной среде – получало весомые преимущества для расширения пространства самовыражения, не говоря уж о творческой деятельности. В советской же системе, как правило, напротив: такое лицо не могло не выделяться на общем фоне с риском для себя. Поэтому обычно попадало под подозрение и подлежало торможению, ограничению, стеснению, а до середины 1950-х гг. с высокой вероятностью – пристрастной негласной проверке с перспективой ареста.

2. Знакомство с Дмитрием Ивановичем Трубецковым и с многообразными работами, вышедшими из-под его пера за полвека, осознаётся мной сегодня не только как удача, как везение: «так легче жить», если опять цитировать Пастернака. Но ещё – и как моральная обязанность: надлежит привести хоть в какую-то систему разрозненные соображения о назначении учёного в наши дни в России. А навеяны они – причём в немалой степени – мысленными обращениями к фигуре Д.И.

Своей книге, рассказывающей историю изучения синхронизации, Дмитрий Иванович дал лаконичное, но ёмкое название: «Учёный и время» [6]. Оно оказывается для меня некоторой рамкой, способом упорядочить свои субъективные суждения и несдерживаемые эмоции. Мне кажется, что в юбилейном контексте субъективность, откровенность, даже раскрепощённость допустимы и простительны.

Всё же, чтобы минимизировать их, целесообразно описывать работу учёного на более строгом языке. В ряде отношений для этого пригодны понятия теории целеустремлённой системы деятельности. Её предложил Владимир Корогодин (1929–2005) [7], биофизик и радиобиолог, ученик Николая Тимофеева-Ресовского, а развивает Эдуард Соснин, оптик из Томского Института сильноточной электроники СО РАН [8–11].

3. Структура творческого действия, как и всякой целеустремлённой системы деятельности (ЦСД), выразима символической формулой

$$[R, \cdot S]|_{P>p}^{Q(I)} \to [Z, \cdot W]. \tag{1}$$

Здесь S — наличная ситуация, в которой находится творец, и для него она содержит проблему, скажем, осознаётся недостаток знания: научного, технологического и т.п. Поэтому формулируется цель деятельности Z, то есть достижение Z обещает разрешить проблему либо снизить её остроту. I — искомая информация (понимаемая как предписание, как плодотворная идея), на основе которой можно построить Q — так называемый оператор достижения цели: метод, схему, алгоритм, механизм, лекарство $etc.\ R$ — необходимые для достижения цели ресурсы. W— побочные продукты деятельности, предвидимые и непредвиденные. p — вероятность случайного (спонтанного) достижения цели. P — вероятность достижения цели Z в итоге сознательных усилий $[7, c.\ 22–28]$.

Иначе говоря, смысл познавательного акта, согласно (1), – выявить информа- иию I, которая определяет:

- как достичь цели Z, используя имеющиеся у субъекта R, S, Q;
- каким должен быть оператор Q при имеющихся у субъекта R, S, Z;
- в какой ситуации S, при наличных R, Q субъект может достичь цели Z;
- какие ресурсы R нужны, чтобы при наличных S, Q субъект мог достичь Z;
- как минимизировать побочные продукты W или утилизировать их [9, с. 27–29, 39–41].

К категории W относятся не только потерянное время, испорченные материалы, неудачные опыты, вредные для здоровья экспериментатора последствия и прочие сюрпризы. В книгах [6; 12] Дмитрий Иванович на десятках сюжетов разъясняет, что занятие наукой – не всегда идиллия. Часто это драма: сиротство идей, тщета человеческих стремлений, растрата жизненных и умственных сил, амортизация души. Таковы, скажем, многосторонние конфликты: между творческими лицами, новатора с консервативными коллегами, вольнодумца с начальством etc.

Среди набросков Фридриха Ницше 1880-х гг. в рубрике «Наука» упоминается «принудительная школа заблуждений» [13, с. 397]. Знать, таковы издержки научного авторитета. А как же тогда case Д.И. Трубецкова? И вот какой ответ у меня: в роли неожиданных побочных продуктов W сегодня по-прежнему возможно моральное воздействие учёного на своё окружение и на более широкое сообщество, сохранившее восприимчивость к позитивному началу.

4. Исходя из градации ценности новаций: $Z\gg Q(I)\gg R\gg W$, – которую выявили исследователи развития техники, логично установить иерархию субъектов творческой деятельности. Согласно Э.А. Соснину, можно построить шестиуровневую шкалу типичных творческих фигур. Её верх образует созидательная триада: Гений (работает с целями Z, нередко с информацией I и первыми операторами Q(I)), Талант (работает с информацией I и операторами Q(I)), Мастер (работает с ресурсами R). Благодаря их усилиям, вероятность P достижения новой цели Z возрастает, а ЦСД устойчиво воспроизводит себя в изменчивой внешней среде. Творческая работа Потребителя с побочными продуктами W обычно не повышает вероятности P. Возможны и такие «внеплановые» побочные продукты W, которые весьма полезны сами по себе, безотносительно к цели Z. Скажем, таковы случайные открытия, плоды везения в науке. Методологи называют подобный W «поризм» (от др.-греч. π орюфіς — приобретение; добывание) либо «серендипическая удача» (serendipity). О некоторых из них рассказано в книгах D.И. Трубецкова [6; 12; 14].

Вредным для ЦСД творчеством занимается Хитрец. Его активность понижает P, то есть он – антипод Мастера. Фатально опасен для ЦСД Революционер (антипод Таланта). Он искусно разрушает одряхлевшую систему, чтобы стать лидером её. Иначе говоря, творчество Хитреца и Революционера образует низ шестиуровневой шкалы и имеет ценностно отрицательное значение. Показательно, что С.Э. Шноль в своих книгах по истории российской научного сообщества квалифицирует подобных лиц как конформистов и злодеев науки (см., например, [15]).

История культуры убеждает в том, что для её эволюции необходима деятельность всех шести фигур. Содержание понятий «Гений», «Талант» и т.д. определяется именно контекстом ЦСД, описываемой формулой (1). В литературе же аналогичные понятия издавна и очень широко используются во всевозможных ситуациях, контекстах, смыслах. Чтобы избежать путаницы, имена персонажей шестиуровневой шкалы пишем с прописной буквы. Реальный творческий субъект может объединять в себя, например, две роли, меняя их на различных этапах профессионального и жизненного пути, а также в тех или иных ситуациях S. Допустим, Мастер в изменившихся условиях S_{new} и новом целеполагании Z_{new} может стать Талантом, а Потребитель – Хитрецом либо наоборот [8; 16, с. 111, 158]. Историческими примерами на этот счёт богаты книги Дмитрия Ивановича [6; 12; 14] и, уверен, его память о легендарных учителях, славных ровесниках, блестящих воспитанниках.

Успех книг Д.И., на мой читательский взгляд, вызван не только мощной физикоматематической эрудицией автора, что само по себе далеко не банально! Стиль многих его текстов, образно говоря, выдаёт личное прикосновение к материи науки, очное, а порой даже короткое знакомство автора с замечательными творцами современной радиофизики, электроники, биофизики. Поэтому в рассказах Дмитрия Ивановича о классиках, об их борениях и зигзагах творческой судьбы мне чувствуется особая интонация инсайдера. Весьма точно, щемяще, по-мужски трезво её передаёт Рейн в стихотворении, посвящённом и адресованном Иосифу Бродскому («В Новую Англию»):

Когда-нибудь нас всех накроет общий флаг, Когда-нибудь нас всех припомнит общий друг!

В данном сюжете «общий друг» – это ещё и наука, духовно объединяющая нас, не так ли?

5. Обратим теперь внимание на динамику системы целеустремлённой деятельности. Эволюционный («жизненный») цикл любой ЦСД ограничен двумя бифуркациями: на старте и в финале. Вблизи бифуркации «рождения системы» её сложность (и структурная, и функциональная - подразумеваемые принципом Эшби) минимальна. С течением времени сложность любой ЦСД изменяется. График её есть S-образная кривая, имеющая за участком насыщения нисходящую ветвь. На Sобразной кривой новое целеполагание Z (миссия Гения) соответствует медленному процессу рождения системы. На начальном участке нелинейного подъёма уточнение цели Z сопровождается созданием первых операторов Q(I) на основе информации I, то есть «счастливых» илей. Их воплошение в Q(I) часто илёт в комбинации с адаптацией известных Q. Первые операторы обычно изобретает Гений – в одиночку или вкупе с примкнувшим к нему Талантом. Этап быстрого роста сложности ЦСД вызван доводкой операторов Q(I) усилиями Таланта наряду с нахождением новых ресурсов R (часто в комбинации с преобразованием известных R). Здесь выручает Мастер. Дополнительно ускоряют рост удачно найденные средства нейтрализации побочных продуктов W, особенно – непредвиденных. В этом помогает активность Потребителя, порой при поддержке Мастера [8, с. 349–377].

В период стагнации (участок насыщения S-кривой) усилия сосредоточены на работе с ресурсами R (Мастер) и побочными продуктами W (Потребитель). Ведь резервы развития Q(I) исчерпаны, не говоря уж о возможной устарелости Z либо Q(I). А Гений и Талант к тому времени часто находятся в положении мавра, который давно сделал своё дело... И конкуренция с более эффективными системами-аналогами ухудшает положение дел. В финале сложность системы падает, то есть она деградирует. Остатки её сил направлены на борьбу с вредными W. Финальная бифуркация влечёт либо необратимое разрушение системы, которая часто становится добычей Революционера, либо возникает медленный рост сложности, благодаря выдвижению новой цели $Z_{\rm new}$ (обычно — очередным Гением, отцом будущей ЦСД). Тогда «на развалинах» старой системы возникает «возрождаемая» ЦСД. Затем её жизненный цикл, стадии которого ориентированы последовательно на работу с $Z_{\rm new}$, $Q(I_{\rm new})$, $R_{\rm new}$, $W_{\rm new}$, повторяется — до очередной бифуркации etc. [16, с. 72–73].

