

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 23, № 2, 2015, Саратов

## СО Д Е Р Ж А Н И Е

### НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА В ЛИЦАХ. ИСТОРИЯ

*Трубецков Д.И.* Математическое моделирование живых систем: Некоторые исторические аспекты и частные задачи ..... 3

### ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ НЕЛИНЕЙНОЙ ТЕОРИИ КОЛЕБАНИЙ И ВОЛН

*Дмитриев А.С., Герасимов М.Ю., Емельянов Р.Ю., Ицков В.В.* Моделирование of ансамблей нелинейных динамических систем с непрерывным временем в активных сверхширокополосных беспроводных сетях ..... 21

*Титов В.Н., Забиров Н.Р.* Моделирование сложной динамики однотранзисторного генератора ..... 37

### НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА И НЕЙРОНАУКА

*Захаров Д.Г., Касаткин Д.В., Кириллов С.Ю., Кузнецов А.С.* Особенности одновременного воздействия возбуждающих синаптических токов на нейрон с дифференциацией отклика ..... 47

### ИЗ КНИГ И ЖУРНАЛОВ

*Соснин Э.А., Поизнер Б.Н.* Осмысленная научная деятельность: Диссертанту – о жизни знаний, защищаемых в форме положений ..... 57

### КНИЖНОЕ ОБОЗРЕНИЕ

*Аникин В.М.* О «жизни» научных знаний ..... 67

### *Материалы XVI Международной зимней школы-семинара по радиофизике и электронике СВЧ Саратов, Россия, 2–7 февраля 2015*

### НОВОЕ В ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКЕ

*Соминский Г.Г., Тумарева Т.А.* Перспективные полевые эмиттеры из углеродных нанотрубок, графена и полупроводников: Последние разработки ..... 74

*Абубакиров Э.Б., Гузнов Ю.М., Денисов Г.Г., Запевалов В.Е., Завольский Н.А., Запевалов С.А., Планкин О.П., Розенталь Р.М., Седов А.С., Семенов Е.С., Чирков А.В., Шевченко А.С.* Проект релятивистского гиротрона W-диапазона с выходной мощностью 5–10 МВт ..... 94

*Глявин М.Ю., Завольский Н.А., Запевалов В.Е., Заславский В.Ю., Лещева К.А., Розенталь Р.М., Седов А.С.* Влияние азимутальной несимметрии электронно-волнового взаимодействия на характеристики излучения гиротронов субтерагерцового диапазона ..... 108

*Бубликов К.В., Садовников А.В., Константинова М.А., Шешукова С.Е.* Влияние зазора между слоями феррита и сегнетоэлектрика в мультиферроидной структуре конечной ширины на свойства собственных гибридных волн ..... 119

### КОНФЕРЕНЦИИ. СЕМИНАРЫ. СИМПОЗИУМЫ. ШКОЛЫ

XVI Международная зимняя школа-семинар по радиофизике и электронике СВЧ. Саратов, Россия, 2–7 февраля 2015 ..... 127

C O N T E N T S

HISTORY OF NONLINEAR DYNAMICS. PERSONALIA

- Trubetskov D.I.* Mathematical modelling of biological systems: Some historical aspects and particular problems ..... 3

APPLIED PROBLEMS OF NONLINEAR OSCILLATION AND WAVE THEORY

- Dmitriev A.S., Gerasimov M.Yu., Emelyanov R.Yu., Itskov V.V.* Modelling ensembles of nonlinear continuous time dynamical systems in active ultra wideband wireless networks ..... 21
- Titov V.N., Zabirov N.R.* Modeling of complicated dynamics of transistor generator .. 37

NONLINEAR DYNAMICS AND NEUROSCIENCE

- Zakharov D.G., Kasatkin D.V., Kirillov S.Yu., and Kuznetsov A.S.* Feature of simultaneous influence of excitatory synaptic currents on a neuron with differential responses ..... 47

FROM BOOKS AND JOURNALS

- Sosnin E.A., Poizner B.N.* Meaningful Scientific Activity: On the Life of Knowledge in the Form of Scientific Propositions ..... 57

BOOK REVIEW

- Anikin V.M.* On «the life» of scientific knowledge..... 67

*Transactions of the XVI International wintry  
school-seminar on microwave electronics and radiophysics  
Russia, Saratov, February 2–7, 2015*

INNOVATIONS IN APPLIED PHYSICS

- Sominski G.G., Tumareva T.A.* Prospective field emitters made from carbon nanotubes, graphene and semiconductors..... 74
- Abubakirov E.B., Guznov Yu.M., Denisov G.G., Zapevalov V.E., Zavolsky N.A., Zapevalov S.A., Plankin O.P., Rozental R.M., Sedov A.S., Semenov E.S., Chirkov A.V., Shevchenko A.S.* Design of W-band 5–10 MW output power relativistic gyrotron ..... 94
- Glyavin M.Yu., Zavolsky N.A., Zapevalov V.E., Zaslavsky V.Yu., Lescheva K.A., Rozental R.M., Sedov A.S.* The influence of the azimuthal inhomogeneity of electron beam–microwave interaction on the operation regime of subterahertz gyrotrons..... 108
- Bublikov K.V., Sadovnikov A.V., Konstantinova M.A., Sheshukova S.E.* Transformation of eigenmodes spectrum of finite width multiferroic structure due to tuning of the gap between ferrite and ferroelectric layers..... 119

CONFERENCES. MEETINGS. SYMPOSIA. SCIENTIFIC SCHOOLS

- XVI International wintry school-seminar on microwave electronics and radiophysics. Russia, Saratov, February 2–7, 2015 ..... 127



УДК 57:51-76; 57.02.001.57

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖИВЫХ СИСТЕМ****Некоторые исторические аспекты и частные задачи***Д. И. Трубецков*

Саратовский государственный университет

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Герои статьи Николас Рашевски, Карл Людвиг фон Бергаланфи и Эрвин Шрёдингер, а события, связанные с их деятельностью и происходившие в математической биологии, относятся к периоду до конца Второй мировой войны. Большая часть статьи уделена значению книги Эрвина Шрёдингера «Что такое жизнь. Физический аспект живой клетки» – книги, о которой знают многие, но мало кто её читал. Кратко описан дальнейший путь математической биологии, связанный с появлением компьютеров. Обсуждаются также простейшие модели раковых заболеваний и эпидемий.

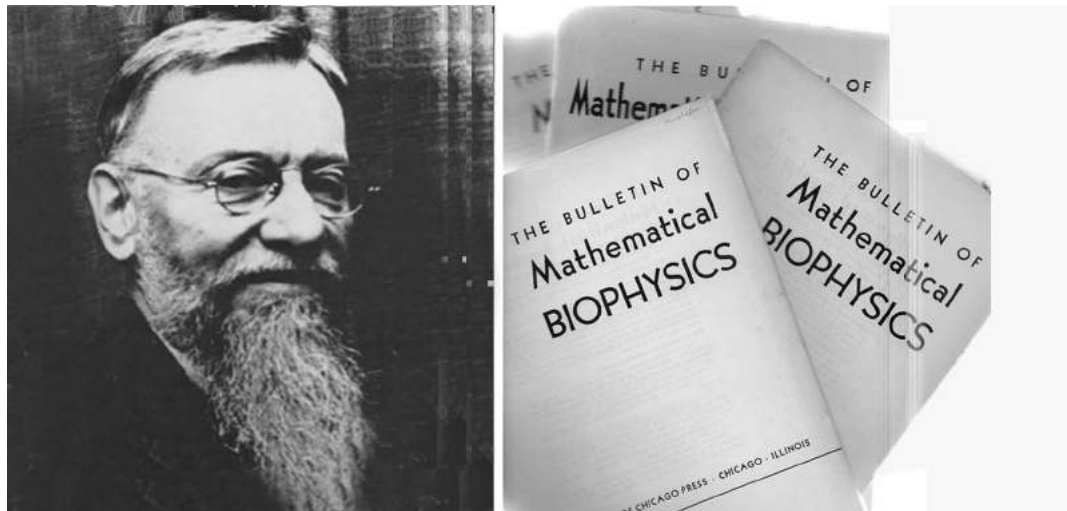
*Ключевые слова:* Математическое моделирование, математическая биология, история, Рашевски, Людвиг фон Бергаланфи, Шрёдингер, эпидемия, раковые заболевания.

**1. Рождение и становление математической биологии**

Начало статьи выглядит несколько неожиданно: создателем математической биологии, по крайней мере, на Западе, считается Николай Рашевский (1899–1872). Фамилия мало кому знакомая.

Начало XX века. Россия потерпела поражение в русско-японской войне 1904–1905 года. 1914 год – начало Первой мировой войны. В стране глубокий экономический кризис и нарастающее социальное недовольство. Грядёт Октябрьская революция. Всё это заставило физика-теоретика украинского происхождения Николая Рашевского покинуть Россию вместе с супругой Эмилией. Сменив несколько государств, в 1924 году они оказались в США, где Рашевский занялся исследованием деления клеток в исследовательской лаборатории Westinghouse. Рассмотрение деления клеток с позиции физики и математики считалось тогда «передовым фронтом науки», как любят писать журналисты.

В 1934 году Николас Рашевски (так его стали называть в США) стал работать в Чикагском университете, получив должность старшего преподавателя кафедры физиологии. Два последующих события, связанных с его деятельностью, имели большое значение для развития математической биологии.



Николаас Рашевски основал Общество математической биологии и стал редактором первого журнала по этой дисциплине. Рисунок заимствован из [1, с. 12] и из электронного ресурса <http://longstreet.typepad.com/books/2014/05/catalog-1-2014-physics-math.html>

В 1938 году вышла его работа *Mathematical Biophysics*<sup>1</sup>, ставшая знаменитой, поскольку в ней впервые была сделана попытка изложить физико-математические основы биологии. В 1939 году Рашевски создал научный журнал *The Bulletin of Mathematical Biophysics* («Вестник математической биофизики»). Первоначальное название журнала позднее сменилось на *The Bulletin of Mathematical Biology* («Вестник математической биологии»). Это первый научный журнал, посвящённый исследованиям в математической биологии. Приведём далее длинную цитату из книги [1].

«В последующие годы Рашевски занимался теоретической работой и применил теорию множеств и логику высказываний в исследованиях биологических систем. Он изучал различные общества и способы организации живых существ, а также иерархии, которые они образуют. Сегодня ответы на стоявшие перед ним вопросы кажутся очевидными: рассмотрим, к примеру, последовательность молекулы → клетки → ткани → органы → системы → индивид → популяция. Рашевски создал теорию биологических отношений – реляционную биологию, а также ввёл понятие «множество организмов». Все эти открытия до недавнего времени оставались незамеченными большинством биологов, которых в основном интересовали полевые исследования или работа в лаборатории. Подлинный размах и возможности теоретического аппарата, терпеливо выстроенного Рашевски, стали очевидны лишь с возникновением так называемой биологии сложных систем. А развитие этой дисциплины, в свою очередь, было бы невозможным без распространения компьютеров.

Наверное, одной из важнейших особенностей первого этапа развития математической биологии, который мы будем дальше называть этапом зарождения биоматематики, стало влияние на неё физики. Это неудивительно, если учесть, что в 1921 году Рашевски преподавал теорию относительности в Праге. Подобно Эйнштейну, посвятившему последние годы жизни работе над «единой теорией», в 1960-е Рашевски пытался создать единую теорию биологии. Он мечтал выразить на языке математики биологические принципы, описывающие жизнь во всех её проявлениях, будь то растения, животные или микроорганизмы» [1, с. 12–13].

На русском языке, насколько известно, вышла единственная из книг Рашевско-

<sup>1</sup>Chicago, The University of Chicago Press, 1938.

го [2], в которой представлен обзор некоторых математических проблем биологии, тесно связанных с медициной.

В книге обсуждаются вопросы оседания частиц в дыхательных путях, движения крови по системе кровообращения, действие лекарственных препаратов, патология желёз внутренней секреции, деятельность центральной нервной системы. Проблемы теоретической биологии обсуждены в отдельной главе.

На мой взгляд, самостоятельный интерес представляет введение к книге, которое имеет название «Цели и методы теоретических исследований». Оно начинается так.

«У французов есть поговорка “Savoir c’est prévoir” – “знать – значит предвидеть”. Другими словами, знать – значит предсказать. Критерий предсказания можно использовать для оценки системы научных знаний, полученной на основании фактов или из чисто теоретических рассуждений. Может показаться, что любое знание фактов представляет неоспоримую научную ценность, однако это не всегда так» [2, с. 7]. И далее следует ряд примеров к тезису «...не всегда так».

В разделе «Методы теоретического исследования» Рашевский задаётся вопросом: «Каким образом создаётся теория?»

Ещё одна длинная цитата, поскольку уж очень хорошо написано.

«В сущности, основой любой теории является совокупность предположений или гипотез относительно интимного, невидимого глазом механизма совокупности исследуемых явлений. Любое явление, будь то физическое или биологическое, если оно достойно теоретического рассмотрения, обычно достаточно сложно, причём в биологии эта сложность больше, чем в физике. Но даже и в физике простота является исключением. Исследователям в ньютоновские времена все явления казались проще, так как все сложности не были ещё известны.

Рассматривая многочисленные примеры из истории науки, можно прийти к выводу, что ни одна теория не описывает явления во всей сложности и что не следует признавать теорию негодной лишь потому, что она лишь приближённо объясняет определённые явления. Из этого вывода вытекает другой, из которого следует, что в наше время, когда техника эксперимента настолько точна, что может дать целый ряд второстепенных данных относительно интересующих нас явлений, теоретик должен умышленно абстрагировать существенные черты явления. Но каким образом он должен узнавать именно существенные черты?

На этот вопрос, вероятно, следует ответить так: способным и преуспевающим теоретиком является именно тот, кто верно угадывает существенное и умело использует абстрактное. Окончательное подтверждение пользы этой абстракции может быть получено иногда через годы и даже десятилетия...

Теория хороша, когда она приводит к заключениям, согласующимся с экспериментальными данными, если она внутренне непротиворечива и если она даёт возможность предсказывать новые факты. Хорошая теория в некоторых отношениях может терять связь с реальностью.

Требование неразрывной связи теории с реальностью по всем пунктам само по себе не имеет связи с реальностью. Это требование противоречит самому духу теоретического мышления» [2, с. 12–14].

Рашевский, как и Шрёдингер, задавался вопросом: «Что такое жизнь?», но ответа на вопрос не дал, как, впрочем, и все другие после него. В 1972 году он умер от сердечного приступа.

В книге [1, с. 13] указано, что во времена Рашевского были работы Карла Людвиг фон Бергаланфи, носящие прикладной характер. Бергаланфи родился в Австрии в 1901 году, учился в университетах Инсбрука и Вены, работал в Лондонском

университете и различных канадских институтах. Свою карьеру он окончил в Университете штата Нью-Йорк. Умер он внезапно от сердечного приступа в 1972 году, как и Рашевский. Основной вклад Бергаланфи в науку – общая теория систем, но были работы и по математической биологии. Наиболее знаменита формулировка (1938 год) уравнения роста, которое применяется в рыбоводческих хозяйствах. Он показал, что размер рыбы  $L(t)$  с её возрастом  $t$  подчиняется уравнению

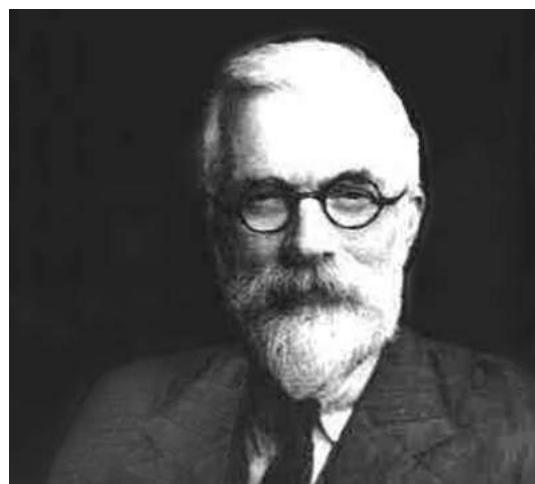
$$L(t) = L_k - (L_k - L_0) e^{-kt},$$

где  $L_k$  – максимальный размер,  $k$  – постоянная роста.

Ещё одним важным событием для математической биологии стало создание Альфредом Джеймсом Лоткой в 1925 году и годом позже Вито Вольтеррой известной модели «хищник–жертва». Это одна из самых прозрачных моделей в математической биологии и, пожалуй, самая популярная модель в экологии. Широта её применения поражает<sup>2</sup>.

С момента выхода книги Чарльза Дарвина «Происхождение видов» в центре важнейших тем биологии была эволюция. В 1930-е годы ей уделяется большое внимание и в математической биологии.

Под эволюцией понимают физиологические и другие изменения, претерпеваемые живыми существами с течением времени. Согласно Дарвину, живые существа – будь то растения, животные или микроорганизмы – реализуют различные решения задач адаптации к окружающей среде. И чем лучше «решение», которое представляет биологический вид, тем лучше он приспособлен, тем больше его шансы на выживание и, следовательно, на достижение репродуктивного возраста. Если организму удалось размножиться, гены будут переданы следующему поколению. После публикации книги Дарвина в Великобритании возникла английская биометрическая школа, которой принадлежали такие видные учёные, как Фрэнсис Гальтон и Карл Пирсон, впервые применившие в биологии методы статистики.



Рональд Эймлер Фишер (1890–1962)

В 1930 году Рональд Эймлер Фишер сформулировал основную теорему естественного отбора: при определённых условиях и за определённое время  $t$  ритм или скорость, с которой повышается средняя приспособленность конкретного вида, равна разнообразию возможных значений генов [1, с. 15–16]

$$\Delta \bar{W} = \frac{\sigma_W^2}{\bar{W}}.$$

Здесь  $\Delta \bar{W}$  – средний рост приспособленности,  $\bar{W}$  – средняя приспособленность,  $\sigma_W^2$  – множество возможных значений генов (генных вариаций).

<sup>2</sup>См., например, статью Трубецкого Д.И. Феномен математической модели Лотки–Вольтерры и сходных с ней (Изв. вузов. ПНД, 2011, т. 19, № 2, с. 69–88)

Несколько слов о Фишере.

Рональд Эймлер Фишер родился в Лондоне в 1890 году. Окончил в 1912 году Кембриджский университет, изучая физику и математику. В 1919 году он стал сотрудником Ротамстедской экспериментальной станции (до этого он преподавал и занимался статистикой), где столкнулся с проблемой статистической обработки массовых опытов по селекции сельскохозяйственных культур и генетике. Именно тогда он написал свою известную книгу «Методы статистики для научных работников». На протяжении всей своей жизни Фишер занимался разработкой, пропагандированием и внедрением методов математической статистики в биологию и другие области экспериментальных исследований. Он занимал гальтоновскую кафедру в Лондоне, затем – кафедру генетики в Кембридже. После своей отставки в 1957 году Фишер переехал в Австралию; умер в Аделаиде в 1962 году.

Фишер сформулировал основные концепции популяционной генетики, что было важно для объяснения механизма эволюционного процесса. Его книга «Генетическая теория естественного отбора» (1930) стала классическим сочинением, с которого началось развитие популяционной генетики.

Фишер одновременно с Колмогоровым, Петровским и Пискуновым исследовал уравнение  $\partial U / \partial t = k(1 - U)U + D(\partial^2 U / \partial x^2)$  (частный случай уравнения КПП).

Имя Эрвина Шрёдингера уже упоминалось в связи с попытками Рашевского ответить на вопрос: «Что такое жизнь?». Но упоминания мало, поскольку книга Шрёдингера [3] занимает особое место в науке. В ней Шрёдингер попытался прояснить с точки зрения физики вопросы, интересовавшие человечество с древних времён.

«Большой, важный и очень часто обсуждаемый вопрос состоит в следующем: как физика и химия смогут объяснять те явления в пространстве и времени, которые происходят внутри живого организма?» [3, с. 11].

Кратко о самом Эрвине Шрёдингере [4,5].

12 августа 1887 года в семье Рудольфа Шрёдингера и Георгины Бауэр родился единственный сын – Эрвин Шрёдингер. Родился он в Вене, где и учился в гимназии, затем в Университете, который окончил в 1910 году, получив степень доктора после защиты диссертации на тему «Электрическая проводимость на поверхности изоляторов во влажном воздухе».

В 1926 году Шрёдингер сформулировал знаменитое уравнение, которое носит его имя, и в шести статьях обосновал свою волновую версию квантовой механики, а также доказал эквивалентность своей теории и матричной механики Гейзенберга. В ноябре 1933 года ему была присуждена Нобелевская премия, которую он разделил с Полем Дираком. Любопытно, что Поль Дирак так писал о Шрёдингере: «Из всех физиков, которых я знаю, мне кажется, Шрёдингер больше всех похож на меня. ...Думаю, это



Эрвин Шрёдингер (1887–1961)

потому, что мы оба безнадежно увлечены математической красотой, которая и определяет нашу работу» [цит. по 1, с. 12].

В этом смысле интересны высказывания двух великих:

Э. Шрёдингер: «Я пропустил красоту вперёд науки».

П. Дирак: «Физический закон должен обладать математическим изяществом» («The physical law should have the mathematical beauty»).

В 1935 году Шрёдингер опубликовал статью «Современное состояние квантовой механики»; в ней он описал «парадокс кота» и ввёл термин «запутанность» (см., например, [5, глава 4]). Нас больше всего интересует 1944 год, в котором Шрёдингер опубликовал одну из наиболее важных работ ушедшего XX века – книгу «Что такое жизнь? Физический аспект живой клетки» [3].

Умер Эрвин Шрёдингер в Вене 4 января 1961 года.

Из изложенного выше может сложиться впечатление о гладкой успешной жизни Шрёдингера, но это не так. Поэтому приведём начало Введения к книге [5].

«Эрвин Шрёдингер – видный представитель исчезнувшего сегодня вида. Он носитель великой культуры Центральной Европы, которая долгое время развивалась на берегах Дуная и была рассеяна в результате мировых войн и деятельности политических экстремистов прошедшего века. Учёный жил и работал в те же годы, что и Фрейд, Климт, Шёнберг, Витгенштейн – в Вене, а Манн, Гросс и Брехт – в Берлине. Он словно впитывал в себя яркий свет современников, оставаясь в их тени. Шрёдингер участвовал в Первой мировой войне в звании лейтенанта артиллерии, знал нищету и невзгоды послевоенного времени, своими глазами видел, как изгоняли евреев, и дважды становился эмигрантом: сначала – когда Гитлер пришёл к власти в Германии, а затем – после аннексии Австрии. Он наблюдал закат двух великих эпох, сформировавших его, – исторической и научной (эпохи классической физики).

Единственный сын в богатой семье, он получил образование и с детства мог воспользоваться всеми преимуществами, которые дают человеку деньги и просвещенное окружение. Однако первоначальный комфорт сменили значительные трудности, в которых Шрёдингер проявил себя как страстная, увлечённая личность, не чуждая и противоречий. Мятежный характер учёного помог ему строить семейную жизнь, отойдя от лекал традиционного буржуазного брака<sup>3</sup>, однако в области политики и особенно науки он проявил себя как убеждённый консерватор».

Широта исследований Шрёдингера поражает: диэлектрические материалы, магнетизм, термодинамика, спектроскопия, квантовая механика, общая теория относительности, радиоактивность, космические лучи, поверхностное натяжение, сверхпроводимость, учение о цвете, единые теории поля. Он поставил также множество экспериментов. При этом он работал один (в этом он был подобен Дираку):

<sup>3</sup>«В отношениях с окружающими учёный проявлял себя как опытный обольститель, это в равной мере справедливо и для женщин и для студенческой аудитории и для слушателей его докладов на конференциях. Однако обаяние учёного порой приносило ему одни только неприятности, и его бурная личная жизнь иногда становилась уж слишком наэлектризованной. Известно, что у Шрёдингера было три внебрачные дочери от трёх разных женщин и при этом один брак на всю жизнь. Однажды он приехал в Оксфорд сразу с двумя партнёршами, и это событие вызвало настоящий скандал. И всё же, несмотря на весь свой авантюризм и настойчивые ухаживания за некоторыми женщинами, Шрёдингер вовсе не был Дон Жуаном. Он просто любил саму любовь, для него эта вспышка страсти была главной движущей силой, которая стимулировала его прогресс в исследованиях, – по крайней мере, так считал сам учёный. И действительно, его постоянство и непостоянство наложило отпечаток и на научную карьеру: исследователь всё время стремился к новым горизонтам» [5, с. 9].



«В научной деятельности, как и вообще в жизни, я никогда не придерживался какой-либо генеральной линии, не следовал руководящей программе, рассчитанной на длительные сроки. Хотя я очень плохо умею работать в коллективе, в том числе, к сожалению, с учениками, мои труды никогда не были совершенно самостоятельными, поскольку мой интерес к какому-либо вопросу всегда зависит от интереса, проявляемому к этому же вопросу другими» (цит. по [5, с. 11]).

Но вернёмся к книге [3], которая продолжает играть важную роль в современной науке. К проблемам, затронутым в книге, внимание Шрёдингера привлекли работы Макса Дельбрюка, который разработал модель гена, основанную на предположении о квантовой природе элементарного процесса передачи наследственных признаков. Модель объясняла устойчивость и изменчивость молекулярных сил. Шрёдингер, используя эти идеи, попытался распространить их на живую клетку, в деятельности которой главную роль играют гены. Он рассматривал вопрос о тесной связи мутаций и отбора с квантовыми скачками (вопрос о тесной связи фундаментальных биологических и физических явлений) и хотел количественно описать хорошо известные биологам мутации, то есть найти формулы для относительных частот различного рода мутаций.

Ю.А. Данилов в предисловии к третьему русскому изданию книги [3] пишет следующее.

«Идеи Э. Шрёдингера условно можно отнести к двум главным темам «порядок из порядка» и «порядок из беспорядка».

К первому кругу идей относятся размышления автора о том, каким образом организмы передают информацию из поколения в поколение, как ген, имеющий микроскопически малые размеры, противостоит тепловым флуктуациям и удерживает наследственную информацию (шрёдингеровская модель аperiодического кристалла, в структуре которого изолирован «план» организма, переключается с современными представлениями о мозаиках Пенроуза и квазикристаллах).

Полвека развития молекулярной биологии, неравновесной термодинамики и нелинейной физики подтвердили пророческий характер и плодотворность идей Шрёдингера, относящихся к проблеме «порядок из беспорядка».

Остановимся немного подробнее на двух главных темах, указанных выше, следуя тексту книги [3] и комментируя отдельные места.

Концепция аperiодического кристалла сыграла важную роль в биологии, поскольку она используется в формулировке принципа хранения генетического кода.

В разделе 46 «Аperiодическое твёрдое тело» Шрёдингер пишет следующее.

«Небольшую молекулу можно назвать “зародышем твёрдого тела”. Исходя из такого твёрдого зародыша, очевидно, возможно представить себе два различных пути построения всё больших и больших ассоциаций. Один – это сравнительно однообразный путь повторения снова и снова одной и той же структуры в трёх направлениях. Так растёт кристалл. Если периодичность установилась, то уже нет определённого предела для размера такого агрегата. Другой путь – построение всё более и более увеличивающегося агрегата без скучного механизма повторения. Это случай всё более и более сложной органической молекулы, в которой каждый атом, каждая группа атомов играет индивидуальную роль, не вполне равнозначную роли других атомов и групп атомов. Мы можем совершенно точно назвать это образование аperiодическим кристаллом или твёрдым телом и выразить нашу гипотезу словами: мы полагаем, что ген, или возможно целая хромосомная нить представляет собой аperiодическое твёрдое тело» [3, с. 66, 67].

Раздел 47 книги [3] носит название «Разнообразное содержание, сжатое до миниатюрного кода» и начинается так:

«Часто задают вопрос, как такая крошечная частичка вещества – ядро оплодотворённого яйца – может вместить сложный шифровальный код, включающий в себя всё будущее развитие организма? Хорошо упорядоченная ассоциация атомов, наделённая достаточной устойчивостью для длительного сохранения своей упорядоченности, представляется единственно мыслимой материальной структурой, в которой разнообразие возможных («изомерных») комбинаций достаточно велико, чтобы заключать в себе сложную систему детерминации в пределах минимального пространства».

На простом числовом примере, основанном на азбуке Морзе, Шрёдингер поясняет, что даже при небольшом числе элементарных «кирпичиков» можно получить почти неограниченное число возможных расположений. Он пишет:

«Этим мы хотели проиллюстрировать, что, представив ген в виде молекулы, мы не можем считать немислимым точное соответствие миниатюрного шифровального кода чрезвычайно сложному, специфическому плану развития организма. Мы не можем также считать немислимым и содержание в нём факторов, реализующих этот план» [3, с. 67].

Во времена Шрёдингера уже существовало представление о генах как больших молекулах. Отсюда его определение аperiodического кристалла как составляющей структуры молекулы, несущей наследственную информацию. Когда такие структуры повторяются в наследственной молекуле, то они напоминают некий алфавит – код, несущий генетическую информацию. Но тогда можно принять термин «аperiodический кристалл» как описывающий двойную спираль.

Как удачно указано в [5, с. 146]: «Конфигурация молекулы включала не только инструкции для организма, программу жизни, но и способствовала исполнению этой программы: “Это одновременно и проект архитектора, и рабочие руки строителя”».

Структуру ДНК, как известно, открыли Розалинда Франклин, Морис Уилкинс, Джеймс Уотсон и Фрэнсис Крик. Некоторых из них на эти исследования толкнула книга [3]. В частности, Нобелевский лауреат Джеймс Уотсон писал впоследствии:

«Мне понравилась идея, согласно которой жизнь могла продолжиться благодаря учебнику с инструкциями, записанными в виде конкретного кода» (цит. по [5, с. 146]).

Шрёдингер в своей книге одним из первых описал открытые системы, показав, что в них могут происходить процессы самоорганизации и самовоспроизведения. Эти идеи, высказанные в середине сороковых годов, были предтечей современной теории образования структур в живых системах. Вот как звучит его определение жизни.

«Жизнь – это упорядоченное и закономерное поведение материи, основанное не только на одной тенденции переходить от упорядоченности к неупорядоченности, но и частично на существовании упорядоченности, которая поддерживается всё время» [3, с. 73].

Дать ответ на вопрос «Что такое жизнь?» пытались многие (см., например, [6]). Приведём два примера, которые хорошо соответствуют времени их написания.

Первый пример – статья академика В. Гольданского [7] (обратите внимание, что она опубликована в журнале «Коммунист» в разделе «Горизонты науки» в 1986 году). Начинается статья так.

«Знаменитое определение Энгельса: “Жизнь есть способ существования белковых тел, существенным моментом которого является постоянный обмен веществ с окружаю-

щей их внешней природой, причём с прекращением этого обмена веществ прекращается и жизнь...” (К. Маркс и Ф. Энгельс, Соч. Т. 20, с. 616) – намного опередило своё время, указав на самое принципиальное в характеристике сущности живого... Прекрасно понимая, что наука о сущности жизни делала ещё только первые шаги, он писал: “Наша дефиниция жизни, разумеется, весьма недостаточна, поскольку она далека от того, чтобы охватить все явления жизни...” (там же, стр. 84)».

Далее во вводной части статьи В. Гольданского изложены краткие сведения об основных молекулах жизни – биополимерах: белках (полипептидах) и ДНК и РНК (полинуклеотидах). Указано, что основным признаком жизни – самовоспроизведение, самообновление белковых тел, в основе которых лежит саморепликация, состоящая в удвоении молекулы ДНК с передачей рождающейся клетке генетической информации. Наконец, следует определение: «...жизнь есть форма существования биополимерных тел (систем), способных к саморепликации в условиях постоянного обмена веществом и энергией с окружающей средой».

Второй пример – статья [8], опубликованная в 2010 году, содержит следующее определение.

«Жизнь с точки зрения физики можно определить как результат процесса игры взаимодействий материи, в которой одна её часть приобрела свойство запоминать вероятности появления удач и неудач в предыдущих раундах этой игры, повышая тем самым свой шанс на существование в последующих раундах. Эту часть материи и называют сегодня живой природой».

Удивительно современно в книге Шрёдингера выглядит содержание главы VI «Упорядоченность, неупорядоченность, энтропия» [3, с. 72–78], которая содержит следующие разделы: 56. Упорядоченность, основанная на «упорядоченности»; 57. Живая материя избегает перехода к равновесию; 58. Питание «отрицательной энтропией»; 59. Что такое энтропия? 60. Статистическое значение энтропии; 61. Организация, поддерживаемая извлечением упорядоченности из окружающей среды.

Закончим рассказ об Эрвине Шрёдингере цитатой.

«Хотя Шрёдингер не основал ни одной школы и не собрал вокруг себя последователей, он написал одно из самых вдохновляющих научных произведений XX века – сборник «Что такое жизнь?», куда вошёл цикл его лекций, прочитанных в Тринити-колледже в Дублине в 1943 году. Эта книга убедила целое поколение учёных в том, что физика содержит уникальные возможности для изучения живых существ. Шрёдингер предвидел структурные особенности, выражающиеся в том, что наследственность связана с хромосомами, и вывел современную концепцию генетического кода.

Одна из наиболее выдающихся частей наследия Шрёдингера имеет отношение к его языку, к его способности находить для описания экспериментальных ситуаций яркие образы, которые сразу же подхватывают даже его научные оппоненты. Например, все знают о коте, который носит имя учёного и стал символом загадок в квантовой механике» [5, с. 11].

Пожалуй, изложенное охватывает все основные события в математической биологии до конца Второй мировой войны.

Ситуация меняется с появлением компьютеров. Появляется вычислительная биоматематика [1, с. 15-22].

В 1952 году в университете Манчестера появился компьютер Ferrari Mark I, на котором начал работать Алан Тьюринг, используя его для математического моделирования биологических задач.

Его интересовали две задачи морфогенеза (образования форм):

- 1) как объяснить, почему живые организмы обретают конечную форму (почему ветви деревьев обретают именно такую структуру, почему членистоногие состоят как бы из отдельных кусочков, а кольчатые черви – из колец);
- 2) почему на коже некоторых позвоночных есть узоры (полосы у зебр, круглые пятна у леопарда).

Тьюринг предложил первую математическую теорию морфогенеза, используя для анализа формы листьев последовательность Фибоначчи  $a_n = a_{n-1} + a_{n-2}$ . Если принять первое число Фибоначчи  $a_1$  за 0,  $a_2$  положить равным 1, то последовательность будет такой: 0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144 и т.д. Она описывает количество лепестков цветов, расположение листьев растений и чешуек шишек. Интересно, что если лист соперничает с другими за доступ к солнечному свету, то оптимальное расположение листьев даёт последовательность Фибоначчи. Такая особенность растений получила название филлотаксиса Фибоначчи.

В ставшей классической работе<sup>4</sup> Тьюринг показал, что периодическое в пространстве и стационарное во времени распределение концентраций может установиться в первоначально однородной системе, где химические реакции сочетаются с диффузией.

1950–1960 годы – время проводимых с помощью компьютеров математических исследований живых существ и жизни в предположении, что растения, животные и микроорганизмы находятся в стационарном состоянии, которое возможно благодаря механизмам саморегуляции или гомеостаза. Изучались линейные системы. Их изучение было связано с уже упоминавшимся системным анализом Карла Людвиг фон Бергаланфи (в 1968 году он опубликовал книгу «General system theory: foundations, development, applications»). По Бергаланфи, система есть множество реально существующих объектов (частей или элементов системы), связанных и взаимодействующих между собой.

«Важный момент теории систем фон Бергаланфи заключается в том, что части системы взаимодействуют между собой, а сами системы являются незамкнутыми и взаимодействуют с окружающей средой. При этом из среды в систему поступает входная информация, результатом обработки или преобразования которой является ответ системы, или выходная информация, поступающая обратно в среду. Такие понятия, как саморегулирование и обратная связь, баланс и гомеостаз, в этой модели возникают естественным образом» [1, с. 24].

Заметим, что эти годы – годы кибернетики. Любопытно упомянуть, что в это же время Джон фон Нейман и Алан Тьюринг писали «Жизнь – это информация».

1970-е годы – годы Ильи Романовича Пригожина, время теории диссипативных структур – систем, непрерывно обменивающихся с окружающей средой и функционирующих благодаря тому, что они далеки от равновесного состояния.

1980–1990 годы – годы изучения неравновесных, нелинейных систем, особенно динамического хаоса в них. Сошлёмся опять на книгу [1, с. 28–29].

«В середине 1980-х учёные объединили нелинейные, хаотические и диссипативные системы в одно целое – сложные системы, изучению которых в биологии уделяется наи-

<sup>4</sup>Turing A.M. Chemical foundations of morphogenesis. // Philos. Trans. Roy. Soc. London. Series B, Biological Sciences. 1952. Vol. 237, № 641, p. 37.

большее внимание. К таким системам относятся, например, муравейники, мозг, иммунная система, клетка, морфогенез и экосистемы».

Появляются и эвристические методы изучения сложных систем, например метод клеточных автоматов.

На этом закончим краткое описание лишь некоторых исторических аспектов математического моделирования живых систем. И вновь уместна цитата.

«Обратите внимание, что не только зарождение, но и последующее развитие этой дисциплины неизменно находилось под большим влиянием преобладающих на этот момент физических интерпретаций жизни... Сегодня одним из самых важных достижений математической биологии являются математические модели, позволяющие проводить с помощью компьютера сложные эксперименты» [1, с. 29].

Поэтому в конце статьи изложены описание и анализ нескольких моделей, которые описывают явления, чрезвычайно важные для человечества, но о которых не часто упоминают в литературе по нелинейной динамике. К ним относятся математическое изучение раковых заболеваний, СПИДа, свиного гриппа и различных эпидемий.

## 2. Математическое изучение раковых заболеваний [1, с. 58], [5, с. 210]

При заболеваниях раком наблюдается бесконтрольный рост группы клеток, образующих опухоль, которая разрушает близлежащие клетки и ткани. Данное определение подходит и для лейкемии. Раковая опухоль содержит и обычные клетки. Их злокачественная трансформация ведёт к образованию раковых.

«Лечение раковых заболеваний настолько важно, что сегодня существует целая база данных QCDB (от англ. Quantitative Cancer Modeling Data Base – база данных для количественного моделирования рака), предоставляющая доступ к информации об этом заболевании биоматематикам всего мира» [1, с. 58].

Что даёт математика?

- 1) Она помогает выдвигать новые гипотезы о причинах образования опухолей.
- 2) Она позволяет лучше анализировать громадные объёмы накопленных экспериментальных и клинических данных.

Раковые опухоли – сложные системы, в которых раковые клетки взаимодействуют между собой и с другими клетками. В соответствии с этим, предполагается, что опухоль образуется не в результате сбоя в конкретном гене: причина заболевания в том, что имеет место общий сбой взаимодействия между генами.

В книге [1, с. 58] приведена любопытная аналогия.

«Проводя параллель с интернетом, рак можно сравнить с результатом нарушения работы множества компьютеров в сети (DNS – серверов, маршрутизаторов и т.д.), а не с результатом сбоя какого-нибудь конкретного компьютера».

Рост опухолей в предположении ограниченного пространства и питательных веществ (классический пример – рак груди) может быть описан функцией Гомпертца, которая является решением дифференциального уравнения

$$\frac{dy}{dt} = \alpha \ln \left( \frac{K}{y} \right) y,$$

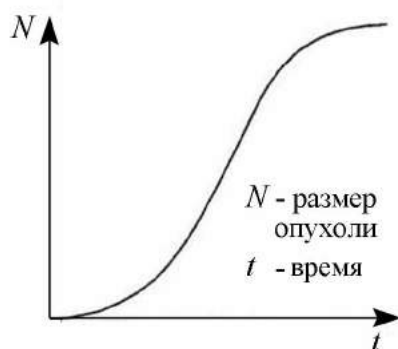


Рис. 1. Кривая Гомпертца, описывающая рост раковой опухоли [1]

модели Мальтуса. Применительно к раковым заболеваниям размер опухоли  $y$  описывается выражением

$$y = K e^{\{\ln(\frac{y(0)}{K})\}e^{-\alpha t}},$$

где  $y(0)$  – начальный размер опухоли. При лечении  $y(0) < K$ , в противном случае размер опухоли будет увеличиваться. Функция на графике весьма схожа с логистической функцией (сигмоидой): рост опухоли замедлен в начале и в конце процесса. «Замедление в конце процесса кажется очевидным, если учесть, что по мере роста опухоли клетки, расположенные внутри неё, получают меньше кислорода, отмирают и вызывают некроз ядра опухоли. В результате её размер стабилизируется: рост внешней части уравнивается отмиранием клеток во внутренней части» [1, с. 60].

Первыми применили функцию Гомпертца страховые компании. В чём основная идея этого применения? Смысл её в том, что с увеличением возраста уровень смертности возрастает в геометрической прогрессии.

Гомпертц вывел формулу связи между уровнем смертности  $R_m$  и возрастом  $t$  в виде:

$$R_m = R_0 e^{\beta t} + A.$$

Слагаемое  $A$  отражает воздействие на уровень смертности различных факторов, не связанных с возрастом человека. Величина  $A$  может быть снижена благодаря тому, что в развитых странах выросла средняя продолжительность жизни в соответствии с ростом уровня жизни и созданием более здоровой среды. На уменьшение  $A$  могут повлиять рост городов, улучшение гигиены, питания и т.п. В то же время параметр  $\beta$  не меняется. За счёт снижения  $A$  величина  $R_m$  уменьшается, но сердечные и раковые заболевания приводят к тому, что с возрастом  $R_m$  увеличивается.

Описанному закону подчиняется и динамика роста высокотехнологических предприятий, например, операторов мобильной связи или фармацевтических компаний. Почему, понятно: сначала затраты на исследования, патенты, рекламу и т.д. превышают доходы от продаж, потом идёт период бурного роста, компания получает прибыль, но далее из-за насыщения рынка продажи падают.

И совсем интересно: «Также функция Гомпертца описывает рост органов эмбрионов и регенерацию хвоста у ящерицы» [1, с. 60].

В 1980-е годы установили, что данная функция не совсем точно описывает рост опухолей малых размеров, потому что в модели не учитывается, например, роль иммунной системы. В этой модели на первом этапе роста опухоли раковые клетки не

где  $dy/dt$  – скорость роста опухоли в указанных условиях (размер опухоли может быть выражен через её объём или число клеток),  $\alpha$  – параметр способности раковых клеток опухоли к росту,  $K$  – максимальный возможный размер опухоли (уже упоминалось, что объёмы ткани, характеризующие опухоль, и количество питательных веществ ограничены). Эта функция была предложена английским математиком Бенджаминном Гомпертцем в 1825 году как уточнение

ведут борьбу за доступные ресурсы, поэтому их рост подчиняется экспоненциальному закону Мальтуса. Но при достижении некоторого критического размера имеет место переход к функции Гомпертца.

В книге [9, раздел 5.6, с. 210–219] обсуждается одна из моделей, в которой рассматривается влияние иммунной системы больного на опухоль.

Раковые клетки содержат особые вещества – антигены, которые вызывают резкую иммунную реакцию у больного. Она состоит в том, что производятся клетки-лимфоциты, атакующие и уничтожающие клетки опухоли. Будем следовать переменной работы [9]. Все переменные относятся к размеру популяций клеток:  $L$  – свободные лимфоциты на поверхности опухоли;  $C$  – опухолевые клетки внутри опухоли и на её поверхности;  $C_S$  – опухолевые клетки на поверхности опухоли;  $\bar{C}$  – опухолевые клетки на поверхности опухоли, не связанные лимфоцитами;  $C_f$  – опухолевые клетки внутри опухоли и на её поверхности, не связанные лимфоцитами.

Из определения следует, что

$$C = C_f - \bar{C} + C_S. \quad (1)$$

Предполагается, что опухоль имеет шарообразную форму и не меняется, поэтому

$$C_S = K_1 C^{2/3}, \quad (2)$$

где  $K_1 = \text{const}$ , и что взаимодействие опухолевых клеток с лимфоцитами происходит только на поверхности опухоли. Связывание клеток происходит только тогда, когда опухолевая клетка встречается со свободным лимфоцитом. Предполагается, что между количеством свободных и связанных лимфоцитов имеет место соотношение

$$C_S - \bar{C} = K_2 \bar{C} L, \quad (3)$$

где  $K_2 = \text{const}$ .

Из выражений (1) и (2) имеем:

$$C_f = C - K_1 K_2 L C^{2/3} \frac{1}{1 + K_2 L}, \quad (4)$$

$$\bar{C} = K_1 \frac{C^{2/3}}{1 + K_2 L}. \quad (5)$$

Из этих равенств следует, что  $L$  и  $C$  можно считать основными переменными модели.

Далее допускается, что величина  $(1/L)(dL/dt)$  для популяции лимфоцитов состоит из двух слагаемых: 1) постоянного уровня смертности  $\lambda_1$ ; 2) уровня стимуляции  $\alpha_1 \bar{C} (1 - L/L_M)$ . Из последнего выражения 2) следует, что, когда  $L$  мало, стимуляция свободных лейкоцитов растёт линейно с увеличением  $\bar{C}$ . Кроме того, существует максимальный размер популяции  $L_M$ , при котором уровень стимуляции равен нулю. Тогда  $L$  удовлетворяет уравнению

$$\frac{dL}{dt} = -\lambda_1 L + \alpha_1 \bar{C} L \left(1 - \frac{L}{L_M}\right). \quad (6)$$

Скорость роста опухолевых клеток описывается уравнением

$$\frac{dC}{dt} = \lambda_2 C_f - \alpha_2 \bar{C} L. \quad (7)$$

Первое слагаемое в (7) описывает рост опухоли, которая не подвергается воздействию лейкоцитов, а второе – учитывает взаимодействие свободных лейкоцитов с опухолевыми клетками на поверхности опухоли. Используя (4) и (5), перепишем (6) и (7) в виде:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= -\lambda_1 x + \alpha_1 x y^{2/3} \frac{(1-x/c)}{1+x}, \\ \frac{dy}{dt} &= \lambda_2 y - \alpha_2 x y^{2/3} \frac{1}{1+x}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $x = K_2 L$ ,  $c = K_2 L_M$ ,  $y = K_2 C$ ,  $\lambda_1, \lambda_2, \alpha_1, \alpha_2 > 0$  и const. Поскольку  $x$  и  $y$  – размеры популяций, они должны быть неотрицательными,  $x$  не может быть больше  $c$ , поскольку  $L \leq L_M$ .

В [9, с. 212–219] изложены результаты анализа динамики системы уравнений (8). Основной вывод состоит в том, что чаще всего имеет место неконтролируемый рост опухоли.

Как найти области устойчивости?

Предлагается модель с источниками лейкоцитов, которые с постоянной скоростью поступают в систему. В этом случае уравнения (8) переписутся следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= -\lambda_1 (x - x_0) + \alpha_1 x y^{2/3} \frac{(1-x/c)}{1+x}, \\ \frac{dy}{dt} &= \lambda_2 y - \alpha_2 y^{2/3} \frac{x}{1+x}, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\lambda_1 x_0$  ( $x_0 > 0$ ) соответствует источнику лимфоцитов. Система уравнений (9) имеет устойчивую неподвижную точку с координатами  $(0, x_0)$ , соответствующую полной ремиссии опухоли. Один из возможных фазовых портретов изображён на рис. 2, где область устойчивости для точки  $(0, x_0)$  заштрихована [9].

### 3. О математическом моделировании эпидемий СПИДа, свиного гриппа и других заболеваний [1, с. 62–64], [10, § 10]

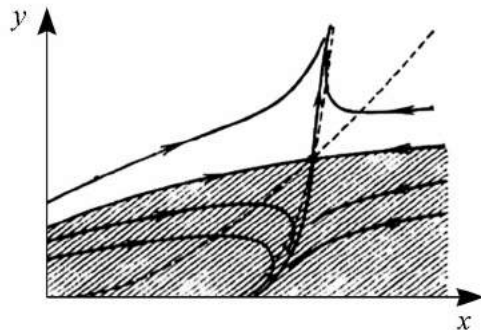


Рис. 2. Один из возможных фазовых портретов системы уравнений (9)

Вирус СПИДа или ВИЧ (вирус иммунодефицита человека) описал в 1983 году французский исследователь Люк Монтанье. Он представляет собой сферу диаметром 100 нанометров и окружён внешней белковой оболочкой. Его геном образован цепочкой РНК, поэтому вирусологи называют этот вирус ретровирусом. В мире этим вирусом заражены десятки миллионов человек. Большая часть заболевших – жители Африканского континента.



Пандемия свиного гриппа, возбудителем которого является вирус H1N1/09, началась в 2009 году. Геном этого заболевания представляет собой смесь ДНК птиц, свиней и человека, что позволяет вирусу преодолевать межвидовые барьеры. Летом и осенью 2009 года процент смертельных случаев среди заболевших был весьма высоким. Со временем, благодаря использованию противовирусных препаратов, число смертей снизилось.

Существует ряд моделей распространения эпидемий. Рассмотрим самый простой случай, когда заболевание распространяется среди группы восприимчивых индивидуумов, но удаления их из популяции за счёт гибели, выздоровления или изоляции не происходит [см., например, 10]. Такая постановка задачи может оказаться приемлемой для начальных стадий некоторых заболеваний верхних дыхательных путей, так как при таких заболеваниях может пройти много времени, прежде чем источник инфекции будет удалён из популяции. Полагаем также, что рассматриваемая группа индивидуумов достаточно многочисленна, чтобы можно было использовать математический аппарат дифференциального исчисления, но в то же самое время эта группа компактно сосредоточена в некоторой области, так что пространственными аспектами распространения эпидемии можно пренебречь.

Пусть имеется  $n$  индивидуумов, восприимчивых к данному заболеванию, а в момент времени  $t = 0$  в группу попадает один «источник инфекции». Рассмотрим равномерно перемешанную группу, состоящую из  $(n + 1)$  индивидуумов. Пусть в момент времени  $t$  в этой группе имеется  $x$  восприимчивых индивидов и  $y$  источников инфекции, то есть

$$x + y = n + 1.$$

Разумно предположить, что среднее число новых случаев заболевания, появляющихся в интервале  $dt$ , будет пропорционально как числу источников инфекции, так и числу восприимчивых индивидуумов. Если частота контактов между членами этой группы равна  $\beta$ , то среднее число новых случаев заболевания, появляющихся в интервале  $dt$ , будет равно  $\beta xydt$ , то есть

$$dx = -\beta xydt.$$

Знак минус в правой части уравнения указывает на то, что число восприимчивых индивидуумов  $x$  уменьшается за интервал времени  $dt$  на величину  $\beta xydt$ . Если ввести безразмерное время  $\tau = \beta t$ , то эволюционное уравнение примет вид

$$\frac{dx}{d\tau} = -x(n - x + 1)$$

при начальном условии

$$\tau = 0, \quad x = n.$$

При построении данной модели предполагается, что зараженный индивидуум становится заразным для остальных восприимчивых индивидуумов сразу после того, как он сам заразится, то есть что латентный период равен нулю.

Решением полученного уравнения является зависимость

$$x(\tau) = \frac{(n + 1)n}{n + e^{(n+1)\tau}}.$$

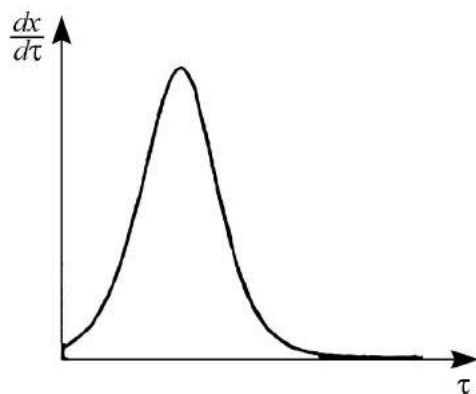


Рис. 3. Эпидемическая кривая

На практике во время эпидемии регистрируется обычно число новых случаев заболевания, появляющихся за сутки или за неделю, а не общее число заболевших. Поэтому более удобно рассматривать динамику нарастания числа новых случаев, описываемую так называемой «эпидемической кривой». Соответствующее ей уравнение имеет вид

$$\frac{dy}{d\tau} = -\frac{dx}{d\tau} = x(n-x+1) = \frac{n(n+1)^2 e^{(n+1)\tau}}{(n + e^{(n+1)\tau})^2}.$$

Это симметричная одновершинная кривая с одним максимумом. Таким образом, получено характерное свойство эпидемий: число новых случаев заболевания сначала быстро возрастает, в какой-то момент времени достигает максимума, а затем уменьшается до нуля. Такая форма эпидемической кривой является чисто математическим следствием принятого допущения о том, что среднее число новых случаев пропорционально как числу восприимчивых индивидуумов, так и числу источников инфекции (рис. 3) [11, с. 344].

Любопытно обратить внимание на то, что даже, казалось бы, такая простая модель даёт очень хорошее соответствие реальным статистическим данным (рис. 4), описывающим такой глобальный процесс, как распространение заболевания СПИД по территории США [11, с. 344].

В книге [10] описаны и другие модели эпидемий. В частности модель, в которой заражённые индивидуумы могут удаляться из коллектива. Если число восприимчивых к заболеванию индивидуумов непрерывно пополняется с заданной скоростью, то приходим к модели повторяющихся эпидемий.

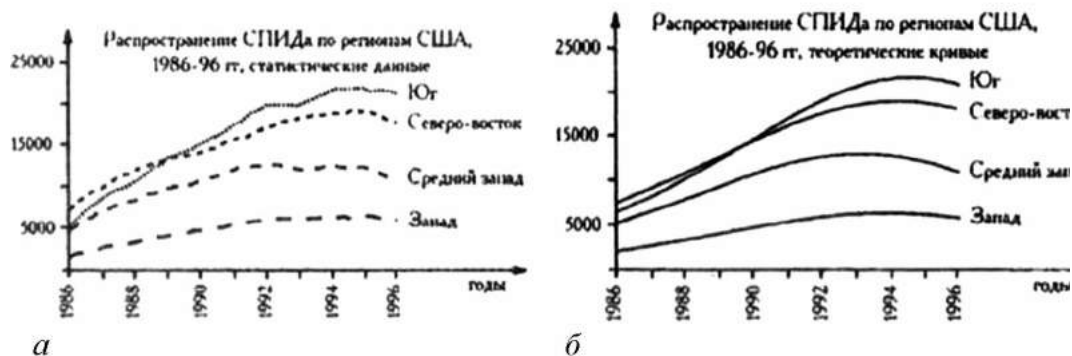


Рис. 4. Эпидемические кривые распространения эпидемии СПИДа по регионам США: *а* – реальные статистические данные (по материалам the Centers for Disease Control and Prevention. URL: <http://thebody.com/cdc/cdcpage.html>); *б* – аналитические эпидемиологические кривые  $dy/d\tau$ , построенные в соответствующих размерных единицах

Закончим часть статьи о моделях цитатой.

«В настоящее время благодаря использованию компьютерного моделирования можно оценить распространение эпидемии (например, сезонного гриппа), что позволяет органам здравоохранения формировать календарь вакцинации населения» [1, с. 64].

*Работа выполнена при государственной поддержке ведущих научных школ России, грант НШ-828.2014.2 и при поддержке гранта РФФИ № 13-02-01209.*

## Библиографический список

1. *Лаос-Бельтра Р.* Математика жизни. Численные модели в биологии и экологии // Мир математики: в 40 т., т. 28 / Пер. с исп. М.: Де Агостини, 2014. 160 с.
2. *Расhevски Н.* Некоторые медицинские аспекты математической биологии / Пер. с англ. под редакцией и с предисловием академика В.В. Парина. М.: Медицина, 1966. 243 с.
3. *Шрёдингер Э.* Что такое жизнь? Физический аспект живой клетки. Ижевск: Ижевская республиканская типография, 1999. 96 с.
4. *Хофман Д.* Эрвин Шрёдингер / Пер. с нем. М.: Мир, 1987. 96 с.
5. Наука. Величайшие теории: выпуск 5: На волне Вселенной. Шрёдингер. Квантовые парадоксы / Пер. с фр. М.: Де Агостини, 2015. 168 с.
6. *Реутов В.П., Шехтер А.Н.* Как в XX веке физики, химики и биологи отвечали на вопрос: «что есть жизнь?» // УФН. 2010. Т. 180. С. 393.
7. *Гольданский В.* Возникновение жизни с точки зрения физики // Коммунист. 1986. № 1. С. 86.
8. *Иваницкий Г.Р.* XXI век: что такое жизнь с точки зрения физики // УФН. 2010. Т. 180. С. 337.
9. *Эрроусмит Д., Плейс К.* Обыкновенные дифференциальные уравнения. Качественная теория с приложениями. М.: Мир, 1986. 243 с.
10. *Трубецков Д.И.* Введение в синергетику. Хаос и структуры. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2014. 240 с.
11. Моделирование нелинейной динамики глобальных процессов / Под ред. И.В. Ильина, Д.И. Трубецкова. М.: Изд-во Московского университета, 2010. 412 с.

## References

1. Mir matematiki: v 40 t., t. 28, *Rafael Laos-Bel'tra.* Matematika zhizni. Chislennie modeli v biologii i ekologii / per. s isp. M.: DeAgostini, 2014. 160 s. (In Russian).
2. *Rashevsky N.* Some Medical Aspects of Mathematical Biology. Springfield, IL: Charles C. Thomas, 1964.
3. *Schrödinger E.* What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell. Cambridge: University Press, 1944.
4. *Hoffman D.* Erwin Schrödinger. Leipzig, 1984.
5. Nauka. Velichaishe teorii: vipusk 5: Na volne Vselennoi. Shrodinger. Kvantovie paradoksi / per. s fr. M.: DeAgostini, 2015. 168 s. (In Russian).

6. Reutov V.P., Schechter A.N. // Physics–Uspekhi. 2010. Vol. 53, № 4. P. 377.
7. Goldanskii V. // Kommunist. 1986. № 1. S. 86. (In Russian)
8. Ivanitskii G.R. // Physics–Uspekhi. 2010. Vol. 53, № 4. P. 327.
9. Arrowsmith D.K., Place C.M. Ordinary Differential Equations: A Qualitative Approach with Applications. Chapman and Hall, 1982.
10. Trubetskoy D.I. Vvedenie v Cinergeticu. Haos i Ctruktury. M.: Knizhyi Dom «LIBROKOM», 2014. 240 s. (In Russian)
11. Modelirovanie nelineinoi dinamiki globalnih processov / Red. I.V. Il'in, D.I. Trubetskoy. M.: Izdatelstvo Moskovskogo universiteta, 2010. 412 s. (In Russian).

*Поступила в редакцию 12.05.2015*

## MATHEMATICAL MODELLING OF BIOLOGICAL SYSTEMS

### Some historical aspects and particular problems

*D. I. Trubetskoy*

Saratov State University

National Research Nuclear University MEPhI

The characters of the article are Nicolas Rashevsky, Karl Ludwig von Bertalanffy and Erwin Schrödinger. The events connected to their scientific research in the sphere of Mathematical Biology take place up to the end of the World War II. The biggest part of the article focuses attention on Erwin Schrödinger's book «What Is Life? The Physical Aspect of the Living Cell». This book is known by many, but not many people read it. The article describes briefly the further way of Mathematical Biology development, connected to the invention of computers. Also the simplest models of cancer and epidemics are discussed in the article.

*Keywords:* Mathematical modeling, Mathematical Biology, history, Rashevsky, Ludwig von Bertalanffy, Schrödinger, epidemic, cancer.



*Трубецков Дмитрий Иванович* – родился в Саратове (1938). Окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1960). Защитил диссертации на соискание ученой степени кандидата (1965) и доктора физико-математических наук в СГУ (1978) в области радиофизики. Заведующий кафедрой электроники, колебаний и волн факультета нелинейных процессов СГУ, профессор кафедры прикладной математики НИЯУ МИФИ, член-корреспондент Российской академии наук, заслуженный деятель науки РФ, лауреат премии Президента РФ в области образования. Научный руководитель Лицея прикладных наук и факультета нелинейных процессов СГУ. Область научных интересов: вакуумная электроника и микроэлектроника сверхвысоких частот, теория колебаний и волн, нелинейная динамика, история науки. Автор более двадцати учебных пособий и монографий, а также более двухсот статей в периодической печати.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83  
 Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского  
 115409 Москва, Каширское шоссе, 31  
 Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
 E-mail: dtrubetskoy@yahoo.com



## МОДЕЛИРОВАНИЕ АНСАМБЛЕЙ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ С НЕПРЕРЫВНЫМ ВРЕМЕНЕМ В АКТИВНЫХ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ

*А. С. Дмитриев<sup>1,2</sup>, М. Е. Герасимов<sup>1</sup>, Р. Ю. Емельянов<sup>1,2</sup>, В. В. Ицков<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)

В работе рассматривается новая многоэлементная процессорная платформа для моделирования поведения взаимодействующих динамических систем – активная беспроводная сверхширокополосная сеть. Каждой динамической системе в процессе моделирования ставится в соответствие узел активной сети. Взаимодействие между динамическими системами производится через передачу информации о состоянии системы по радиоканалам между узлами активной сети. Возможности платформы демонстрируются на примере ансамбля осцилляторов Курамото. Описывается методика моделирования, экспериментальные результаты и их анализ.

*Ключевые слова:* Нелинейные динамические системы, беспроводные сети, сверхширокополосные сигналы, связь с использованием динамического хаоса.

### Введение

Беспроводные сенсорные сети (БСС) представляют собой совокупность узлов с датчиками, объединенными в ансамбль путем взаимодействия по радиоканалам [1]. Популярность БСС и объем их использования стремительно растут в последние годы. Так, в 2010 году в мире было произведено около 50 миллионов микросхем приемопередатчиков для БСС, а в 2012 году – уже более 100 миллионов. В основном, БСС используются пока как средства для сбора, доставки и обработки данных от пространственно распределенных датчиков, таких, например, как датчики потребления электроэнергии. Вместе с тем появляется все большее число примеров беспроводных сетей, узлы которых кроме приемопередатчика и датчика включают в себя актуаторы – устройства, воздействующие на окружающую среду, в том числе устройства отображения информации (например, светодиоды или экраны), и устройства обработки информации (микроконтроллеры, процессоры). Ниже будем называть такие обобщенные беспроводные сенсорные сети активными беспроводными сетями (АБС).

Особый интерес представляют сверхширокополосные АБС с приёмопередатчиками на хаотических радиоимпульсах [2–4], в которых скорость передачи между узлами в 10...25 раз превосходит скорость передачи между приемопередающими узлами, реализованными на узкополосных приемопередатчиках типа ZigBee.

Широкий набор оборудования в узлах, вместе с коммуникационными возможностями, позволяет рассматривать сверхширокополосные АБС не только как средство сбора данных с некоторой территории и передачи их пункту анализа, но и как мощную технологическую платформу для решения более широких классов задач, относящихся к многоэлементным взаимодействующим системам, в том числе коллективного поведения роботов, сложной динамики ансамблей нелинейных систем, обработки территориально распределенной информации. Однако для практической реализации широких возможностей АБС необходимо создание и экспериментальная апробация как аппаратных, так и программных средств АБС, в частности узлов, локально обрабатывающих информацию в условиях обмена ею по радиоканалам. При этом не во всех случаях необходимо одновременное использование сенсоров, актуаторов и устройств локальной обработки информации. Например, при экспериментальной реализации взаимодействующих нелинейных динамических систем будут использоваться только коммуникационные и вычислительные возможности узлов сети. Вместе с тем, такие эксперименты позволяют визуально определить, насколько радиоканалы могут обеспечить требуемое качество связи, в том числе при изменении расстояний между узлами и наличии внешних возмущений. В работе эти вопросы исследуются в экспериментах с ансамблем систем Курамото [6–8].

Структура статьи следующая.

Первый раздел посвящен постановке задачи и схеме моделирования. Во втором разделе описываются сверхширокополосный активный узел и актуатор. В третьем разделе рассматривается модель Курамото. Четвертый раздел посвящен численному исследованию динамики ансамбля Курамото из шести осцилляторов. Здесь математическое моделирование используется как «эталонная» система, позволяющая сопоставить полученные в последующих экспериментах результаты с известными из литературы данными. В пятом разделе рассматривается экспериментальная эмуляция ансамбля в активной сверхширокополосной беспроводной сети. В шестом разделе описываются эксперименты с активной сетью и их результаты. В разделе семь анализируются предельные возможности по моделированию ансамблей динамических систем в активных сетях.

## **1. Постановка задачи и схема моделирования**

Пусть имеется ансамбль взаимодействующих динамических систем, каждая из которых описывается одним или несколькими нелинейными дифференциальными уравнениями. Требуется реализовать ансамбль в АБС и использовать эту реализацию для наблюдения и исследования динамики ансамбля.

Первым шагом реализации ансамбля в АБС является представление взаимодействующих динамических систем в беспроводной активной сети (рис. 1).

Представление включает в себя:

- постановку каждому элементу ансамбля динамических систем в соответствие узла АБС;

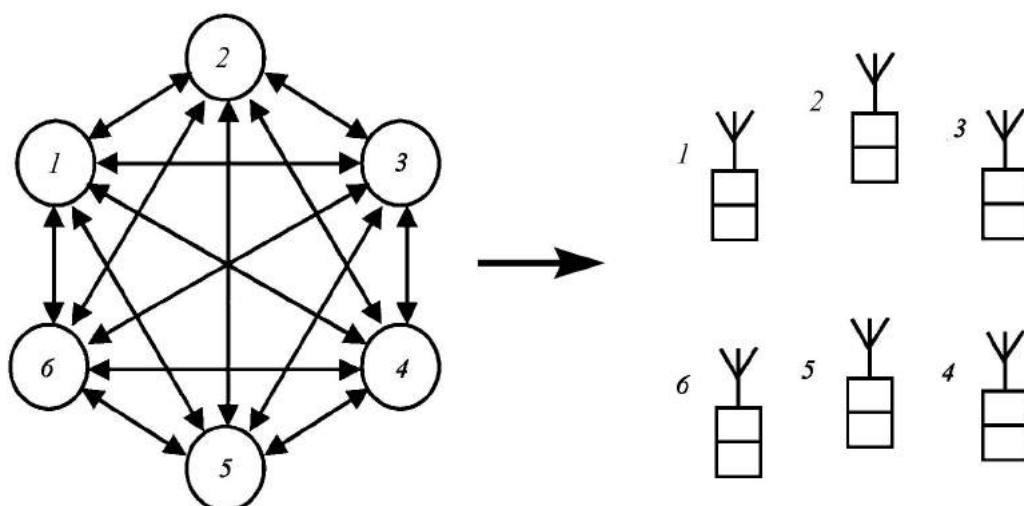


Рис. 1. Схема отображения ансамбля динамических систем на АБС. Динамические системы моделируются на узлах, связи реализуются посредством радиоканалов

- программирование уравнений элемента ансамбля в процессоре узла АБС;
- определение и установление связей между узлами активной сети согласно связям между элементами ансамбля;
- реализацию связей через радиоканалы.

Программирование уравнений ансамбля в процессорном элементе, вместе с его взаимодействием, осуществляется в три этапа:

- написание программы на языке высокого уровня и ее отладка;
- компиляция программы в машинный код;
- «загрузка» программы в микроконтроллер.

Принципиальным моментом при моделировании взаимодействующих динамических систем в АБС является способность сети реализовать связи между любыми узлами с помощью радиоканалов. Это означает, что в принципе радиоканалы обеспечивают моделирование ансамблей с произвольной топологией связей.

Чтобы убедиться в этом, будем считать, что каждый из узлов активной сети находится в области прямой радиовидимости со всеми остальными узлами. Для передачи данных от узла  $i$  к другим узлам в этом случае используется передача широковещательного пакета с информацией о том, от кого этот пакет исходит. Все узлы принимают этот пакет и те из них, которые по модели связаны с элементом ансамбля, представленном в узле  $i$ , используют содержащуюся в пакете информацию для формирования своего состояния на следующем шаге. Те же узлы, которые по модели не связаны с излучающим узлом, не реагируют на данные, содержащиеся в полученном пакете.

При моделировании:

- узлы располагаются так, чтобы каждый узел находился в области видимости любого другого узла сети, то есть имел возможность как получать данные от узлов, с которыми он должен быть связан, так и передавать им свои данные;
- в каждом узле процессор интегрирует уравнения, описывающие поведение соответствующего элемента ансамбля;

- все узлы работают независимо во времени, циклически совершая каждый шаг интегрирования через интервал времени  $T$ ;
- в начале интервала каждый элемент переходит в режим прослушивания эфира, а в конце интервала передает в эфир сообщение о состоянии своих переменных;
- в результате за «свой» интервал времени  $T$  каждый из узлов сети передает информацию о своем состоянии всем узлам, с которыми он поддерживает связь, и получает информацию о состоянии этих узлов;
- состояние переменной узла отображается визуально цветом свечения светодиода.

## 2. Сверхширокополосный активный узел и актуатор

Активный узел сети представляет собой устройство, включающее беспроводной приемопередатчик и специальную плату – актуатор, связанные специальным интерфейсом (рис. 2). В качестве приемопередатчика в работе использовался сверхширокополосный прямохаотический приемопередатчик ППС 43 [4].

Актуатор был реализован на основе микроконтроллера STM32L, используемого в качестве вычислительного устройства, на котором программируется уравнение элемента ансамбля, и цветного светодиода в качестве элемента визуального отображения состояния одной из переменных элемента ансамбля.

Микроконтроллер STM32L имеет RISC архитектуру, его тактовая частота может меняться от 1 до 32 МГц. Таким образом, это достаточно мощный процессор. При этом микроконтроллер STM32 – чрезвычайно компактное и мало потребляющее устройство.

Важным свойством микроконтроллера является возможность эмуляции на нем операций с плавающей запятой, что позволяет использовать его как полноценное

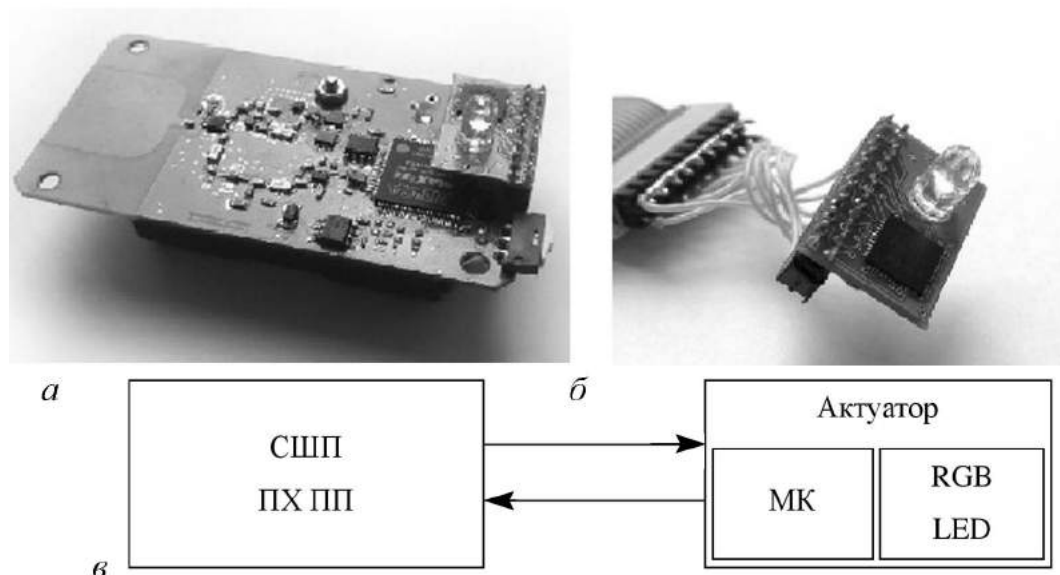


Рис. 2. Активный беспроводной узел и его структура: *а* – сверхширокополосный прямохаотический приемопередатчик (СШП ПХ ПП) с актуатором; *б* – актуатор; *в* – структура узла



устройство для моделирования динамических систем. Программирование уравнений элемента ансамбля осуществляется на языке C, с последующей компиляцией в код микроконтроллера.

Цветной светодиод реализует полную RGB палитру с 256 цветами по каждому цветовому каналу. Совместное использование нескольких светодиодов в сети дает визуальную динамическую картину степени согласованности их коллективного поведения. Например, цветовая картина четко фиксирует такие явления как синхронизация элементов ансамбля и их кластеризация. Фактически цветное светодиодное отображение состояния переменной представляет собой аппаратную реализацию широко используемого при исследовании динамических систем приема отображения их состояния через цвет.