В рамках такого подхода творческими продуктами указанных персонажей оказываются последовательно (как правило) создаваемые Z-новации, Q(I)-новации, R-новации, W-новации. Их научно-техническая и (или) социальная ценность в конкретной ситуации S образует шкалу, близкую скорее к логарифмической, чем к линейной [9, c. 49–55].

6. Разумеется, существуют альтернативные описания творческой активности. Так, продуманную версию строит философ и филолог Михаил Эпштейн, рассматривая творчество «как модальный процесс перехода от актуального к потенциальному», в результате чего происходит актуализация нового состояния. Подход Эпштейна учитывает достижения квантовой физики, логики, информатики, синергетики, включая теорию детерминированного хаоса. По Эпштейну, в творческом процессе важны «два взаимосвязанных элемента: аномалия и аналогия. *Аномалия* — исключение из правила, отступление от заданного порядка. *Аналогия* — выстраивание нового порядка на основе сходства и унификации в рамках новой, складывающейся системы».

Разъясняя свою концепцию, М.Н. Эпштейн, в частности, вводит понятия «конструктивная аномалия» (constructive anomaly), упоминая известную мысль наукове-

да Томаса Куна, и «креатема» (*createme*, от лат. *creatio* – (со)творение, создание). Конструктивная аномалия есть «нарушение правил определённой системы», но это отнюдь не случайное действие, то есть не промашка, не безграмотность и т.п. Напротив, это такое нарушение правил, которое обнаруживает потенциал расширения и обновления системы. Согласно Эпштейну, конструктивная аномалия (лакуна) заложена в самой системе и потому способна стать «отправной точкой развития новых научных идей».

Креатема — «минимальная структурная единица творческого акта». Она есть «творческое отклонение от нормы». В отличие от бесплодной ошибки, креатема вводит в действие новую закономерность. Эпштейн уподобляет творческий акт конструктивной мутации (от лат. *mutatio* — изменение, перемена), то есть ошибке наследования в гене, благодаря которой создаётся новый вид или организм. Ссылаясь в этом месте на метод проб и ошибок, М.Н. Эпштейн цитирует современного американского философа Дэниела Деннетта. Последний считает искусство совершения ошибок важнейшей частью плодотворной интеллектуальной стратегии. Эпштейн видит особенность творческого мышления в том, что оно «постоянно оперирует аномалиями, извлечёнными из старых систем, и превращает их в аналогии, в системность нового порядка». Креатема как единица творчества включает три момента: «1) аномалия, выпадение из системы; 2) пауза, кризис, хао́с, крах системы; 3) аналогия, превращение аномалии в конструктивный принцип новой системы» [17, с. 204–208].

Вообще-то понятие «конструктивный принцип» вводит в оборот Юрий Тынянов в статье «Литературный факт» (1924). Он объясняет механизм возникновения новых жанров: «Конструктивный принцип вырисовывается на основе "случайных" результатов и "случайных" выпадов, ошибок» [18, с. 263] (курсив Ю.Т.). Поэтому конструктивная аномалия и креатема выглядят как продолжение и обобщение тыняновской идеи, отдающей должное игре случая. Заметим ещё, что три момента, составляющих у Эпштейна креатему, описывают отдельные «миги» жизненного цикла ЦСД. На S-кривой динамики её сложности первый момент принадлежит стадии деградации системы, второй и третий – случаю бифуркации с благоприятным исходом, когда вновь начинает расти сложность будущей ЦСД (если Гений опережает Революционера – на языке [16, с. 72–73]). На этом языке Гений – инициатор эпштейновской конструктивной аномалии, Талант же (в тандеме с Гением либо в одиночку) – созидатель аналогии.

7. Подзаголовок «Учёный и время», выбранный Дмитрием Ивановичем для лекций, посвящённых развитию исследований явления синхронизации [6], содержит игру смыслов. Она заслуживает того, чтобы на ней остановиться.

По моему мнению, у Д.И. в подобных трудах изложение исторического материала имеет отношение, как сказал бы античный грек, не только к Хроносу (Хро́vоς), но и к *этосу* ($\eta\theta$ ос) науки, то есть к принятым в ней обычаям, нравам, образу мыслей. Думаю, тем самым проявляется одна из черт творческой персоны Д.И. Трубецкова: в роли летописца физико-математического знания он стремится восстановить диалоги учёных прошлого с выпавшими им периодами истории. И он озабочен моральным аспектом науки, тем паче — современной. Поэтому у меня (уверен, что не только у меня) подзаголовок его лекций ассоциируется со знаменитым восклицанием Цицерона в его речи против претора Катилины: *о tempŏra, o mōres!* — о времена, о нравы!

Насколько знаю, Д.И. близка ирония и стоицизм, выражаемые стихотворением Александра Кушнера, которое начинается сентенцией, уже давно ставшей крылатой: «времена не выбирают». Почему бы не видеть в развёртывании жизненного цикла социальной ЦСД смены таких времён? Да и смены цицероновских $temp\check{o}ra$ – тоже? В них приходится жить и действовать творческой личности того или иного ранга. В родной истории отнюдь не редкость, когда непомерно затянувшаяся стадия этого цикла воспринимается творцом как навязанная ему общественная эпоха. Кстати, у древних греков слово «эпоха» (ϵ лох $\hat{\eta}$) первоначально означало: задержка, приостановка [2, стлб. 520]. Образно говоря, эпоха – привал социокультурной эволюции.

Как точнее назвать фундаментальную проблему «Синхронизации» [6] и других работ Д.И. Трубецкова, касающихся далёкого или недалёкого прошлого физики колебаний и волн? А заодно как квалифицировать его метод анализа?

Мне кажется, для этого полезно обратиться к понятию-неологизму «соисторичность» (cohistoricity). Его придумал М.Н. Эпштейн. Скорее всего, физик сразу уловит пересечение смысловых спектров слов «синхронизация» и «соисторичность». Поэтому для него длинная цитата окажется, возможно, небесполезной. Соисторичность есть «мера соответствия между индивидуальной человеческой жизнью и ходом истории. В разных культурах и в разные эпохи индивидуальная жизнь вмещает исторические процессы разных масштабов. Современная Америка привлекает людей со всего мира тем, что здесь посеянное может принести несколько урожаев при жизни одного поколения. Можно своими глазами увидеть, как вырастают "внуки" и "правнуки" твоих открытий, инициатив, начинаний, как идея пускается в двойной или тройной оборот, как последствия её внедрения приносит новые идеи, которые опять-таки внедряются на твоих глазах. На одну жизнь приходится несколько циклов исторических перемен, и все они имеют один вектор, направлены в будущее. Во многих других культурах, напротив, целые поколения не успевают дожить до итога своих трудов – или обречены наблюдать их бесплодность» [17, с. 257].

Позволю себе продолжить цитату, поскольку она подталкивает к выводу, который, по-моему, имплицитно содержится и в историко-научных сюжетах, рассмотренных Д.И. Трубецковым [6; 14; 16; 19]. А также она – теперь уже в контексте конца 2010-х гг. – приводит к пониманию дальновидности английского писателя Чарльза Сноу с его концепцией «двух культур» (1971). Её сторонником, пропагандистом и воплощением остаётся Дмитрий Иванович.

«Без сотрудничества с историей, – убеждён Эпштейн, – без соисторичности, художник или мыслитель окажется в вакууме, как мозг в колбе. Нельзя творить в одиночестве, не подключаясь к творящим силам и возможностям времени, языка, общества, обстоятельств. Индивидуальная жизнь во много раз короче, чем жизнь нации. При этом возникает глубоко экзистенциальный вопрос: какую долю себя приносить на служение обществу?». Каждый – полагает М.Н. Эпштейн – имеет право самостоятельно решать, «тратить ли свою единственную жизнь на то, чтобы согласовать её с историческими темпами своей страны, с ритмом её дыхания, – или осознать, что сроки твоей жизни несоизмеримы с ритмом здешней истории, и выбирать другую страну/культуру как более подходящую среду для самореализации» [17, с. 257].

8. Тезис о необходимости, о благотворности для учёного, художника *etc*. «сотрудничества с историей» М.Н. Эпштейн аргументирует, как нам кажется, молча

подразумевая прогрессивное развитие общества [17, с. 257]. Тогда вряд ли его тезис оспорим. И практики-исследователи, и методологи науки высоко ценят возможности синергии: междисциплинарной, межкультурной, международной и т.п. Однако следует, на наш взгляд, принять во внимание опыт слишком долгого у нас XX столетия. А для него, но, конечно, не только для него актуален вопрос о позиции человека в «тёмные времена» (в 2018-м исполнилось полвека книге очерков немецкого философа Ханны Арендт «Люди в тёмные времена» [20]). И в период затмения социальных перспектив, вероятно, едва ли продуктивна соисторичность, синергия творческого субъекта с его сумрачной эпохой, от которой ему некуда скрыться, увы. А в моральном плане такое сотрудничество тем паче сомнительно; здесь, пожалуй, уже надлежит говорить о неподобающем коллаборационизме с тёмной силой.

Кроме того, соисторичности, наверное, препятствует заведомое, явное рассогласование, несовпадение между творческим потенциалом личности и социальным запросом на креативный масштаб, уровень, стиль и пр. Такое противоречие возникает, когда более или менее свободное общество достаточно консервативно. Например, когда тон в нём задают клерикалы. Противоречие, по-видимому, совершенно неизбежно в эпоху тоталитаризма или близкой к нему формы правления. Для обозначения противоречия требуется антоним к слову «синергия». Имеется ли он? Кажется, в такой функции пригоден грецизм «дизергия» («dysergy»): δυσεργία – трудность сделать что-либо, затруднение, препятствие (в деле); δύσεργος – трудно исполнимый, трудный; с трудом делающий, недеятельный [2, стлб. 350]. (Морфологически и семантически «дизергия» похожа, скажем, на слово «дисграфия» – расстройство способности к письму.)