### 3. Модель Курамото

Модель Курамото представляет собой систему  $N$  связанных фазовых осцилляторов с исходными частотами  $\omega_i$ , распределенными в соответствии с заданной плотностью вероятности  $g(\omega)$ , и динамикой, описываемой уравнениями

$$\dot{\theta}_i = \omega_i + \sum_{j=1}^N K_{ij} \sin(\theta_j - \theta_i), \quad i = 1, \dots, N. \quad (1)$$

Таким образом, каждый осциллятор сам по себе пытается действовать независимо на своей собственной частоте, в то время как связи стремятся синхронизировать его со всеми другими. Когда связи достаточно слабые, осцилляторы колеблются некогерентно, тогда как при превышении определенного порога спонтанно возникает коллективная синхронизация.

Первоначально [6, 7] анализ синхронизации модели Курамото был выполнен для случая связей типа среднего поля, то есть в предположении, что в уравнениях (1)  $K_{ij} = K/N > 0$ . Уравнения модели были переписаны в более удобной форме, с введением параметра порядка

$$r e^{i\psi} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N e^{i\theta_j}, \quad (2)$$

где  $r(t)$  с  $0 \leq r(t) \leq 1$  является мерой когерентности популяции осцилляторов и  $\psi(t)$  – усредненная фаза. С учетом этого определения уравнения (1) принимают вид

$$\dot{\theta}_i = \omega_i + Kr \sin(\psi - \theta_i), \quad i = 1, \dots, N, \quad (3)$$

и ясно, что каждый осциллятор связан с общей усредненной фазой  $\psi(t)$  силой связи  $Kr$ .

В форме среднего поля (3) характер модели становится очевидным. Каждый осциллятор оказывается не связанным со всеми остальными, хотя, конечно, они взаимодействуют, но только через среднее поле, определяемое  $r$  и  $\psi$ . В частности, фаза подтягивается в направлении средней фазы, а не к фазе какого-либо отдельного осциллятора. Более того, эффективная сила взаимодействия пропорциональна когерентности  $r$ . Эта пропорциональность устанавливает положительную обратную

связь между силой взаимодействия и когерентностью: по мере того как популяция становится более когерентной,  $r$  растет и, таким образом, эффективность связи  $Kr$  возрастает, что, как правило, вовлекает еще больше осцилляторов в синхронизированный кластер. Если согласованность дополнительно увеличивается за счет вовлечения новых элементов, процесс будет продолжаться; в противном случае он становится самоограничивающимся. Этот механизм, лежащий в основе спонтанной синхронизации, был открыт Уинфри [5], но проявляется особенно ярко в модели Курамото.

Хотя первоначально модель Курамото была введена и исследовалась в случае большого числа фазовых осцилляторов, со временем она оказалась интересной и для случая малого числа элементов.

Прежде всего, здесь идет речь об обнаружении и исследовании динамического хаоса в ансамблях фазовых осцилляторов [14, 15], а также об исследовании состояний типа химера [16].

Так, в работах [14, 15] показано, что с ростом параметра связи  $K$  хаотическое поведение в модели Курамото возникает уже при числе элементов  $N = 4$ . Его возникновению предшествует квазипериодическое поведение. При увеличении  $N$  может возникать гиперхаос: уже при  $N = 6$  и  $7$  существуют режимы с двумя положительными ляпуновскими показателями. Авторы исследовали также ансамбли осцилляторов Курамото с большим числом элементов и обнаружили, что количество положительных ляпуновских показателей может достигать половины числа осцилляторов в сети. При этом наиболее сильный фазовый хаос имеет место для ансамблей средних размеров.

Таким образом, модель Курамото демонстрирует различные нетривиальные динамические явления, как при малом, так и при значительном числе элементов. Она является хорошей качественной моделью для широкого круга явлений, таких как синхронизация пульсаций светлячков в стае [9], эффекта Джозефсона [10] и связанных химических реакций [11], физиологии популяций нейронов [12]. Также можно отметить применение данной модели при объяснении колебаний «Моста тысячелетия» в Лондоне во время церемонии открытия [13].

С точки зрения моделирования на АБС дополнительным аргументом в ее пользу является то обстоятельство, что каждый элемент модели описывается только одним дифференциальным уравнением первого порядка.

#### 4. Динамика ансамбля с шестью осцилляторами

В рамках подготовки к экспериментам по реализации ансамбля Курамото на активной сети было проведено компьютерное моделирование и анализ динамики ансамбля с шестью элементами. Число элементов при моделировании соответствовало числу узлов в последующих экспериментах. Ансамбль моделировался согласно системе уравнений

$$\dot{\theta}_i = \omega_i + \frac{K}{6} \sum_{j=1}^N \sin(\theta_j - \theta_i), \quad i = 1, \dots, 6. \quad (4)$$

В процессе моделирования анализировалась динамика ансамбля в зависимости от

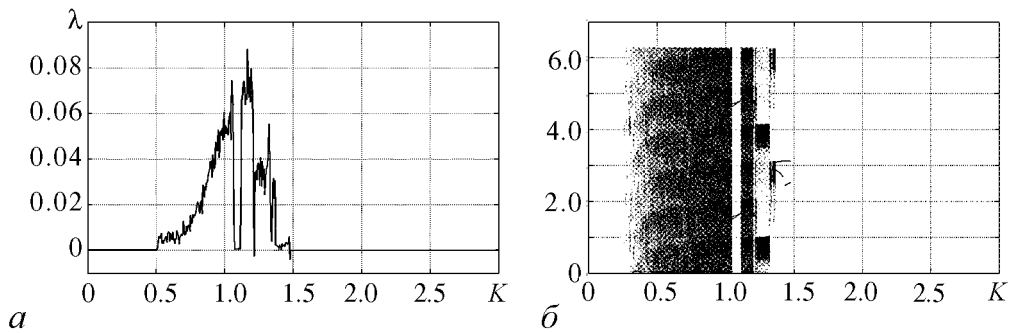


Рис. 3. Старший показатель Ляпунова (а) и диаграмма колебательных режимов (б) для числа элементов  $N = 6$ ,  $\omega_i = -1 + (2/5)(i - 1)$ ,  $i = 1, \dots, 6$

силы связи  $K$  при фиксированных значениях собственных частот:

$$\omega_i = -1 + \frac{2}{5}(i - 1), \quad i = 1, \dots, 6, \quad (5)$$

где  $i$  – номер осциллятора. В процессе моделирования были построены диаграмма колебательных режимов и зависимость старшего показателя Ляпунова от силы связи в ансамбле (рис. 3).

В поведении ансамбля можно выделить три типа динамических режимов: квазипериодические колебания при малой силе связи, динамический хаос и синхронизацию. Кроме того, при отсутствии связей, реализуется режим независимых колебаний в осцилляторах.

В случае симметричного распределения собственных частот (5), синхронный режим вырождался в состояние равновесия с нулевой частотой колебаний. По результатам моделирования были выбраны следующие значения параметра  $K$  для экспериментального исследования динамики ансамбля в активной сети:  $K = 0$  для режима независимых колебаний;  $K = 1.3$  для динамического хаоса и  $K = 3$  для синхронного режима.

## 5. Моделирование сенсорной сети

Процесс эмуляции коллективного поведения ансамбля фазовых осцилляторов модели Курамото в АБС включает в себя следующие этапы:

- запуск сети;
- переходный процесс;
- стационарный динамический режим.

Особенностью работы рассматриваемой сети является ее автономность, в ней отсутствует центр управления сетью (сток).

**Запуск сети.** Пусть имеется  $n$  узлов. Они последовательно включаются в моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_n$ . С момента включения каждый узел в течение времени  $T_1$  прослушивает эфир, затем производит интегрирование уравнения фазового осциллятора методом Эйлера в течение времени  $T_2$ , и за время  $T_3$  передает информацию о себе, включающую значение переменной и номер узла, после чего цикл повторяется. Продолжительность цикла  $T = T_1 + T_2 + T_3$ .

Предполагается, что все узлы находятся в пределах прямой видимости друг друга;  $T_2, T_3 \ll T$ , что вместе со случайными значениями моментов времени  $t_1, t_2, \dots, t_n$  позволяет пренебречь коллизиями между пакетами.

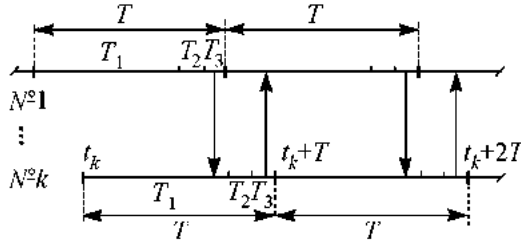


Рис. 4. Схема обмена данными между двумя узлами АБС

Через какое время при этих условиях все узлы гарантированно получают информацию о наличии всех узлов в сети? Пусть последним был включен узел с номером  $k$  и произошло это в момент времени  $t_k$ . В общем случае для всех  $(n - 1)$  остальных узлов начальные моменты времени циклов длительности  $T$  лежат слева от точки  $t_k$ . Циклы всех этих узлов заканчиваются на интервале времени  $(t_k, t_k + T)$ . Поскольку  $T_2 + T_3 \ll T$ ,  $k$ -й узел с большой вероятностью получит информацию обо всех узлах до того момента как передаст информацию о себе. Если он ее все же не получит на этом интервале, то он ее обязательно получит на интервале времени  $(t_k + T, t_k + 2T)$ . Если какой-то из узлов до включения последнего узла не получил первый раз информацию от какого-то из остальных  $(n - 2)$  узлов, то он ее обязательно получит на интервале времени  $(t_k, t_k + T)$  (рис. 4).

Таким образом, через время  $2T$  после включения последнего узла каждый узел сети получит информацию о состоянии всех узлов в сети и эта информация будет обновляться на каждом следующем его интервале времени  $T$ .

**Переходный процесс.** Функционирование сети начинается с переходного процесса. Каждый узел АБС состоит из беспроводного приемопередатчика и актуатора, описанного выше. Динамическая система на  $i$ -м узле задается уравнением (4). На вычислительном устройстве  $i$ -го узла уравнение (4) начинает интегрироваться со значениями параметров, соответствующими исследуемому режиму, но с разными начальными условиями для каждого узла и в разные моменты времени. Поэтому в сети в начале функционирования будет наблюдаться переходный процесс от случайно заданных начальных условий к стационарному состоянию. Значение  $\theta_i$  – переменной фазового осциллятора, изменяющееся в интервале  $(0, 2\pi)$ , отображается цветом RGB светодиода актуатора в  $i$ -м узле. Узлы на каждом своем интервале времени  $T$  связываются друг с другом по радиоканалу и обмениваются информацией о своих состояниях. Полученные в процессе обмена значения переменных используются при интегрировании с весами  $K/N$ .

**Стационарный динамический режим.** После некоторого количества шагов интегрирования система приходит в стационарный динамический режим. Тип этого режима зависит от числа элементов в ансамбле и значения весового коэффициента.

## 6. Эксперимент

В экспериментах использовалась сеть, состоящая из 6 узлов (рис. 5). Устройства располагались на столе в пределах прямой радиовидимости друг с другом и последовательно включались оператором с интервалом в несколько секунд.

Параметры динамических систем для каждого узла АБС задавались при компиляции программы, написанной для микроконтроллера актуатора. Программа обеспечивает расчет динамической системы фазового осциллятора путём периодического интегрирования уравнения осциллятора с учетом имеющихся данных о фазах других осцилляторов в ансамбле, управление приемопередатчиком – переключение приемопередатчика из режима приёма в режим передачи и обратно, и управление цветом светодиода в соответствии с фазой осциллятора.

В первой группе из трех экспериментов собственные круговые частоты осцилляторов задавались теми же, что и при компьютерном моделировании:  $-1.0$ ;  $-0.6$ ;  $-0.2$ ;  $0.2$ ;  $0.4$ ;  $0.6$ ;  $1.0$ . Начальная фаза каждого из осцилляторов выбиралась при помощи генератора случайных чисел.

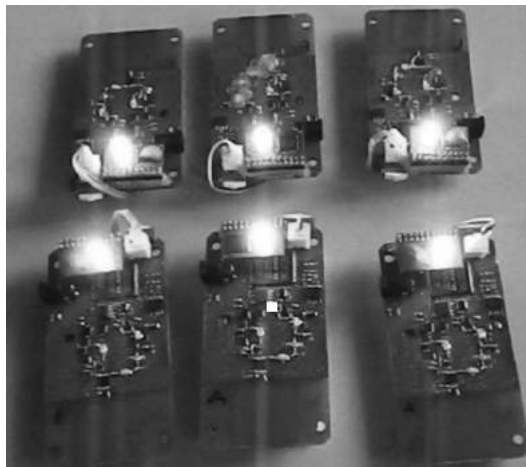


Рис. 5. Эмуляция ансамбля Курамото на АБС

Если к моменту, когда программа начинала процесс интегрирования, была получена информация о фазах  $M$  других динамических систем, то в уравнении модели Курамото эти фазы учитывались, размер ансамбля выбирался как  $N = M + 1$ . В частности, когда информации от других узлов не было совсем, слагаемое с суммой в уравнении (4), соответствующее связи между узлами, полагалось равным нулю.

Для удобства визуального наблюдения динамики ансамбля значение временного цикла интегрирования  $T$  было выбрано равным 100 мс. При этом характерные времена существенного изменения значения переменных составляли единицы секунд.

Информацией о фазах динамических систем узлы обменивались с помощью пакетов с длиной  $L = 16$  байт. Первые 4 байта в пакете соответствовали уникальному номеру узла АБС, следующие 8 байт занимало передаваемое значение фазы осциллятора узла – источника пакета, последние 4 байта – контрольная сумма, обеспечивающая контроль целостности пакета. Наличие уникального номера позволяло различать узлы между собой.

При проведении экспериментов возникла проблема отображения и интерпретации получаемых результатов.

Во-первых, как отобразить цветную динамическую картину цветов в черно-белом формате статьи? И, во-вторых, некоторые режимы, например, режим независимых колебаний при отсутствии обмена информацией между узлами и хаотический режим работы сети трудноразличимы даже при непосредственном наблюдении за динамикой.

Чтобы решить проблему, был использован дополнительный приемник, подключенный через USB интерфейс к компьютеру. На этот приемник, так же, как и на каждый из приемников в узлах активной сети, постоянно поступают данные о

состоянии динамических переменных всех фазовых осцилляторов. Эти данные пересылаются в компьютер и используются для построения графиков изменения частот осцилляторов (производных их фаз) во времени (рис. 6).

В первой группе экспериментов менялось значение силы связи  $K$ .

В первом эксперименте  $K = 0$ . В этом случае узлы постоянно обменивались значениями фаз в течение эксперимента, однако член с суммой в уравнении (4), отвечающий за связь между динамическими системами, был равен нулю. Все динамические системы на узлах эволюционировали независимо, с разными собственными частотами, стартовав в различные моменты времени. При проведении эксперимента наблюдалась строго периодическая плавная смена цветов светодиодов на актуаторах узлов АБС, корреляция между цветами отсутствовала, и частоты колебаний после включения оставались постоянными (рис. 6, а).

Следующий эксперимент был проведен для системы с силой связи  $K = 1.3$ , что соответствует динамическому хаосу при расчетах в модели Курамото. Показатель Ляпунова при этом положителен и равен приблизительно 0.03. Для данной силы связи, по сравнению с предыдущим экспериментом, визуально поведение ансамбля поменялось, смена цветов светодиодов утратила периодичность и стала нерегулярной, видимой корреляции между цветами светодиодов в разных узлах не было. На графике зависимости мгновенной частоты от времени (рис. 6, б) видно, что частоты колебаний осцилляторов при этом меняются нерегулярно.

Третий эксперимент проводился при силе связи  $K = 3$ . В этом эксперименте

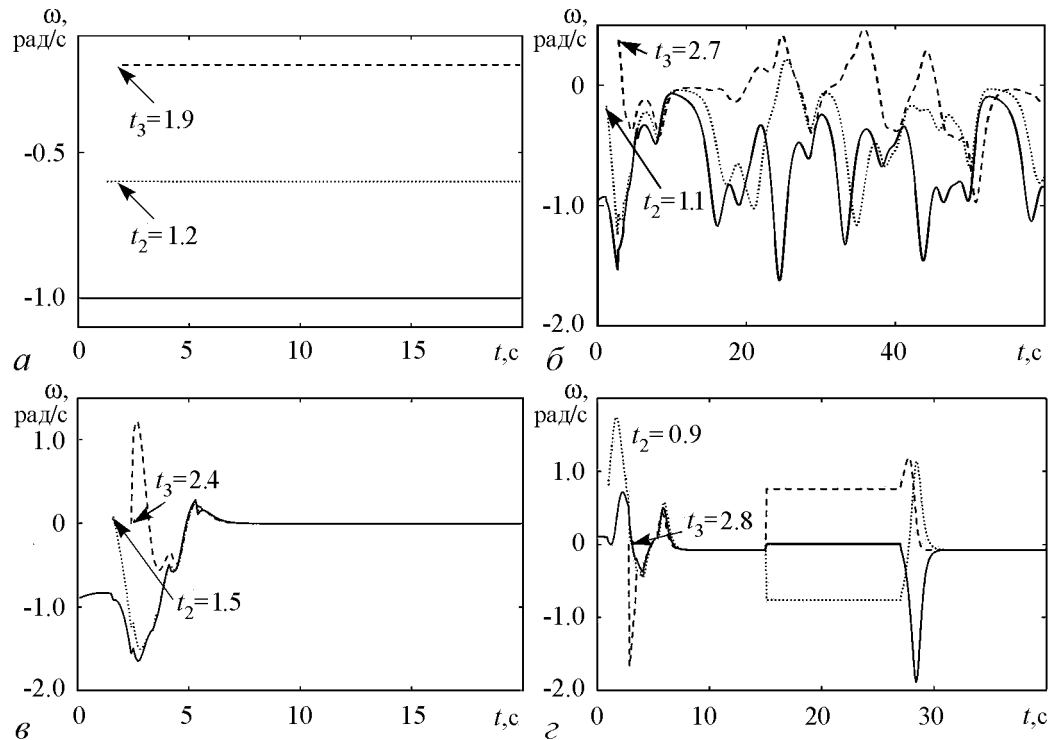


Рис. 6. Зависимость мгновенных круговых частот первых трех осцилляторов от времени (сплошная линия – 1-й осциллятор, пунктирная – 2-й осциллятор, штриховая – 3-й осциллятор): а – режим независимых осцилляций,  $K = 0$ ; б – динамический хаос,  $K = 1.3$ ; в – синхронизация,  $K = 3$ ; г – разрушение режима синхронизации внешним помеховым сигналом;  $t_i$  – момент включения  $i$ -го узла

устройства начали работу после включения со случайными цветами, но затем наблюдалась сходимость процесса к равновесному состоянию, при котором все светодиоды постоянно горели одним цветом. Равновесная частота была равна нулю (рис. 6, в).

В четвертом эксперименте собственные частоты осцилляторов выбирались случайно в интервале  $(-1, 1)$ , а не равномерно распределенными, как в предыдущих экспериментах. В этом случае при силе связи  $K = 3$ , наблюдалось схождение к режиму синхронизации, при котором результирующая частота в отличие от третьего эксперимента была не нулевой. Визуально процесс выглядел как когерентная периодическая смена осцилляторами цвета. Частота когерентных колебаний менялась при каждом новом включении.

Для последнего эксперимента использовалась АБС с теми же параметрами, что и в четвертом эксперименте. Динамика частот в осцилляторах в эксперименте показана на рис. 6, з. После включения осцилляторов и синхронизации ансамбля (примерно седьмая секунда на графике рис. 6, з) к устройствам на 15-й секунде был поднесен передатчик с непрерывным излучением хаотического сигнала в диапазоне частот, на котором работают приёмопередатчики АБС. Наличие такой помехи привело к нарушению работы приемников в узлах, разрушению связей в АБС и прекращению обмена данными о фазах осцилляторов в рамках ансамбля. Как следствие, цвета светодиодов перестали совпадать и начали эволюционировать независимо – произошла десинхронизация ансамбля. На рис. 6, з этому состоянию соответствует участок от 15-й секунды до момента, когда передатчик хаотического сигнала был отключен (28-я секунда). На этом временном участке каждый осциллятор колеблется независимо от других с фиксированной случайной частотой, заданной в начале эксперимента. После отключения на 28-й секунде передатчика, излучающего помеховый сигнал, синхронизация в ансамбле быстро восстановилась.

## 7. Предельные возможности АБС

В проведенных экспериментальных исследованиях сверхширокополосная АБС включала в себя шесть узлов. А какое максимальное число узлов  $N$  может включать беспроводная сеть в экспериментах такого типа?

Это число определяется следующими факторами: скоростью передачи данных по радиоканалу между приёмопередатчиками, скоростью передачи данных по коммуникационному интерфейсу «приёмопередатчик – актуатор» (см. рис. 2), допустимой вероятностью коллизий пакетов в каналах связи и скоростью моделирования динамической системы.

Проанализируем степень влияния данных ограничений.

**Скорость передачи данных по радиоканалу.** Чтобы узлы АБС за время цикла  $T$  обменялись данными, каждому узлу необходимо один раз отправить пакет данных со своим состоянием и принять  $N - 1$  пакетов от своих соседей при длине пакета  $L$ . Суммарное количество принимаемой и передаваемой информации  $I$ , которое может обеспечить канал с пропускной способностью  $C$  за время  $T$ :

$$I = CT.$$

В предельном случае максимально возможного числа устройств в сети оно должно

равняться информации, содержащейся в  $N$  пакетах, то есть

$$I = NL = CT. \quad (6)$$

Откуда следует, что максимальное число узлов в сети при учете только пропускной способности канала связи равно

$$N = \frac{CT}{L}. \quad (7)$$

Приёмопередатчики ППС 43 имеют скорость передачи данных, равную 6 Мбит/с. Поэтому, согласно формуле (7), для длины пакета  $L = 128$  бит (16 байт) и используемого периода цикла  $T = 100$  мс максимальное число узлов в АБС превышает 4000. Оно достигается при синхронной работе сети, когда каждому узлу на интервале  $T$  предоставлено свое окно для передачи. Во время этого окна излучает только один узел, остальные слушают.

**Скорость передачи данных по интерфейсу между приёмопередатчиком и актуатором.** Все полученные и отправленные приёмопередатчиком пакеты транслируются через интерфейс актуатор – приёмопередатчик. Следовательно, формулу (7) можно использовать и для оценки максимально достижимого количества устройств в АБС, определяемого скоростью коммуникационного интерфейса. В узлах платформы интерфейс реализован в виде UART со скоростью передачи данных  $C = 46080$  бит/с. По формуле (7) оцениваем максимальное число узлов в составе АБС: из-за низкой скорости интерфейса оно ограничивается примерно 35 устройствами. Длина передаваемого пакета может быть уменьшена до 8 байт, при этом максимально возможное число узлов в сети, определяемое скоростью интерфейса UART, увеличивается до 70.

**Допустимая вероятность коллизий пакетов в каналах связи.** При количестве устройств в сети до 70 возможно использование несинхронной работы сети, что и делалось в проведенных экспериментах. Расчеты показывают, что в этом случае вероятность коллизий пакетов  $P < 2 \cdot 10^{-2}$ . При потере пакета в результате коллизии или других факторов, в связи с малым изменением фазы осциллятора за один шаг интегрирования, в уравнении (4) можно использовать значения фазы из предыдущего шага интегрирования, практически не ухудшая при этом точность расчета динамики системы.

**Скорость вычислений при моделировании динамических систем на микроконтроллере.** Время расчета одной итерации интегрирования модели Курамото для ансамбля из шести узлов составляет 3...4 мкс. Объем вычислений при интегрировании уравнения (4) в каждом актуаторе растет линейно с увеличением числа узлов в сети. Исходя из того, что при шести узлах время интегрирования не превышает 3...4 мкс, добавление каждого нового узла даст прирост времени интегрирования в узле не более 1 мкс. Далее, предполагая, что время вычисления не превышает 10% от длительности периода цикла  $T = 100$  мс, получаем оценку по ограничению числа узлов при учете только этого фактора примерно в 10000 узлов.

Таким образом, главным ограничением в используемой аппаратной платформе, влияющим на число узлов в АБС, является скорость передачи данных по интерфейсу приёмопередатчик – актуатор. Поэтому максимальное число узлов в сети может быть увеличено в 30...50 раз и достигать 3000 за счет замены интерфейса UART



на высокоскоростной интерфейс SPI с использованием синхронного режима работы сети.

### Заключение

В работе рассмотрена возможность использования АБС как среды для экспериментального исследования динамики многоэлементных систем с непрерывным временем.

Создан и экспериментально реализован актуатор, обладающий возможностью интегрировать уравнение системы и отображать её состояние в виде изменения цвета светодиода.

Разработаны программы, обеспечивающие работу актуатора в составе беспроводного активного узла и функционирование АБС как многоэлементной динамической системы с непрерывным временем.

В качестве конкретной многоэлементной динамической системы выбран ансамбль связанных осцилляторов Курамото. На примере этой системы с шестью элементами экспериментально показано, что динамика активной сети может полностью соответствовать динамике исходной математической модели.

Проведены эксперименты по воздействию на активную сеть внешнего к ней сверхширокополосного хаотического радиосигнала, в результате чего происходило разрушение связей между узлами и качественное изменение поведения многоэлементной системы в целом.

Полученные результаты показали, что АБС могут эффективно использоваться для экспериментальной эмуляции многоэлементных динамических систем с непрерывным временем.

Авторы выражают благодарность за советы и помощь в работе М.Г. Попову и В.А. Лазареву.

*Данная работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП ИР 2014–2020 Минобрнауки, Соглашение № 14.584.21.0010, Идентификатор RFMEFI58414X0010.*

### Библиографический список

1. [http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless\\_sensor\\_network](http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_sensor_network)
2. Дмитриев А.С., Кяргинский Б.Е., Максимов Н.А., Панас А.И., Старков С.О. Перспективы создания прямохаотических систем связи в радио и СВЧ диапазонах // Радиотехника. 2000. № 3. С. 9.
3. Дмитриев А.С., Кяргинский Б.Е., Панас А.И., Старков С.О. Прямохаотические схемы передачи информации в сверхвысокочастотном диапазоне // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46, № 2. С. 224.
4. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Лазарев В.А., Герасимов М.Ю. Сверхширокополосная беспроводная самоорганизующаяся прямохаотическая сенсорная сеть // Успехи современной радиоэлектроники. 2013. Т. 3. С. 19.
5. Winfree A. The geometry of biological time. New York: Springer, 1980.
6. Kuramoto Y. Chemical oscillations, waves and turbulence. Berlin: Springer-Verlag, 1984.

7. Kuramoto Y. Self-entrainment of a population of coupled non-linear oscillators // International Symposium on Mathematical Problems in Theoretical Physics / Ed. H. Araki. 1975. Vol. 39. P. 420. Berlin, Springer.
8. Strogatz S.H. From Kuramoto to Crawford: exploring the onset of synchronization in populations of coupled nonlinear oscillators // Physica D. 2000. Vol. 143. P. 1.
9. Ermentrout G.B. An adaptive model for synchrony in the firefly *Pteroptyx malaccae* // Journal of Mathematical Biology. 1991. Vol. 29. P. 571.
10. Wiesenfeld K., Colet P., Strogatz S.H. Frequency locking in Josephson arrays: connection with the Kuramoto model // Phys. Rev. E. 1998. Vol. 57, № 2. P. 1563.
11. Wang W., Kiss I.Z., Hudson J.L. Clustering of arrays of chaotic chemical oscillators by feedback and forcing // Phys. Rev. Lett. 2001. Vol. 86, № 21. P. 4954.
12. Tass P.A. Phase resetting in medicine and biology. Berlin: Springer, 1999.
13. Strogatz S.H., Abrams D.M., McRobie A. and others. Theoretical mechanics: Crowd synchrony on the Millennium Bridge // Nature. 2005. Vol. 438, № 7064. P. 43.
14. Popovych O.V., Maistrenko Yu.L., Tass P.A. Phase chaos in coupled oscillators // Phys. Rev. E. 2005. Vol. 71, № 6. P. 065201.
15. Maistrenko Yu.L., Popovych O.V., Tass P.A. Desynchronization and chaos in the Kuramoto model // Lecture notes in physics. 2005. Vol. 671. P. 285.
16. Abrams D., Strogatz S.H. Chimera states for coupled oscillators // Phys. Rev. Lett. 2004. Vol. 93, № 17. P. 174102.

## References

1. [http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless\\_sensor\\_network](http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_sensor_network)
2. Dmitriev A.S., Kyarginsky B.Ye., Maximov N.A., Panas A.I., Starkov S.O. // Radiotekhnika. 2000. № 3. P. 9. (In Russian).
3. Dmitriev A.S., Kyarginsky B.Ye., Panas A.I., Starkov S.O. // Journal of Communications Technology and Electronics. 2001. Vol. 46, №2. P. 207.
4. Dmitriev A.S., Efremova E.V., Lazarev V.A., Gerasimov M.Yu. // Achievements of Modern Radioelectronics. 2013. Vol. 3. P. 19. (In Russian).
5. Winfree A. The geometry of biological time. New York: Springer, 1980.
6. Kuramoto Y. Chemical oscillations, waves and turbulence. Berlin: Springer-Verlag, 1984.
7. Kuramoto Y. Self-entrainment of a population of coupled non-linear oscillators // International Symposium on Mathematical Problems in Theoretical Physics / Ed. H. Araki. 1975. Vol. 39. P. 420. Berlin, Springer.
8. Strogatz S.H. From Kuramoto to Crawford: exploring the onset of synchronization in population sof coupled nonlinear oscillators // Physica D. 2000. Vol. 143. P. 1.
9. Ermentrout G.B. An adaptive model for synchrony in the firefly *Pteroptyx malaccae* // Journal of Mathematical Biology. 1991. Vol. 29. P. 571.
10. Wiesenfeld K., Colet P., Strogatz S.H. Frequency locking in Josephson arrays: connection with the Kuramoto model // Phys. Rev. E. 1998. Vol. 57, № 2. P. 1563.
11. Wang W., Kiss I.Z., Hudson J.L. Clustering of arrays of chaotic chemical oscillators by feedback and forcing // Phys. Rev. Lett. 2001. Vol. 86, № 21. P. 4954.

12. *Tass P.A.* Phase resetting in medicine and biology. Berlin: Springer, 1999.
13. *Strogatz S.H., Abrams D.M., McRobie A. and others.* Theoretical mechanics: Crowd synchrony on the Millennium Bridge // *Nature*. 2005. Vol. 438, № 7064. P. 43.
14. *Popovych O.V., Maistrenko Yu.L., Tass P.A.* Phase chaos in coupled oscillators // *Phys. Rev. E*. 2005. Vol. 71, № 6. P. 065201.
15. *Maistrenko Yu.L., Popovych O.V., Tass P.A.* Desynchronization and chaos in the Kuramoto model // *Lecture notes in physics*. 2005. Vol. 671. P. 285.
16. *Abrams D., Strogatz S.H.* Chimera states for coupled oscillators // *Phys. Rev. Lett.* 2004. Vol. 93, № 17. P. 174102.

*Поступила в редакцию* 13.03.2015

*После доработки* 25.04.2015

## MODELLING ENSEMBLES OF NONLINEAR CONTINUOUS TIME DYNAMICAL SYSTEMS IN ACTIVE ULTRA WIDEBAND WIRELESS NETWORKS

*Alexander S. Dmitriev<sup>1,2</sup>, Mark Yu. Gerasimov<sup>1</sup>,  
Ruslan Yu. Emelyanov<sup>1,2</sup>, Vadim V. Itskov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology (State University)

The paper deals with a new multi-element processor platform to model the behavior of interacting dynamical systems – active wireless network. Each dynamical system modeling process, is associated with an active network node. The interaction between the dynamical systems is made through the transfer of information on the state of the system through radio channels between nodes of active network. Platform capabilities are demonstrated by an ensemble of oscillators Kuramoto. Describes the technique of modeling, experimental results and their analysis.

*Keywords:* Nonlinear dynamical systems, wireless networks, ultra wide band, chaotic communication.



*Дмитриев Александр Сергеевич* – родился в 1948 году. Окончил Московский физико-технический институт (1971). Кандидат физико-математических наук (1974), доктор физико-математических наук (1988), профессор. Зав. отделом Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН. Дважды Лауреат Премии Совета Министров СССР (1984 и 1989). Область научных интересов – теория динамического хаоса, информационные технологии на основе хаотической динамики. Автор более 250 научных трудов, в том числе 3 монографии.

125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7  
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН  
141700 Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9  
Московский физико-технический институт (государственный университет)  
E-mail: chaos@cplire.ru



*Герасимов Марк Юрьевич* – родился в 1990-м году. Окончил Московский физико-технический институт (2013). Аспирант института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН. Область научных интересов: беспроводные сенсорные и сети, информационные и коммуникационные технологии на основе динамического хаоса. Имеет 8 научных публикаций.

125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7  
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН  
E-mail: 728239@gmail.com



*Емельянов Руслан Юрьевич* – родился в 1988 году в городе Алматы, Республика Казахстан. Окончил Московский физико-технический институт (2011). Окончил аспирантуру Московского физико-технического института (2014). Младший научный сотрудник лаборатории беспроводных технологий Московского физико-технического института. Автор более 10 публикаций (в соавторстве).

125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7  
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН  
141700 Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9  
Московский физико-технический институт (государственный университет)  
E-mail: ruslanem@gmail.com



*Ицков Вадим Викторович* – родился в городе Гомель, Республика Беларусь. Окончил Гомельский Городской Лицей № 1. Окончил бакалавриат факультета аэрофизики и космических исследований Московского физико-технического института (2012). Окончил магистратуру факультета радиотехники и кибернетики Московского физико-технического института (2014). Аспирант 1 курса Московского физико-технического института, младший научный сотрудник в лаборатории Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва. Областью научных интересов являются беспроводные сети на сверхширокополосных прямохаотических сигналах.

141700 Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9  
Московский физико-технический институт (государственный университет)  
E-mail: vadim.itskov@phystech.edu



## МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНОЙ ДИНАМИКИ ОДНОТРАНЗИСТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА

*В. Н. Титов, Н. Р. Забиров*

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

Исследуется математическая модель системы с 2.5 степенями свободы под внешним периодическим воздействием, которая представляет собой генератор хаоса с биполярным транзистором в качестве активного элемента. Показана возможность формирования хаотических импульсов в такой системе путем внешнего периодического воздействия на генератор.

*Ключевые слова:* Внешнее периодическое воздействие, хаотические импульсы, генераторы хаоса, динамические системы.

### 1. Генератор хаоса с 2.5 степенями свободы

Генераторы хаотических колебаний являются важнейшей частью коммуникационных систем на основе динамического хаоса. В таких системах они используются не просто как источники шумоподобных сигналов, но и как носители информации [1].

Первые генераторы хаотических колебаний в сверхвысокочастотном диапазоне были основаны на использовании в качестве активного элемента вакуумных электронных приборов (лампы бегущей волны, лампы обратной волны и др). Однако уже в начале восьмидесятых годов возник интерес к генераторам хаоса радиочастотного и СВЧ диапазонов на основе полупроводниковых активных элементов, таких как транзисторы. Эти генераторы привлекательны тем, что транзисторы – типичные, широко распространенные электронные элементы, относительно легко реализуемые в радиочастотном и СВЧ диапазонах [2].

В работе [3] предложена простая математическая модель генератора хаоса с 1.5 степенями свободы и транзистором в качестве активного элемента. В этой работе описаны эксперименты по возбуждению хаотических колебаний в транзисторном генераторе с сосредоточенными элементами мегагерцового диапазона частот. Показана возможность получения хаотических колебаний в генераторе Колпитца в радиодиапазоне, но эти колебания – широкополосные. В системах связи такие режимы генератора малоперспективны.

Чтобы получить хаотические колебания в ограниченной полосе частот, необходимо реализовать полосовые хаотические сигналы. Для этого в работе [4] предложено ввести в цепь обратной связи генератора, как и в кольцевых системах, резонансный элемент (фильтр), обеспечивающий необходимые частотно-избирательные свойства обратной связи и тем самым создающий условия для генерации колебаний преимущественно в полосе пропускания резонансного элемента.

В работе [5] рассмотрен один из генераторов такого класса, который представляет собой модель нелинейной динамической системы с 2.5 степенями свободы, где в качестве активного элемента используется биполярный транзистор. Схема этого генератора приведена на рис. 1. Генератор состоит из активного элемента – биполярного транзистора и пассивного четырехполюсника, замкнутых в цепь обратной связи.

В безразмерной форме динамика математической модели генератора описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{v}_{CE} &= \frac{1}{w_0 C_0 R_{BE}} (i_1 - i_C), \\ \dot{i}_1 &= \frac{R_{BE}}{w_0 L_1} (v_A + v_{BE} - v_{CE} - \frac{R_1}{R_{BE}} i_1), \\ \dot{v}_A &= \frac{1}{w_0 C_1 R_{BE}} (-\frac{R_{BE}}{R_E} (v_E - v_{BE}) + i_B + (1 + \frac{C_2}{C_1}) i_2 - \frac{C_2}{C_1} i_1), \\ \dot{i}_2 &= \frac{R_{BE}}{w_0 L_2} (v_C - v_A - \frac{R_2}{R_{BE}} i_2), \\ \dot{v}_{BE} &= \frac{1}{w_0 C_2 R_{BE}} (\frac{R_{BE}}{R_E} (v_E - v_{BE}) - i_2 - i_B), \end{aligned} \quad (1)$$

где нелинейность  $i_B(v_{BE})$  является кусочно-линейной функцией

$$i_B(v_{BE}) = \begin{cases} 0, & \text{если } v_{BE} \leq 1, \\ v_{BE} - 1, & \text{если } v_{BE} > 1. \end{cases} \quad (2)$$

Связь между нормированными переменными и параметрами с исходными переменными задается соотношениями:  $v_{CE} = V_{CE}/V_T$ ,  $v_{BE} = V_{BE}/V_T$ ,  $v_A = V_A/V_T$ ,  $i_1 = I_{L1}/I_0$ ,  $i_2 = I_{L2}/I_0$ ,  $v_E = V_E/V_T$ ,  $v_C = V_C/V_T$ ,  $I_0 = V_T/R_{BE}$ ,  $i_C = \beta i_B(v_{BE})$ ,  $w_0 = \sqrt{(C_0 + C_1)/(L_1 C_0 C_1)}$ .

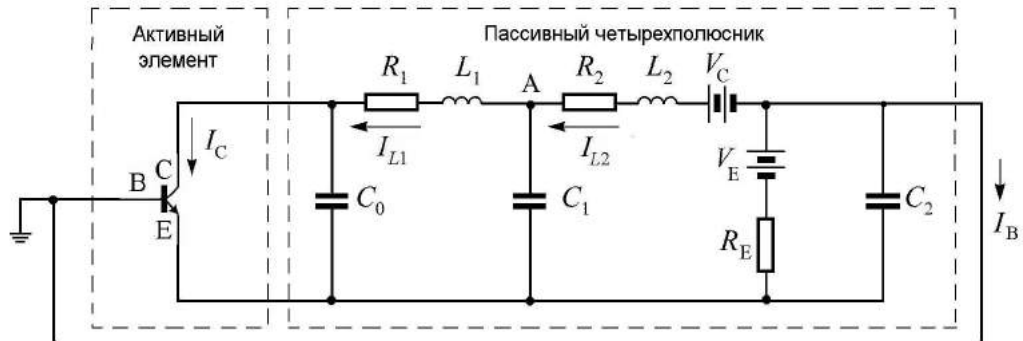


Рис. 1. Схема генератора с 2.5 степенями свободы

Здесь  $V_{CE}$ ,  $V_{BE}$  – напряжения коллектор–эмиттер и база–эмиттер;  $V_1$  – напряжение на емкости  $C_1$ ;  $I_{L1}$ ,  $I_{L2}$ ,  $I_C$ ,  $I_B$  – токи через индуктивность  $L_1$ , индуктивность  $L_2$ , коллектор С и базу В;  $V_A = V_1 - V_{BE}$  – разность потенциалов – эквивалентна измерению напряжения в точке А относительно земли;  $V_T$  – барьерный потенциал (примерно 0.75 В);  $R_{BE}$  – сопротивление перехода база–эмиттер;  $\beta$  – коэффициент усиления транзистора.

В случае использования кусочно-линейной аппроксимации вольт-амперной характеристики математическая модель генератора обладает интересным свойством, заключающимся в том, что при  $v_E > 1$  в ней возбуждаются хаотические колебания сразу, без промежуточных бифуркаций, как показано на рис. 2, на котором изображена диаграмма зависимости режимов работы автономного генератора при разных напряжениях источника питания на эмиттере  $v_E$ . С ростом  $v_E$  амплитуда этих колебаний растет пропорционально разности  $(v_E - 1)$ , однако структура колебаний и их характеристики не меняются.

Форма сигнала и его спектр мощности сильно зависят от выбора точки схемы, в которой снимается сигнал, или, если речь идет о математической модели генератора, от выбора анализируемой переменной. На рис. 3 видно, что в системе с 2.5 степенями свободы можно получить колебания в точке А (см. рис. 1), спектр мощности которых близок к полосовому, что очень существенно для коммуникационных приложений, когда необходимо, чтобы основная спектральная мощность была сосредоточена в ограниченной полосе.

## 2. Динамика математической модели при внешнем гармоническом воздействии

В качестве носителя информации в широкополосных и сверхширокополосных системах связи часто используются хаотические радиоимпульсы. Основным преимуществом хаотического радиоимпульса по сравнению с классическим импульсом является независимость полосы частот хаотического сигнала от длительности радиоимпульса [6].

Последовательность хаотических импульсов получают путем глубокой амплитудной модуляции стационарного хаотического сигнала на выходе источника хаоса. Однако такой подход требует постоянной работы генератора хаоса как на интервалах времени, когда формируются хаотические радиоимпульсы, так и в паузах между

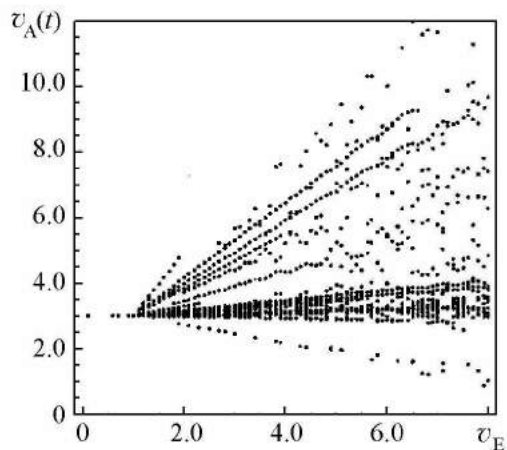


Рис. 2. Зависимость режимов генератора от параметра  $v_E$

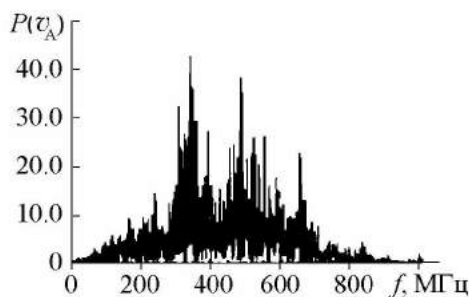


Рис. 3. Спектр мощности напряжения  $V_A$  в точке А

ними. Необходимость генерации хаотического сигнала в паузах между импульсами приводит к снижению энергетической эффективности системы в целом. Особенно значительным это снижение энергетической эффективности оказывается в случае больших скважностей следования импульсов. Именно такие режимы представляют значительный интерес для беспроводных сенсорных сетей и других приложений, чувствительных к сбережению энергии [7].

При помощи численного моделирования рассмотрим генерацию потока хаотических радиоимпульсов путём воздействия внешнего периодического сигнала на динамическую систему с 2.5 степенями свободы, которая в автономном режиме генерирует хаотические колебания. Необходимо за счёт такого воздействия получить хаотические колебания на части периода внешнего сигнала, оставляя систему невозбуждённой на оставшейся части периода, и получить периодическую последовательность хаотических импульсов с паузами между ними. Это поможет повысить энергетическую эффективность системы, так как в паузах генератор не будет потреблять энергию, или её потребление будет незначительно, и общее потребление энергии будет значительно ниже, чем при постоянной генерации хаоса.

Рассмотрим генератор, схема которого приведена на рис. 4.

Модель генератора описывается системой дифференциальных уравнений (1), только в данном случае напряжение на эмиттере периодическое  $V_E = V_{DC} + V_{AC} \sin(2\pi ft)$ ,  $V_{DC}$  и  $V_{AC}$  – амплитуды постоянной и переменной составляющей внешнего сигнала  $V_E$  соответственно,  $f$  – частота внешнего сигнала. В автономном режиме работы генератора  $V_{AC} = 0$ .

Воздействие периодического сигнала приводит к возникновению модуляции хаотических колебаний. Глубина модуляции колебательного процесса зависит от амплитуды внешнего сигнала, при её увеличении глубина модуляции увеличивается до появления цугового режима колебаний. В этом режиме промежутки времени, на которых наблюдаются колебания, периодически прерываются промежутками времени, на которых колебания отсутствуют. Расстояние между цугами колебаний зависит от периода внешнего воздействия, его амплитуды, а также определяется напряжением постоянного смещения на эмиттере транзистора  $V_{DC}$ . На практике это можно объяснить запирающим и открывающим р-п-перехода в транзисторе в процессе модуляции. Когда напряжение  $V_E$  превышает напряжение смещения на транзисторе  $V_T$ , возникает генерация. Таким образом, подбирая частоту модулирующего колебания, его амплитуду  $V_{AC}$  и постоянное напряжение  $V_{DC}$ , можно получать последовательность хаотических импульсов разной скважности.

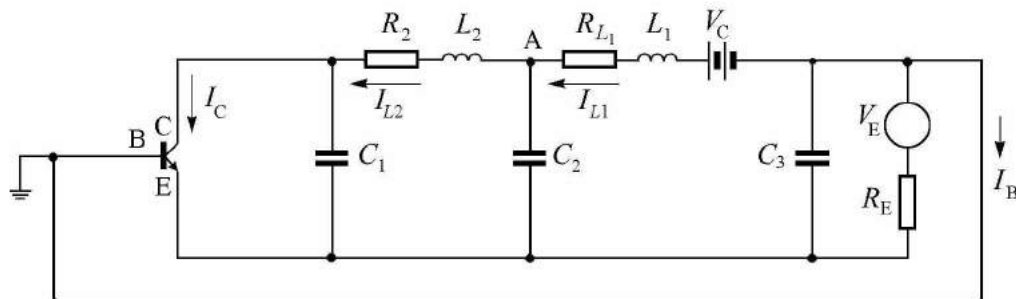


Рис. 4. Схема генератора хаоса с 2.5 степенями свободы



На рис. 5 показан фрагмент реализации и спектр мощности сигнала на выходе генератора, модулированного сигналом  $V_E$  с параметрами  $V_{DC} = 0$ ,  $V_{AC} = 1$  и  $f = 250$  kHz, что позволяет генерировать последовательность хаотических импульсов со скважностью 4. Нужно заметить, что на интервалах времени между хаотическими импульсами потребление тока близко к нулю, что существенно повышает энергетическую эффективность генератора.

С точки зрения нелинейной динамики, последовательности хаотических импульсов на временной оси представляют собой интервалы времени как с регулярным поведением траектории (промежутки между импульсами), так и с хаотическим поведением (хаотические импульсы).

Далее рассмотрим воздействие внешним сигналом, который представляет собой последовательность прямоугольных импульсов. В случае воздействия гармоническим сигналом система относительно медленно выводится из режима с регулярным поведением и так же медленно переходит обратно. В случае же воздействия импульсами генератор скачкообразно переводится из режима с регулярным поведением в режим хаотической генерации и обратно. Это обеспечивает высокую скорость переключения системы из режима покоя в режим генерации и обратно и, тем самым, – высокую скорость передачи информации на практике. На рис. 6 показан фрагмент реализации и спектр мощности сигнала на выходе генератора, модулированного последовательностью прямоугольных импульсов с амплитудой 2.2 В.

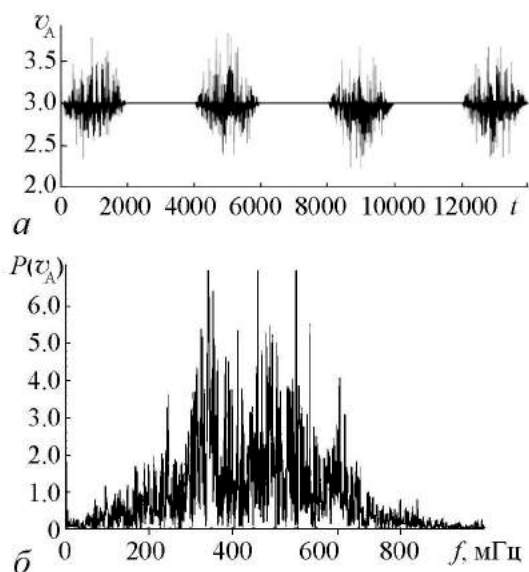


Рис. 5. Последовательность хаотических импульсов со скважностью 4 (а) и спектр мощности сигнала на выходе генератора (б), модулированного гармоническим сигналом  $V_E(t)$

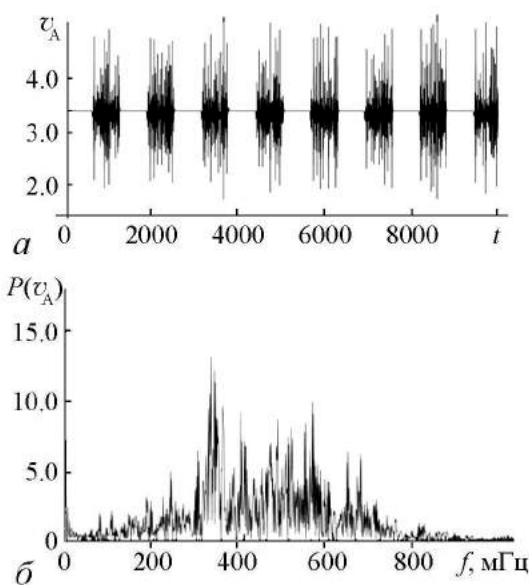


Рис. 6. Временная реализация (а) и спектр мощности сигнала на выходе генератора (б), модулированного последовательностью прямоугольных импульсов с амплитудой 2.2 В

### 3. Моделирование генератора в Advanced Design System

Математическая модель генератора основывается на применении законов Кирхгофа к электрической схеме и описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений в системах с сосредоточенными параметрами. В таких моделях

вольтамперная характеристика нелинейных элементов (диоды, биполярные и полевые транзисторы и т.д.) определяется максимально простыми функциями: кусочно-линейными, экспоненциальными или полиномиальными. Это позволяет проанализировать основные особенности динамики системы. Однако при переходе от таких упрощенных математических моделей к реальным радиотехническим устройствам возникает ряд проблем, связанных с тем, что динамические режимы математической модели не соответствуют режимам колебаний в реальном электронном устройстве, что затрудняет его реализацию. Для решения этой проблемы существуют специальные программные пакеты схемотехнического моделирования, к одним из них относится Advanced Design System (ADS). Данный пакет позволяет моделировать работу электронных приборов в СВЧ-диапазоне в реальном времени. Спектр задач, решаемых с помощью ADS, простирается от разработки простейших радиотехнических устройств до моделирования работы систем связи в целом, и включает все этапы от разработки принципиальной схемы устройства до решения задач системного уровня.

На рис. 7 приведена схема генератора, собранная в среде ADS. В целом эта схема повторяет схему генератора, приведенного на рис. 1, где была введена его математическая модель, и отличается лишь наличием блокировочной емкости  $C_4 = 100$  пФ и нагрузки  $R = 50$  Ом на выходе системы. Блокировочная ёмкость введена для того, чтобы избавиться от постоянной составляющей в спектре выходного сигнала, а модельная нагрузка учитывает входное сопротивление реальной нагрузки в экспериментальном макете.

Четырехполюсник в цепи обратной связи генератора состоит из набора пассивных элементов с номиналами, приведенными в разделе 1 при описании математической модели. Питание коллекторной цепи задается источником постоянного напряжения  $V_C = 6.4$ , а питание в цепи эмиттера – источником переменного напряжения  $V_E = 2.2$ .

При описании математической модели было показано, что при использовании кусочно-линейной функции в качестве вольт-амперной характеристики транзистора при определенных значениях параметров хаотические колебания существуют при всех значениях напряжения на эмиттере, превышающих пороговое значение  $V = 0.75$ . Однако при моделировании в ADS модель транзистора имеет гладкую

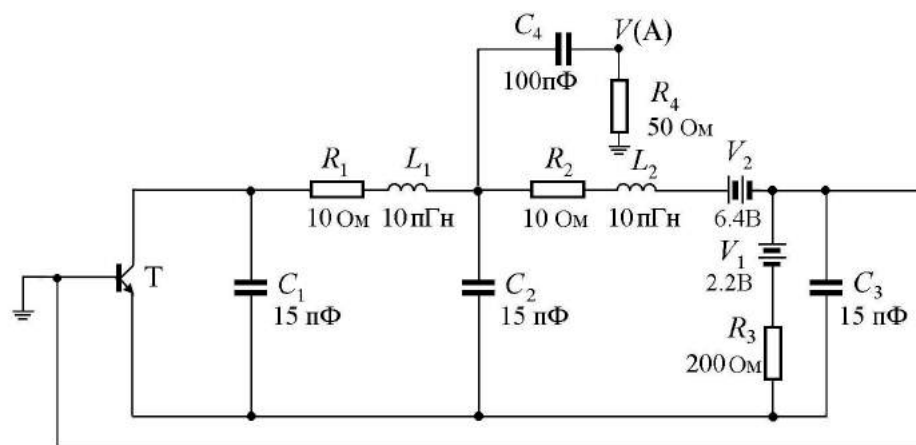


Рис. 7. Схема генератора хаоса, моделируемая в ADS

нелинейность, и зависимость режимов генератора от величины напряжения на эмиттере становится более сложной.

На рис. 8 приведена бифуркационная диаграмма, показывающая характер колебаний, реализующихся в системе, при разных напряжениях на эмиттере.

Как видно из диаграммы, до значения напряжения  $V_E \cong 1.55$  в системе наблюдаются периодические колебания периода 1, при  $V_E > 1.55$  происходит каскад бифуркаций удвоения периода с переходом к хаосу при  $V_E > 1.7$ . При дальнейшем увеличении напряжения на эмиттере происходит чередование зон периодических и хаотических режимов.

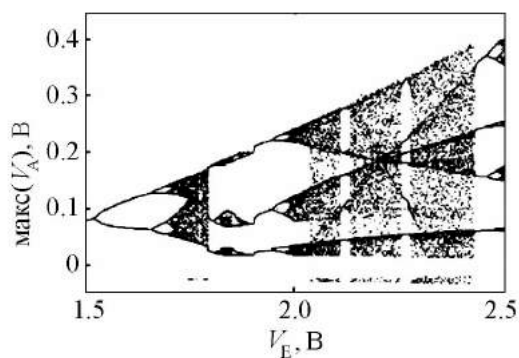


Рис. 8. Бифуркационная диаграмма колебательных режимов генератора по параметру  $V_E$ ;  $V = 6.4$

#### 4. Моделирование генератора под внешним воздействием в программном пакете ADS

Ранее с помощью численного моделирования была продемонстрирована возможность генерации хаотических импульсов путём воздействия периодического сигнала на динамическую систему. Теперь работоспособность этой идеи будет проверена путём моделирования в среде ADS, описанной выше. В качестве источника хаотического сигнала при моделировании в ADS используется генератор хаоса с 2.5 степенями свободы с биполярным транзистором.

При моделировании в ADS в качестве биполярного транзистора был использован транзистор BFP620; рабочий диапазон этого транзистора простирается до 70 ГГц.

Четырёхполюсник в цепи обратной связи генератора состоит из набора пассивных элементов с номиналами:  $L_1 = L_2 = 10$  нГн,  $C_0 = C_1 = C_2 = 15$  пФ,  $R_E = 200$  Ом,  $R_1 = R_2 = 15$  Ом. Питание коллекторной цепи задается источником постоянного напряжения  $V_C = 6.4$ , а питания в цепи эмиттера – источником переменного напряжения  $V_E$ .

При модуляции модели генератора синусоидальным сигналом напряжение на эмиттере меняется медленно по сравнению с характерным периодом колебаний генератора. Неавтономная система генерирует импульсы с синусоидальной огибающей, внутренняя колебательная структура которых меняется в соответствии со сменой динамических режимов.

На рис. 9 показан поток импульсов, полученных в результате изменения напряжения на эмиттере по гармоническому закону с амплитудой 2.2 В и частотой  $f = 2.3$ . На интервалах времени,

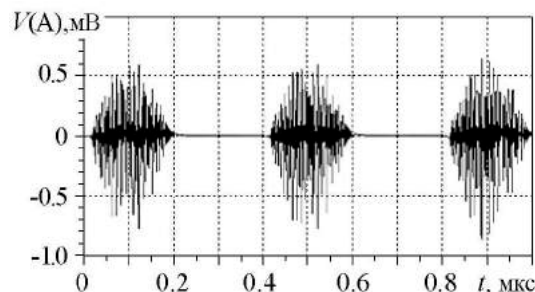


Рис. 9. Поток хаотических импульсов при изменении напряжения на эмиттере по гармоническому закону

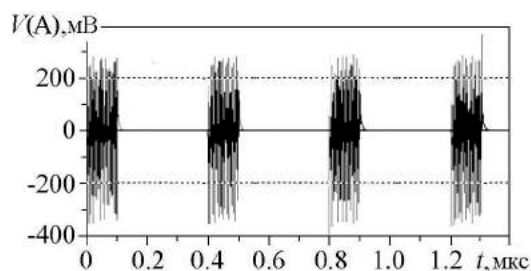


Рис. 10. Поток хаотических импульсов при модуляции напряжения на эмиттере прямоугольными импульсами с амплитудой 2.2 В, длительностью 100 нс и скважность 4

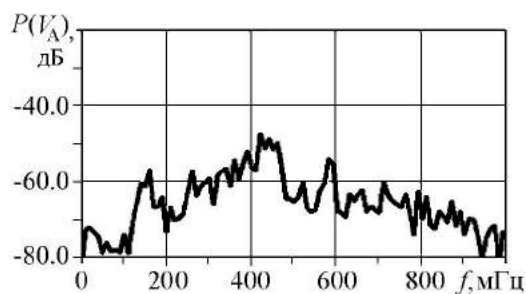


Рис. 11. Спектр мощности сигнала на выходе генератора при модуляции напряжения на эмиттере прямоугольными импульсами с амплитудой 2.2 В, длительностью 100 нс, скважность 4

когда  $V_E < 1.2$ , колебания в системе отсутствуют, а при  $V_E > 1.2$  формируется хаотический импульс.

Если внешнее воздействие представляет собой последовательность прямоугольных импульсов с амплитудой, равной значению напряжения, то автономная система скачкообразно переводится из режима с регулярным поведением в режим хаотической генерации.

Пусть источник напряжения на эмиттере формирует последовательность прямоугольных импульсов с амплитудой 2.2 В, длительностью  $\tau = 100$  и скважность 4. В соответствии с этим законом изменения напряжения на эмиттере, на выходе генератора возникает поток хаотических импульсов длительностью 100 нс и скважность 4 (рис. 10). На рис. 11 приведен спектр мощности потока хаотических импульсов. Из рис. 11 видно, что введение модуляции не оказывает заметного влияния на форму спектра мощности.

### Заключение

В данной работе рассмотрена динамика системы с 2.5 степенями свободы под внешним периодическим воздействием, а также проведен анализ динамики генератора в пакете схемотехнического моделирования ADS. Использование программ, подобных ADS, необходимо, чтобы избежать проблемы при переходе от упрощенных математических моделей к реализации реальных радиотехнических устройств.

Также была показана возможность генерации хаотических импульсов в данной модели путём воздействия на нее внешнего периодического сигнала. Установлено, что подобное воздействие на такую систему позволяет генерировать поток хаотических импульсов, а за счёт выбора частоты воздействия и значения постоянного напряжения смещения, в широких пределах варьировать длину хаотических импульсов и темп их следования.

### Библиографический список

1. Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Никишов А.Ю., Панас А.И. Генераторы хаоса: от вакуумных приборов до наносхем // РЭНСИТ. 2009. Т. 1, №1–2. С. 6.
2. Фрадков А.Л. Кибернетическая физика: принципы и примеры. СПб.: Наука, 2003. 208 с.

3. *Дмитриев А.С., Иванов В.П., Лебедев М.Н.* Модель транзисторного генератора с хаотической динамикой // Радиотехника и электроника. 1988. Т. 33, № 5. С. 1085.
4. *Максимов Н.А., Панас А.И.* Однотранзисторный генератор полосовых хаотических сигналов радиодиапазона // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 2000. Т. 11. С. 61.
5. *Ефремова Е.В., Атанов Н.В., Дмитриев Ю.А.* Генератор хаотических колебаний радиодиапазона на основе автоколебательной системы с 2.5 степенями свободы // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2007. Т. 15, № 1. С. 23.
6. *Дмитриев А.С., Кяргинский Б.Е., Панас А.И., Старков С.О.* // РЭ. 2001. Т. 46, № 2. С. 224.
7. *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Кузьмин Л.В.* // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 22. С. 29.

## References

1. *Dmitriev A.S., Efremova E.V., Nikishov A.Y., Panas A.I.* Generatory haosa: ot vakuumnnyh priborov do nanoshem // RENSIT. 2009. Т. 1, № 1-2. S. 6. (In Russian).
2. *Fradkov A.L.* Kyberneticheskaya physica: principy i primery. SPb .: Nauka, 2003. 208 s. (In Russian).
3. *Dmitriev A.S., Ivanov V.P., Lebedev M.N.* Model transistornogo generatora s haoticheskoy dinamikoy // Radiotekhnika i elektronika. 1988. Т. 33, № 5. S. 1085. (In Russian).
4. *Maksimov N.A., Panas A.I.* Odnotranzistorniy generator haoticheskikh polosovykh signalov radiodiapazona // Zarubejnaya radioelektronika. Uspehi sovremennoy radioelektroniki. 2000. Т. 11. S. 61. (In Russian).
5. *Efremova, E.V., Atanov N.V., Dmitriev U.A.* Generator haoticheskikh kolebaniy radiodiapazona na osnove avtokolebatelnoy systemi s 2.5 stepenyami svobody // Izvestiya vuzov. Prikladnaya nelineynaya dinamika. 2007. Т. 15, № 1. S. 23. (In Russian).
6. *Dmitriev A.S., Kyarginy B.Ey., Panas A.I., Starkov S.O.* // Journal of Communications Technology and Electronics. 2001. Vol. 46, №2. P. 207.
7. *Dmitriev A.S., Efremova E.V., Kuzmin L.V.* // Pisma v JTF. 2005. Т. 31. Vip. 22. S. 29. (In Russian).

*Поступила в редакцию 25.05.2015*

## MODELING OF COMPLICATED DYNAMICS OF TRANSISTOR GENERATOR

*V. N. Titov, N. R. Zabiroy*

Saratov State University

A mathematical model with 2.5 degrees of freedom under external periodic stimulation is investigated. It is a model of chaotic oscillator with bipolar transistor as an active

element. It is shown that external periodic stimulation of the oscillator of such system allows to generate chaotic pulse stream.

*Keywords:* Periodic external impact, chaotic impulses, generators of chaos, dynamical systems.



*Титов Владимир Николаевич* – родился в поселке Степное Саратовской области (1974). Окончил с отличием физический факультет СГУ (1997). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «Радиофизика» (2001). В 2002–2003 годах прошел стажировку в Сеульском национальном университете (Ю. Корея). Доцент кафедры электроники, колебаний и волн СГУ. Область научных интересов включает численное моделирование нестационарных процессов в приборах СВЧ-электроники, исследование нелинейной динамики в распределенных системах различной природы. Автор более 30 статей по данной тематике.

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



*Забиров Наиль Равильевич* – родился в г. Бухара, Узбекистан (1991). С 1995 года проживает на территории Российской Федерации. В 2008 году поступил в Саратовский госуниверситет на факультет нелинейных процессов. Окончил бакалавриат, направление – радиофизика (2012), и магистратуру факультета нелинейных процессов (2014) с красным дипломом.

410012, Саратов, ул. Астраханская, 83  
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского  
E-mail: Zabirov\_nail@list.ru



## ОСОБЕННОСТИ ОДНОВРЕМЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОЗБУЖДАЮЩИХ СИНАПТИЧЕСКИХ ТОКОВ НА НЕЙРОН С ДИФФЕРЕНЦИАЦИЕЙ ОТКЛИКА

Д.Г. Захаров<sup>1</sup>, Д.В. Касаткин<sup>1</sup>, С.Ю. Кириллов<sup>1</sup> и А.С. Кузнецов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Отдел нелинейной динамики Института прикладной физики РАН

<sup>2</sup> Department of Mathematical Sciences

and Center for Mathematical Modeling and Computational Sciences, IUPUI

Некоторые типы нейронов, например дофаминергические, норадренергические и серотонинергические, могут демонстрировать дифференциацию отклика на возбуждающие синаптические стимулы, то есть генерировать в ответ на эти стимулы качественно разные отклики. В частности, воздействие NMDA-тока обычно приводит к высокочастотной генерации (более чем в 5 раз по сравнению с тонической активностью), в то время как AMPA-ток не может приводить существенному увеличению частоты и при относительно небольших значениях силы тока подавляет активность нейрона. Поскольку оба тока вызываются глутаматными рецепторами, и, следовательно, в большинстве случаев активируются одновременно, в этой статье рассмотрен вопрос их одновременного воздействия на нейронную модель, обладающую дифференциацией отклика. Показано, что в зависимости от значений проводимостей AMPA и NMDA рецепторов возможно получение разных режимов нейронной активности (состояние покоя, низкочастотную или высокочастотную активность). Максимальная частота генерации достигалась при одновременном действии обоих синаптических токов. Дополнительный рост частоты, связанный с активацией AMPA-тока в дополнение к NMDA-току, может составлять до 20%. Таким образом, было установлено, что основной вклад в рост частоты дает NMDA-ток, а AMPA-ток способствует дальнейшему увеличению частоты. Динамический механизм такого синергического действия синаптических токов проиллюстрирован с помощью эволюции фазового портрета модели.

*Ключевые слова:* Нейрон, возбуждающие синаптические токи, AMPA, NMDA, дифференциация отклика.

### Введение

В центральной нервной системе (ЦНС) существует несколько типов медленных пейсмейкерных нейронов, например, серотонинергические [1], норадренергические [2] и дофаминергические (DA) [3] нейроны. В моменты генерации потенциалов действия они выделяют нейромедиаторы-моноамины: норадреналин, серотонин и дофамин, играющие ключевые роли в регуляции жизненно важных процессов в

организме. В режиме низкочастотной (тонической) генерации (1.0...5.0 Гц) эти нейроны поддерживают фоновый уровень этих нейромедаторов, а под действием стимулов они способны переходить в состояние покоя или к высокочастотной генерации, что, в свою очередь, приводит к понижению или повышению уровня нейромедаторов в ЦНС. Отметим, что вызвать высокочастотную генерацию у этих нейронов достаточно сложно: в отличие от большинства нейронов они демонстрируют дифференциацию отклика на возбуждающие стимулы. В частности, инъекция тока в сому DA нейронов в экспериментах *in-vitro* не приводит к существенному повышению частоты [4, 5]. Возбуждающие синаптические токи, активируемые AMPA<sup>1</sup> и NMDA<sup>2</sup> рецепторами, дают противоположные результаты: AMPA-ток, так же как и инъекция тока в сому нейрона, не приводит к высокочастотной генерации и подавляет активность нейрона, а NMDA-ток вызывает существенное повышение частоты генерации в пять и более раз [6–8]. Интересным фактом является то, что агонистом обоих рецепторов является глутамат<sup>3</sup>. По этой причине в большинстве случаев эти синаптические токи активируются одновременно, оказывая при этом противоположное действие на нейрон, поэтому представляется важным рассмотреть одновременное действие этих синаптических токов, что и сделано в этой статье. Отдельно следует отметить, что такая постановка задачи важна также с точки зрения изучения биологических механизмов привыкания человека к таким вредным привычкам, как алкоголизм, курение, наркомания и т.д. Это объясняется ключевой ролью дофаминергической системы в обучении с подкреплением, где высокочастотная активность дофаминергических нейронов приводит к дополнительному выбросу дофамина, что служит «подкреплением» повторяемости того или иного действия. При этом одним из проявлений действия никотина, алкоголя, кокаина и т.д. на дофаминергическую систему является изменение соотношения величин AMPA- и NMDA-токов.

Несмотря на существование ряда биофизических моделей этих нейронов, основанных на балансе ионных токов (например, [9–11]), для нашего исследования была выбрана феноменологическая модель с дифференциацией нейронного отклика [12, 13]. Это связано с тем, что предложенная в [12, 13] модель, представляющая собой модифицированные уравнения ФитцХью–Нагумо, является существенно более простой (содержит всего два уравнения), что значительно упрощает анализ и выявление динамических механизмов нейронной активности. Она была получена добавлением в правую часть первого уравнения Ca<sup>2+</sup>-управляемого калиевого тока SK-типа. В результате такой модификации модель стала качественно описывать основные свойства нейронов с дифференциацией отклика:

- периодическая (низкочастотная) генерация спайков без внешних воздействий;
- пятикратный рост частоты под действием NMDA-тока;
- двукратный рост частоты и подавление колебаний при инъекции тока в сому или активации AMPA-тока.

<sup>1</sup> AMPA-рецепторы ( $\alpha$ -амино-3-гидрокси-5-метил-4-изоксазолпропионовой кислоты) – ионотропные возбуждающие рецепторы, которые являются одними из самых распространенных в нервной системе позвоночных.

<sup>2</sup> NMDA-рецепторы (N-метил-D-аспартат) – ионотропные возбуждающие рецепторы. В отличие от AMPA-рецепторов, их каналы могут закрываться ионами магния, которые удаляются при деполяризации постсинаптической мембраны.

<sup>3</sup> Глутамат (глутаминовая кислота) – самый распространенный возбуждающий нейротрансмиттер в нервной системе позвоночных. Является агонистом AMPA- и NMDA-рецепторов.



## 1. Модель

Рассмотрим модель нейрона, демонстрирующую описанную выше дифференциацию нейронного отклика на возбуждающие стимулы:

$$\begin{aligned} \dot{u} &= f(u) + j_{\text{KCa}}(u, v) + j_{\text{stim}}, \\ \dot{v} &= \varepsilon g(u, v), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $u$  описывает мембранный потенциал,  $v$  – концентрацию ионов кальция,  $\varepsilon$  – малый параметр. В отличие от классических уравнений ФитцХью–Нагумо [15], здесь линейный член « $-v$ » заменен нелинейной функцией  $j_{\text{KCa}}(u, v)$ , качественно воспроизводящей  $\text{Ca}^{2+}$ -управляемый калиевый ток SK-типа [16]:

$$j_{\text{KCa}}(u, v) = g_{\text{KCa}}(E_{\text{K}} - u) \frac{v^4}{v^4 + k}, \quad (2)$$

где  $g_{\text{KCa}}$  – максимальная проводимость рецепторов,  $E_{\text{K}}$  – реверсивный потенциал ионов калия,  $k$  – параметр полуактивации.

Функции  $f(u)$  и  $g(u, v)$  взяты в виде

$$\begin{aligned} f(u) &= a_1(u^3 + a_2u^2 + a_3u + a_4), \\ g(u, v) &= \begin{cases} u - c, & v \geq 0, \\ 0.01(u - c) - v, & v \leq 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

Фазовым пространством модели (1) является плоскость  $(u, v)$ . На ее положительной полуплоскости ( $v > 0$ )  $u$ -нульклина имеет типичную для уравнений ФитцХью–Нагумо  $N$ -образную форму. Однако из-за нелинейности  $\text{Ca}^{2+}$ -зависимого калиевого тока (2) эта нульклина становится симметричной относительно оси  $u$  и, следовательно, имеет еще одну (симметричную) ветвь при  $v < 0$ . Для того чтобы избежать пересечения нульклин на отрицательной полуплоскости  $v < 0$  (и существования там состояний равновесия) функция  $v = g(u, v)$  была выбрана кусочно-линейной (3).

В этой статье мы рассмотрим влияние на динамику модели (1) двух возбуждающих стимулов – AMPA и NMDA синаптических токов:

$$\begin{aligned} j_{\text{stim}} &= g_{\text{NMDA}}(u)(E_{\text{NMDA}} - u) + g_{\text{AMPA}}(E_{\text{AMPA}} - u), \\ g_{\text{NMDA}}(u) &= \frac{g_{\text{NMDA}}}{1 + [Mg] \exp^{-6u}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $g_{\text{AMPA}}$  и  $g_{\text{NMDA}}$  – максимальные проводимости AMPA и NMDA рецепторов,  $E_{\text{NMDA}}$  и  $E_{\text{AMPA}}$  – их реверсивные потенциалы. Отметим, что проводимость AMPA-рецепторов не зависит от постсинаптического потенциала, в то время как проводимость NMDA-рецепторов имеет нелинейную зависимость от постсинаптического потенциала, связанную с закрытием ионного канала ионами магния при реполяризации мембранного потенциала [16].