«Дизергию» правомерно понимать как нарушение, расстройство, нестроение, разлад в совместной деятельности либо ощутимое затруднение в ней. «Если ты недоволен эпохой – охай!». Кажется, писатель Вениамин Каверин указывает автором рискованного bon mot (начало 1920-х гг.) Ю.Н. Тынянова. Вряд ли он имел в виду исключительно бытовые неудобства, причинённые Октябрьской революцией. Скорее всего, Тынянов, будучи филологом-концептуалистом и прозаиком-историком, указал своим полу-каламбуром на кардинальную дизергию, проявившуюся уже в раннесоветское время. Бесспорно, расширение государственного террора заставит почти всех интеллектуалов забыть о дизергии. Да и вообще забыть обо всех формах и градусах творческого дискомфорта: «не до жиру – быть бы живу»...

Далее ограничимся четырьмя уровнями творчества, ориентированными преимущественно на создание: новой цели Z, операторов Q(I), ресурсов R, работу с побочными продуктами W. Уровни эти обеспечивает четвёрка креативных фигур: Гений, Талант, Мастер, Потребитель. При описании эволюции социальной ЦСД (например, корпорации, страны, университета, супермаркета), представляемой S-кривой динамики сложности системы, ограничимся тоже четырьмя стадиями. Они являются «эпохами» в глазах современников ЦСД (в их числе и четверица творцов). Для простоты считаем, что на каждой из стадий истории ЦСД ключевыми (с точки зрения регуляторов ЦСД, скажем, ректората университета, правительства страны и т.п.) типами деятельности является работа последовательно с Z, Q(I), R, W.

Необходимо отметить, что не только в описании социальной ЦСД, но и в деятельности творческих субъектов имеется темпоральный (временной) аспект. На него указывает, например, М.Н. Эпштейн. Он вводит неологизм «хроне́ма» (chroneme) по

аналогии с терминами «идеологема», «морфема» (минимальная значимая часть слова) и т.п. Хронема есть «единица времени в гуманитарном измерении», а также «личностное, психологическое, историческое» восприятие такой «единицы» времени, в отличие от астрономического времени. В жизни личности хронема может вмещать от нескольких секунд до нескольких лет. Так, хронема – это время, нужное человеку для создания творческого продукта. В зависимости от эмоционального состояния и возраста хронемы растягиваются или сжимаются. То есть одна физическая единица времени может вместить меньше или больше времени психологического.

Хронемы имеют различную протяжённость и в жизни разных народов. Иллюстрируя это положение, Эпштейн цитирует «Скифов» Александра Блока (1918): «Для вас – века, для нас – единый час». И комментирует: «Так различаются по исчислению поэта хронемы западной и российской истории: первые исчисляются веками долгого, упорного труда, вторые – часами бунтов, революций». По наблюдениям Эпштейна, «время в России вытесняется пространством (физическим и метафизическим) – это "Архимедов" закон погружения большого географического тела в историческую среду. Чем обширнее становилась Россия, тем медленнее текло в ней историческое время – и наоборот, сокращаясь в пространстве, она убыстрялась во времени». В наши дни, по мере ускорения истории хронемы всё более сокращаются в своём физическом измерении [17, с. 258–260]. Судя по мемуарам и личным воспоминаниям (уверен, что по воспоминаниям Д.И. тоже), чёткими хронемами оказываются годы правления монархов, диктаторов, генсеков компартии, президентов. Даже – заведующих кафедрой, не говоря уже о деканах или тем паче ректоров.

Вероятно, было бы любопытно и полезно для педагогов уточнить: как в творческом акте соотносятся между собой хронема и креатема, состоящая, согласно Эпштейну, из трёх моментов; насколько для хронемы (не)типично свойство скейлинга или его подобие; коррелирует ли длительность хронемы с уровнем творческой продукции ($Z\gg Q(I)\gg R\gg W$); с помощью каких методик целесообразно сравнивать и измерять хронемы etc.

Прибегнув к эпштейновскому понятию, можно сказать, что в творческом контексте на создание новой цели Z или оператора Q(I) и т.д. человеку требуется одна хронема. Очевидно, что её длительность (в астрономических единицах) будет чрезвычайно сильно варьировать в зависимости от содержания деятельности, от индивидуальности, от условий S, силы мотива и пр. В нашей модели S-кривая динамики сложности ЦСД состоит минимум из четырёх хронем. Вообще-то физики издавна оперируют хронемами: разве период регулярного процесса не есть хронема динамической системы? А время релаксации какого-либо состояния в веществе разве не хронема его «внутренней истории»? При желании легко убедиться, что в книгах Д.И. Трубецкова [6; 12; 14], С.Э. Шноля [15], М. Перутца [21] широко практикуется, если так можно сказать, *хронемный анализ* ситуаций, факторов, событий, коллизий в науке, эволюции научных школ.

Степень грубости сделанных нами выше идеализаций и приближений достаточно очевидна: в реальности «чистых» типов нет. А творческая личность похожа на неправильный многогранник. В одном из типов своей деятельности она может выступать, допустим, Мастером, а в другом – Потребителем, например, и т.д. «На свете что непостояннее, чем жизнь?», – улыбается Е. Рейн («599/600»). Вероятно, человек? За годы своей работы – пусть даже в одной и той же сфере деятельности:

искусстве, технике, науке *etc.* – он способен сначала проявлять признаки Таланта, а потом – Гения или Потребителя и наоборот. Профессиональные биографии выдающихся учёных, исследованные Д.И. Трубецковым, С.Э. Шнолем, М. Перутцем и другими, содержат немало драматических либо счастливых эпизодов, иллюстрирующих эту динамику творческой силы в изменчивой среде.

9. Из наблюдений и обобщений, сделанных в их книгах, можно вывести: согласие, синергия притязаний творца между выдвигаемым современной ему эпохой социальным запросом на приоритетный уровень творчества мотивирует креативную личность. Бесспорно, речь идёт лишь о тенденции, о поле благоприятных шансов для субъекта: ведь в истории культуры непременно отыщутся исключения и эксцессы. Сам же «запрос эпохи» на определённый тип творца не всегда явно и публично артикулируется. То есть он не всегда напоминает открытый тендер на поставку творческого товара Q(I) или R. Порой социально-политические декларации маскируют этот запрос. И порой маскировка способна сбить с панталыку человека, захваченного любимым делом.

Тогда логично предположить, что дизергия между творческими возможностями личности и типом деятельности, который является ключевым для переживаемого ею времени, способна, напротив, демотивировать личность. На наш взгляд, близкими по смыслу оказываются наброски Фр. Ницше:

```
«Наука, две её стороны: обращённая к личности обращённая к комплексу культуры ("уровни") – противоположные оценки с той и другой стороны».
```

И ещё: «Предпосылка *научной работы*: вера в единую цепь и в то, что твоя работа не умрёт, – поэтому человек может работать на любом, даже самом последнем месте, будучи уверен, что работает *не напрасно*.

Есть лишь один великий тормоз: сознавать, что *напрасно* работаешь, *напрасно* бъёшься» [13, с. 397, 401] (курсив – Фр. Н.).

В зависимости от исторических обстоятельств такая демотивация (ницшевский «тормоз») может быть скрытой, не сразу и не всеми осознаваемой, а может быть и довольно прозрачной, иногда же – демонстративной. В этом убеждает, например, анализ советской ЦСД общества. Её отличала унифицированная культура, чей уровень предусмотрительно был понижен лишь до формальной грамотности населения. Власть Революционеров de facto ликвидировала высокообразованный класс – источник новых ценностей и целей, способов творчества и культурных образцов, ориентирующих на расширение человеческой свободы. Организация советского социума минимизировала возможность воспроизводства в обществе Гениев, сократила её для Талантов, зато расширила для Мастеров, а куда больше – для Потребителей (Хитрецы процветают практически при любом стиле правления). Воспроизводство же деструкторов-Революционеров шло под строгим партийным и комсомольским надзором, чтобы использовать их лишь для казённых надобностей.

Примечательно, что русская мысль давно обнаружила угрозу творцам культуры, исходящую от теорий Революционеров, а пуще – от их практик. Вот, скажем, Василий Розанов читает письмо Фёдора Достоевского к Николаю Страхову 30.05.1871

в связи с Парижской коммуной (о жестокости её вождей у нас после 1917 г. молчат). Розанов резюмирует (1915) письмо следующим тезисом: «Не надо гениев: ибо это – аристократия». Он добавляет: «Сам Достоевский был бедняк и демократ: и в этих словах, отнесённых к будущему торжеству "равенства и братства", он сказал за век или за два "отходную" будущему торжеству этого строя» [22, с. 197]. То есть Достоевский предчувствовал в 1871-м грядущий 1917-й. После Октября начались гонения на Гениев как виновников сложности культуры и общества, а потому главных врагов Революционеров, то есть принципиальных примитивизаторов, решительных, последовательных и энергичных упростителей.

Торжество это безошибочно предвидел, например, Андрей Белый (в письме жене 04.11.1917): «Кому нужны теперь писатели, философы, поэты: мы – роскошь для России, нас надо ликвидировать» (цит. по [23, с. 39]). Так и вышло... В этом проявился творческий стиль Ленина-Революционера: «К интеллигенции и учёным он относился почти враждебно. Науку и искусство понимал утилитарно», – излагает Всеволод Веселовский впечатления ульяновского брата Дмитрия Ильича [24, с. 70]. Примечательно, что Розанов различил в словах Достоевского ещё и прогноз краха экстремистского проекта Революционеров. Прогноз сбылся через 120 лет, в 1991-м. (По Далю, «отхо́дная» – молитва, читаемая на отход души, умирающему [25, стлб. 1884]).