Параметры были зафиксированы таким образом, чтобы модель демонстрировала тоническую низкочастотную активность (имела устойчивый предельный цикл

на фазовой плоскости):  $a_1 = -1$ ,  $a_2 = 1.35$ ,  $a_3 = 0.54$ ,  $a_4 = 0.0539$ ,  $c = -0.585$ ,  $[Mg] = 0.2$ ,  $E_{\text{NMDA}} = E_{\text{AMPA}} = 0$ ,  $g_{\text{KCa}} = 0.5$ ,  $E_{\text{KCa}} = -1$ ,  $k = 10$ . Параметры  $g_{\text{AMPA}}$ ,  $g_{\text{NMDA}}$  были выбраны управляющими параметрами при исследовании динамики системы (1).

## 2. Отклики модели на одновременную активацию синаптических токов

Случаи влияния независимо активируемых AMPA и NMDA синаптических токов были рассмотрены в [12, 13]. AMPA-ток хоть и мог двукратно увеличить частоту генерации нейрона, но приводил к быстрому уменьшению амплитуды колебаний и при относительно небольших значениях проводимости AMPA-рецепторов вызывал подавление колебаний. Напротив, NMDA-ток не уменьшал амплитуду колебаний, а его действие приводило к высокочастотной генерации спайков (рост частоты более чем в 4 раза) в широком диапазоне значений проводимости NMDA-рецепторов. Ниже мы рассмотрим одновременное воздействие этих синаптических токов.

На рис. 1, а представлена двухпараметрическая бифуркационная диаграмма на плоскости параметров  $(g_{\text{AMPA}}, g_{\text{NMDA}})$ . На ней область параметров, отвечающая нейронной активности (и выделенная серым цветом), ограничена двумя линиями. Левая граница отвечает суперкритической бифуркации Андронова–Хопфа (рис. 1, б), а правая – бесконечному росту периода предельного цикла до бесконечности, вызванного «уходом» максимума  $u$ -нульклины на бесконечность (рис. 2). При малых значениях параметра  $g_{\text{NMDA}}$  (и достаточно больших значениях  $g_{\text{AMPA}}$ ) на фазовой плоскости модели единственным аттрактором является устойчивое состояние равновесия, и, следовательно, нейрон находится в состоянии покоя. С ростом  $g_{\text{NMDA}}$  происходит суперкритическая бифуркация Андронова–Хопфа, в результате которой состояние равновесия теряет свою устойчивость, и рождается устойчивый предельный цикл (рис. 2, а) с нулевой амплитудой и конечной частотой. Его амплитуда начинает быстро расти с увеличением  $g_{\text{NMDA}}$  (см. рис. 1, б) или уменьшением  $g_{\text{AMPA}}$  и достигает своего максимума на правой бифуркационной границе. Таким образом, большая часть области нейронной активности отвечает релаксационному предельному циклу, который соответствует колебаниям с большой амплитудой – спайкам.

Частота предельного цикла при отдалении от границы бифуркации Андронова–Хопфа сначала резко уменьшается. Это связано с тем, что в малой окрестности бифуркационной границы происходит переход от низкоамплитудного предельного цикла, родившегося в малой окрестности состояния равновесия, к релаксационному предельному циклу большой амплитуды. На частотной диаграмме (рис. 3, б) этому переходу соответствует узкая черная область в окрестности границы бифуркации Андронова–Хопфа. Поскольку предельный цикл малой амплитуды не соответствует генерации потенциалов действия, то далее мы не будем рассматривать эту область параметров (на рис. 4 эти значения частот не отображены). При умеренных значениях параметра  $g_{\text{AMPA}}$  с дальнейшим ростом параметра  $g_{\text{NMDA}}$  частота колебаний начинает увеличиваться, затем достигается ее максимум, и она падает до нуля, что отвечает полному подавлению генерации на правой бифуркационной границе. Высокочастотным колебаниям на диаграмме рис. 3, б отвечает большая овальная область черного цвета. Интересным фактом является то, что в этой области может дости-

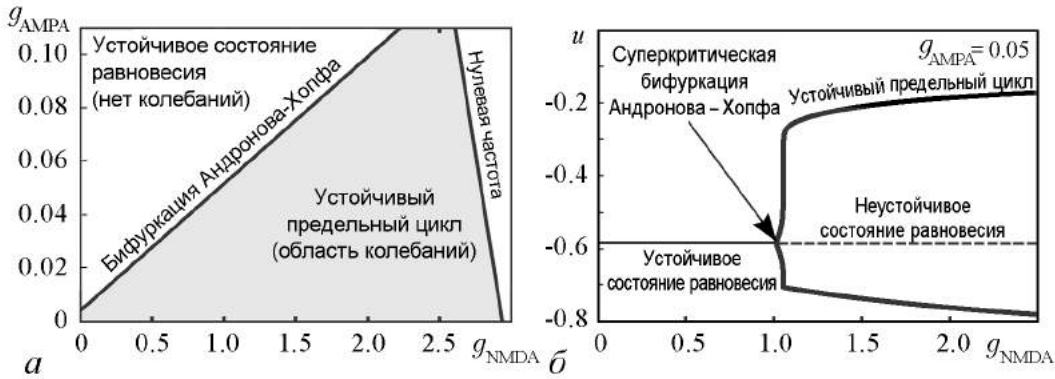


Рис. 1. Двухпараметрическая (а) и однопараметрическая (б) бифуркационные диаграммы системы (1)

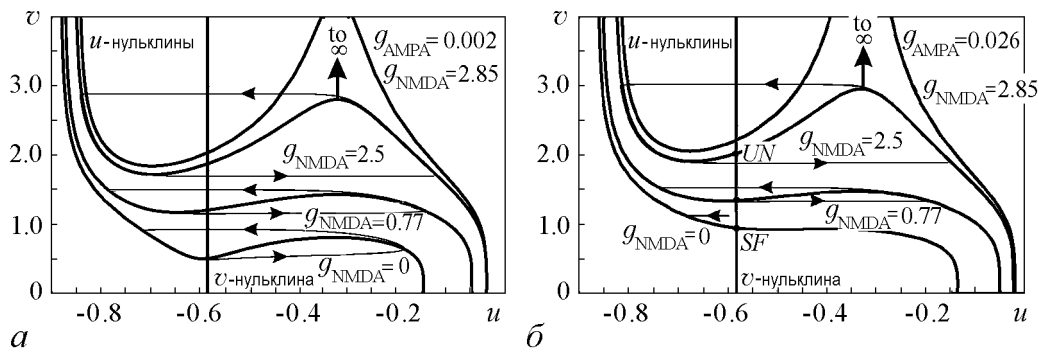


Рис. 2. Эволюция фазовой плоскости модели (1) при  $g_{AMPA} = 0.002$  (а) и  $g_{AMPA} = 0.026$  (б)

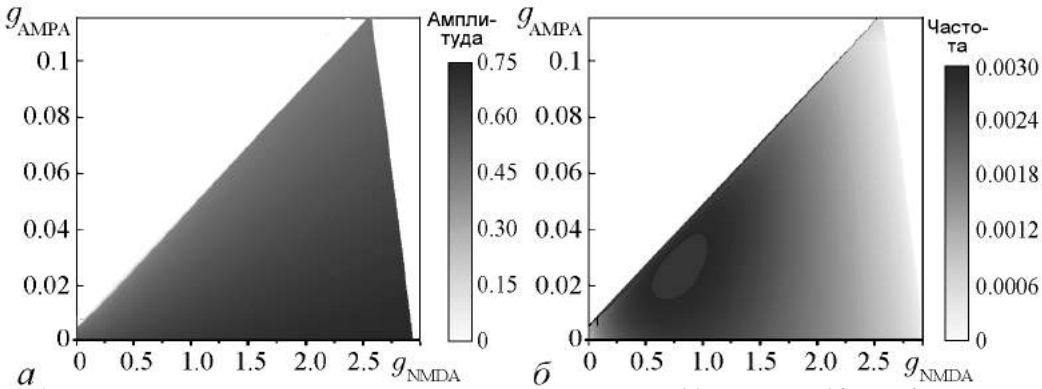


Рис. 3. Двухпараметрические диаграммы зависимости амплитуды (а) и частоты (б) колебаний от проводимостей AMPA и NMDA рецепторов

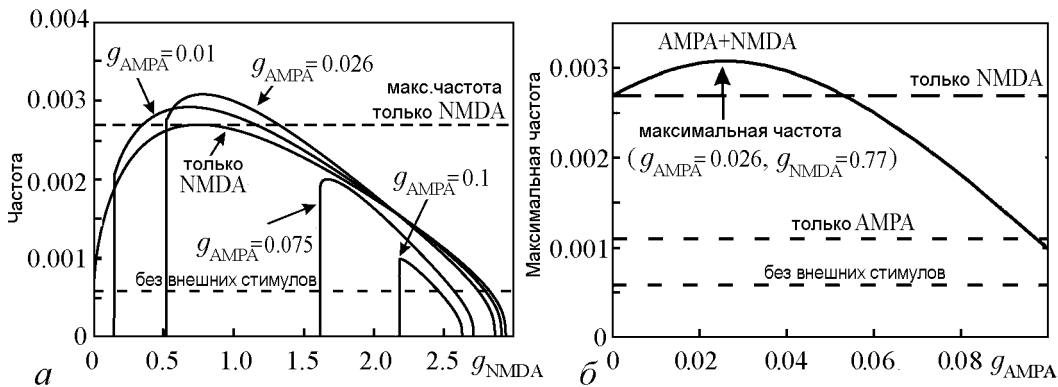


Рис. 4. Зависимость частоты генерации от проводимости NMDA рецепторов (а). Зависимость максимальной частоты (по параметру  $g_{NMDA}$ ) от значений проводимости AMPA рецепторов (б)

гаться частота, которая превышает максимально возможную частоту при действии только NMDA-тока (рис. 4). Максимальная величина такого дополнительного роста частоты составляет примерно 20%. Отметим, что при больших значениях  $g_{AMPA}$  рост частоты не наблюдается – она монотонно уменьшается до нуля (рис. 4, *a*).

### 3. Динамический механизм дополнительного роста частоты колебаний

Рассматриваемая в этой работе система (1) является самой простой моделью, качественно описывающей базовые свойства медленных пейсмейкерных нейронов. Она включает в себя всего два обыкновенных дифференциальных уравнения, ее фазовым пространством является плоскость  $(u, v)$ , а наличие малого параметра позволяет провести анализ методом разрывных колебаний. Поэтому, для наглядности, мы проиллюстрируем динамический механизм дополнительного роста частоты (при добавлении AMPA-тока) с помощью описания эволюции фазовой плоскости этой модели.

Независимое действие обоих синаптических токов было рассмотрено в работах [12, 13]. В них было показано, что NMDA-ток увеличивает частоту колебаний (кривая «только NMDA» на рис. 4), а AMPA-ток вызывает относительно небольшое (максимально – двукратное, линия «только AMPA» на рис. 4, *b*) увеличение частоты, после чего амплитуда колебаний начинает резко уменьшаться, и при относительно малых значениях проводимости рецепторов наступает подавление колебаний. При одновременном действии обоих синаптических токов изменения, оказываемые ими на нульклины, «накладываются» друг на друга. При малых значениях проводимости AMPA-рецепторов наблюдается (качественно) такой же сценарий, что и без действия AMPA-тока (см. рис. 2, *a*). С ростом  $g_{NMDA}$  происходит «разгибание»  $u$ -нульклины: ее экстремумы сближаются по оси  $v$ , но остаются широко разнесенными по оси  $u$ . Это приводит к увеличению частоты колебаний (и небольшому росту амплитуды) за счет уменьшения участков устойчивых медленных многообразий, в окрестности которых проходит траектория предельного цикла, и отхода минимума этой нульклины от неустойчивого состояния равновесия влево, что увеличивает скорость прохождения изображающей точки по траектории, проходящей в окрестности левого устойчивого многообразия медленных движений. Затем, при дальнейшем росте проводимости NMDA-рецепторов, частота колебаний достигает своего максимума и начинает уменьшаться за счет удаления экстремумов  $u$ -нульклины друг от друга по оси  $v$ , что увеличивает амплитуду колебаний по этой переменной. Этот процесс продолжается до тех пор, пока максимум  $u$ -нульклины не уйдет на бесконечность (см. рис. 2, *a*).

Несмотря на то, что AMPA-ток считается возбуждающим, в нашем случае он приводит к подавлению колебаний в модели (1). Действительно, с ростом силы тока экстремумы  $u$ -нульклины становятся ближе друг к другу не только по оси  $v$ , но и по оси  $u$  (минимум смещается вправо, а максимум – влево), что ведет к уменьшению амплитуды колебаний (рис. 5). При достаточно сильном AMPA-токе  $u$ -нульклины окончательно «разогнется» и будет иметь точку перегиба вместо двух экстремумов. Смещение минимума вправо при некотором значении силы AMPA-тока приводит к тому, что пересечение нульклин начинает происходить на устойчивом многообразии медленных движений, то есть произойдет обратная суперкритическая бифуркация

Андропова-Хопфа, в результате которой предельный цикл исчезнет, а состояние равновесия станет устойчивым (см., например рис. 5, который соответствует движению вверх при  $g_{\text{NMDA}} = 0.77$  по диаграммам на рис. 3).

Другими словами, AMPA- и NMDA-токи оказывают противоположное действие на  $u$ -нульклину в районе ее минимума (смещают его в разные стороны относительно  $v$ -нульклина), и их совместное действие определяет будет находиться нейрон в покое или активном состоянии. Поэтому, начиная с некоторого значения  $g_{\text{AMPA}}$ , нейрон уже не может генерировать колебания при нулевых значениях проводимости NMDA-рецепторов, и предельный цикл появится в результате суперкритической бифуркации Андропова-Хопфа только, когда действие NMDA-тока скомпенсирует действие AMPA-тока. К моменту появления предельного цикла,  $u$ -нульклина уже будет «деформированной» действиями обоих синаптических токов (см. рис. 2, б), поэтому частота колебаний (релаксационного предельного цикла) будет выше, чем была бы без действия AMPA-тока. Если к этому моменту значения проводимости NMDA-рецепторов оказались меньше значения, соответствующего максимальному значению частоты в случае действия только NMDA-тока, то  $u$ -нульклина будет продолжать «разгибаться» с увеличением  $g_{\text{NMDA}}$ , и мы увидим рост частоты, если ниже, то экстремумы  $u$ -нульклина будут уходить друг от друга, и частота с ростом  $g_{\text{NMDA}}$  будет уменьшаться (см. рис. 4, а). Таким образом, в области максимума зависимости частоты колебаний от проводимости NMDA-рецепторов (когда NMDA-ток уже максимально «разогнул»  $u$ -нульклину и не может более увеличивать частоту), добавление умеренного AMPA-тока, с одной стороны, приведет к дальнейшему росту частоты за счет дополнительного разгибания  $u$ -нульклина по оси  $v$ , а с другой, не даст сильного уменьшения амплитуды предельного цикла или подавления колебаний (см. рис. 5), что позволит считать эти колебания спайками.

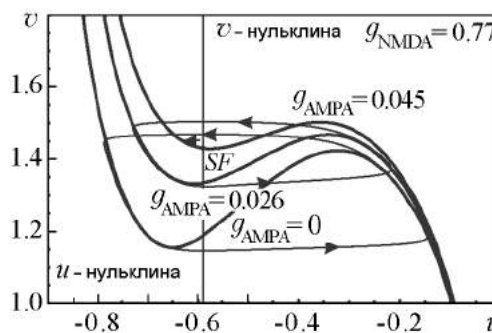


Рис. 5. Эволюция фазовой плоскости при изменении проводимости AMPA-рецепторов (верхний предельный цикл ( $g_{\text{AMPA}} = 0.026$ ) соответствует максимальной частоте генерации при одновременном действии синаптических токов)

## Обсуждение

В этой статье мы рассмотрели одновременное воздействие AMPA и NMDA синаптических токов на модель дофаминергического нейрона. Эти возбуждающие синаптические токи, которые в большинстве случаев активируются одновременно, оказывают на нейронную модель с дифференциацией отклика противоположные действия: NMDA-тока вызывает грубые высокочастотные колебания с ростом частоты в четыре и более раз, а AMPA-ток подавляет его активность при относительно малых значениях проводимости AMPA-рецепторов. Проведенное исследование показало, что конкуренция динамических механизмов этих воздействий может приводить не только к достаточно очевидным динамическим режимам: подавлению колебаний, низко- или высокочастотной активности, но также к весьма интересному результа-

ту – возможности при ко-активации AMPA-тока повышения на 20% максимальной частоты по сравнению с максимально достижимой частотой генерации спайков при действии только NMDA-тока. Таким образом, было установлено, что (в рамках модели (1)) основной вклад в рост частоты дает NMDA-ток (примерно пятикратный рост частоты), а AMPA-ток может способствовать дальнейшему увеличению частоты еще примерно на 20%. Динамический механизм такого увеличения был показан с помощью эволюции фазовой плоскости модели (1).

С биологической точки зрения, получен несомненно важный результат, поскольку это может, например, снять существующее в настоящее время противоречие в экспериментальных результатах, касающихся влияния AMPA-тока на активность дофаминергических нейронов. Так, например в эксперименте [17] было показано, что ко-активация AMPA-тока приводит к увеличению частоты генерации, а в [8] – что она приводит к ее снижению. В будущем авторы планируют провести исследования отклика биологически релевантных моделей медленных пейсмейкерных нейронов на одновременное воздействие AMPA и NMDA синаптических токов и надеются на верификацию полученных в рамках данной статьи результатов экспериментальным путем.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН (проект № 0035-2014-0007).*

#### **Библиографический список**

1. *Hajos M., Gartside S.E., Villa A.E., and Sharp T.* Evidence for a repetitive (burst) firing pattern in a sub-population of 5-hydroxytryptamine neurons in the dorsal and median raphe nuclei of the rat // *Neuroscience*. 1995. Vol. 69, № 1. P. 189.
2. *Muntoni A.L., Pillolla G., Melis M., Perra S., Gessa G.L., and Pistis M.* Cannabinoids modulate spontaneous neuronal activity and evoked inhibition of locus coeruleus noradrenergic neurons // *Eur J Neurosci*. 2006. Vol. 23, № 9. P. 2385.
3. *Wilson C.J. and Callaway J.C.* A coupled oscillator model of the dopaminergic neuron of the substantia nigra // *J. Neurophysiol*. 2000. Vol. 83. P. 3084.
4. *Hajos M., Sharp T., Newberry N.R.* Intracellular recordings from burst-firing presumed serotonergic neurones in the rat dorsal raphe nucleus in vivo // *Brain Res*. 1996. Vol. 737, № 1–2. P. 308.
5. *Richards C.D., Shiroyama T. and Kitai S.T.* Electrophysiological and immunocytochemical characteristics of GABA and dopamine neurons in the substantia nigra of the rat // *Neuroscience*. 1997. Vol. 80. P. 545.
6. *Overton P., Clark D.* Burst firing in midbrain dopaminergic neurons // *Brain Res. Reviews*. 1997. Vol. 25. P. 312.
7. *Morikawa H., Khodakhah K., Williams J.* Two intracellular pathways mediate metabotropic glutamate receptor-induced  $Ca^{2+}$  mobilization in dopamine neurons // *J. Neuroscience*. 2003. Vol. 23. P. 149.
8. *Deister C.A., Teagarden M.A., Wilson C.J., Paladini C.A.* An intrinsic neuronal oscillator underlies dopaminergic neuron bursting // *J Neurosci*. 2009. Vol. 29. P. 15888.

9. *Kuznetsov A.S., Kopell N.J., and Wilson C.J.* Transient high-frequency firing in a coupled-oscillator model of the mesencephalic dopaminergic neuron // *J. Neurophysiol.* 2006. Vol. 95. P. 932.
10. *Oster A., Gutkin B.S.* A reduced model of DA neuronal dynamics that displays quiescence, tonic firing and bursting // *J. Physiol. Paris.* 2011. Vol. 105, № 1–3. P. 53.
11. *Ha J., Kuznetsov A.* Interaction of NMDA Receptor and Pacemaking Mechanisms in the Midbrain Dopaminergic Neuron // *PLoS ONE.* 2013. Vol. 8, № 7. e69984.
12. *Zakharov D.G., Kuznetsov A.S.* A differentiation mechanism of neuron response on the excitable external signals // *JEPT Letters.* 2012. Vol. 95, № 11. P. 598.
13. *Zakharov D.G., Kuznetsov A.S.* A minimal model for a slow pacemaking neuron // *Chaos, Solitons & Fractals.* 2012. Vol. 45. P. 640.
14. *Saal D., et al.* Drugs of abuse and stress trigger a common synaptic adaptation in dopamine neurons // *Neuron.* 2003. Vol. 37, № 4. P. 557.
15. *FitzHugh R.* Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane // *Biophysical J.* 1961. Vol. 1. P. 445.
16. *Li Y.-X., Bertram R., and Rinzel J.* Modeling N-methyl-D-aspartate-induced bursting in dopamine neurons // *Neuroscience.* 1996. Vol. 71. P. 397.
17. *Christoffersen C.L., and Meltzer L.T.* Evidence for n-methyl-d-aspartate and ampa subtypes of the glutamate-receptor on substantia-nigra dopamine neurons – possible preferential role for n-methyl-d-aspartate receptors // *Neuroscience.* 1995. Vol. 67, № 2. P. 373.

*Поступила в редакцию*      3.04.2015  
*После доработки*              20.05.2015

## **FEATURE OF SIMULTANEOUS INFLUENCE OF EXCITATORY SYNAPTIC CURRENTS ON A NEURON WITH DIFFERENTIAL RESPONSES**

*D.G. Zakharov<sup>1</sup>, D.V. Kasatkin<sup>1</sup>, S.Yu. Kirillov<sup>1</sup>, and A.S. Kuznetsov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Department of Nonlinear Dynamics, Institute of applied physics, RAS

<sup>2</sup> Department of Mathematical Sciences

and Center for Mathematical Modeling and Computational Sciences, IUPUI

The simultaneous influence of excitatory synaptic stimuli (the tonic AMPA and NMDA currents) on the neuron model with response differentiation is studied. It is shown that different types of neuron activity (rest state, low frequency or high frequency firing) are observed depending on the conductance of the AMPA and NMDA receptors. It is found that for the certain parameters values if both types of receptors are activated simultaneously, it is possible to obtain maximal frequency to be approximately 20% greater than that with the NMDA current alone. Thus, we confirm the major role of NMDA receptors in the appearance of high-frequency firing and conclude that AMPAR activation may further significantly increase the frequency. The dynamical mechanism of such frequency growth is explained in the framework of phase plain evolution.

**Keywords:** Neuron, excitatory synaptic current, AMPA, NMDA, response differentiation.



*Захаров Денис Геннадьевич* – родился в Нижнем Новгороде (1976), окончил радиофизический факультет Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (1999). С 1997 года работает в Институте прикладной физики РАН. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по направлению радиофизика (2005). Область научных интересов – теория нелинейных колебаний и волн, нелинейная динамика, нейродинамика. Имеет более 50 научных публикаций.

603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46  
ИПФ РАН  
E-mail: zakharov@neuron.appl.sci-nnov.ru



*Касаткин Дмитрий Владимирович* – родился в Нижнем Новгороде (1978), окончил радиофизический факультет Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (2001). С 2002 года работает в Институте прикладной физики РАН. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (2004, ННГУ). Область научных интересов – теория нелинейных колебаний и волн, динамический хаос, нейродинамика. Имеет более 50 научных публикаций по указанным направлениям.

603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46  
ИПФ РАН  
E-mail: kasatkin@neuron.appl.sci-nnov.ru



*Кириллов Сергей Юрьевич* – родился в Нижнем Новгороде (1986), окончил радиофизический факультет Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (2009). С 2008 года работает в Институте прикладной физики РАН. Область научных интересов – нелинейная динамика, нейродинамика, теория бифуркаций, параметрические и автоколебательные системы, нелинейные волны в активных средах. Имеет более 15 научных публикаций по указанным направлениям.

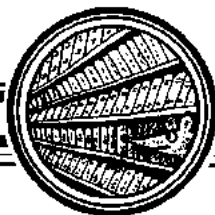
603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46  
ИПФ РАН  
E-mail: skirillov@neuron.appl.sci-nnov.ru



*Кузнецов Алексей Сергеевич* – родился в Нижнем Новгороде (1973), окончил радиофизический факультет Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (1996), защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (1999). С 1993 по 2003 работал в Институте прикладной физики РАН. В настоящее время является профессором в Университете Индианаполиса (США). Область научных интересов – междисциплинарные исследования, объединяющие экспериментальную и теоретическую биологию с математическим и статистическим моделированием. Имеет более 60 научных публикаций.

402 N. Blackford St., Indianapolis, IN 46202, USA  
Department of Mathematical Sciences and Center for Mathematical Modeling  
and Computational Sciences, IUPUI  
E-mail: alexey@math.iupui.edu





УДК 004; 007; 123.1; 124; 159.9; 316.4; 577.22 (072)  
ББК 87; 88.37; 88.4; 60.5; 22.18; 32.973

Серия: «Научная мысль»

## ОСМЫСЛЕННАЯ НАУЧНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

Диссертанту – о жизни знаний, защищаемых в форме положений

Э. А. Соснин, Б. Н. Пойзнер

© Соснин Э.А., Пойзнер Б.Н., 2015  
М.: РИОР: ИНФА-М, 2015. 148 с.  
ISBN 978-5-369-01430-1 (РИОР)  
ISBN 978-5-16-010841-4 (ИНФА-М, print)  
ISBN 978-5-16-102901-5 (ИНФА-М, online)

Как появляются научные знания? Как разоблачают шарлатанов? Всякая ли теория научная? Чем новации отличаются от инновации? Как определить «возраст» направления НИР? Авторы выделили ситуации, где не соблюдается критерий истинности знания, причём эти нарушения неизбежны, социокультурно обусловлены, но преодолимы метасистемными переходами. В этом контексте рассмотрены ошибки диссертантов при составлении научных положений и их анализе. На десятках примеров раскрыты принципы корректного формулирования защищаемых положений и их оценок.

Для магистрантов, аспирантов, соискателей ученой степени в области естественных наук, членов диссертационных советов.

Под редакцией *А.В. Войцеховского*, д.ф.-м.н., профессора

Рецензенты: *Анкин В.М.*, д.ф.-м.н., профессор; *Рыжов В.П.*, д.ф.-м.н., профессор

## Оглавление

### Предисловие

### Глава 1. Общие сведения об оценке результатов научной работы

1.1. Трудности с целью и задачами. 1.2. Трудности с методами и моделями исследований. 1.3. Трудности с определением научной ценности полученных результатов.

*Упражнения к главе 1*

### Глава 2. Эволюция критерия истинности научного знания

*Упражнения к главе 2*

### **Глава 3. Рождение и юность знаний: от новации к инновации**

3.1. Зачем знать о генезисе знания? 3.2. Получение знания – частный случай целенаправленной деятельности. 3.3. Наш лозунг: от репликатора 1-го рода – к репликатору 2-го рода! 3.4. Четыре уровня новаций.

*Упражнения к главе 3*

### **Глава 4. Жизнь знаний: к оценке своевременности результатов НИР**

4.1. Жизнь системы по получению знаний в зеркале S-образной кривой. 4.2. Опыт типологии исследовательских ошибок. 4.3. Как определить своевременность результатов своей НИР.

### **Глава 5. Старение знаний: роль побочных продуктов в НИР**

5.1. Теория научных революций Куна через призму теории целенаправленных систем Корогодина. 5.2. Сценарии «омоложения» нормальной науки.

*Упражнения к главе 5*

### **Глава 6. Как диссертанту построить грамотное положение, выносимое на защиту**

6.1. Защищаемое положение как высказывание в канонической форме. 6.2. Высказывание научное versus высказывание техническое. 6.3. Достоверно ли ваше НПВЗ? 6.4. Новы ли ваши НПВЗ и другие результаты? 6.5. Какова научная ценность или практическая значимость ваших НПВЗ и других результатов? 6.6. Ориентировочный порядок изложения материала в диссертации.

*Упражнения к главе 6*

### **Глава 7. Дюжина терминов, полезных для рефлексии над своей НИР и в научной полемике**

7.1. Идеалы научности. 7.2. Как возможно саморегулирование и самоочищение в науке? 7.3. Человек неустраним из теории, а теория – из опыта. 7.4. Элементы занимательной иерархиологии науки.

### **Заключение, или о принципе «Соинтуиции» С.В. Мейена**

#### **Список литературы**

#### **Указатель имен и эпонимов**

#### **Об авторах**

\* \* \*

## **Глава 2**

### **Эволюция критерия истинности научного знания**

Истина – дочь времени.

*Цицерон*

В чём состоит достоверность и истинность научных результатов?

Как показывает история, критерии истинности научного знания эволюционируют. Необходимо знать, как и почему это происходит, чтобы лучше оценивать свои научные результаты.

Согласно известной максиме<sup>1</sup> философа и теолога Фомы Аквинского (1225–1274), истина – это *adaequatio rei et intellectus*, то есть «соответствие предмета и ума» (Сумма теологии 1, q. 16). Такое понимание истины привело к представлению о соответствии мысленных конструкций субъекта внеположным ему предметам

<sup>1</sup>Максима (от лат. *maxima*, иначе *regula* или *sententia* – основное правило, принцип) – изречение этического характера, правило поведения, каким следует руководствоваться.

и стало мощным импульсом для рационального<sup>2</sup> постижения мира субъектом. Во времена Фомы согласиться с его позицией означало, кроме всего прочего, признать за собой право на поиск истины не только в рамках господствующей религиозной парадигмы, но и в её окрестностях. Таким образом, постулировав, что истинное знание рождается в связке «субъект–объект», Аквинский расширил возможности познавательного акта. Теперь искать истину могли и вполне далёкие от религии и мистики люди, проявляющие любопытство и целенаправленно структурирующие объект, соотнося его со свойствами своего ума.

Рассмотрим познавательный акт как систему целенаправленной деятельности человека, используя методологический аппарат теории целенаправленных систем [3; 40]. В упрощённой форме образ познавательного акта может быть представлен так:

$$[R, S]|^Q P > p \rightarrow [Z], \quad (1)$$

где  $S$  – наличная ситуация,  $Z$  – цель,  $Q$  – операторы достижения цели (методы, схемы, механизмы, машины и т.д.),  $R$  – необходимые для достижения цели ресурсы,  $p$  – вероятность достижения цели.

В такой записи смысл познавательного акта – выявить *информацию*, которая определяет:

- как достичь цели  $Z$ , используя имеющиеся у субъекта  $R, S, Q$ ;
- каким должен быть оператор  $Q$  достижения цели  $Z$  при имеющихся у субъекта  $R, S, Z$ ;
- в какой ситуации  $S$  при наличных  $R, Q$  субъект может достичь цели  $Z$ ;
- какие ресурсы нужны, чтобы при наличных  $S, Q$  субъект мог достичь цели  $Z$ .

Если до познавательного акта вероятность  $p = 0$ , а после него  $p > 0$ , то речь идет об *открытии*, получении фундаментальных знаний. Если же до познавательного акта вероятность получения уже отлична от нуля ( $p = P > 0$ ), а после него стремится к максимуму ( $p \rightarrow 1$ ), то речь идет о получении прикладных знаний.

Согласно этому представлению в самом общем виде вся познавательная творческая деятельность направлена на увеличение вероятности достижения цели  $p$  до максимально возможной в данных условиях величины [40; 41]. Полученная в познавательном акте информация всегда говорит нам о том, как достичь желаемого с определенной вероятностью. Ее истинность именно в этом и проявляется.

Если достигается новая цель  $Z$ , для чего выстраиваются  $R, S, Q$ , то говорят о прямой задаче познания. Критерием истинности полученной информации в этом случае является воспроизводимость целенаправленной системы с достигнутой исследователем вероятностью  $p$ . Обратим внимание на то, что использование понятия «вероятность» в записи системы означает, что некая цель лишь статистически достижима, и это абсолютно гарантировано!

- ☒ Филолог, используя правила словообразования ( $Q_1$ ) и данные о древних языках ( $R_1$ ) может сделать вывод о том, что велика вероятность происхождения некоторого современного слова от слова из древнего языка. Любой желающий может пройти вслед за ним и убедиться, что вероятность этого отлична от нуля, но и не

<sup>2</sup>Рациональный (от лат. *rationalis* – разумный < *ratio* – счет; (деловое) отношение; способ, приём, план; мышление, разум, разумность, сообразность с законами; принцип, теория, система, учение; мнение, взгляд, рассуждение [2, с. 532–533]) – разумно обоснованный, целесообразный.

равна единице, то есть не абсолютна. Несколько человека, повторивших рассуждения филолога, тем самым *статистически обеспечивают признание истинности* рассуждения филолога. Но что будет завтра, если при изучении древних языков будут найдены новые слова, которые тоже можно будет интерпретировать как родственные по отношению к анализируемому? Найденная филологом истина обесценится?

- ☒ Поставив цель ( $Z$ ) доказать, что в атмосфере содержится электричество, американский политический деятель и ученый Бенджамин Франклин (1708–1790) запустил в небо воздушного змея на шелковой нити ( $Q_1$ ). Электрический заряд ( $R_1$ ), стекая по нити в лейденскую банку ( $Q_2$ ), заряжал ее и мог быть далее использован для демонстрации в академической среде, в аудитории скептиков<sup>3</sup>. Но и здесь мы вынуждены сделать оговорку: не всякий сможет попасть в область концентрации атмосферных зарядов из-за непредсказуемого направления ветра и т.д. То есть вероятность успеха  $p$  в повторении опыта выше нуля, но нет 100%-й гарантии повторений всех условий опыта. И истинность можно подтвердить лишь статистически. Другого пути нет.

Итак, истинность знания, полученного в отношениях «субъект–объект» в прямой задаче познания, не является абсолютной. Она имеет, условно говоря, *статистическую истинность* для заданных  $R$ ,  $S$ ,  $Z$ .

Кроме того, ситуация  $S$  и ресурсы  $R$ , которыми располагает субъект познания, всё время меняются. Так, один алхимик получает информацию о том, как сделать оператор для производства серебра из галенита (PbS), который рассыпан по местности, где алхимик экспериментирует. В этой местности серебро как примесь галенита позволяет алхимику раз за разом проводить выделение серебра из материала, то есть статистически обосновывать своё изобретение. Но переместимся в другую местность, туда, где галенит не содержит серебра. И тогда найденная алхимиком информация обесценится. С другой стороны, может выясниться, что полученный алхимиком оператор информации может быть использован для выделения примесей серебра из других минералов. Это свойство информации было названо В.И. Корогодиным *полипотентностью*<sup>4</sup> [3, с. 41–42].

В автореферате научной работы статистическая мера истинности содержится в разделе «достоверность результатов». Она связана либо с тем, что ваши результаты в силу полипотентности информации используются для решения самых разных задач («содержание первого защищаемого положения согласуется с возможностью транс-цис-фотоизомеризации, доказанной экспериментально в <указание источника>») или *многokратно применяются по назначению*. То есть достоверность подтверждается:

- ☒ «воспроизведением экспериментальных данных по положению электронных состояний различной молекулярно-орбитальной природы и мультиплетности молекул с отклонением в 5-10%»;
- ☒ «согласием рассчитанных и экспериментальных данных по силам осцилляторов и поляризации электронных переходов, физико-химическим свойствам органических молекул»;
- ☒ «проверенными в ходе многолетних исследований различных классов органических соединений методиками оценки констант скоростей»;

<sup>3</sup>Скептик – человек, относящийся ко всему критически, с недоверием или с крайним сомнением; последователь скептицизма как философского учения. Соискатель, наверное, вспомнит, что слово «скепсис» (др.-гр. σκεψις – рассматривание, размышление) происходит от глагола σκεπτομαι – осматриваться; взирать; обдумывать, взвешивать, обращать внимание. Отсюда позднее Σκερτικοι – скептики, то есть философы, сомневавшиеся во всём, подвергавшие всё критике [17, стб. 1134]). Для последовательного скептицизма характерно сомнение в существовании какого-либо надёжного критерия истины.

<sup>4</sup>От др.-гр. πολυ – много + лат. potentia – мощь, сила; власть.

- ☒ «согласием полученных результатов с данными других научных групп при близких условиях, в том числе по оптимальным условиям <указан процесс>».