Вспомним ещё два размышления о месте и роли творческой фигуры в обществе. Самооценка её места и роли важна потому, что содержание самооценки способно – с какой-то вероятностью – побуждать человека к деятельности либо наоборот. У Андрея Платонова в «Старом механике» герой-резонёр заявляет: «Без меня народ неполный». Тезис этот, надо думать, выдаёт заветную надежду самого Платонова. Вероятно, он долго находился под хмелем русского революционно-романтического коллективизма 1920-х гг. В послесталинские десятилетия тезис о неполноте с энтузиазмом повторяли, словно аксиому теории социальных множеств, публицистынародофилы и не только они. Хотя вся история СССР (и постсоветского общества) не дала каких-либо внятных доказательств ни конкретных проявлений этой народной неполноты, ни форм осознания либо ощущения её. Между тем, близится столетие отсечения почти всей интеллигентной части от народного тела.

Куда более реалистична, на наш взгляд, концепция родного населения у филолога Михаила Гаспарова. Не потому ли она непопулярна? Он совсем иначе определяет общественную ценность образованного исследователя у нас. Будучи самостоятельно мыслящей личностью, учёный не становится слагаемым, то есть он обладает социальной антиаддитивностью, вероятно, сказал бы математик. Гаспаров возражает Платонову: «"Без меня народ неполный"? Нет, полнее, чем со мной: \mathbf{x} – отрицательная величина, \mathbf{x} в нём избыточен». Не так ли «избыточен» побочный продукт \mathbf{w} деятельности учёного, писателя, режиссёра — его дрожжевое, ферментативное действие в обществе? Недаром Гаспаров уверен: «Я существую только по попущению общества и могу быть уничтожен в любой момент за то, что \mathbf{x} не совершенно такой, какой \mathbf{x} ему нужен» [26, с. 88, 143].

В гиперболе Гаспарова для нас важно чётко переданное противоречие между приверженностью творца к своему делу («сторона науки» либо искусства, «обращённая к личности», как выражается Ницше) и социальным запросом (не любой творец привечаем обществом, но лишь «такой, какой ему нужен», по словам Гаспа-

рова). Причём запрос часто соответствует очередной хронеме, то есть он изменчив подобно курсам валют на бирже. Однако нельзя забывать и про иные эпохи. Для них М.Н. Эпштейн – по аналогии с понятием «утопия», то есть место, которого нет, – предлагает неологизм «ухро́ния» (uchronia; от др.-греч. ού – не, нет + χρόνος – время). Ухрония – «безвременье, вневременье, мир остановленного времени; тип общества или политического режима, в которых фактор времени, исторического изменения сведён к минимуму». Согласно Эпштейну, по мере своего осуществления утопия переходит в ухронию, разрыв самой истории, остановку времени. Ведь место, которого нет, становится временем, в котором ничего не происходит. Потому антиутопии Е.И. Замятина «Мы» и Дж. Оруэлла «1984» – это ещё и антиухронии. Они разоблачают хроноцид (χρόνος + лат. caedere – валить, убивать), то есть время-убийство. В нём состоит главное историческое преступление утопических режимов. Существенно, что хроноцид, геноцид и экоцид (губящий природную среду; особенно радикально – в моей Сибири), «как правило, связаны прямой линией революционной преемственности» [17, с. 258–259, 262].

Подозреваю, что Дмитрий Иванович не слишком бы возражал М.Н. Эпштейну. Но, возможно, поинтересовался бы: каковы признак того, что утопия переходит в ухронию? И, скорее всего, отметил бы, что в сочинениях Галилео Галилея физическое описание объекта оперирует аналогом ухронии гуманитария: понятием статичности, адинамизма, ничтожности движения. Но это отнюдь не в упрёк Эпштейну. Ведь по мысли швейцарского культурфилософа Якоба Буркхардта, история – это область, в которой никогда нельзя начать с самого начала (цит. по: [26, с. 135]).

10. Изложенное выше побуждает задуматься: нельзя ли сблизить концепцию ЦСД В.И. Корогодина вкупе с опирающейся на неё шкалой творческих фигур Э.А. Соснина, идеи соисторичности, хронемы, ухронии, которые предметно иллюстрируются в «Синхронизации» и других работах Д.И. Трубецкова и содержательно вербализованы М.Н. Эпштейном, а также реплики В.В. Розанова, Андрея Белого, М.Л. Гаспарова, Фр. Ницше, А. Ассман? Можно надеяться, что такой синтез послужит развитию самосознания креативной личности, уточнению своей социальновременной координаты. Известно, что личность есть «точка пересечения» внутренней потребности в творчестве и текущей нужды, заинтересованности общества в некотором типе, уровне деятельности. Синтез можно осуществить разными путями. Один из пробных вариантов выносится ниже на суд рецензентов, Дмитрия Ивановича и других читателей.

Предлагаемая схема отражает попытку эвристически упорядочить потенциальные «творческие контексты», в которых может действовать субъект. Схема оформлена как таблица, которая содержит 4×4 сочетаний индивидуальных и исторических хронем (как сказал бы М.Н. Эпштейн). Содержание «творческих контекстов» вытекает из многообразия отношений креативной личности того или иного ранга со сменяющими друг друга стадиями жизненного цикла социальной ЦСД. На каждой стадии система выдвигает «запрос» на ключевой (желательный для её регуляторов) тип деятельности. В таблице строки (сверху вниз) задают иерархию творческих личностей и их продуктов, а столбцы (слева направо) – ход эволюции социальной ЦСД. Творческие контексты отличаются мерой синергии либо дизергии между уровнем деятельности творца и сутью социального запроса. Предполагается, что этой мере

релевантна мотивация творческой фигуры к активности, саморазвитию, «самопреодолению» (термин Ницше) или наоборот – демотивация её.

Кроме того, в качестве гипотезы предполагается, что каждый из четырёх этапов жизненного цикла социальной ЦСД отличает свой «темпоральный акцент». Метафора эта навеяна понятием «темпоральный режим» у А. Ассман [5, с. 112].

Выражение «темпоральный акцент» означает, что, например, «эпоха Z» отдаёт приоритет преимущественно будущему, она футуристична. Эпоху целеполагания Z отличает множественность моделей будущего, утверждение новых ценностей, регулирующих общественную, групповую, частную жизнедеятельность, обилие принципов прогнозирования, богатство фантазий футурологов и утопистов, дерзость экспериментов, проектов и т.п. Вспомним культуру русского модернизма, так называемого серебряного века, породившую авангард в искусстве и расцвет в науках. Естественно думать, что эпоха, в которую высоко ценится необычное целеполагание Z, отдаёт примат свободе творчества. В свою очередь, главный двигатель и признак творчества есть $Drang\ nach\ Freiheit\ -$ жажда свободы как условия плодотворного существования человека. Нам-то хорошо известно, насколько режим неволи в обществе губителен для всех видов интеллектуальной деятельности; и он исключает индивидуальное целеполагание Z. Так, Блок, прощаясь со своим временем и своей средой (весна 1921 г.), признаёт крушение предреволюционной культуры: «Но не эти дни мы звали, / А грядущие века».

Насколько можно судить, именно в «эпоху Z» оттачиваются и декларируются самые главные идеи общества. Возможно, здесь нелишне привести дискуссионное рассуждение М.Н. Эпштейна: «Искание собственной идеи и её ненаходимость — две аксиомы "россиянства". Если нация постоянно отчуждается от себя в форме "другой, истинной, настоящей России", значит эта чуждость себе, неуспокоенность в себе и составляют её экзистенциальную заботу. С этой точки зрения ни православие, ни соборность, ни коммунизм, ни космизм, ни евразийство не способны исчерпать, выразить и оформить сущность России, потому что эта сущность ставится как задача, и в такой постановке всегда удаляется от ищущего» [17, с. 553] (курсив М. Э.).

«Эпоха Q(I)» в наибольшей степени сосредоточена на настоящем как способе приблизить будущее, чья модель в основном уже построена и предъявлена обществу. «Эпоха Q(I)» – звёздные часы для Талантов, решающих нетривиальные проблемы осуществления небывалых проектов. Нетривиальность видна хотя бы из того, что, по оценкам ряда историков индустриализации в СССР, подавляющее большинство системозадающих технологий, то есть Q(I), не было плодом отечественных умов. А было результатом покупок у западных фирм либо успехов промышленного шпионажа [27]. Но вины умов (включая случайно уцелевших Талантов) в этом нет. Вполне логично поэтому спорить: как возможны сегодня наука и высшее образование в России? Более века назад этот разговор и серию практических дел развернули Владимир Вернадский с единомышленниками. Однако и ныне научно-образовательное сообщество наше, если использовать эпштейновский оборот, «всё время ищет себя, проецирует себя как предмет рефлексии и вопрошания» [17, с. 553]. В поисках внушающих надежду положительных примеров невозможно обойти почти полувековую деятельность профессора Д.И. Трубецкова, умножающую традиции саратовской научно-образовательной школы по радиофизике и электронике [28].

«Эпоха R» заметно ориентирована на прошлое: в зависимости от ситуации – на близкое или на далёкое, воспроизводя его с разной степенью адекватности. Ори-

Контексты персонального творчества в цикле эволюции общества Contexts of personal creativity in the evolution of society cycle

	Стадии эволюционного цикла общества на S -кривой динамики сложности, ключевые типы деятельности на данной стадии, темпоральный акцент \to Stages of the evolutionary cycle of society on the S -curve of the dynamics of complexity, the key types of activity at this stage, the temporal accent				
	Z: Медленный рост сложности после стартовой бифуркации	Q(I): Быстрый рост сложности и переход к нелинейному участку	R: Стагнация (участок с насыщением)	W: Деградация (нисходящая ветвь) перед финальной бифуркацией	
Статус творца, уровни (продукты) его творчества ↓ The status of the creator, the levels (products) of his creativity	Выдвижение целей Z и ценностей, регулирующих жизнедеятельность в социуме	Изобретение и улучшение операторов $Q(I)$, регулирующих жизнедеятельность в социуме, при одобренных обществом Z	Создание, улуч-шение, экономия ресурсов при одобренных обществом Z и $Q(I)$	Создание средств утилизации побочных продуктов W , их нейтрализации, минимизации вреда от них при одобренных обществом Z , $Q(I)$, R	
	Акцент на буду- щем	Акцент на насто-ящем	Акцент на прошлом	Акцент на недо- стоверном насто- ящем	
Гений, целеполагание Z , обновление сферы ценностей	Синергия: социальный запрос (на целеполагание Z) соответствует уровню Z Гения; авангардное творчество «на передовой линии» науки, техники, искусства, управления и т.д.	Частичная дизергия: социальный запрос (на операторы $Q(I)$) демотивирует Гения; его альтернативные цели Z не одобряются или запрещены	Неполная дизергия: социальный запрос (на ресурсы R) демотивирует Гения; его альтернативные цели Z и $Q(I)$: методологии, идеологии, алгоритмы etc . — не одобряются или запрещены	Дизергия: социальный запрос (на работу с побочными продуктами W) демотивирует Гения; сюжет: его альтернативные $Z, Q(I)$, ресурсы R не одобряются или запрещены	
Талант, изобретение и улучшение операторов $Q(I)$: методов, принципов, алгоритмов, приборов etc .	Неполная синергия: социальный запрос (на целеполагание Z) мотивирует Таланта превзойти свой уровень $Q(I)$; сюжет: догоняющая модернизация по части Z	Синергия: социальный запрос (на операторы $Q(I)$) соответствует уровню $Q(I)$ Таланта при одобренных обществом Z , в том числе авангардных	Частичная дизергия: социальный запрос (на операторы $Q(I)$) демотивирует Таланта; его альтернативные $Q(I)$ не одобряются или запрещены	Неполная дизергия: социальный запрос (на работу с побочными продуктами W) демотивирует Таланта; его альтернативные $Q(I)$ и R не одобряются или запрещены	

Мастер, создание, улучшение, экономия ресурсов R	Частичная синергия: социальный запрос (на целеполагание Z) мотивирует Мастера превзойти свой уровень R ; догоняющая модернизация по части $Q(I)$	Неполная синергия: социальный запрос (на операторы $Q(I)$) мотивирует Мастера превзойти свой уровень R ; догоняющая модернизация по части $Q(I)$	Синергия: социальный запрос (на работу с ресурсами R) соответствует уровню R Мастера — при одобренных обществом Z , $Q(I)$	Частичная дизергия: социальный запрос (на работу с побочными продуктами W) демотивирует Мастера; сюжет: его альтернативные R не одобряются или запрещены
Потребитель, создание средств утилизации побочных продуктов W , их нейтрализации, минимизации вреда от них	Минимальная синергия: социальный запрос (на целеполагание Z) мотивирует Потребителя превзойти свой уровень W ; догоняющая модернизация по части R	Частичная синергия, социальный запрос (на операторы $Q(I)$) мотивирует Потребителя превзойти свой уровень W ; догоняющая модернизация по части R	Неполная синергия: социальный запрос (на ресурсы R) мотивирует Потребителя превзойти свой уровень W ; догоняющая модернизация по части R	Синергия: социальный запрос (на работу с побочными продуктами W) соответствует уровню W Потребителя; арьергардное творчество («в глубоком тылу» науки, техники, искусства, управления и т.д.) при одобренных обществом Z , $Q(I)$, R

ентация на прошлое — особенно в ситуации дефицита R — позволяет освоить и использовать интеллектуальные и иные ресурсы минувших культур [29]. Варианты эксплуатации исторической и культурной памяти различны. Слова Гамлета (в переводе Пастернака): «порвалась дней связующая нить» — раскрывают тот активный фон, который М.Н. Эпштейн метко именует «хронопатия» (chronopathy), толкуя неологизм как тяжкий психоисторический недуг, как общественный диагноз [17, с. 260—261]. И на этом фоне идёт эксплуатация минувшего. О разрыве времён много пишут сегодня публицисты, педагоги, порой и науковеды. В частности, А. Асман размышляет, как возможно «новое построение взаимосвязи между прошлым, настоящим и будущим» [5, с. 5]. Однако не исключены очередные приёмы эксплуатации культурного беспамятства, которая влечёт тяжёлые социокультурные последствия. Приёмы изобретают Хитрецы, беспамятство используют Революционеры.

Так, у нас «с каждой последующей властью после 1917 года, – доказывает эссеист Кирилл Кобрин, – прошлое обкарнывалось, обрезалось, ненужные куски выбрасывались или тщательно прятались. В результате не осталось ничего – ни истории царей, ни истории генсеков, ни даже истории святых, генералов, писателей и композиторов. Со второй половины 1980-х всё пришлось сочинять заново» [30, с. 95]. Проблеме этой посвящено «Кривое горе» Александра Эткинда [31]. В этом плане актуальна традиция нашего журнала «Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика» отмечать юбилеи деятелей науки и годовщины событий в её прошлом. Тем самым мы противодействуем неизбежным процессам забвения, наступления амнезии и прочим видам «разрыва времён».

А соответствует ли какое-нибудь грамматическое время «эпохе W» социальной ЦСД? Да. По нашей шаткой догадке, это — «недостоверное настоящее». Как оно звучало бы по-английски? The inauthentic present tense? Или the inadequate present tense? Подозреваю, что картины «эпохи W» не изгладились из памяти многих, живших на закате СССР. Социально-психологический комментарий к советской версии «недостоверного настоящего» даёт, например, Алексей Юрчак в монографии «Это было навсегда, пока не кончилось» [32]. «Это было при нас», — оглядывался Пастернак на 1905 год (лет 90 назад). Наверное, Дмитрий Иванович тоже обратил внимание на сочинение А. Юрчака. Но не знаю, согласится ли Д.И. с категорией «недостоверного настоящего»...

Добавим: в «эпоху W» идёт угасание системы. Она неспособна кардинально улучшить своё положение, свою конструкцию, функцию, конкурентоспособность. А потому занята лишь косметическим ремонтом, предпринимает сугубо декоративные реформы и т.п. В силу чего система неадекватно воспринимает, толкует свои предшествующие стадии-хронемы. Чтобы избежать сравнений не в пользу «эпохе W», кое-чего из прошлого системы полагается не помнить. Однако именно оно и есть *неудобозабываемое* (остро́та М.Л. Гаспарова [26, с. 123]). В «эпоху W» недостоверность в оценках обнаруживается чуть ли не повсеместно. Значит, требуется поддерживать официальное бодрячество и казённый оптимизм, выдаваемый всем бесплатно. Думаю, что Дмитрий Иванович вспомнит ехидную песенку начала брежневской поры: «Но не станем мы в беде ахать или охать, / Это очень хорошо, что пока нам плохо, / Это очень хорошо, это очень хорошо, / Что нам очень плохо!». Дада, охали в начале 1920-х, будучи недовольны эпохой, а за сорок-то лет выжившие «перековались».

Нельзя не принять во внимание самоускорение мировой цивилизации, особенно заметное с последней четверти ХХ в. «Темп человеческой деятельности непрерывно ускоряется, стремясь достичь большего ценой меньших затрат, - констатирует английский политолог Мартин Дэвис. - Это оказывает патогенное влияние на социальное пространство». В частности, «беспокойное технократическое общество» не склонно к размышлениям. «Оно не может сделать перерыв на рефлексию, у него на это нет времени. Оно запрограммировано на "усовершенствование"», - констатирует Дэвис. Кроме того, «развитое общество живёт во всё более стеснённых временных условиях», когда особенно остро переживается бег времени, мимолётность всех событий. А «техника оттесняет жизнь на второй план» [33, с. 354, 357]. Таков фон, всё более ощутимый и у нас. С учётом его, по-видимому, следует рассматривать заключение ряда отечественных интеллектуалов о переживаемом ныне финале «постсоветского этапа» в истории России. Финал этот ставит вопрос об «типовых чертах, свойственных концовкам разных эпох» [34, с. 391]. Финал, конечно, возбуждает аналогии с ракоходным движением российского, а позднее также советского общества в те или иные периоды нашего прошлого [30].

Поэтому поколению Дмитрия Ивановича как наблюдателю за исторической сценой чрезвычайно повезло. Поколение застало – уже второй раз! – фазу деградации ЦСД общества. Отсюда, конечно, и горечь, и тревога, и кислое ощущение deja-vu. «Спасибо-спасибо, этот цветочек я уже нюхал...». Нынешний Zeitgeist, дух времени отчасти вернулся из прошлого, он знаком и несвеж. Снова приближается дефицит воздуха в обществе, о чём когда-то говорил А.А. Блок, сравнивая николаев-

скую Россию с РСФСР. Сегодня оказывается, что темпоральный аромат «эпохи W» имеет своим компонентом свалочный газ, флюиды и миазмы очередного разложения. Оно идёт живописнее, вульгарнее, шире, откровеннее, чем в 1980-е гг. Для понимания закономерности такой атмосферы в обществе отчасти полезно обобщение М.Н. Эпштейна. Среди видов хронопатии он выделяет «историческую аритмию». Классический случай её — российская история, «состоящая из взрывов и застоев, революций и стагнаций» [17, с. 261]. Казалось бы, такая ситуация провоцирует учёного чаще размышлять о временах? Хотя... М.Л. Дэвис, например, меланхолически отмечает: в «обществе, пребывающем в вечной погоне за новизной, память только мешает» [33, с. 356].