В историографии главным критерием достоверности является сопоставление фактического материала, лежащего в основе работ учёных, ставших предметом анализа, с другими источниками. То есть, чем чаще упоминается какое-то историческое событие в исторических материалах, тем выше статистическая мера истинности исторического факта. Поясним сказанное.

- ☒ Итальянский учёный и писатель Умберто Эко (р. 1932), например, обращает внимание на *многократность* упоминания о фантастических существах (аспидах, гидрах, кентаврах, песьеголовцах, центикорах, морских чудищах, горгонах *etc.* [42–46]) в исторических хрониках у античных и средневековых авторов. Здесь именно статистическая мера истинности торжествует – вопреки здравому смыслу. Это должен учитывать историк, изучающий нашу современность, чтобы отделить мифологемы от фактов. Ведь мифологемы – обратим внимание – убеждают исключительно длительностью своего существования, фактом своей давней репликации, высокой частотой появления в общественном сознании современников.

В этой запутанной ситуации истинность информации алхимика может быть снята только при переходе от его локальной системы знания к *метасистеме* (включающей локальную систему как свою часть). В описанном примере такой метасистемой может быть современная кристаллография и геохимия. Мы, читатели, смотрим на алхимика снисходительно, поскольку уже в школе изучали азы химии и немного разбираемся в кристаллах. Поэтому для нас очевидно, что его изобретение является частностью, которая отвечает критерию истинности, только если включить ее в свод известных нам знаний, то есть в метасистему по отношению к алхимическому знанию. А поскольку во времена алхимика такой метасистемы ещё не было, ему приходилось довольствоваться своими локальными требованиями к истинности. Значит, то, что было даже статистически обосновано как истина, может перестать таковой быть, если со временем не будет частью метасистемы знаний.

- ☒ Всем известный закон Ома является лишь простейшим приближением для зависимости тока от разности потенциалов. Когда закон был открыт, не было сомнений в его истинности. Ведь любой мог многократно повторять опыты немецкого физика Георга Симона Ома (1789–1854), регистрируя пропорциональность между плотностью тока и напряженностью электрического поля в металлах. Это обеспечивало истинность полученной информации до тех пор, пока не начали регистрировать величины тока и напряжения в газах (а впоследствии и в полупроводниках). Оказалось, что в природе есть большое количество сред, имеющих нелинейную вольт-амперную характеристику. То есть закон превратился из всеобщей истины в частную и потерял бы свою легитимность совсем, если бы не был включён в состав новой надсистемы закономерностей – в общем случае нелинейных.

С другой стороны, относительность истинности любого знания одновременно является источником новых знаний. Иначе вместо открытий мы всегда имели бы «закрытия» (сошлёмся здесь на пронизательное замечание академика Петра Леонидовича Капицы (1894–1984): «Когда теория совпадает с экспериментом, это уже не открытие, а закрытие»), приближая конец научной деятельности, «закрывая» всё на свете.

Иногда познавательный акт преследует решение *обратной задачи*, в которой при заданной  $Z$  осуществляется реконструкция исходной ситуации  $S$  и (или) оператора  $Q$ , с помощью которого эта ситуация привела к результату  $Z$ , и/или необхо-

димых для этого ресурсов  $R$ . Например, феномен шизофрении, будучи осознанным культурой [47], позволил исследователям поставить целый ряд задач о выявлении механизмов ( $Q$ ), условий ( $S$ ) и ресурсов ( $R$ ) его воспроизводства.

Полученный результат может быть как эмпирическим (механизм, вещество, процесс, оборудование и т. д.), так и теоретическим (понятие, модель и т.д.). И реконструировать по нему  $Z$  можно как опытным путём, так и умозрительно. Сочетания опыта и умозрения являются определяющими для соответствия или несоответствия результата решения познавательной задачи критерию истины. Чаще всего обращают внимание на следующие виды реконструкций.

**1. Теоретическая реконструкция по умозрительному результату.** Есть стандартная научная проблема идентификации базовых положений и аксиоматики<sup>5</sup> какой-либо теории или граничных и начальных условий какой-либо модели. Строгий критерий истинности знания в этой реконструкции предполагает обязательную обратимость хода логических механизмов. Иными словами, выводы теории (или расчёты модели) должны находиться в однозначном соответствии с первоначальными посылками и аксиоматикой. Критерий этот «злостно» нарушается.

- ☒ В теории фракталов имеются стандартные процедуры построения соответствующих математических объектов – фигур Коха, деревьев Кейли и т.д., размерность которых вычисляется из способа построения. А вот обратная задача по определению размерности уже имеющегося в наличии фрактала не решается строго математически, и предпочтение отдается эксперименту! [48]

Вообще почти вся современная нелинейная математика не обещает обратимости от результата к начальным условиям за исключением некоторых простых случаев, то есть не отвечает строгому критерию самоидентичности логической информационной системы. С другой стороны, ряд реконструкций указанного типа *в области гуманитарных наук* традиционно не предполагают строгости, хотя и вызывают постоянную их критику. Это, в частности, хорошо известные задачи о происхождении идей (мифов, концепций и т.д.) от других идей.

- ☒ Ещё пример: один философ, отталкиваясь от рассуждений другого, создаёт собственный вариант логической теории. Если бы критерий истинности знания выполнялся, то порождение одной теорией другой стало бы невозможным.

**2. Опытная реконструкция по эмпирическому результату** – это типичная задача количественной науки. Критерием истины добытых знаний здесь служит возможность их употребления для построения эмпирическим образом объекта во многом, хотя и не полностью, идентичного  $Z$ . Такая задача решается, например, технологами фирм, которые по готовым продуктам фирм-конкурентов пытаются воспроизвести технологию, необходимую для их изготовления. В этом же смысле даже некоторые рецепты алхимиков отличает типично научное звучание [49].

Рассмотренные типы реконструкций таковы, что в контексте теории или опытной процедуры хорошо заметны сомнительные элементы и слабые звенья. Строгость сосредоточена не в глобальных, а элементарных процедурах, которые никоим образом не должны нарушаться, отсюда элементарные ремарки, служащие критерию истины: эмпирическое «нельзя проткнуть пальцем стену» или теоретическое «нельзя делить на ноль».

<sup>5</sup> Аксиома (от др.-гр. ἀξίωμα – достоинство, почёт, уважение; требование, желание, воля, решение; положение, не требующее доказательств < ἀξιός – достойный, стоящий чего-либо [17, стб. 143]) – положение, принимаемое без доказательств в качестве исходного для данной теории; неоспоримая истина.

Но есть еще два типа реконструкций, где эти внутренние запреты опустошаются, откуда происходит большая доля приходящихся на них спекуляций.

**3. Опытная реконструкция по умозрительной идее.** Здесь соблюдение критерия истины требует доказательства соответствия возможностей, предрекаемых теорией, эмпирической практике. Здесь велик риск неудачной реконструкции, риск нарушения критерия истины, поскольку никогда достоверно нельзя знать, обретёт ли идея плоть. Нам, например, удался ядерный проект, однако о реализации идеи термоядерной энергетики говорить весьма сложно. Хотя в силу свойства полипотентности выявленная в ходе исследований возможностей получения управляемого термоядерного синтеза (УТС) информация пригодилась для решения других задач, и можно смело говорить о том, что она оказалась частью нескольких метасистем знаний, которые «принесли колоссальную выгоду. В космосе летают плазменные двигатели, впервые разработанные в Курчатовском институте, плазменные технологии, развитые в процессе работ по УТС, проникли в промышленность, медицину и дали импульс развитию смежных областей науки и технологий. Работы по ИТЭР резко подняли экспортный потенциал российских предприятий, реализованный в многочисленных контрактах. В отечественной школе по УТС и физике горячей плазмы выросла плеяда учёных с мировым именем, созданы основы для воспитания нового поколения молодых учёных» [50].

В этом примере мы видим, как критерий истинности научного знания выполняется опосредованно, за пределами предметной сферы, в которой развёртывается первичный познавательный акт.

**4. Теоретическая реконструкция реальных феноменов.** Здесь, как и в предыдущем случае, нарушение критерия истины совсем не гарантирует опознания лженаучного рассуждения и «присуждения ему необходимой меры наказания».

- ☒ Дж.К. Максвелл, работая над моделью электромагнитного поля, мыслил его как набор «шестерёнок». Конечно, электромагнитное поле – отнюдь не шестерёнки, но «понимая условность, вспомогательный характер модели, Максвелл не останавливается ... – модель раскрывает все новые и новые стороны, оборачивается открытием новых захватывающих свойств электромагнетизма, и вряд ли на этом прекрасном фоне стоит искать способ преодоления чисто механического противоречия!» [51, с. 57]. Его теория также служит целям пояснения электромагнитных феноменов за счёт установления соответствий с механической моделью «вихря», снимая отдельные парадоксы безэфирной физики. Аналогичным образом можно относиться к эфиродинамике В.А. Ацюковского [34].

Реконструкции 3 и 4 служат целям открытия перспектив, что и компенсирует недостаток выполнения критерия истинности.

Итак, познавательный акт не может гарантировать знания истинности, поэтому каждый тип реконструкции неявно предполагает дополнительные условия поддержки.

Какие это условия?

Понятно, что формула Фомы Аквинского получила признание в век одиночек, занятых научным познанием. Когда количество учёных в обществе выросло настолько, что произошла институционализация<sup>6</sup> научной деятельности, критерий истинности был дополнен «социальным» пояснением.

<sup>6</sup>Институционализация (от лат. *institutum* – установление, учреждение) – формирование новых социальных институтов, то есть определенных форм организации, регулирования, упорядочения общественной жизни, деятельности и поведения людей.

Отдельный исследователь теперь не может вслед за Фомой Аквинским монополизировать истину, и для признания её таковой необходимы согласованные целенаправленные действия некоего сообщества исследователей, которые осуществляют верификацию, дополнительную классификацию и доводку оригинального (авторского) отношения «субъект–объект». Кроме того, они вырабатывают общий язык и выразительные средства для обсуждения получаемых результатов [52], что усиливает статистическую достоверность истины. Это так называемая «коммуникативная рациональность» [53]. Иными словами, эта рациональность – по совместному соглашению, конвенционально<sup>7</sup> – вырабатывается сообществом исследователей [54] и может иметь разные институциональные формы (научные общества, лаборатории и т.д.).

Однако истину в науке не устанавливают, исходя из презумпции<sup>8</sup> правоты именно большинства. Так принято поступать в массовых движениях (социальных, религиозных, консьюмеристских *etc.*), выражающих те или иные компоненты *массового* сознания. Напротив, важнейшие научные истины открывает некое меньшинство. Оно никак формально не выделено *a priori*<sup>9</sup>, на деле же отличается повышенной креативностью.

При широком распространении научных методов в обществе «коммуникативная рациональность» дополняется ещё одним требованием: средства наблюдений, анализа и измерений должны быть доступны всякому заинтересованному наблюдателю и исследователю для проверки [55]. В культуре Средневековья выполнение этого требования было невозможным. Скажем, перегонный куб и чистые ингредиенты для экспериментов были редкостью, и о масштабной проверке истинности знаний не могло идти речи.

☒ В автореферате научной работы мера коммуникативной истинности результатов «спрятана» в разделах «сведения о внедрении результатов» и «апробация работы». Чем чаще вы внедряете свои результаты, чем чаще вы их докладываете, тем легче вам понять, как принимает ваши результаты сообщество специалистов.

В последние десятилетия всё чаще говорится о том, что наука как целенаправленная деятельность снова трансформируется в так называемую *технонауку*: «Формируется трёхсторонняя связка “наука–технология–бизнес”, которая представляет собой не просто внешнее соединение этих трёх ингредиентов, но качественно новую интегрированную структуру. Порой складывается впечатление, что наука, которая со времён Бэкона и Декарта была призвана направлять процесс совершенствования технологии, ныне меняется с ней ролями. Однако это не так: наука в целом сохраняет свое преобладание над технологией как сферой её приложения. Другое дело, что эволюция системы социальных отношений, в которые включена исследовательская деятельность, меняет идентичность учёного и вызывает значительную трансформацию тех ментальных<sup>10</sup> структур, которые можно назвать образами науки и которые определяют процессы её внутреннего саморегулирования» [56].

<sup>7</sup> Конвенциональный (от лат. *conventionalis* – соответствующий договору < *conventio* – соглашение) – принятый сообществом, отвечающий установленной традиции. Конвенционализм в науке означает, что в основу математических и естественнонаучных теорий кладут – по договоренности между учеными – некоторые соглашения. А их выбор обусловлен логикой целесообразности или даже простого удобства.

<sup>8</sup> Презумпция (от лат. *praesumptum* – брать вперед; наперед принимать; предвкушать; наперед представлять себе; предполагать [2, с. 494]) – предположение, основанное на вероятности; признание факта юридически достоверным, пока не будет доказано обратное.

<sup>9</sup> Априори (лат. *a priori* – из предшествующего) – до (независимого от) опыта.

<sup>10</sup> Ментальный (от лат. *mentalis* – умственный, духовный < *mens* – разум) – относящийся к умствен-



Здесь критерий истинности вновь трансформируется. Теперь истину соотносят не только с личным представлением субъекта и не только с представлениями того или иного сообщества учёных-специалистов. Но ещё – со стандартами управления бизнес-процессами, протоколами применения современных научных инструментов и новыми *метатеориями*, скажем, синергетикой и концепцией технологической сингулярности [57]. Старые истины должны быть вписаны в метасистему или будут отброшены как анахронизмы. С точки зрения кибернетики, здесь ничего нового.

*Метасистемный переход* – переход от системы (или нескольких систем) к над-системе (метасистеме), содержащей как подсистему(ы), так и аппарат управления. Понятие введено В.Ф. Турчиным [58, с. 59], и считается, что любой явно различимый шаг эволюционного развития системы является метасистемным переходом.

Приведём пример того, как необходимо сегодня приводить знания (новые или старые) в соответствие обновлённому критерию истинности. Для этого обратимся к такому конструкту<sup>11</sup>, как архетипы<sup>12</sup> [60].

Согласно К.Г. Юнгу, архетип – это универсальные врождённые психические структуры, распознаваемые в нашем культурном опыте, например, в традициях (семейных и государственных), в мотивах сновидений. Источником этого теоретического конструкта, который получен за счёт выявления Юнгом инвариантов в культуре и поведении, являются представления психологии его времени. Сегодня для верификации истинности архетипов уже отнюдь недостаточно того, что часть психологов разделяют представления Юнга! Необходима дополнительная верификация теории Юнга с помощью какой-либо современной метатеории, например, нейропсихологии, включая современные средства нейропсихологической диагностики (магнитно-резонансная томография; позитронно-эмиссионная томография и т.д.). Далее – несколько «если»:

- i) если появятся исследования, которые покажут, что проявлению того или иного архетипа соответствуют характерные паттерны<sup>13</sup> деятельности нервной системы;
- ii) если на основе (i) возникнут какие-то новые методы нейропсихологической диагностики;
- iii) если методы (ii) найдут применение, то полученная информация будет обладать скорректированной мерой истинности. А без этого в среде технауки Юнг останется анахронизмом.

ным способностям.

<sup>11</sup>Конструкт – понятие, которое «работает» в зоне перехода от практического опыта к теоретическому знанию и обратно, играя роль «перевода». Пример – классификация [66, с. 327]. Конструктом также именуют нечто недоступное непосредственному наблюдению, но выведенное логично на основе наблюдаемых признаков (такова, скажем, идея интеллекта, существование которого подразумевается при объяснении различий в поведении людей) [59, с. 206].

<sup>12</sup>Архетип (от др.-гр. *αρχετυπον* – первообраз, оригинал, подлинник < *αρχη* – начало + *τυπος* – чеканка, отпечаток, изображение [17 стб. 202, 1262] – термин (1919) швейцарского психолога Карла Густава Юнга (1875–1961). Идея архетипа (первообраза) восходит к выражению Аврелия Августина (354–430), христианского богослова и церковного деятеля, но у Юнга она лишена мистического содержания. Архетип толкуется им как определенное образование архаического, то есть древнейшего, характера. Архетип содержит по форме и по смыслу мифологические мотивы [60].

<sup>13</sup>Английское слово *pattern* имеет широкий спектр значений: образец; шаблон; трафарет; модель; (конкретный) набор; конфигурация, (конкретная) комбинация (например, символов); схема; структура; образ; изображение; рисунок; картина; узор; растр; стереотип; копия. В данном контексте – структура, образ.

Повторим: сказанное не отменяет того факта, что во времена Юнга, на том уровне развития культуры и общественных отношений, полученная им информация имела распространение в среде психологов и пациентов, то есть обеспечивала коммуникационную рациональность. Так же и закон Ома в своё время был вкладом в науку и отвечал критерию истинности современников-учёных.

Итак, в силу полипотентности информации [3, с. 42] и статистической обусловленности целенаправленного действия ни при решении прямой, ни обратной задач познания невозможно получить статичный и единый критерий научной истинности.

Ядром любых критериев научной истинности является максима Фомы Аквинского, на основе которой возможен переход к элементарной структуре познавательного акта субъекта как отношениям «субъект–объект».

Коммуникативная рациональность возникает как средство усиления статистической достоверности новой информации, как переход к отношениям «субъекты–объекты» и служит предпосылкой объединения разрозненных знаний в метасистемы знаний.

Настоящее время характеризуется переходом к технаучке, что трансформирует критерии научной истинности [61]. Однако этот важный феномен здесь обсуждать, к сожалению, нет места.

Вероятно, наш читатель уже привык к стилю разговора авторов. И понял, что они меньше всего желают резонёрствовать<sup>14</sup>, поскольку являются такими же исследователями, как читающий эти строки, то есть никогда не свободны от сомнений.

Теперь авторы приглашают его всмотреться в то, как научные знания рождаются, расцветают, живут, стареют, а нередко и умирают, давая место новым. И так – по циклу *ad infinitum*<sup>15</sup>.

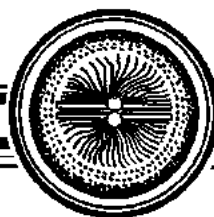
#### Упражнения к главе 2

1. Постарайтесь расписать элементы системы познавательной задачи, которую вы решали или решаете, согласно записи образа познавательного акта (2.1). Определите, прямая это задача или обратная? Если обратная, то какому типу реконструкции она соответствует?

2. Если вы работаете в сложившейся системе научного знания, то подумайте, как можно было бы обеспечить метасистемное согласование существующих знаний с помощью других научных дисциплин (как пример используйте случай с теорией архетипов Юнга).

<sup>14</sup>Резонёрствовать (от фр. *raisonner* – рассуждать, судить, делать заключения; спорить) – пространно и скучно рассуждать о чем-либо в нравоучительном тоне. Резонёр (от фр. *raisonneur*) – литературный персонаж, высказывающий (нравоучительные) суждения с авторской точки зрения; человек, склонный к такого рода разглагольствованиям.

<sup>15</sup>До бесконечности (лат.).



## О «ЖИЗНИ» НАУЧНЫХ ЗНАНИЙ

*В. М. Аникин*

Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

О научном творчестве как системе целенаправленной деятельности и особенностях представления полученного научного знания в форме защищаемого положения.

*Ключевые слова:* Целенаправленная деятельность, диссертация, структура научного положения.

Самая серьёзная потребность есть  
потребность познания истины.

*Гегель*

Новая книга Эдуарда Анатольевича Соснина и Бориса Николаевича Пойзнера «Осмысленная научная деятельность: Диссертанту – о жизни знаний, защищаемых в форме положений» [1] продолжает выпуск книг [2,3] томских авторов, посвящённых методологии, психологии и этике научных исследований с точки зрения физика. Слово сочетание «Осмысленная научная деятельность», вынесенное в заголовок книги, говорит о том, что в данном случае сделан акцент на такой органичной составляющей деятельности ученого, как необходимость рефлексии над собственной научной работой, предъявления обществу «доказательства» своей потребности и умения искать истину». И книгу свою авторы посвящают всем тем, кто «двигаем волей к истине и заботой о ней на стезе научного творчества».

Московские издательства РИОР и ИНФРА-М выпустили книгу в серии «Научная мысль», и по жанру она отнесена к монографиям. По своему содержанию и структуре издание претендует на ранг настольной книги по диссертациознанию и диссертациоведению как для соискателей ученых степеней, так и для научных экспертов. Наличие двух пластов в содержании дает возможность для первой категории читателей получить необходимые знания о корректном (и профессиональном!) представлении научных результатов в форме диссертации, вторая категория читателей найдёт для себя много полезных науковедческих материалов и, более того, познакомится с авторской концепцией формирования знаний и научной деятельности. Цель своего труда авторы видят в том, чтобы «помочь начинающим и продолжающим учёным найти в своей деятельности смысл и форму – такую, чтобы убедительно представить этот смысл научному сообществу, облегчив ему восприятие и понимание».

Из авторского подхода к анализу содержания и методологии научного творчества явно выделяются следующие моменты. В книге развивается концепция познавательного акта как системы целенаправленной деятельности человека, использующей понятия телеологической теории информации В.И. Корогодина и «формулу» целевой деятельности. Эта формула наглядно отражает и связывает периоды «жизни знаний» с категориями цели, оператора действий, ресурсами, побочными продуктами активности системы.

Замысел описать функционирование системы получения нового знания в науке в представлениях теории В.И. Корогодина принадлежит к приоритетам авторов книги (главы 2–5). Они едва ли не единственные среди отечественных представителей естественных наук, кто давно и последовательно использует эту теорию для анализа различных видов творческой деятельности [3]. Так, например, в рамках концепции ими предлагается идея о введении *четырёх уровней новаций*, которая придаёт объективность и проверяемость такой градации для научно-исследовательской работы. Столь же новым и одновременно впечатляющим выглядит предложение оперировать *понятием репликаторов первого и второго рода* при описании перспектив новации в науке или технике. Неожиданным и стимулирующим к дискуссии выглядит тезис: «Настоящее время характеризуется переходом к технаучке, что трансформирует критерии научной истинности» [1, с. 37].

Представленный в главах 2–5 материал отличается высоким уровнем обобщения: многие рассмотренные в книге теории и ситуации (например, теория научных революций Т. Куна в разд. 5.1) представляются частными случаями построенной авторами модели. С этих общих позиций читатель получает возможность взглянуть на *своё личное творчество*, выявить преимущества и недостатки проводимой им конкретной научно-исследовательской работы. Далее, высказанные в книге соображения обладают предсказательными свойствами: руководствуясь ими, можно попытаться *предвидеть*, в какую стадию скоро перейдёт система целенаправленной деятельности, с которой связана научная работа. Следовательно, «пользователь» системы получает возможность, опережая нежелательные события, подготовиться к ним морально, ментально, организационно-тактически. Соответствующие рекомендации по анализу характеристик НИР как системы целенаправленной деятельности сформулированы в выводах разд. 5.2. При проектировании же целей будущей НИР, выборе темы её из нескольких альтернативных, а также методов достижения цели модель целенаправленной деятельности по Соснину–Пойзнеру позволяет получить «подсказки», облегчающие анализ своевременности той или иной НИР, перспективность научного коллектива, в который он собирается войти, и т.д., то есть она обладает и «консультативным потенциалом».

Проводимый анализ исследовательской работы на языке эволюции систем целенаправленной деятельности (главы 2–5) определяет смысловой аспект, который служит для интеграции всех материалов, представленных в книге, для увеличения ее познавательной ценности. А в ней наличествуют признаки не только *монографии*, но и *методического пособия* (об этом говорит лекционный стиль изложения почти всего материала, упражнения в конце глав, богатый выбор литературы для желающих взяться за профессиональное самообразование, «тренинговый» характер первой, шестой, отчасти седьмой глав), *эссе или публицистического текста* (часть седьмой главы и заключение), а также *научно-популярного текста* (в тексте помещены «врезки»-иллюстрации, описания исторических прецедентов, поучительных случаев, биографические данные, глоссы и этимоны).

В первой главе «Общие сведения об оценке результатов научной работы» читатель получает классификацию типичных *трудностей*, возникающих при осознании и формулировании цели и задач, методов и моделей исследований, с определением научной ценности полученных результатов. Попутно приводятся примеры из истории науки и техники, современных диссертаций и даются конкретные рекомендации авторам научных работ.

Во второй главе «Эволюция критерия истинности научного знания» читателю предлагается коллекция примеров и связанная с ней компактная типология исследовательских проблем, основанная, как уже говорилось, на системе целевой деятельности. В последующих главах рассмотрены три фундаментальных периода целевой деятельности: «Рождение и юность знаний: от новации к инновации» (глава 3), «Жизнь знаний: к оценке своевременности результатов НИР (глава 4), «Старение знаний: роль побочных продуктов в НИР» (глава 5).

При вдумчивом прочтении первых 40 страниц читатель, как надеются авторы, сможет диагностировать уровень создаваемых им новаций, оценить степень их своевременности и вероятность совершения типичных ошибок исследователя, определить «возраст» системы деятельности, в составе которой он ведёт НИР, и возможные сценарии её «омоложения». По замыслу авторов, проведение этих действий и означает *осмысленную научную деятельность*, принимающую во внимание закономерности «жизни знаний», о чём и заявляет название книги. Деление глав на более мелкие части и наличие десятков примеров способствует удержанию внимания читателя и усвоению им авторской концепции.

В главе 6 «Как диссертанту построить грамотное положение, выносимое на защиту» авторы кратко раскрывают некоторые жанровые особенности диссертации как научного произведения. На множестве примеров разъясняется, «как надо» и «как не надо» формулировать в диссертациях научные положения, выносимые на защиту, а также их аспектные характеристики: достоверность, новизну, научную ценность, практическую значимость и т.п. (в тактичном соотношении с рекомендациями [4]).

Далее читателю, готовому теперь к корректировке диссертации (если есть в том нужда), предлагается «Дюжина терминов, полезных для рефлексии над своей НИР и в научной полемике» (глава 7). Ему предстоит вернуться к вопросам, отчасти затронутым в первой и второй главах. По существу, продолжается его методологическое обучение. Причём оно ведётся с помощью науковедческой концепции, развитой в главах 2–5, и приведённых в шестой главе норм смыслового оформления результатов диссертации. Исследователю предлагают задуматься над темами, имеющими непосредственное отношение к его творческому участию и к его роли в системе коллективной научной деятельности: «Идеалы научности», «Как возможно саморегулирование и самоочищение в науке?», «Человек неустрашим из теории, а теория – из опыта».

Раздел 7.4 (Элементы занимательной иерархиологии науки) и Заключение (О принципе «соинтуиции» С.В. Мейена) посвящены психологическим и морально-этическим проблемам научной деятельности в наши дни. Обосновывая свою позицию по этим «вечным вопросам», авторы привлекают суждения крупных учёных, мыслителей, деятелей художественной культуры. Собранный здесь материал побуждает читателя к самоопределению, к уточнению задач его интеллектуального развития.

Библиографический список (204 наименования) содержит источники, которые свидетельствуют о плодотворном межуниверситетском сотрудничестве (Томский университет – Саратовский университет) в области методологии представления научных исследований. Из последних работ в этом направлении можно назвать [4] (Б.Н. Пойзнер – рецензент издания, авторитетное мнение которого авторами [4] учтено в полной мере), а также совместные статьи и доклады [5–19].

Книга Э.А. Соснина и Б.Н. Пойзнера «Осмысленная научная деятельность: диссертанту – о жизни знаний, защищаемых в форме положений» заинтересует начинающих исследователей, ибо вооружит их владением науковедческих норм. «Устоявшиеся» же учёные почерпнут из неё новые подходы к анализу деятельности, которая составляет смысл их жизни.

### Библиографический список

1. *Соснин Э.А., Пойзнер Б.Н.* Осмысленная научная деятельность : диссертанту о жизни знаний, защищаемых в форме положений / Под ред. А.В. Войцеховского. М.: РИОР: ИНФРА-М., 2015. 148 с. (Научная мысль). DOI 10.12737/5737.
2. *Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н.* О науке, событиях в истории изучения света, колебаний, волн, об их исследователях, а также глоссы и этимоны / Под ред. А.В. Войцеховского. Томск: Издат. дом Томского ун-та, 2014. 380 с.
3. *Соснин Э.А., Пойзнер Б.Н.* Из небытия в бытие: творчество как целенаправленная деятельность. Томск: STT, 2011. 520 с.
4. *Аникин В.М., Усанов Д.А.* Диссертация в зеркале автореферата. 3 изд., перераб. и доп. М.: ИНФРА-М, 2013. 128 с. (Менеджмент в науке).
5. *Аникин В.М., Пойзнер Б.Н.* Научное руководство аспирантами: «внутренние» и «внешние» регуляторы // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика. 2015. Т. 15, вып. 1. С. 83.
6. *Аникин В.М., Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н.* Диссертанту о воспринимаемости, числовой оценке и защите научных результатов // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2014. Т. 22. № 6. С. 25.
7. *Аникин В.М.* Физика и интеллектуальное саморазвитие личности // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2014. Т. 22, № 4. С. 117.
8. *Аникин В.М., Пойзнер Б.Н.* «Предзащита» диссертации: формальные требования и традиции // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2014. Т. 22, № 2. С. 95.
9. *Аникин В.М., Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н.* Диссертация: характеристики научности // Гетеромагнитная микроэлектроника. 2014. Вып. 16. С. 105. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=22446204>.
10. *Аникин В.М., Пойзнер Б.Н.* Коммуникативная функция автореферата и уровень лингво-дисциплинарной компетенции диссертанта // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика. 2013. Т. 13, вып. 1. С. 80.
11. *Аникин В.М., Пойзнер Б.Н.* Провокация магистранта на вербализацию защищаемого положения как прием когнитивного менеджмента // Вестник Томского

- государственного университета. Философия. Социология. Политология. 2013, № 2. С. 15.
12. *Аникин В.М., Пойзнер Б.Н.* Какова природа интересного, или дефиниции науки и научности – эпистемологический компонент профессиональной компетенции (радио)физика как инженера-исследователя // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56, № 10/3. С. 118.
  13. *Аникин В.М., Пойзнер Б.Н.* Эпистемологические упражнения магистранта: формулировка и оценка научных положений в своей диссертации // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 55, № 8/3. С. 213.
  14. *Аникин В.М., Пойзнер Б.Н.* Как диссертанту аргументировать достоверность научных положений и результатов, выносимых на защиту // Известия высших учебных заведений. Физика. 2011. Т. 54, № 6. С. 105.
  15. *Аникин В.М., Пойзнер Б.Н., Усанов Д.А.* Схема поаспектной характеристики диссертации: правила, рекомендации, примеры // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17, № 3. С. 137.
  16. *Аникин В.М., Усанов Д.А.* Автореферат диссертации: функции, структура, значимость // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика. 2008. Т. 8, вып. 2. С. 61.
  17. *Аникин В.М., Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н.* «Поучительно следить за изменчивыми судьбами научных теорий» // Материалы X международной интернет-конференции «Образование в современном мире». Саратов: ИДПО СГУ, 2–25 марта 2015 г.  
URL: <http://www.sgu.ru/sites/default/files/textdocsfiles/2015/03/04/anikin-izmaylov-royzner.pdf>.
  18. *Аникин В.М., Измайлов И.В., Пойзнер Б.Н.* Критерии научности диссертации // Проблемы оптической физики и биофотоники. SFM–2014: материалы межд. симпозиума Saratov Fall Meeting 2014 «Оптика и биофотоника–II» / Под ред. Г.В. Симоненко, В.В. Тучина. Саратов: Изд-во «Новый ветер», 2014. С. 155.  
URL: <http://optics.sgu.ru/library/pop>.
  19. *Аникин В.М., Пойзнер Б.Н.* Диссертационные авторефераты: коммуникативный аспект // Интеграция науки и практики как механизм развития современного общества: сб. науч. статей / Под ред. проф. Ю.Г. Голуба. Саратов: Изд-во «Саратовский источник», 2013. С. 111.

## References

1. *Sosnin E. A., Poizner B. N.* Osmyslennaya nauchnaya deyatel'nost': Dissertantu o jizni znanii, zaschischaemyh v forme polojenii / Pod red. A.V. Voicehovskogo. M.: RIOR: INFRA-M., 2015. 148 s. (Nauchnaya mysl'). DOI 10.12737/5737. (In Russian).
2. *Izmailov I.V., Poizner B.N.* O nauke, sobytyah v istorii izucheniya sveta, kolebanii, voln, ob ih issledovatelyah, a takje glossy i etimony / Pod red. A.V. Voicehovskogo. Tomsk : Izdat. Dom Tomskogo un-ta, 2014. 380 s. (In Russian).
3. *Sosnin E. A., Poizner B. N.* Iz nebytiya v bytie : tvorchestvo kak celenapravlenneya

- deyatel'nost'. Tomsk : STT, 2011. 520 s. (In Russian).
4. *Anikin V. M., Usanov D. A.* Dissertaciya v zerkale avtoreferata. 3 izd., pererab. i dop. M.: INFRA-M, 2013. 128 s. (Menedjment v nauke). (In Russian).
  5. *Anikin V.M., Poizner B.N.* Nauchnoe rukovodstvo aspirantami: «vnutrennie» i «vneshnie» regulatory // *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya Fizika.* 2015. T. 15, vyp. 1. S. 83. (In Russian).
  6. *Anikin V.M., Izmailov I.V., Poizner B.N.* Dissertantu o vosprinimaemosti, chislovoi ocenke i zaschite nauchnyh rezul'tatov // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenii. Prikladnaya nelineinaya dinamika.* 2014. T. 22. № 6. S. 25. (In Russian).
  7. *Anikin V.M.* Fizika i intellectual'noe samorazvitie lichnosti // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenii. Prikladnaya nelineinaya dinamika.* 2014. T. 22. № 4. S. 117. (In Russian).
  8. *Anikin V.M., Poizner B.N.* «Predzaschita» dissertacii: formal'nye trebovaniya i tradicii // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenii. Prikladnaya nelineinaya dinamika.* 2014. T. 22, № 2. S. 95. (In Russian).
  9. *Anikin V. M., Izmailov I. V., Poizner B. N.* Dissertaciya: harakteristiki nauchnosti // *Geteromagnitnaya mikroelektronika.* 2014. Vyp. 16. S. 105.  
URL : <http://elibrary.ru/item.asp?id=22446204>. (In Russian).
  10. *Anikin V.M., Poizner B.N.* Kommunikativnaya funkciya avtoreferata i uroven' lingvodisciplinarnoi kompetencii dissertanta // *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya Fizika.* 2013. T. 13, vyp. 1. S. 80. (In Russian).
  11. *Anikin V.M., Poizner B.N.* Provokaciya magistranta na verbalizaciyu zaschischaemogo polojeniya kak priem kognitivnogo menedjmenta // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Filosofiya. Sociologiya. Politologiya.* 2013, № 2. S. 15. (In Russian).
  12. *Anikin V.M., Poizner B.N.* Kakova priroda interesnogo, ili definicii nauki i nauchnosti – epistemologicheskii komponent professional'noy kompetencii (radio)fizika kak injenera-issledovatelya // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenii. Fizika.* 2013. T. 56, № 10/3. S. 118.
  13. *Anikin V.M., Poizner B.N.* Epistemologicheskie uprajneniya magistranta: formulirovka i oценка nauchnyh polojenii v svoei dissertacii // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenii. Fizika.* 2013. T. 55, № 8/3. S. 213. (In Russian).
  14. *Anikin V.M., Poizner B.N.* . Kak dissertantu argumentirovat' dostovernost' nauchnyh polojenii i rezultatov, vynosimyh na zaschitu // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenii. Fizika.* 2011. T. 54, № 6. S. 105. (In Russian).
  15. *Anikin V. M., Poizner B .N., Usanov D. A.* Shema poaspektnoi harakteristiki dissertacii: pravila, rekomendacii, primery // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenii. Prikladnaya nelineinaya dinamika.* 2009. T. 17, № 3. S. 137. (In Russian).
  16. *Anikin V. M., Usanov D. A.* Avtoreferat dissertacii: funkcii, struktura, znachimost' // *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya Fizika.* 2008. T. 8, vyp. 2. S. 61. (In Russian).
  17. *Anikin V.M., Izmailov I.V., Poizner B.N.* «Pouchitel'no sledit' za izmenchivymi sud'bami nauchnyh teorii» // *Materialy X mejdunarodnoi Internet-konferencii «Obrazovanie v Sovremennom Mire».* Saratov: IDPO SGU, 2–25 marta 2015 g.



URL: <http://www.sgu.ru/sites/default/files/textdocsfiles/2015/03/04/anikin-izmaylov-poyzner.pdf>. (In Russian).