Автору остаётся тешить себя слабой надеждой. А именно, предлагаемая типология контекстов творчества в жизненном цикле социальной ЦСД (заметно стимулированная «Синхронизацией» Д.И. Трубецкова) и толкования введённых понятий способны послужить профессиональной рефлексии исследователя, особенно молодого. Таблица призвана побудить читателя осознать себя как креативную фигуру. Для этого полезно самому себе артикулировать ответы на некоторый минимум вопросов. Допустим, таких: 1) какое конкретное содержание и какие неповторимые особенности имеют компоненты Z, Q(I), R, W творческой деятельности, описываемой «формулой» (1), в его НИР? 2) На какой уровень новации (Z, Q(I), R, W) он вправе претендовать в своей НИР сегодня и в ближайшей перспективе? 3) Какие достижения (на уровнях Z-, O(I)-, R- или W-новаций) имелись в прошлом у творческого коллектива, где он ведёт НИР: у научной группы, лаборатории и т.д.? 4) Какому участку на S-кривой динамики сложности системы соответствует текущее состояние этого коллектива? 5) Наблюдает ли он явные признаки синергии либо дизергии между уровнем своей творческой продуктивности (Z, Q(I), R, W) и «уровнем запроса», ориентацией его коллектива? 6) В каких конкретных формах он получает от коллектива (де)мотивацию? – см. варианты в таблице. 7) Какую из стадий (Z, Q(I), R, W) эволюции общественной системы он считает наиболее благоприятной лично для себя как учёного? 8) Симптомы какой стадии он опознаёт, ассоциирует с нашими днями?

11. По существу последний вопрос перетекает в ещё более трудный, почти экзистенциальный. А мы-то в какую «эпоху» живём, к какой хронеме или ухронии принадлежит наша персональная современность?

По мнению некоторых историков, философов, публицистов (среди них, например, К.Р. Кобрин [30, с. 95], И.П. Смирнов [35], М.Н. Эпштейн [17], А.М. Эткинд [31]), общество переживает нечто подобное второй стадии культурного одичания. Первая была вызвана победой радикалов-большевиков. Они истребили либо разогнали почти всю культуросозидающую элиту и умело разрушили механизмы её воспроизводства [36]. Это позволило быстро наладить индустриальную формовку «советских людей», максимально удобных для манипулирования ими. Не помогло: СССР пал. Но вот и посткоммунистический проект рубежа 1980–1990-х гг. тоже потерпел крах... На наших глазах воспитан новый массовый человек. Причём для него, кажется, ещё нет сущностного имени: он – постсоветский? неокапиталистический? Но созрел он в условиях постепенно нарастающего социокультурного упадка, распространения отрицательных ценностей, маразматических умонастроений, про-

грессирующего безлюдья. Ощущение последнего вызвано постепенно нарастающей убылью из нашей популяции Гениев и Талантов. А сейчас, пожалуй, очередь доходит до Мастеров? Логично ожидать, что становящийся преобладающим антропологический тип окажется опасен и для себя самого, и для социума в целом. Вряд ли в его присутствии станет у нас развиваться понимание исключительной важности интеллектуальной деятельности, неотделимой от прогресса науки, образования, высокого искусства.

Думаю, что Дмитрий Иванович обратил внимание на то, как часто современные аналитики находят параллели с нашими общественными болезнями начала минувшего века. Скажем, философ Игорь Смирнов перечитывает статью Блока «Безвременье» (1906). Смирнов вопрошает: «И не тот же ли самый "переход от тишины пошлой обыденщины к сумасшествию" [А. Блок] переживаем мы снова?» [35, с. 7]. Мысли М.Н. Эпштейна об ухронии как обобщении понятия безвременья цитировались выше. Близость позиций двух мыслителей показательна.

Под впечатлением от первой мировой войны и эксцессов в России в 1917-1922 гг. Николай Бердяев назвал XX столетие «Новым средневековьем» (1924) в своей книге под этим заголовком. Сегодня М.Н. Эпштейн говорит о новейшем средневековье (Newest Middle Ages). Основание для этого – конфликт цивилизаций, рост религиозного и политического фундаментализма. По его мнению, начало нашего века ознаменовано террористическим актом в Нью-Йорке (11.09.2001) - «взрывным рецидивом Средневековья. Этот импульс исходил от воинствующего исламизма, а впоследствии - от России, в которой стали возрождаться архаические черты, не только дореволюционной, но и допетровской эпохи, включая противопоставление себя Западу, отход от секуляризма к религиозному фундаментализму, милитаризацию, ограничение роли науки и просвещения». Новейшее средневековье XXI века отличается от Нового средневековья XX века тем, что «опирается на религиознонациональную традицию, на традиционализм как таковой, и обращено в прошлое, а не в будущее». И оно - в отличие от нашего коммунистического тоталитаризма не имеет опоры внутри западных обществ [17, с. 245–246]. Последнее грозит нам изоляцией, вроде стратегии чучхэ, что было бы фатально для науки, образования, да и всей кровеносной системы трансляции культуры.

Чуть позже (1926) философ Семён Франк (высланный, как и Бердяев, из РСФСР на «философском пароходе» в 1922 г.) составил «сводку жизненных наблюдений над нашей эпохой» в виде двух лекций; их авторские конспекты недавно опубликованы. Если читатель ещё не успел заглянуть в них, выпишем оттуда самое главное. Франк свидетельствует «о процессе варваризации, о внутреннем перерождении европейского общества в направлении умирания культурных традиций и зарождении и укреплении нового варварства».

Франку бросились в глаза следующие факты. 1) «Ослабление интеллектуальных интересов, потеря вкуса к чистому научному знанию, преобладание практических интересов. Материальное и социальное положение учёных всюду такое же, как в советской России» (курсив всюду С. Ф.). 2) «Повышение интереса к физическому развитию – спорт». Франк обнаруживает «центральное общественное значение» спорта. «Физическая сила и ловкость становятся, как у дикаря, мерилом ценности человека (Указание на древнюю Грецию – но где в наше время интерес к состязанию поэтов и ораторов.)». 3) «Упрощение брачной и эротической жизни. "Советские

браки"». 4) «Эволюция моды, женского туалета – не каприз, а инстинктивное осуществление духа времени. <...> Влечение к варварской естественности». 5) «Успех кинематографа и вытеснение им театра». 6) Новый танец. <...> Танец всё более возвращается к своему значению в первобытные времена – к символизации половой жизни в самой упрощённой, реалистической форме». 7) «Крушение политической свободы, уважения к свободе личности. <...> Сходство между фашизмом и большевизмом». Франк делает оговорку для социологов: «в России под действием советской политики процесс идёт более катастрофически и опирается на действия власти, а в Европе – более постепенно, лишь просачиваясь через неразрушенный слой старой культуры» [37, с. 137–138].

От взгляда С. Франка не укрывается динамизм состояния современной ему цивилизации – в отличие от «цельной народной культуры с устойчивым бытом». Но в этом состоянии «накопление ценностей идёт за счёт умаления личности». Он констатирует «социальное обеднение» из-за появления новой фигуры: «цивилизованного дикаря», то есть «голого человека, не имеющего культуры в силу бедности и внутренней примитивности духовной жизни». Франк подчёркивает двойственность идущего процесса: «творчество в узкой среде», создающее новую науку и новое искусство, а в то же время – «процесс возрождения дикаря», «варваризация масс». Причинами последней он считает, во-первых, «одичание в результате роста техники». Во-вторых, двойной смысл демократизации: «выступление бытовое низших классов и культурное понижение высших». В итоге «современный европеец ближе к дикарю, чем к примитивной народной культуре» [37, с. 138–140].

Правомерно ли было бы говорить сегодня о «Новейшем варварстве» у нас? Различима ли такая тенденция? Либо пока только отдельные симптомы в общественной жизни, – но всё же указывающие на явления, опасные для развития науки и образования? Не знаю. Если исходить из опыта общения с моими студентами, то, пожалуй, – да. Второе гнетущее впечатление от наших юных поколений близко к диагнозу И.П. Смирнова: «Главное в современности, в которую мы погружены, – её неоригинальность <...> В репродукциях новое контрастирует с самим собой, не становясь иным новым» [35, с. 11]. Но моя статистическая выборка ничтожна. И у меня – поверхностное знание. С. Франк недаром пишет, что «гораздо значительнее стихийные, органические подземные процессы». Причём «политические события только ускоряют такие процессы, а не служат их полной причиной» [37, с. 137]. Уверен, что научному сообществу было бы важно узнать: какую характеристику современности даёт Дмитрий Иванович?

12. Итак, время, сев, урожай входят в компетенцию Хроноса–Сатурна, отчасти же и Тихе–Фортуны. А также – в традиционный темник поэзии. Скажем, Е. Рейн давным-давно завершил свой (питьевой) «Фонтанчик» искренним признанием:

Подсчитай мне время моё, клепсидра, И налей стаканчик ещё с походом, Ты, струя, единая не обрыдла, Ибо схожа ты со слезой и потом. Ибо что-то родное, совсем родное, Что-то братское видно в твоём паденье В эту землю, жадную к перегною, Безысходно-вечную почву тленья.

Позволю себе факультативный комментарий. Рейновская Муза чурается патетики, и в концовке поэт предпочитает сельскохозяйственный словарь. Рейн моделирует для читателя связь времени, личного опыта и гумуса культуры. Каждому из нас – причём всю жизнь – этот humus был способом Q(I) и ресурсом R существования, то есть опорой. А иногда вдруг его смысл открывался через пастернаковский бином: «почва и судьба». Уж кто-кто, а учёный особенно бережно, истово, тщательно добавляет во всемирный перегной свою лепту. Тем же самым занят ответственный художник. Обе эти фигуры кропотливо дополняют некий фрактал культуры, незаконченный и принципиально незавершимый, – вспоминаю статью Д.И. и Е.Г. Трубецковых [19].