18. *Anikin V.M., Izmailov I.V., Poizner B.N.* Kriterii nauchnosti dissertacii // Problemy opticheskoi fiziki i biofotoniki. SFM-2014: Materialy mejd. Simpoziuma. Saratov Fall Meeting 2014 «Optika i biofotonika–II» / Pod red. G. V. Simonenko, V. V. Tuchina. Saratov : Izd-vo «Novyi veter», 2014. S. 155.  
URL : <http://optics.sgu.ru/library/pop>. (In Russian).
19. *Anikin V.M., Poizner B.N.*. Dissertacionnye avtoreferaty: kommunikativnyi aspekt // Integraciya nauki i praktiki kak mehanizm razvitiya sovremennogo obshchestva: sb. nauch.statei / Pod red. prof. Yu.G. Goluba. Saratov: Izd-vo «Saratovskii istochnik», 2013. S. 111. (In Russian).

*Поступила в редакцию 3.05.2015*

## ON «THE LIFE» OF SCIENTIFIC KNOWLEDGE

*V. M. Anikin*

Saratov State University

Review of the book «Meaningful scientific activity: On the life of knowledge in the form of scientific propositions» by Eduard A. Sosnin and Boris N. Poizner is given. Scientific work is considered as a system of goal-seeking activity. The construction of scientific propositions is discussed.

*Keywords:* Goal-seeking activity, thesis, structure of scientific propositions.



*Аникин Валерий Михайлович* – родился в Аткарске Саратовской области (1947). Окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1970). Доктор физико-математических наук, профессор, декан физического факультета СГУ, заведующий базовой кафедрой компьютерной физики и метаматериалов физического факультета СГУ в Саратовском филиале Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, ученый секретарь диссертационного совета Д 212.243.01 на базе СГУ, эксперт Министерства образования и науки Российской Федерации. Область научных интересов – математическое моделирование хаотических и стохастических процессов, диссертационное исследование. В числе работ – монография «Аналитические модели детерминированного хаоса» (совместно с А.Ф. Голубенцевым; М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007), методическое пособие «Диссертация в зеркале автореферата» для аспирантов и соискателей ученой степени естественнонаучных специальностей (совместно с Д.А. Усановым; М.: ИНФРА-М, 2013, 2014).

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83  
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского  
E-mail: [AnikinVM@yandex.ru](mailto:AnikinVM@yandex.ru)



## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПОЛЕВЫЕ ЭМИТТЕРЫ ИЗ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК, ГРАФЕНА И ПОЛУПРОВОДНИКОВ\*

### Последние разработки

*Г. Г. Соминский, Т. А. Тумарева*

ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

В статье приведены последние опубликованные в литературе данные о разработке и исследовании перспективных полевых эмиттеров из углеродных нанотрубок, графена и полупроводников. Анализируются возможности получения больших плотностей и токов полевой эмиссии, а также возможности обеспечения долговечной работы эмиттеров в высоковольтных электронных приборах.

*Ключевые слова:* Полевой эмиттер, углеродная нанотрубка, графен, полупроводник, большие токи, технический вакуум, высокая долговечность.

### Введение

Холодные полевые эмиттеры привлекательны для использования во многих электронных устройствах. Однако широкому их применению препятствует невысокая долговечность при отборе больших токов в условиях технического вакуума. В последние годы интерес к полевым эмиттерам существенно возрос в связи с созданием гиротронов и других высоковольтных СВЧ-приборов коротковолнового миллиметрового и терагерцового диапазона. Миниатюрные холодные полевые эмиттеры больше подходят для коротковолновых СВЧ-устройств, чем термокатоды. Но трудности использования полевых эмиттеров в таких приборах усугубляются тем, что при их эксплуатации наряду с высокой долговечностью должны быть обеспечены одновременно большие токи эмиссии, превышающие пороговые значения порядка или более 20...30 мА, необходимые для пуска приборов, а также плотности токов эмиссии свыше 100...300 мА/см<sup>2</sup>, для того чтобы облегчить требования по компрессии электронных потоков, которые в таких приборах имеют малое сечение.

Основные причины выхода из строя полевых эмиттеров в высоковольтных электронных устройствах, работающих в техническом вакууме, – распыление их

\*Статья написана по материалам доклада, прочитанного на XVI Международной зимней школе-семинаре по радиофизике и электронике СВЧ. Саратов, Россия, 2–7 февраля 2015.

поверхности под действием бомбардировки ионами остаточного газа, а также разрушение эмиттеров из-за перегрева эмитирующих электроны структур при отборе больших токов и/или под действием пондеромоторных сил. В России и за рубежом ведется поиск путей создания и использования долговечных и достаточно сильноточных полевых эмиттеров для высоковольтных электронных устройств, работающих в техническом вакууме.

В последние годы наибольшие усилия были направлены на поиск возможностей создания долговечных и эффективных эмиттеров из углеродных и/или содержащих углерод материалов. История исследования эмиттеров из углеродных материалов изложена, например, в [1–8]. Созданные к настоящему времени полевые эмиттеры из углеродных нанотрубок (УНТ) и графена, могут быть перспективны для эксплуатации в высоковольтных электронных (в том числе СВЧ) приборах. Ведутся и работы, нацеленные на создание полевых эмиттеров из полупроводниковых материалов.

В статье проведен анализ последних опубликованных в литературе данных по созданию и исследованию полевых эмиттеров из углеродных нанотрубок, графена и полупроводников, перспективных для использования в высоковольтных электронных устройствах.

## 1. Эмиттеры на основе углеродных нанотрубок

Принято считать, что эмиттеры, приготовленные из УНТ, весьма привлекательны для практического использования. Были потрачены большие усилия на разработку технологий создания таких эмиттеров и на их исследование.

Для получения больших токов, как правило, используются распределенные структуры УНТ макроскопических размеров. УНТ достаточно прочны и термостойки, имеют высокую электропроводность, что важно при отборе больших токов. Однако для получения больших токов важно также обеспечить хороший их электрический и тепловой контакт с подложкой. Ранее были исследованы возможности обеспечения контакта УНТ преимущественно с полупроводниковыми подложками. Формирование покрытий из УНТ на металлических подложках, имеющих существенно большую проводимость и более стойких к нагреву, изучено меньше. Один из способов обеспечения качественного контакта УНТ с медной подложкой описан авторами [9]. Они исследовали закономерности формирования и функционирования хаотически ориентированных УНТ на такой подложке. Разработанная ими эмиссионная структура включала примыкающий к меди барьерный слой из титана и нанесенный поверх титана тонкий (5...10 нм) слой катализатора из никеля. Рост УНТ осуществлялся с использованием хорошо отработанного ранее метода термического chemical vapor deposition (CVD) при температуре 973 К, вполне применимого к использованной термостойкой системе. На рис. 1 из [9] показаны изображения созданной структуры, полученные с помощью растрового электронного микроскопа. Испытания эмиттеров проводились в непрерывном режиме, а также при подаче напряжения, синусоидально меняющегося во времени с частотой 400 Гц. В непрерывном режиме эмиттер разрушался, как считают авторы, под действием ионной бомбардировки. Поэтому основные измерения проведены в «импульсном» режиме.

В выполненных позднее исследованиях [10] была сделана попытка получить большие токи полевой эмиссии со структуры УНТ, выращенной на медной подложке

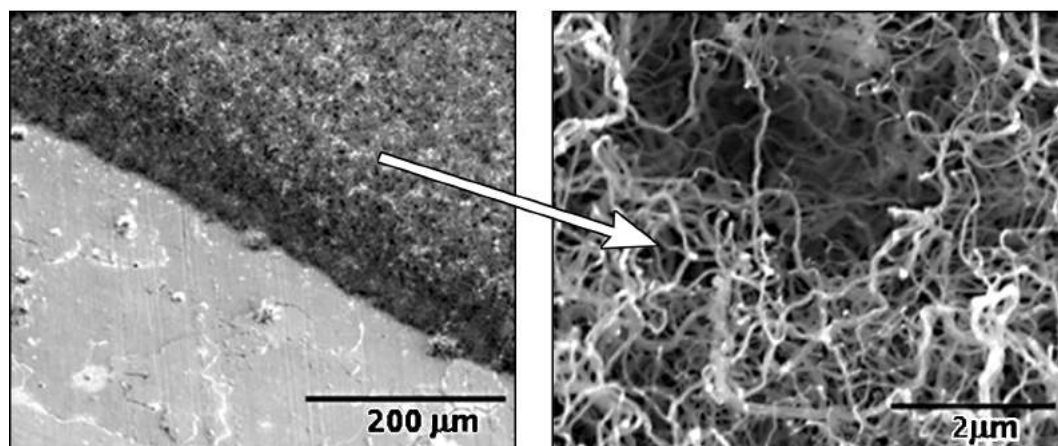


Рис. 1. Полученные с помощью растрового электронного микроскопа изображения хаотически ориентированных УНТ [9]

по технологии, предложенной в [9]. Авторами [10] реализовано оригинальное решение, позволяющее увеличить отбираемые токи с площадки фиксированного размера. Структуры УНТ формировалась на подложках из меди площадью  $1 \text{ мм}^2$ . В подложках перед нанесением покрытия из УНТ создавалась упорядоченная структура одинаковых отверстий диаметром  $120 \text{ мкм}$ . Были измерены эмиссионные характеристики катодов с разным количеством отверстий (4, 9, 16). Наблюдения, выполненные с помощью растрового электронного микроскопа, свидетельствовали, что на таких подложках углеродные нанотрубки растут не только на плоской поверхности пластины, но и на части внутренней поверхности отверстий. В результате увеличивается эффективная эмитирующая поверхность катода при неизменном его сечении. Поэтому с ростом числа отверстий растет по сравнению с эмиттером без отверстий ток эмиссии, который можно отобрать с катода при фиксированном значении анодного напряжения. В импульсном режиме с созданных катодов удавалось получать плотности тока полевой эмиссии до  $270 \text{ мА/см}^2$ . Понятно, что создание катодов большей площади может привести к росту тока эмиссии, но, видимо, без увеличения его плотности.

Выполненные измерения свидетельствовали, что все созданные структуры в импульсном режиме достаточно стабильно работают в течение 10 часов при давлении остаточного газа порядка  $10^{-7}$  Торр. Однако это не дает достаточных оснований считать, что эмиттеры такого типа можно использовать в высоковольтных СВЧ-приборах, работающих в техническом вакууме. Дело в том, во-первых, что испытания на стабильность работы выполнены при сравнительно малых плотностях тока – порядка или менее  $50 \text{ мА/см}^2$ . Кроме того, анодные напряжения в этих испытаниях не превышали приблизительно  $2000 \text{ В}$ . Учитывая, что ионное распыление катодов ускоряется с ростом их энергии, а влияние тепловых эффектов на функционирование катодов усиливается с ростом плотности тока эмиссии, испытания на долговечность следовало бы проводить при больших напряжениях и плотностях тока эмиссии.

Работы [9, 10] привлекают к себе внимание, в основном, тем, что используют довольно простые технологии создания эмиттеров. Однако имеет смысл оценить возможности и других технологий. Как свидетельствуют исследования, выполненные, например, в работах [11, 12], существенного увеличения токов и плотностей токов

полевой эмиссии можно добиться, используя разного рода упорядоченные структуры УНТ, создаваемые с применением более сложных технологий.

Авторами [11] продемонстрирована возможность получения плотностей тока полевой эмиссии ориентировочно до  $1.5 \text{ A/cm}^2$ . На стеклянной подложке со слоем молибдена на поверхности с помощью фотолитографии «строилась» упорядоченная структура гексагональных ячеек. На эту структуру наносились катализаторы (алюминий и железо), а затем на ребрах металлической структуры методом термического CVD выращивались вертикально ориентированные УНТ. Для создания эмиттера требовалось выполнение большого количества операций, которые мы не будем описывать. С ними лучше познакомиться непосредственно в статье. Геометрические характеристики созданной ячеистой структуры поясняет рис. 2 из [11]. Были изготовлены эмиттеры площадью  $4 \times 4 \text{ мм}^2$ . Эмиссионные характеристики созданных эмиттеров измерялись в диоде с расстоянием между катодом и анодом 250 мкм.

Проведенные измерения свидетельствуют, что в связи с большим усилением поля у поверхности нанотрубок, выращенных на ячеистой структуре, в диоде с малым зазором между катодом и анодом ток плотностью  $1.5 \text{ A/cm}^2$  удается отбирать при напряжении порядка 1250 В. Для определения возможностей стабильной работы созданных эмиттеров была измерена зависимость тока полевой эмиссии от времени, показанная на рис. 3 из [11]. Измерения проводились при плотности тока  $\sim 200 \text{ mA/cm}^2$  и постоянном напряжении  $\sim 750 \text{ В}$ . Давление остаточного газа во время испытаний на долговечность в течение примерно 90 часов поддерживалось на уровне  $5 \times 10^{-7}$  мбар, а затем было понижено до  $5 \times 10^{-9}$  мбар и поддерживалось на этом уровне до конца испытаний. Отмеченное сравнительно малое падение тока при высоком давлении авторы объясняют адсорбцией кислорода, повышающей

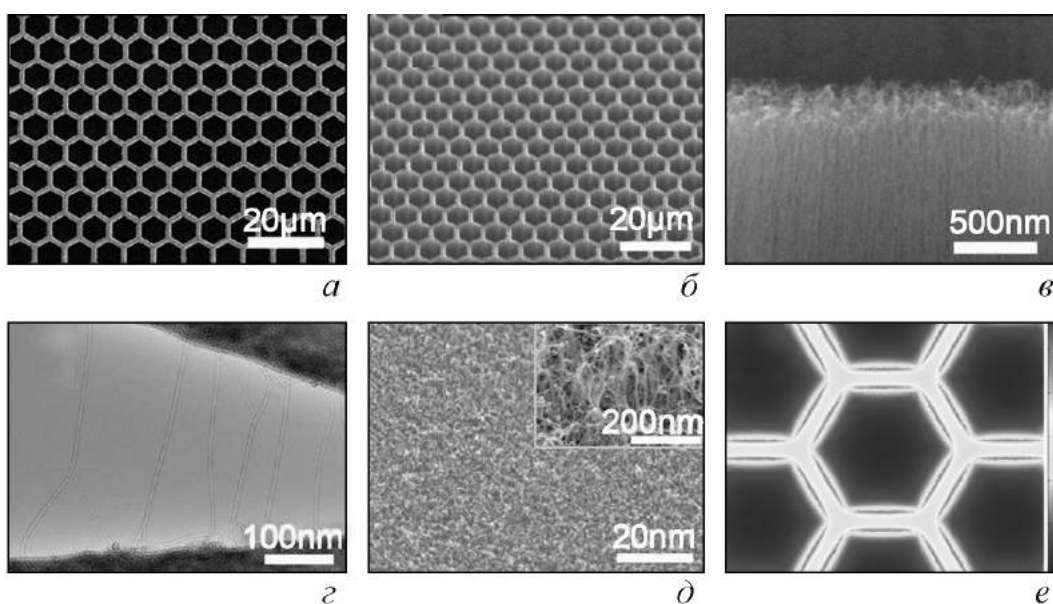


Рис. 2. Изображения, полученные с помощью растрового электронного микроскопа (SEM) и просвечивающего электронного микроскопа (ТЕМ) [11]: *а* и *б* – фронтальное и снятое под углом 45 градусов SEM-изображения сетчатой структуры, соответственно; *в* – вид сбоку на структуру вертикально ориентированных УНТ; *г* – ТЕМ-изображение многослойной УНТ (интервал диаметров 5...15 нм); *д* – SEM-изображение структуры УНТ (вид сверху); *е* – изображение отдельной гексагональной ячейки сетчатой структуры

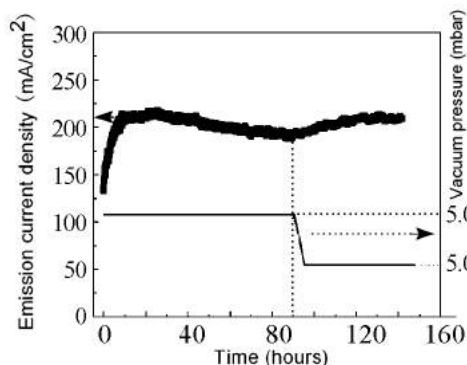


Рис. 3. Зависимости плотности тока эмиссии и давления остаточных газов от времени работы катода [11]

Приведем еще один пример создания с использованием сложных технологий эффективных полевых эмиттеров. Еще в 2007 г. была отработана методика [12] создания однородной хорошо выровненной структуры многослойных УНТ, обеспечивающей получение в импульсном режиме (100 Гц, 10 мкс) рекордно большой по тому времени плотности тока полевой эмиссии  $3.55 \text{ A/cm}^2$  при полном токе более 710 мА с образца площадью порядка  $0.2 \text{ cm}^2$ . В непрерывном режиме с той же структуры получен существенно меньший ток около 15 мА.

Структура включала ячейки квадратного сечения со стороной 3.5 мкм, расположенные таким образом, что расстояние между центрами ячеек составляло 10 мкм. Ячейки заполнены вертикально ориентированными многослойными УНТ приблизительно одинаковой высоты и диаметра. Создание такой структуры производилось в результате многоэтапной обработки многослойной структуры (своеобразного «сэндвича», по терминологии авторов) с использованием метода microwave chemical vapor deposition.

Измерение эмиссионных характеристик созданных катодов проводилось в диоде, в котором расстояние между катодом и анодом было установлено равным 300 мкм. На рис. 4 из [12] приведены полученные в экспериментах характеристики. Для определения возможности стабильной работы катода в импульсном режиме измерена зависимость тока  $I$  от времени  $t$ . Измерения выполнены при токе  $\sim 500 \text{ mA}$  и напря-

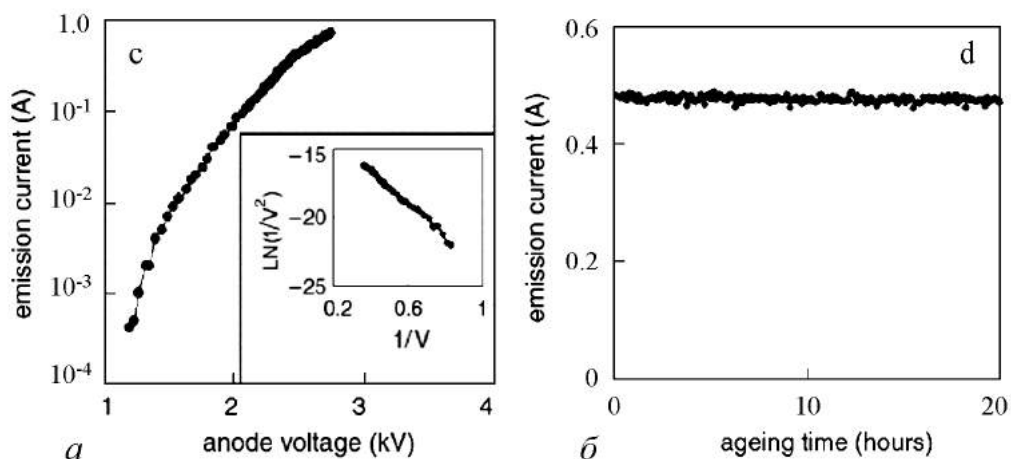


Рис. 4. Эмиссионные характеристики «сэндвич»-катодов [12]: (а) – вольт-амперная характеристика (на врезке соответствующая характеристика Фаулера–Нордгейма), (б) – зависимость тока эмиссии от времени работы катода

жении около 700 В. Давление в приборе в отсутствие электронной бомбардировки анода было равно  $8 \times 10^{-9}$  мбар. Насколько оно увеличивалось во время измерения зависимости  $I(t)$ , из статьи определить трудно. Ток полевой эмиссии практически не менялся в течение 20 часов.

Таким образом, созданные катоды обеспечивали ток эмиссии, достаточный для работы некоторых типов СВЧ-приборов, но, к сожалению, и в данном случае не доказана возможность использования катодов в высоковольтных устройствах, поскольку испытания на долговечность проведены в импульсном режиме с большой скважностью импульсов  $Q = 10^3$  и при слишком малом напряжении. В таких условиях становится пренебрежимо малым разрушение катода под действием ионной бомбардировки не только потому, что испытания выполнены при низких энергиях бомбардирующих катод ионов, но также и по той причине, что невелико время воздействия ионной бомбардировки. При скважности импульсов  $10^3$  за двадцать часов испытаний катод подвергается бомбардировке ионами остаточных газов всего в течение 1.2 мин.

Попытки создания эффективных полевых эмиттеров на основе УНТ не прекращаются до сих пор. Один из последних примеров - работа [13]. Ее авторы в качестве основы эмиттера использовали тонкий графитовый стержень диаметром 0.3 мм. На вершине стержня крепилось с помощью биндера покрытие из УНТ, приготовленных с помощью CVD технологии. Использованный для крепления УНТ биндер удалялся в результате неоднократных прогревов эмиттера, в том числе, в вакууме. Испытания созданных катодов проводились в диоде с расстоянием между анодом и торцом эмиттера, равным 500 мкм. Давление в приборе поддерживалось на уровне  $2 \times 10^{-7}$  Торр.

Площадь эмитирующей поверхности созданного катода мала, по оценкам авторов приблизительно равна  $7 \times 10^{-4}$  см<sup>2</sup>. Использование в качестве основы катода длинного тонкого стержня позволяло обеспечить значительное усиление электрического поля у его поверхности. Максимальный ток полевой эмиссии с созданного катода перед пробоем зазора катод-анод достигал 5.9 мА при «макроскопическом» электрическом поле 4.6 В/мкм. Максимальная плотность тока эмиссии в этом режиме была приблизительно равна 8.5 А/см<sup>2</sup>. Были проведены измерения изменений тока эмиссии во время эксплуатации катода. Эти измерения, выполненные при токе 2 мА и напряжении приблизительно 2300 В, показали, что ток с хорошо прогретого в вакууме катода слабо меняется в течение 100 мин. Однако, как и при рассмотрении других конструкций катодов с УНТ, стабильная работа данного катода при малом напряжении не свидетельствует о возможности долговременной его работы в высоковольтных электронных приборах.

Таким образом, подводя итоги исследования катодов из УНТ, можно сказать следующее.

К настоящему времени разработаны технологии создания источников полевой эмиссии на основе УНТ. Лучшие образцы катодов с УНТ обеспечивают плотности тока полевой эмиссии до 1.5...8.5 А/см<sup>2</sup>. Но, пожалуй, только один тип эмиттеров, изготовленных с использованием так называемой «сэндвич»-технологии, обеспечивает токи, необходимые для некоторых типов высоковольтных СВЧ-приборов. Можно надеяться, что эмиттеры из УНТ после определенной доработки смогут обеспечить необходимые токи. Однако требуется проверка возможности долговечной их работы в высоковольтных электронных приборах, эксплуатируемых в условиях технического вакуума.

## 2. Эмиттеры из графена и содержащих графен материалов

В последние годы активно изучаются возможности создания полевых эмиттеров из графена или с использованием графена. Графен привлекает к себе внимание, так как сочетает ряд прекрасных качеств, в целом подобных углеродным нанотрубкам: он прочен и химически инертен, имеет высокую проводимость, термостоек, листы графена отличаются большим аспектным отношением, так как при малой толщине могут иметь существенно большую протяженность в поперечном направлении.

Как правило, графеновые пленки, которые планируется использовать для полевой эмиссии, располагаются на поверхности проводящей подложки. Интенсивная полевая эмиссия с таких пленок возможна, если обеспечено усиление поля хотя бы на некоторых участках их поверхности. Усиления поля можно достичь, например, если создать выступы на поверхности пленки.

Влияние неоднородностей графеновых пленок на их полевую эмиссию исследовано во многих работах. Так, например, авторами [14] показано, что даже малые неоднородности пленки, обусловленные неровностями подложки, ведут к существенному (иногда в сотни раз) увеличению тока полевой эмиссии.

Значительно большего усиления поля можно достичь, если в достаточной степени использовать характерное для графеновых пленок большое аспектное отношение. Однако для этого требуется ориентировать пленку длинной ее стороной в направлении электрического поля. Авторами [15] были получены покрытия из окисла графена (graphene oxide, GO), состоящие из большого количества хаотически ориентированных малых по толщине лепестков графена. Среди этих лепестков существовали и ориентированные приблизительно перпендикулярно поверхности подложки (рис. 5) и в направлении электрического поля. Графеновое покрытие создавалось с использованием электрофореза. Эта технология позволяла регулировать морфологию поверхности покрытия, меняя время его нанесения, и оптимизировать покрытие с целью достижения максимальных плотностей тока эмиссии. На рис. 6 приведены полученные в [15] вольт-амперные характеристики созданных образцов и соответствующие характеристики Фаулера–Нордгейма. Измерения проводились в плоском диоде с чрезвычайно малым расстоянием, 100 мкм, между катодом и анодом. Поэтому измерения выполнены при напряжениях менее 100 В.

Структуры подобного типа, характеризующиеся большим количеством участков на поверхности покрытия, где заметно усилено поле (центров эмиссии), могут быть созданы не только из моноатомных графеновых лепестков. В работе [16], например, создавались покрытия из тонких пластинок графита размером порядка нескольких микрон. Необходимое усиление поля существовало в данном случае на острых границах пластинок. Авторами [16] в предпробойных режимах получены плотности токов эмиссии около 30 мА/см<sup>2</sup>. Однако есть основания полагать, что при отборе больших токов существовало «газовое усиление», обусловленное ионизацией продуктов, десорбированных с анода под действием электронной бомбардировки. В этом случае ток на анод превышает исходный ток полевой эмиссии.

В последние годы были созданы и исследованы многоострийные структуры с покрытиями из графена и оксида графена. Такие структуры представлялись перспективными для получения большого усиления поля в областях покрытия над остриями подложки. Была изучена работа с тонкопленочными покрытиями (от 1 до 5 моносло-



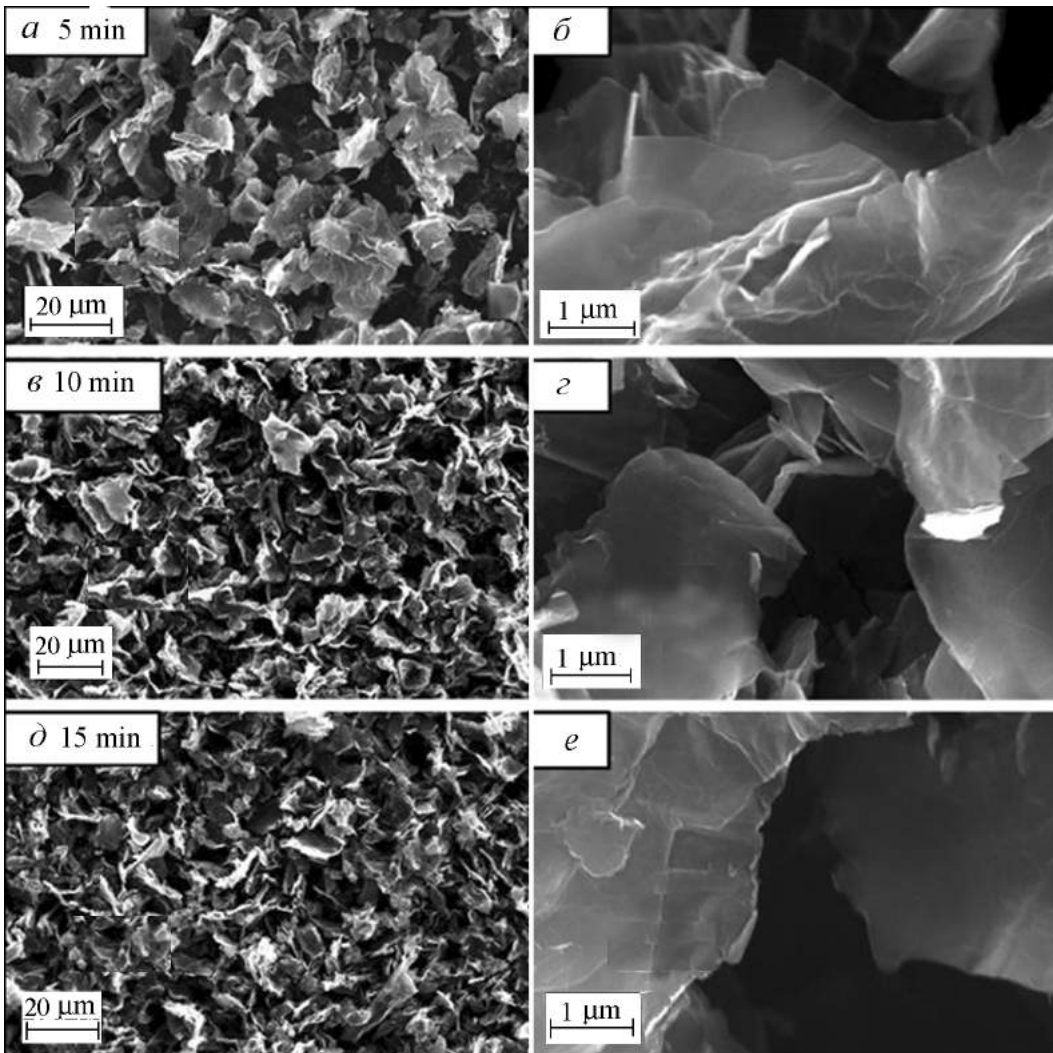


Рис. 5. Полученные с помощью растрового электронного микроскопа изображения графеновых полевых эмиттеров [15]. Приведены изображения эмиттеров, созданных при нанесении покрытий в течение разных интервалов времени: 5 мин. (а, б); 10 мин. (в, з); 15 мин. (д, е). Изображения в левой и правой колонках получены соответственно при увеличениях в 1000 и в 20000 раз

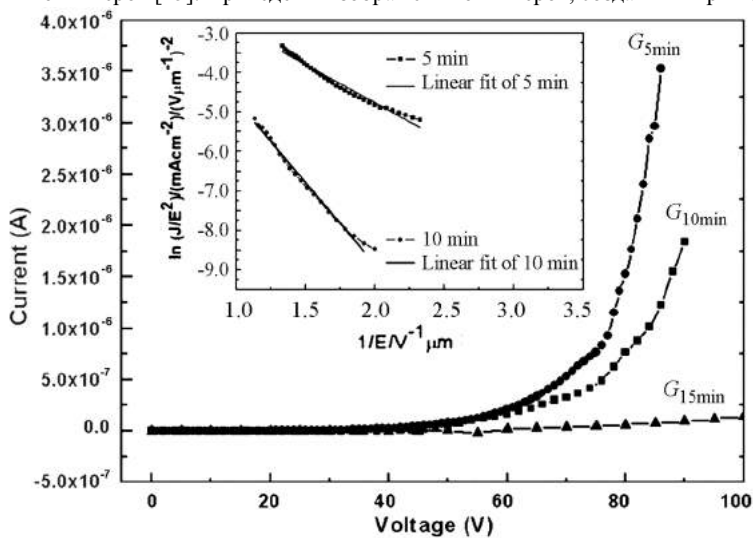


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики и соответствующие характеристики Фаулера–Нордгейма (на врезке), полученные при нанесении графенового покрытия в течение разных интервалов времени (5, 10 и 15 мин.) [15]

ев) многоострийных структур из окиси цинка [17], из никеля [18] и из кремния [19]. На данном этапе такие структуры эксплуатировались при малых отбираемых токах (порядка десятка мкА) и плотностях тока меньше (1...2)  $\text{mA}/\text{cm}^2$ .

Рекордно большие плотности тока полевой эмиссии удалось получить с эмиттеров, приготовленных из так называемой «графеновой бумаги» [20,21]. Характеристики эмиттеров из графеновой бумаги иллюстрируют рис. 7, рис. 8 и рис. 9 [21]. Графеновая бумага представляет собой «пачку» листов графена толщиной примерно 4.25 мкм (см. рис. 7, б). Токи отбираются с торцевой поверхности систем, изготовленных из бумаги. Там слои расщеплены и на них существует значительное усиление поля. Изучена работа трех типов катодов из графеновой бумаги. Один катод, показанный на рис. 7, в, формировал плоский поток электронов шириной около 19 мм. Катод, изображенный на рис. 8, позволял создавать электронный поток

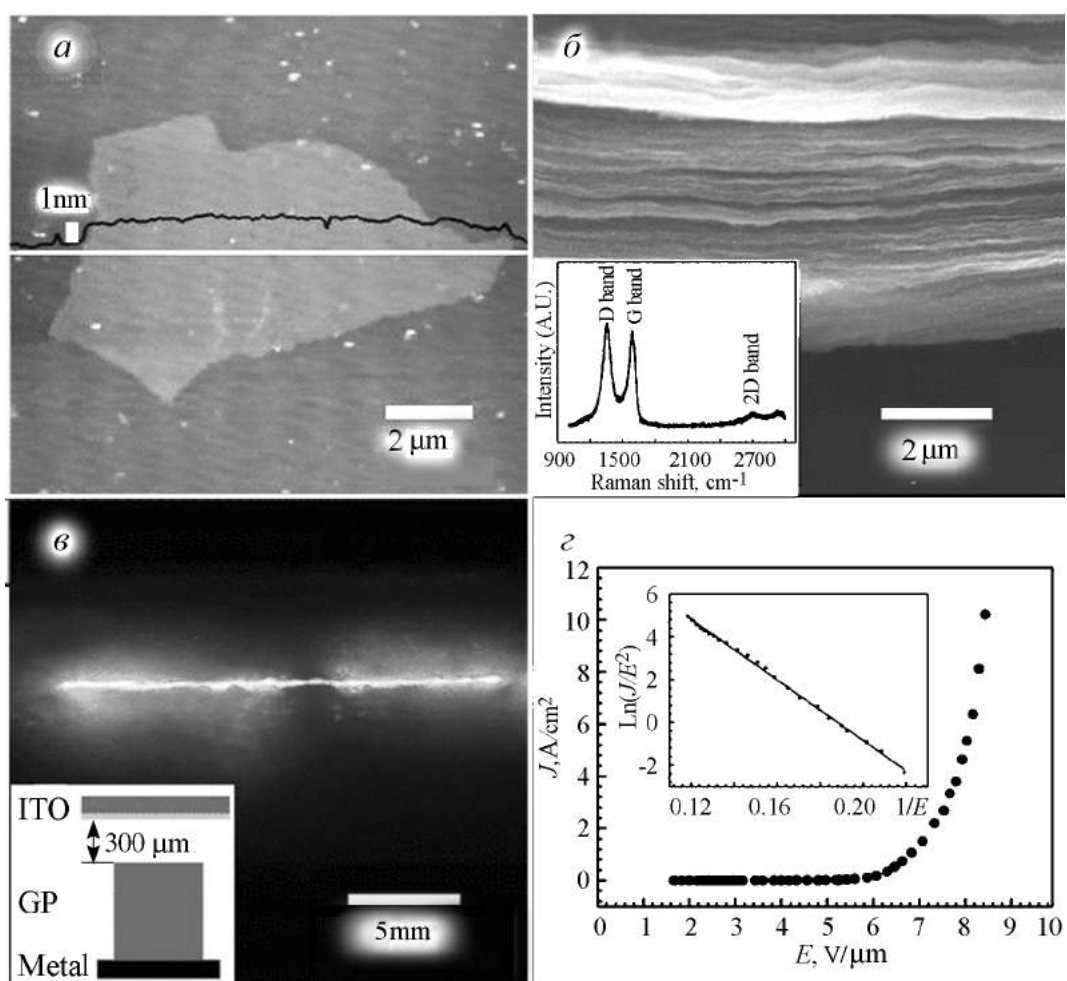


Рис. 7. а – полученное с помощью атомно-силового микроскопа (AFM) изображение листа графена; б – полученное с помощью растрового электронного микроскопа (SEM) изображение «пачки» листов графена, на врезке – рамановский спектр с поверхности созданного эмиттера; в – эмиссионное изображение катода, формирующего плоский поток электронов, на врезке – схематическое изображение системы, использованной для контроля эмиссионных свойств катода; г – зависимость плотности тока эмиссии  $J$  от величины макроскопического поля  $E$  и соответствующая характеристика Фаулера-Нордгейма (на врезке) [21]

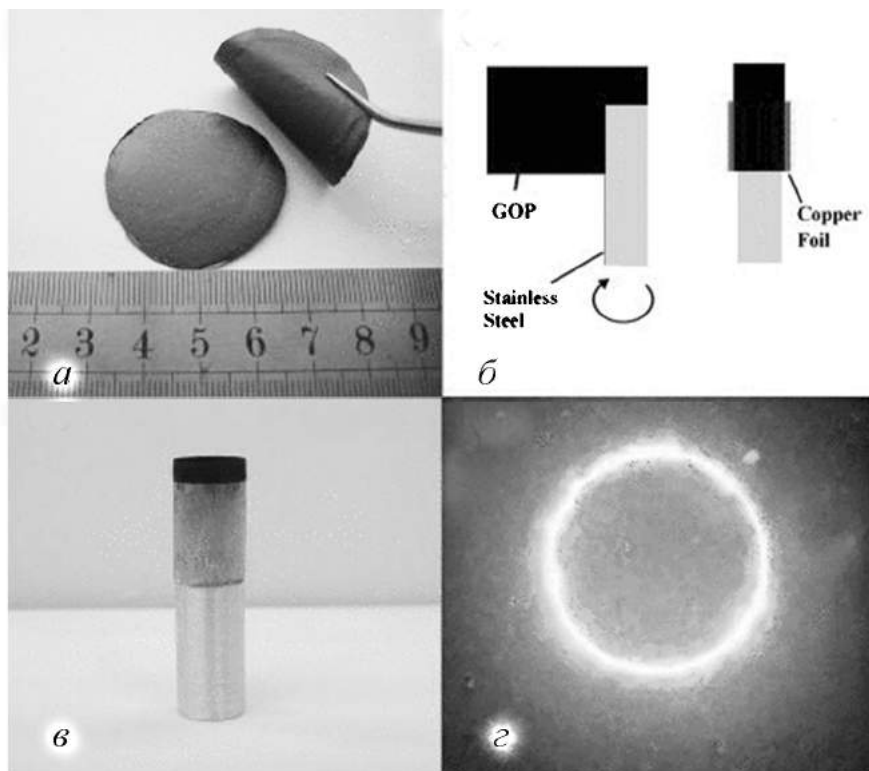


Рис. 8. *a* – изображения использованных листов графеновой бумаги; *б* – схема, поясняющая метод изготовления цилиндрического эмиттера; *в* – фотография цилиндрического эмиттера; *г* – фотография эмиссионного изображения электронного пучка, сформированного катодом, на люминесцентном экране [21]. Диаметр катода 6 мм

кольцевого сечения диаметром 6 мм. С этих катодов в работе [21] были получены плотности токов приблизительно до  $10 \text{ A/cm}^2$ . Нужно отметить, что, несмотря на большие плотности полученных токов, катоды обоих типов обеспечивают сравнительно небольшие по абсолютной величине токи – приблизительно 8 мА, так как имеют малую площадь эмитирующей поверхности. Был испытан в работе и эмиттер небольшого диаметра (около 500 мкм), полученный в результате намотки графеновой бумаги на центральный кварцевый стержень диаметром 100 мкм (см. рис. 9). Максимальная плотность тока эмиссии с этого катода ( $3 \text{ A/cm}^2$ ) была меньше, чем в случае тонкостенных катодов, что неудивительно, так как меньше у этого катода было и усиление поля. Ток эмиссии с этого катода был около 6 мА.