Рискну предположить, и мне кажется, что Дмитрий Иванович может согласиться: эта цель Z усилий учёного и художника почти всегда от них заслонена. Потому что оба сосредоточены на преодолении барьеров – внутренних и внешних – в ходе производства нового. На одну из граней этого производства указывает предостережение Шарля Бодлера (1863): «Новизна составляет переходную, текучую, случайную сторону искусства; вечное и неизменное определяет другую его сторону» [38, с. 292]. Если распространить сентенцию Бодлера на будничный труд современного исследователя, то получается, что творчество обрекает жить преимущественно в состоянии перехода, транзита. Тогда метафоры струи, истечения у Рейна («что-то братское видно в твоём паденье») и её противоположности (в финальной строке) согласуются с бодлеровской мыслью.

Р.S. Пусть и поздно, но спохватился: мой *hommage* члену-корреспонденту РАН профессору Д.И. Трубецкову не имеет должной концовки: ведь причина появления текста обязывает напоследок обратиться к юбиляру с пожеланиями. Само собой разумеется – здравия желаю дорогому Дмитрию Ивановичу и его близким!!! А ещё? Само собой разумеется – максимум творческого и житейского счастья! Кажется, именно эти два состояния нынче в нашем отечестве становятся всё труднее достижимыми... И сфера науки – не исключение.

По моему представлению о Дмитрии Ивановиче, он был *полноценно счастилив* как раз в наиболее важный для каждого человека период жизни (сужу по книжечке [28]). И, скорее всего, в другие периоды – тоже. В столь сложной экзистенциальной проблеме служить экспертом способен, видимо, кто-нибудь из гениев, вроде Пушкина. А он полагает: «счастие есть лучший университет. Оно довершает воспитание души» (в письме к П.В. Нащокину, март 1834 г. [39, с. 31]). Лучший – для любого из людей, а тем паче – для весьма одарённой натуры. Поэт, заметим, мимоходом указывает гуманистический ориентир для высшей школы и её преподавателей. Будучи ректором, Дмитрий Иванович, насколько знаю, делал всё, чтобы молодёжь в СГУ получила первый опыт счастья познания (извините за неуместный пафос). Оглядывая то, что успел сделать в родном городе Дмитрий Иванович, нельзя не признать: Д.И. Трубецков – выпускник не только Саратовского университета, но и того, который определён в пушкинском изречении.

Vivat academia!

Библиографический список

- 1. Мифы народов мира: Энциклопедия / Гл. ред. С.А. Токарев. М.: Сов. энциклопедия, 1982. Т. 2: К–Я. 720 с.
- 2. *Вейсман А.Д.* Греческо-русский словарь. Репринт 5-го издания 1899 г. М.: Греколатинский кабинет Ю.А. Шичалина, 1991. 1370 стлб.
- 3. *Петрученко О.* Латинско-русский словарь. М.; Пг.; Харьков: Т-во «В.В. Думнов, Наследники Бр. Салаевых», 1918. 810 с.
- 4. Словарь античности / Сост. Й. Ирмшер в сотрудничестве с Р. Йоне. М.: Прогресс, 1989. 704 с.
- 5. *Ассман А.* Распалась связь времён? Взлёт и падение темпорального режима Модерна. М.: Новое лит. обозрение, 2017. 272 с.
- 6. *Трубецков Д.И*. Синхронизация: Учёный и время: Лекции на школах «Нелинейные дни в Саратове для молодых». Саратов: ГосУНЦ «Колледж», 2006. Вып. 2. 112 с.
- 7. Корогодин В.И. Информация и феномен жизни. Пущино: Пущинский научный центр АН СССР, 1991. 204 с.
- 8. *Соснин Э.А., Пойзнер Б.Н.* Из небытия в бытие: Творчество как целенаправленная деятельность. Томск: STT, 2011. 520 с.
- 9. *Соснин Э.А., Пойзнер Б.Н.* Осмысленная научная деятельность: Диссертанту о жизни знаний, защищаемых в форме положений / Под ред. А.В. Войцеховского. М.: ИНФРА-М, 2015. 148 с.
- 10. Аникин В.М., Пойзнер Б.Н., Соснин Э.А., Шувалов А.В. Феномен научной школы: История, типология получения и передачи знаний, психология коммуникаций / Под общей ред. В.М. Аникина. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2015. 232 с.
- 11. *Соснин Э.А.* Методы решения научных, технических и социальных задач : Учеб. пособие / Под ред. А.Н. Солдатова. Томск: ИД ТГУ, 2016. 376 с.
- 12. *Трубецков Д.И*. Наука о сложностях в лицах, датах и судьбах. Как закладывались основы синергетики: Пиршество духа и драма идей. М.: ЛИБРОКОМ, 2013. 312 с.
- 13. Ницше Фр. Воля к власти: Опыт переоценки всех ценностей (черновики и наброски из наследия Фридриха Ницше 1883–1888 годов в редакции Элизабет Фёрстер-Ницше и Петера Гаста) / Науч. редактура, сверка, коммент. и составл. конкорданса И. Эбаноидзе. М.: Культурная революция, 2016, 824 с.
- 14. *Трубецков Д.И*. Колебания и волны для гуманитариев: Учеб. пособие для вузов. Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 1997. 392 с.
- 15. *Шноль С.Э.* Герои, злодеи, конформисты российской науки. М.: Либроком, 2010. 720 с.
- 16. *Соснин Э.А., Шувалов А.В., Пойзнер Б.Н.* Лидер и управление жизненным циклом системы: Шкала творчества, примеры, патографии / Под ред. А.Н. Солдатова. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2013. 254 с.
- 17. Эпитейн М.Н. Проективный словарь гуманитарных наук. М.: Новое литературное обозрение, 2017. 616 с.

- 18. *Тынянов Ю.Н.* Поэтика. История литературы. Кино / Отв. ред. В.А. Каверин, А.С. Мясников; изд. подгот. Е.А. Тоддес, А.П. Чудаков, М.О. Чудакова. М.: Наука, 1977. 576 с.
- 19. *Трубецков Д.И., Трубецкова Е.Г.* Фрактальное искусство // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2016. Т. 24, № 6. С. 84–103.
- 20. *Арендт X*. Люди в тёмные времена. М.: Моск. шк. полит. исследований, 2003. 312 с.
- 21. *Перутц М*. Мне бы рассердить вас раньше: Эссе о науке, учёных и гуманизме. М.: Научный мир, 2007. 432 с.
- 22. *Розанов В.В.* Опавшие листья. Короб второй и последний // Собр. соч. Листва / Под общ. ред. А.Н. Николюкина. М.: Республика; СПб.: Росток, 2010. С. 189—364.
- 23. Глуховая Е. «Странное существо человек, загадочнее кошки»: Переписка Вяч. Иванова с М.О. Гершензоном (1909–1925) // Europa Orientalis: Русско-итальянский архив, VIII / Сост. Кристиано Дидди и Андрей Шишкин. Салерно, 2011. С. 27 46.
- 24. *Веселовский С.Б.* Страницы из Дневника. 1917–1923. Веселовский Вс.С. Встречи с И.А. Буниным в 1917 году. Итог революции и гражданской войны. М.: АИРО-XXI, 2004. 96 с.
- 25. Даль В. Толковый словарь живого великорусского языка / Под ред. И.А. Бодуэнаде-Куртенэ: Т. 1–4: Т. 2: И–О. СПб.–М.: ИГ «Прогресс», «Универс», 1994. 2030 стлб.
- 26. Гаспаров М.Л. Записи и выписки. М.: Новое лит. обозрение, 2000. 416 с.
- 27. $\Gamma y \partial \kappa o s$ Л.Д. Абортивная модернизация. М.: Российская политическая энциклопедия, 2011. 630 с.
- 28. Кафедра электроники, колебаний и волн: Прошлое, настоящее, будущее. Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 2002. 162 с.
- 29. Емельянов В.В. Исторический прогресс и культурная память (о парадоксах идеи прогресса) // Вопросы философии. 2011. № 8. С. 46–57.
- 30. Кобрин К. Постсоветский мавзолей прошлого. М.: Новое лит. обозрение, 2017. 264 с.
- 31. Эткинд А. Кривое горе: Память о непогребённых. М.: Новое лит. обозрение, 2016. 328 с.
- 32. Юрчак А. Это было навсегда, пока не кончилось: Последнее советское поколение / Предисл. А. Беляев. М.: Новое лит. обозрение, 2017. 664 с.
- 33. Дэвис М.Л. Fin de siècle: Психопатология историзованной жизни // Новое литературное обозрение. 2018. № 1. С. 353–373.
- 34. *Смирнов И.П.* Катагенез // Новое литературное обозрение. 2018. № 1. С. 391–400.
- 35. Смирнов И.П. Об ограниченности ума. М.: Новое лит. обозрение, 2017. 312 с.
- 36. *Smith D.* Former People: the Final Days of the Russian Aristocracy. N.Y.: Farrar, Straus and Giroux, 2013. 464 p.
- 37. Франк С.Л. «Новое варварство (конспекты двух лекций)» // Вопросы философии. 2018. № 1. С. 137–141.

- 38. Бодлер Ш. Об искусстве / Предисл. В. Левика; послесл. В. Мильчиной. М.: Искусство, 1986. 422 с.
- 39. Пушкин: Письма последних лет. 1834–1837 / Отв. ред., подгот. раздела, предисл. Н.В. Измайлов. Л.: Наука, ЛО, 1969. 528 с.

References

- 1. Myths of the Peoples of the World: Encyclopedia / Ch. ed. S.A. Tokarev. Moscow: Sovetskaya Encyclopedia, 1982, vol. 2, (in Russian).
- 2. Weisman A.D. Greek-Russian Dictionary. Reprint of the 5th edition of 1899. Moscow: Greko-Latinskiy Kabinet Yu.A. Shichalina, 1991.
- 3. Petruchenko O. Latin-Russian Dictionary. Moscow; Petrograd; Khar'kov: «V.V. Dumnov, Heirs of Br. Salaev», 1918.
- 4. Lexikon der Antike / Verfasser I. Irmsher in Zusammenarbeit mit R. Jonah. Leipzig: VEB Bibliographisches Institut, 1987.
- 5. Assmann Al. Ist die Zeit aus den fugen? Aufstieg und Fall des Zeitregimes der Modern. Mönchen: Carl Hanser Verlag, 2013.
- 6. Trubetskov D.I. Synchronization: Scientist and Time: Lectures at Schools «Nonlinear Days in Saratov for Young People». Saratov: Publishing house of the State Unitary Enterprise «College», 2006, vol. 2 (in Russian).
- 7. Korogodin V.I. Information and the Phenomenon of Life. Pushchino: Pushchino Research Center of the AS USSR, 1991 (in Russian).
- 8. Sosnin E.A, Poizner B.N. From Non-existence to Being: Creativity as a Goal-seeking Activity. Tomsk: STT Publ., 2011 (in Russian).
- 9. Sosnin E.A, Poizner B.N. Meaningful Scientific Activity: to Thesis Author about the Life of Knowledge, Defended in the Form of Statements. Ed. A.V. Voitsekhovskiy. Moscow: INFRA-M Publ. (in Russian).
- 10. Phenomenon of the Scientific School: History, Typology of Knowledge Obtaining and Transfer, Psychology of Communications. V.M. Anikin, B.N. Poizner, E.A. Sosnin, A.V. Shuvalov. Under the general ed. by V.M. Anikin. Saratov: Saratov University Publishing House, 2015 (in Russian).
- 11. Sosnin E.A. Methods for Solving of Scientific, Technical and Social Problems: Textbook / Ed. A.N. Soldatov. Tomsk: Tomsk State University Publ. House, 2016 (in Russian).
- 12. Trubetskov D.I. The Science of the Complexity in Persons, Dates and Fates. How to Lay the Foundations of Synergetics: Feasting of Spirit and Drama of Ideas. Moscow: LIBROKOM Publ., 2013 (in Russian).
- 13. Nietzsche Fr. Der Wille zur Macht. Loschberg: Jazzybee Verlag Jürgen Beck, 2010.
- 14. Trubetskov D.I. Oscillations and Waves for the Humanities: Textbook. Saratov: Publishing house of the State Unitary Enterprise «College», 1997 (in Russian).
- 15. Shnol S.E. Heroes, Villains, Conformists of Russian Science. Moscow: Librocom Publ., 2010 (in Russian).

- 16. Sosnin E.A., Shuvalov A.V., Poizner B.N. The Leader and Management of System Life Cycle: Scale of Creativity, Examples, and Pathographies. Ed. A.N. Soldatov. Tomsk: Tomsk State Univ. Publishing House, 2013 (in Russian).
- 17. Epshtein M.N. A Predictionary of the Humanities. Moscow: Novoe literaturnoe obozrenie, 2017 (in Russian).
- 18. Tynyanov Yu.N. Poetics. History of Literature. Cinema. Eds V.A. Kaverin, A.S. Myasnikov; ed. preparation E.A. Toddes, A.P. Chudakov, M.O. Chudakova. Moscow: Nauka, 1977 (in Russian).
- 19. Trubetskov D.I., Trubetskova E.G. Fractal art. *Izvestiya VUZ, Applied Nonlinear Dynamics*, 2016, vol. 24, no. 6, pp. 84–103 (in Russian).
- 20. Arendt H. Men in Dark Times. NY/Lnd: Harcourt, Brace & Co, 1968.
- 21. Perutz M. I Wish I'd Made You Angry Earlier (Essays on science, scientists and humanity). NY.: Cold Spring Harbor Laboratory Press, 2003.
- 22. Rozanov V.V. Fallen Leaves. The Second and Last Baske. Op. Foliage. Ed. A.N. Nikolyukin. Moscow: Respublika; St. Petersburg: Rostok, 2010 (in Russian).
- 23. Glukhovaya E. «Strange Creature, More Mysterious than a Cat»: Vyacheslav Ivanov' correspondence with M.O. Gershenzon (1909–1925). Europa Orientalis: Archivio Russo-Italiano VIII. A cura Cristiano Diddi e Andrej Shishkin. Salerno: Università di Salerno, 2011, pp. 27–46 (in Russian).
- 24. Veselovsky S.B. Pages from the Diary. 1917–1923. Veselovsky Vs.S. Meetings with I.A. Bunin in 1917. The Result of the Revolution and Civil War. Moscow: AIRO-XXI, 2004 (in Russian).
- 25. Dahl V. Explanatory Dictionary of the Living Great Russian Language. Ed. I.A. Baudouin de Courtenay: Vol. 2. St. Petersburg–Moscow: Progress, Univers, 1994 (in Russian).
- 26. Gasparov M.L. Records and Extracts. Moscow: Novoe literaturnoe obozrenie, 2000 (in Russian).
- 27. Gudkov L.D. Abortive Modernization. Moscow: Rossiyskaya Politicheskaya Entsiklopediya, 2011 (in Russian).
- 28. Department of Electronics, Oscillations and Waves: Past, Present, Future. Saratov: Publishing house of the State Unitary Enterprise «College», 2002 (in Russian).
- 29. Emelyanov V.V. Historical progress and cultural memory (about the paradoxes of the progress idea). *Voprosy Filosofii*, 2011, no. 8, pp. 46–57 (in Russian).
- 30. Kobrin K. Post-Soviet Mausoleum of the Past. Moscow: Novoe Literaturnoe Obozrenie, 2017 (in Russian).
- 31. Etkind A. Warped Mourning: Stories of the Undead in the Land of Unburied. Stanford, California: Stanford University Press, 2013.
- 32. Yurchak A. Everything Was Forever, Until it Was No More: The Last Soviet Generation. Princetone University Press, 2013.
- 33. Davies M.L. Fin de siècle: The Psychopathology of Historicized Life. *Novoe Lite-raturnoe Obozrenie*, 2018, no. 1, pp. 353–373 (in Russian).

- 34. Smirnov I.P. Catagenesis. *Novoe Literaturnoe Obozrenie*, 2018, no. 1, pp. 391–400 (in Russian).
- 35. Smirnov I.P. On Boundedness of Mind. Moscow: Novoe Literaturnoe Obozrenie, 2017 (in Russian).
- 36. Smith D. Former People: the Final Days of the Russian Aristocracy. N.Y.: Farrar, Straus and Giroux, 2013.
- 37. Frank S.L. «New Barbarism (abstracts of two lectures)». *Voprosy Filosofii*, 2018, no. 1, pp. 137–141 (in Russian).
- 38. Baudelaire Ch. Oeuvres complètes. Bruges: Livre et Art, 1968.
- 39. Pushkin: Letters of the Last Years. 1834–1837. Ed., preparation of section, preface by N.V. Izmaylov. Leningrad: Nauka, 1969 (in Russian).



Пойзнер Борис Николаевич – родился в Томске (1941). Окончил радиофизический факультет Томского государственного университета (1963). Защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук (1970). Работал на кафедре квантовой электроники и фотоники (1964—1967 и с 1970). В настоящее время – профессор этой кафедры. Читает лекции по нелинейной оптике, современным проблемам физики, методологии научных исследований. Автор и соавтор более 440 публикаций, 10 изобретений, 26 учебных пособий и монографий по физике лазеров, процесссам самоорганизации и хаотизации в оптических, радиофизических, социокультурных системах, вопросам вузовской педагогики и (само)образования, науковедению и культурологии, проблемам творчества как целенаправленной деятельности в обществе. Заслуженный работник высшей школы РФ (2005). Учёный секретарь диссертационного совета Д 212.267.04 на базе ТГУ. Действительный член Национального союза библиофилов РФ.

634050 Томск, пр. Ленина, 36 НИ ТГУ, РФФ, каф. квантовой электроники и фотоники E-mail: pznr@mail.tsu.ru

Научное издание

Оригинал-макет подготовлен в Редакционно-издательском отделе журнала «Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика» Зав. РИО Н.Н. Левина Редакторы Н.Н. Левина, Л.А. Сидорова Художник Д.В. Соколов Программисты И.А. Пономарева, О.Н. Строганова

Подписка на 2018 год осуществляется по Объединенному Каталогу «Пресса России» Раздел: 30. «Научно-технические издания. Известия РАН. Известия ВУЗов» и по Интернет-Каталогу Агентства «Книга-Сервис» а также по Договору между Подписчиком (юридическим или физическим лицом) и Издателем (Саратовским государственным университетом)

Цена годовой подписки (6 номеров) договорная Заявки на заключение Договора принимаются по почте, по телефону редакции, по эл. почте редакции

Адрес редакции: Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83 Тел./факс: (845-2) 52-38-64 E-mail:and@nonlin.sgu.ru

Сайт журнала http://andjournal.sgu.ru

Распространение журнала осуществляется РИО журнала по адресной системе

Условия подписки на электронную версию журнала на сайте Научной электронной библиотеки http://elibrary.ru

Сдано в набор 1.06.2018. Подписано к печати 28.06.2018 Формат 70х108/16. Бумага офсетная. Печать офсетная Усл. печ. л. 13,5 (9,6). Уч.-изд. л. 13,0. Заказ №88–Т.

Отпечатано в Типографии ФГБОУ ВО СНИГУ Россия, 410012 Саратов, Б.Казачья, 112A, тел. (845-2) 27-33-85

© Саратовский университет, 2018