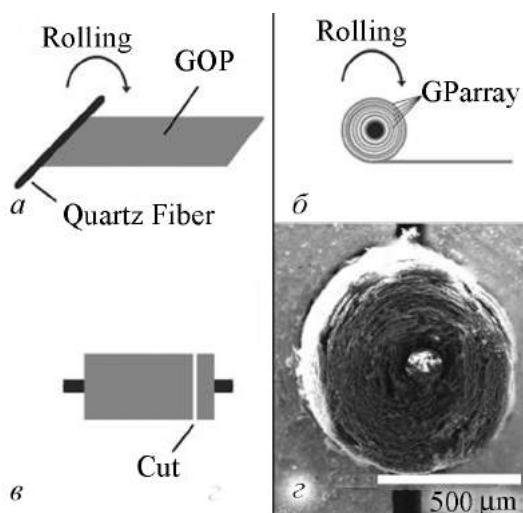


Рис. 9. *a–в* – последовательность операций по изготовлению катода из графеновой бумаги; *г* – полученное с помощью растрового электронного микроскопа изображение графенового катода [21]

В подавляющем числе работ, посвященных исследованию возможностей получения больших токов полевой эмиссии, измерение эмиссионных характеристик созданных образцов проводится в диодах с малым (меньше 500...1000 мкм) зазором между катодом и анодом. Мера эта вынужденная. Действительно, для получения больших токов приходится использовать «распределенные» эмиттеры макроскопических размеров. Если фактор усиления поля для таких катодов невелик, то уменьшение зазора позволяет снизить порог появления полевой эмиссии и получать необходимые токи при умеренных напряжениях. Основные сведения об эмиссионных характеристиках графеновых катодов получены пока при напряжениях, не превышающих 1...3 кВ, и при сравнительно малых плотностях тока эмиссии. Даже в работе [21], где получены рекордные значения плотностей тока полевой эмиссии, около 10 А/см<sup>2</sup>, исследования стабильности функционирования эмиттера выполнены при много меньшей плотности тока эмиссии  $J \sim 100$  мА/см<sup>2</sup>, полном токе меньше 1 мА и напряжении  $U \sim 2700$  В. В этом «щадящем» режиме величина  $J$  уменьшилась за 6 часов всего на 6%. Однако, основываясь на проведенных испытаниях, трудно и в данном случае надежно оценить возможности использования графеновых эмиттеров в высоковольтных электронных приборах. Если предположить, что основными причинами деградации катодов являются ионное их распыление и/или разрушение из-за перегрева, то испытания на долговечность следовало бы выполнять при еще больших напряжениях и плотностях тока.

Катоды из графена имеют большую работу выхода 4.5...4.6 эВ. Уменьшение работы выхода при неизменном факторе усиления поля могло бы позволить существенно увеличить отбираемые с их поверхности токи. Ранее разрабатывались и разрабатываются в настоящее время методы уменьшения работы выхода эмиттеров из углеродных материалов. Авторами данной работы в обзоре [1] проведен анализ методов снижения работы выхода и достигнутых ко времени написания обзора результатов. Поэтому, не останавливаясь на старых данных, коротко опишем достижения последних лет, причем основываясь только на работах, посвященных снижению работы выхода графеновых эмиттеров. Авторами [22] теоретически изучены возможности изменения работы выхода графеновых образований разной формы в результате пассивирования их граней водородом и фтором, а также в результате допирования образцов бором, азотом и фосфором. Пассивация водородом и фтором позволяла снизить работу выхода граней миниатюрных графеновых лепестков приблизительно с 4.5 до 4.0 эВ. Введение в графеновый образец даже малых количеств азота (с концентрацией меньше 3%) вело к заметно большему падению работы выхода графеновых нанообразований (до 3 эВ). Теоретические выводы работы [22] объясняют полученные ранее результаты экспериментальных исследований [23], в которых было обнаружено, что пороги появления полевой эмиссии с допированных азотом графеновых пленок существенно ниже, чем у образцов, не допированных азотом.

Подводя итоги исследования графеновых полевых эмиттеров, можно сказать следующее.

К настоящему времени разработаны технологии создания графеновых пленок и предложен ряд методов активирования графеновых образований. Созданы графеновые эмиттеры, обеспечивающие большие плотности тока полевой эмиссии (ориентировочно до 10 А/см<sup>2</sup>). Однако созданные эмиттеры пока не позволяют получать

достаточно большие токи эмиссии, необходимые для работы даже миниатюрных СВЧ-приборов. К тому же, пока не доказана возможность долговечной эксплуатации таких эмиттеров в высоковольтных электронных приборах при отборе с их поверхности больших по величине токов в условиях технического вакуума. Тем не менее возможности совершенствования графеновых эмиттеров пока не исчерпаны.

### 3. Полупроводниковые полевые эмиттеры

Достижения в исследовании полевых эмиттеров, изготовленных из неорганических полупроводников, обсуждаются в обзоре [24]. Здесь описаны характеристики эмиттеров из окиси цинка (ZnO), из сульфида цинка (ZnS), из оксида вольфрама ( $WO_3$ ), нитрида алюминия (AlN), из карбида кремния (SiC) и из кремния (Si). Основное внимание в обзоре уделено определению порогов появления полевой эмиссии с плотностями тока  $\sim 10$  мкА/см<sup>2</sup>. Измерения выполнены в диодах с малым (порядка десятых долей миллиметра) расстоянием между катодом и анодом и в интервале напряжений, видимо, ограниченном сверху пробоем этого зазора.

Приведенные в [24] немногочисленные данные о работе полупроводниковых эмиттеров при больших плотностях тока  $J$  свидетельствуют, что максимальные значения  $J$  не превышают 0.9...1.2 мА/см<sup>2</sup>, если невелико усиление поля у эмиссионных центров на их поверхности. Так, например, для образца из случайным образом ориентированных нанопоясков ZnS с малым фактором усиления поля наибольшей была плотность тока эмиссии 0.68 мА/см<sup>2</sup>. Создание же упорядоченной структуры нанопоясков ZnS с большим фактором усиления поля 1850 позволяло повысить плотность тока эмиссии до 14.6 мА/см<sup>2</sup>, то есть более 20 раз.

В обзоре [24] содержится сравнительно мало данных об эмиттерах из кремния, несмотря на то, что именно этот материал представляется одним из наиболее освоенных и перспективных, во всяком случае, в микроэлектронике. Приведенные авторами эмиссионные характеристики получены с системы полусферических структур кремниевых нанопроволок, приготовленных с использованием довольно простой технологии термического напыления. Технология не требовала применения каких-либо трафаретов и металлических катализаторов, но созданные структуры обеспечивали (видимо, из-за взаимного экранирования) малое усиление поля  $\sim 424$ . Максимальные плотности тока эмиссии таких структур в диодах с малым (100...120 мкм) расстоянием между катодом и анодом не превышали 0.9 мА/см<sup>2</sup>.

Нам представляется, что для получения больших токов полевой эмиссии лучше подходят упорядоченные многоострийные структуры, обеспечивающие существенно большие усиления поля у поверхности острий, если невелик «эффект экранирования» поля, существующий при излишне малом расстоянии между остриями (см., например, [25–27]).

Как показывает опыт авторов данной статьи, многоострийные кремниевые структуры обладают рядом недостатков, важнейшими из которых являются невысокая их проводимость и малая прочность, а также малая долговечность при отборе больших токов в техническом вакууме. В работе [28] приведены результаты исследования возможностей повышения эксплуатационных характеристик многоострийных кремниевых катодов с помощью специальных покрытий.

Существенно дополняют обзор [24] информацией о получении больших токов полевой эмиссии материалы работ [29,30]. Авторами [29,30] исследовано функционирование эмиттеров из ZnO и SiC. Как следует из [29], нано-игольчатые эмиттеры из окиси цинка способны обеспечить плотности тока полевой эмиссии около  $900 \text{ mA/cm}^2$ . Игольчатые эмиттеры из карбида кремния, согласно данным работы [30], позволяют отбирать токи полевой эмиссии плотностью около  $80 \text{ mA/cm}^2$ .

К сожалению, в работах [29,30] исследованы эмиттеры малой площади. Поэтому невелики были отбираемые с их поверхности полные токи эмиссии. Оценки, сделанные на основании приведенных в [29] данных, свидетельствуют, что с эмиттера из окиси цинка площадью около  $1 \text{ mm}^2$  могут быть получены токи эмиссии порядка  $9 \text{ mA}$ . Полные токи с эмиттера из карбида кремния [30] площадью  $\sim 2.4 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$  не превышали  $200 \text{ mA}$ . Как и в публикациях, цитированных в предыдущих разделах, стабильность работы полупроводниковых эмиттеров исследовалась в диодах при малых напряжениях между катодом и анодом. Так, например, стабильность работы катода из ZnO исследована при напряжении около  $1000 \text{ V}$ . Возможность эксплуатации полупроводниковых катодов в высоковольтных электронных приборах требует проверки.

В последние годы появились работы, посвященные разработке методов создания и исследованию характеристик нано-трубных полевых эмиттеров из двуокиси титана ( $\text{TiO}_2$ ). По мнению авторов [31], нано-трубные эмиттеры из  $\text{TiO}_2$  имеют ряд преимуществ по сравнению, например, с эмиттерами из углеродных нанотрубок. Прежде всего, они могут быть выращены на титановой подложке, а затем окислены. В этом случае гарантированы прочная связь и хороший электрический контакт нанотрубок из двуокиси титана с подложкой, что зачастую трудно обеспечить в случае УНТ. Двуокись титана имеет при комнатной температуре высокую проводимость. Кроме того, работа выхода нанотрубок из двуокиси титана ( $3.9..4.5 \text{ eV}$ ), как правило, меньше, чем у УНТ. Созданные в [31] структуры из двуокиси титана позволили получить плотности тока полевой эмиссии примерно до  $6 \text{ mA/cm}^2$  и стабильно работали при таком токоотборе в течение более  $500$  часов при давлении остаточного газа  $\sim 6.6 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ . К сожалению, в данном случае, как и в рассмотренных ранее, контроль стабильности работы эмиттера проведен в диоде с малым зазором ( $400 \text{ mkm}$ ) между катодом и анодом и при малом напряжении (около  $900 \text{ V}$ ). Поэтому возможность долговечной работы эмиттеров из двуокиси титана в высоковольтных электронных приборах нельзя считать доказанной.

Полезная информация о возможности совершенствования полевых эмиттеров из двуокиси титана позднее получена в работе [32]. Авторы обратили внимание на то, что обычно при создании структур из  $\text{TiO}_2$  в результате электрохимического окисления титана получается система близко расположенных нанотрубок. В результате велико взаимное экранирование трубок, что ведет к уменьшению поля у их поверхности. С другой стороны, было установлено, что выбор электролита и режима окисления влияет на структуру окисленной поверхности. На рис. 10 показаны получаемые структуры. На рис. 10, *a* – структура из плотно расположенных нанотрубок. На рис. 10, *b* и рис. 10, *в* – кластеризованные структуры, отличающиеся большим расстоянием между участками, где максимально усилено поле.

Авторы [32] измерили эмиссионные характеристики нанотрубных структур с разной морфологией поверхности. Измерения выполнены в диоде с расстоя-

нием 150 мкм между катодом и анодом. Катодные образцы имели площадь  $5 \times 5 \text{ мм}^2$ . Давление в приборе поддерживалось на уровне  $5 \sim 10^{-7}$  Торр. В качестве анода использовалась медная сетка с прозрачностью 70%. Использование сетки было мотивировано желанием ускорить удаление из зазора катод-анод газов, десорбированных с анода под действием электронной бомбардировки.

В проведенных измерениях даже оптимальным образом кластеризованные структуры из двуокиси титана обеспечивали сравнительно небольшие плотности тока эмиссии, порядка  $10 \text{ мА/см}^2$  в исследованном интервале анодных напряжений (до  $\sim 1000 \text{ В}$ ), который, видимо, был ограничен пробойными явлениями в диоде с малым зазором между катодом и анодом.

Подводя итоги исследования полупроводниковых полевых эмиттеров, можно сделать следующие выводы.

К настоящему времени разработаны технологии создания полупроводниковых полевых эмиттеров; некоторые из них представляют интерес для использования в высоковольтных электронных приборах. Судя по литературным данным, принципиально могут быть перспективны для таких приложений, например, эмиттеры из оксида цинка и из карбида кремния, которые позволяют получать плотности тока эмиссии более нескольких десятков миллиампер с квадратного сантиметра. Однако пока практически отсутствует информация о работе таких эмиттеров при высоких напряжениях, и необходимы дополнительные исследования возможности их использования. Представляют интерес для указанных приложений и эмиттеры из двуокиси титана. Их отличают сравнительная простота в изготовлении, а также органично присущее им качество: прочная связь и хороший электрический контакт нанотрубных источников эмиссии с подложкой. Но исследования эмиттеров из двуокиси титана находятся пока в начальной стадии и необходимо их продолжение. Как и для эмиттеров, рассмотренных в предыдущих разделах, остается пока открытым вопрос о том, как обеспечить долговечную работу полупроводниковых эмиттеров в техническом вакууме в условиях интенсивной ионной бомбардировки.

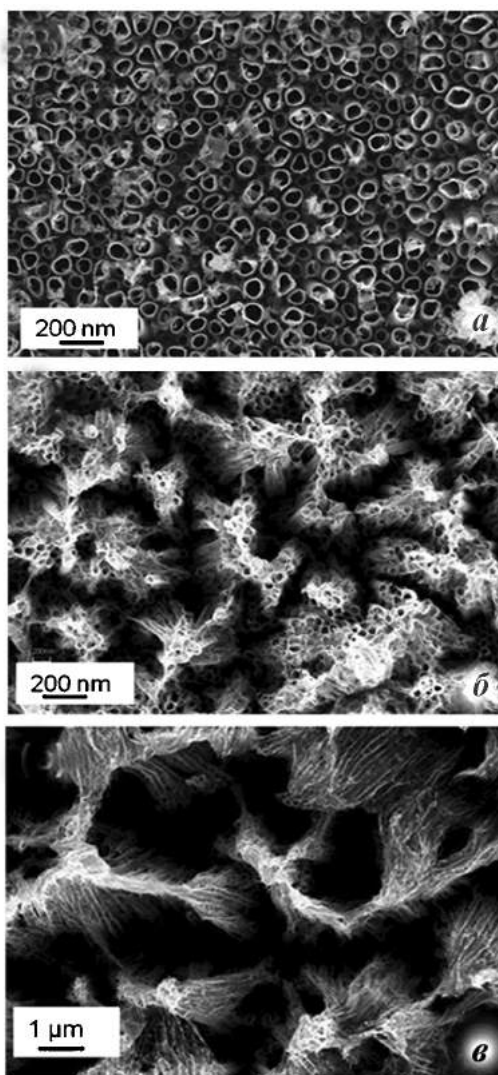


Рис. 10. Полученные с помощью растрового электронного микроскопа изображения поверхности катода из двуокиси титана [31]. *а* – структура из плотно расположенных нанотрубок, *б* и *в* – кластеризованные структуры, отличающиеся большим расстоянием между участками, где усилено поле

## Заключение

Приведенный обзор литературных данных свидетельствует:

- Токковые характеристики лучших полевых эмиттеров из УНТ позволяют их использовать во многих электронных устройствах, в том числе, и в высоковольтных.
- Лучшие полевые эмиттеры из графена перспективны, но пока не обеспечивают достаточно больших полных токов полевой эмиссии.
- Возможность УНТ и графеновых катодов долговечно работать в высоковольтных приборах при отборе больших плотностей токов и в условиях технического вакуума пока вызывает сомнение и требует проверки.
- Изготовление эффективных полевых эмиттеров из УНТ и графена требует использования чрезвычайно сложных технологий.
- Пока не доказана возможность практического использования пролупроводниковых полевых эмиттеров. Однако представляется целесообразным продолжить их исследование. Некоторые из них после определенной доработки могут оказаться конкурентоспособными по сравнению с другими типами эмиттеров.

## Библиографический список

1. *Тумарева Т.А., Соминский Г.Г.* Разработка и совершенствование полевых эмиттеров на основе содержащих углерод материалов // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17, № 3. С. 17.
2. *Егоров Н.В., Шешин Е.П.* Автоэлектронная эмиссия. Принципы и приборы. СПб: Интеллект, 2011. 704 с.
3. *Синицын Н.И., Гуляев Ю.В., Девятков Н.Д. и др.* Углеродные нанокластерные структуры – один из материалов эмиссионной электроники будущего // Радиотехника. 2000, № 2. С. 9.
4. *Шешин Е.П.* Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов. М.: Изд. МФТИ, 2001. 288 с.
5. *Елецкий А.В.* Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства // УФН. 2002. Т. 172. С. 401.
6. *Елецкий А.В.* Холодные полевые эмиттеры на основе углеродных нанотрубок. // УФН. 2010. Т. 180, № 9. С. 897.
7. *Fursey G.N., Novikov D.V., Dyuzhev G.A. et al.* The field emission from carbon nanotubes. //Appl. Surf. Sci. 2003. Vol. 215. P. 135.
8. *Андреев К.В., Григорьев Ю.А., Милютин Д.Д. и др.* Импульсные автоэмиссионные источники электронов на основе углеродных микро и наноструктур для лучевых СВЧ-приборов: численное и экспериментальное исследование. //В сборнике: Материалы 13 зимней школы-семинара по СВЧ электронике и радиофизике (31 января – 5 февраля 2006 г.). Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 2006. С. 64.
9. *Lahiri I., Seelaboyina R., Hwang J.Y., Banerjee R., Choi W.* Enhanced field emission from multi-walled carbon nanotubes grown on pure copper substrate // Carbon. 2010. Vol. 48. P. 1531.



10. *Lahiri I., Wong J., Zhou Z., Choi W.* Ultra-high current density carbon nanotube field emitter structure on three-dimensional micro-channeled copper // *Appl. Phys. Lett.* 2012. Vol. 101. 063110.
11. *Li C., Zhang Y., Mann M., Hasko D., Lei W., Wang B., Chu D., Pribat D., Amaratunga G.A.J., and Milne W.I.* High emission current density, vertically aligned carbon nanotube mesh, field emitter array // *Appl. Phys. Lett.* 2010. Vol. 97. 113107.
12. *Chen Z., Zhang Q., Lan P., Zhu B., Yu T., Cao G. and 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. 265702.
13. *Yuning Sun, Dong Hoon Shin, Ki Nam Yun, Yeon Mo Hwang, Yenan Song, Guillaume Leti, Seok-Gy Jeon, Jung-Il Kim, Yahachi Saito, and Cheol Jin Lee.* Field emission behavior of carbon nanotube field emitters after high temperature thermal annealing // *AIP Advances.* 2014. Vol. 4. 077110.
14. *Pandey S., Rai P., Patole S., Gunes F., won G-D., Yoo J-B., Nikolaev P., and Arepalli S.* Improved electron field emission from morphologically disordered monolayer graphene // *Appl. Phys. Lett.* 2012. Vol. 100. 043104.
15. *Koh A.T., Foong Y.M., Pan L., Sun Z., and Chua D.H.C.* Effective large-area free-standing graphene field emitters by electrophoretic deposition // *Appl. Phys. Lett.* 2012. Vol. 101. 183107.
16. *Song Y., Shin D.H., Song Y-H., Saito Y., and Lee C.J.* High performance field emission properties of graphite nanoplatelet field emitters // *Appl. Phys. Lett.* 2013. Vol. 103. 073112.
17. *Zhicheng Yang, Qing Zhao, Yongxi Ou, Wei Wang, Heng Li, and Dapeng Yua.* Enhanced field emission from large scale uniform monolayer graphene supported by well-aligned ZnO nanowire arrays // *Appl. Phys. Lett.* 2012. Vol. 101. 173107.
18. *Ye D., Moussa S., Ferguson J.D., Baski A.A., and El-Shall M.S.* High efficient electron field emission from graphene oxide sheets supported by nickel nanotip arrays // *NANO Letters.* 2012. Vol. 12. P. 1265.
19. *Devarapalli R.R., Kashid R.V., Deshmukh A.B., Sharma P., Das M.R., More M.A. and Shelke M.V.* High efficiency electron field emission from protruded graphene oxide nanosheets on sharp silicon nanowires // *J. of Materials Chemistry C.* 2013. Vol. 1. P. 5040.
20. *Liu J., Zeng B., Wu Z., Zhu J., and Liu X.* Improved field emission property of graphene paper by plasma treatment // *Appl. Phys. Lett.* 2010. Vol. 97. 033109.
21. *Liu J., Zeng B., Wang W., Li N., Guo J., Fang Y., Deng J., Li J., and Hao C.* Graphen electron cannon: High-current edge emission from aligned graphene sheets // *Appl. Phys. Lett.* 2014. Vol. 104. 023101.
22. *Kvashnin G.G., Sorokin P.B., Bruning J.W. and Chernozatonskii L.A.* The impact of edges and dopants on the work function of graphene nanostructures: The way to high electronic emission from pure carbon medium // *Appl. Phys. Lett.* 2013. Vol. 102. 183112.
23. *Palnitkar U.A., Kashid R.V., More M.A., Joag D.S., Panchakarla L.S., and Rao C.N.R.* Remarkably low turn-on field emission in undoped, nitrogen-doped, and boron-doped graphene // *Appl. Phys. Lett.* 2010. Vol. 97. 063102.

24. Fang X., Bando Y. et al. Inorganic semiconductor nanostructures and their field-emission applications // *J. of Materials Chemistry*. 2008. Vol. 18. P. 509.
25. Гиваргизов Е.И. Управляемый рост нитевидных кристаллов и создание монокристаллических висцерных зондов // *Кристаллография*. 2006. Т. 51, № 5. С. 947.
26. Huang G.S., Wu X.L., Cheng Y.C., et al. Fabrication and field emission property of a Si nanotip array // *Nanotechnology*. 2006. Vol. 17, № 22. P. 5573.
27. Бочаров Г.С., Елецкий А.В. Влияние экранировки на эмиссионные характеристики холодных полевых катодов на основе углеродных нанотрубок // *ЖТФ*. 2005. Т. 75, № 7. С. 126.
28. 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, в печати.
29. Li Y.B., Bando Y., Golberg D. ZnO nanoneedles with tip surface perturbations: Excellent field emitters // *Appl. Phys. Lett.* 2004. Vol. 84, № 18. P. 3603.
30. Wu Z.S., Deng S.Z., et al. Needle-shaped silicon carbide nanowires: Synthesis and field electron emission properties // *Appl. Phys. Lett.* 2002. Vol. 80, № 20. P. 3829.
31. Alivov Y., Klopfer M., and Molloy S. TiO<sub>2</sub> nanotubes as a cold cathode for x-ray generation // *Appl. Phys. Lett.* 2010. Vol. 96. 243502.
32. Alivov Y., Klopfer M., and Molloy S. Enhanced field emission from clustered TiO<sub>2</sub> nanotube arrays // *Appl. Phys. Lett.* 2011. Vol. 99. 063104.

## References

1. Tumareva T.A., Sominski G.G. Development and improvement of field emitters based on carbon-containing materials // *Izvestiya vuzov. Prikladnaya nelineynaya dinamika*. 2009. Vol. 17, № 3. S. 17. (In Russian).
2. Egorov N.V., Sheshin E.P. Field emission. Principles and devices. St. Petersburg: Intellect, 2011. 704 s. (In Russian).
3. Sinitsyn N.I., Gulyaev Yu.V., Devyatkov N.D. et al. Carbon nanocluster structures - one of the materials of emission electronics of the future // *Radiotekhnika*. 2000. № 2. P. 9.
4. Sheshin E.P. Surface structure and field emission properties of carbon materials. M.: Izd. MFTI, 2001, 288 p. (In Russian).
5. Eletskiy A.V. Carbon nanotubes and their emission properties // *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. 2002. Vol. 172. P. 401.
6. Eletskiy A.V. Cold field emitters based on carbon nanotubes // *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. 2010. Vol. 180, № 9. P. 897.
7. Fursey G.N., Novikov D.V., Dyuzhev G.A. et al. The field emission from carbon nanotubes // *Appl. Surf. Sci.* 2003. Vol. 215. P. 135.
8. Andreev K.V., Grigoriev Yu.A., Milyutin D.D. et al. Pulsed field emission sources of electrons based on carbon of micro and nanostructures for beam microwave devices:

- numerical and experimental investigation. // In: Proceedings of 13th Winter School-Seminar on Microwave Electronics and Radiophysics (January 31 – February 5, 2006). Saratov. 2006. Izd. Gos.UNC «Kолledzh». S .64. (In Russian).
9. *Lahiri I., Seelaboyina R., Hwang J.Y., Banerjee R., Choi W.* Enhanced field emission from multi-walled carbon nanotubes grown on pure copper substrate // *Carbon*. 2010. Vol. 48. P. 1531.
  10. *Lahiri I., Wong J., Zhou Z., Choi W.* Ultra-high current density carbon nanotube field emitter structure on three-dimensional micro-channeled copper // *Appl. Phys Lett*. 2012. Vol. 101. 063110.
  11. *Li C., Zhang Y., Mann M., Hasko D., Lei W., Wang B., Chu D., Pribat D., Amaratunga G.A.J., and Milne W.I.* High emission current density, vertically aligned carbon nanotube mesh, field emitter array // *Appl. Phys. Lett*. 2010. Vol. 97. 113107.
  12. *Chen Z., Zhang Q., Lan P., Zhu B., Yu T., Cao G. and 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. 265702.
  13. *Yuning Sun, Dong Hoon Shin, Ki Nam Yun, Yeon Mo Hwang, Yen-an Song, Guillaume Leti, Seok-Gy Jeon, Jung-Il Kim, Yahachi Saito, and Cheol Jin Lee.* Field emission behavior of carbon nanotube field emitters after high temperature thermal annealing // *AIP Advances*. 2014. Vol. 4. 077110.
  14. *Pandey S., Rai P., Patole S, Gunes F., won G-D., Yoo J-B., Nikolaev P., and Arepalli S.* Improved electron field emission from morphologically disordered monolayer graphene // *Appl. Phys. Lett*. 2012. Vol. 100. 043104.
  15. *Koh A.T., Foong Y.M., Pan L., Sun Z., and Chua D.H.C.* Effective large-area free-standing graphene field emitters by electrophoretic deposition // *Appl. Phys. Lett*. 2012. Vol. 101. 183107.
  16. *Song Y., Shin D.H., Song Y-H., Saito Y., and Leel C.J.* High performance field emission properties of graphite nanoplatelet field emitters // *Appl. Phys. Lett*. 2013. Vol. 103. 073112.
  17. *Zhicheng Yang, Qing Zhao, Yongxi Ou, Wei Wang, Heng Li, and Dapeng Yua.* Enhanced field emission from large scale uniform monolayer graphene supported by well-aligned ZnO nanowire arrays // *Appl. Phys. Lett*. 2012. Vol. 101. 173107.
  18. *Ye D., Moussa S., Ferguson J.D., Baski A.A., and El-Shall M.S.* High efficient electron field emission from graphene oxide sheets supported by nickel nanotip arrays // *NANO Letters*. 2012. Vol. 12. P. 1265.
  19. *Devarapalli R.R., Kashid R.V., Deshmukh A.B., Sharma P., Das M.R., More M.A. and Shelke M.V.* High efficiency electron field emission from protruded graphene oxide nanosheets on sharp silicon nanowires // *J. of Materials Chemistry C*. 2013. Vol. 1. P. 5040.
  20. *Liu J., Zeng B., Wu Z., Zhu J., and Liu X.* Improved field emission property of graphene paper by plasma treatment // *Appl. Phys. Lett*. 2010. Vol. 97. 033109.
  21. *Liu J., Zeng B., Wang W., Li N., Guo J., Fang Y., Deng J., Li J., and Hao C.* Graphen electron cannon: High-current edge emission from aligned graphene sheets // *Appl. Phys. Lett*. 2014. Vol. 104. 023101.

22. *Kvashnin G.G., Sorokin P.B., Bruning J.W. and Chernozatonskii L.A.* The impact of edges and dopants on the work function of graphene nanostructures: The way to high electronic emission from pure carbon medium // *Appl. Phys. Lett.* 2013. Vol. 102. 183112.
23. *Palnitkar U.A., Kashid R.V., More M.A., Joag D.S., Panchakarla L.S., and Rao I C.N.R.* Remarkably low turn-on field emission in undoped, nitrogen-doped, and boron-doped graphene // *Appl. Phys. Lett.* 2010. Vol. 97. 063102.
24. *Fang X., Bando Y. et al.* Inorganic semiconductor nanostructures and their field-emission applications // *J. of Materials Chemistry.* 2008. Vol. 18. P. 509.
25. *Givargizov E.I.* Controllable whisker growth and creation of single-crystal whisker probes // *Crystallography Reports.* 2006. Vol. 51, № 5. P. 947.
26. *Huang G.S., Wu X.L., Cheng Y.C., et al.* Fabrication and field emission property of a Si nanotip array // *Nanotechnology.* 2006. Vol. 17, № 22. P. 5573.
27. *Bocharov G.S., Eletsii A.V.* Effect of screening on the emissivity of field electron emitters based on carbon nanotubes // *Tech. Phys.* 2005. Vol. 50, № 7. P. 944.
28. *Sominski G.G., Sezonov V.E., Taradaev E.P., Tumareva T.A., Zadiranov Yu.M., Kornishin S.Yu., Stepanova A.N.* Field emitters of a new type for high-voltage electron devices. // *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2015, in print.
29. *Li Y.B., Bando Y., Golberg D.* ZnO nanoneedles with tip surface perturbations: Excellent field emitters // *Appl. Phys. Lett.* 2004. Vol. 84, № 18. P. 3603.
30. *Wu Z.S., Deng S.Z., et al.* Needle-shaped silicon carbide nanowires: Synthesis and field electron emission properties // *Appl. Phys. Lett.* 2002. Vol. 80, № 20. P. 3829.
31. *Alivov Y., Klopfer M., and Molloy S.* TiO<sub>2</sub> nanotubes as a cold cathode for x-ray generation // *Appl. Phys. Lett.* 2010. Vol. 96. 243502.
32. *Alivov Y., Klopfer M., and Molloy S.* Enhanced field emission from clustered TiO<sub>2</sub> nanotube arrays // *Appl. Phys. Lett.* 2011. Vol. 99. 063104.

*Поступила в редакцию 24.03.2015*

## **PROSPECTIVE FIELD EMITTERS MADE FROM CARBON NANOTUBES, GRAPHENE AND SEMICONDUCTORS**

### **Recent developments**

*G. G. Sominski, T. A. Tumareva*

St. Petersburg Polytechnical University of Peter the Great

The article presents the latest published in the literature data on the development and research of promising field emitters made from carbon nanotubes, graphene and semiconductors. The possibilities of obtaining high densities and currents of field emission, as well as opportunities to ensure long-term operation of emitters in high-voltage electron devices are analyzed.

*Keywords:* Field emitter, carbon nanotubes, graphene, semiconductor, high currents, technical vacuum, high durability.

*Тумарева Татьяна Алексеевна* – родилась в Ленинграде (1937), окончила (1960) Ленинградский политехнический институт (ныне Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого – СПбПУ). После окончания работала в Государственном оптическом институте, а с 1964 года – в ЛПИ (позднее СПбПУ). Защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (ЛПИ, 1972), посвященную созданию и исследованию полевых эмиттеров с разнообразными активирующими покрытиями. В настоящее время – старший научный сотрудник кафедры физической электроники СПбПУ. Научные интересы связаны с разработкой и исследованием полевых эмиттеров. Разработала оригинальные методы диагностики полевых эмиттеров и формируемых ими электронных потоков. Разработала перспективные полевые эмиттеры с фуллереновыми покрытиями. Автор около 150 печатных работ и 5 изобретений.



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

*Соминский Геннадий Гириевич* – родился (1935) в Ленинграде, окончил (1960) Ленинградский политехнический институт (ныне Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого – СПбПУ). Защитил кандидатскую диссертацию (1967) и диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук (1984). Докторская диссертация была посвящена исследованию мощных СВЧ-устройств со скрещенными полями. С 1960 года работает на кафедре физической электроники СПбПУ, профессор (с 1991). В 1968 году организовал на кафедре лабораторию сильноточной и СВЧ электроники и руководит ею по настоящее время. Область основных научных интересов: процессы в пространственном заряде и их влияние на работу сильноточных электронных устройств. Кроме того, занимается разработкой и исследованием полевых эмиттеров для формирования интенсивных электронных потоков. Автор около 300 печатных работ и 21 изобретения.



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



## ПРОЕКТ РЕЛЯТИВИСТСКОГО ГИРОТРОНА W-ДИАПАЗОНА С ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТЬЮ 5–10 МВТ\*

*Э. Б. Абубакиров, Ю. М. Гузнов, Г. Г. Денисов, В. Е. Запезалов,  
Н. А. Завольский, С. А. Запезалов, О. П. Планкин, Р. М. Розенталь,  
А. С. Седов, Е. С. Семенов, А. В. Чирков, А. С. Шевченко*

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Выполнено проектирование экспериментального релятивистского гиротрона 3 мм диапазона длин волн с электронным пучком с энергией 250 кэВ с рекордными выходными параметрами (мощность генерации 5–10 МВт, КПД 35–40%, длительность СВЧ-импульса 0.5–1.0 мкс). Представлено описание основных решений, примененных для создания компонентов прибора: электронно-оптической системы, формирующей винтовой электронный пучок; пространства электронно-волнового взаимодействия; электродинамической системы вывода высокочастотной энергии.

*Ключевые слова:* Релятивистский гиротрон, миллиметровое излучение.

Увеличение выходной мощности и частоты генераторов когерентного электромагнитного излучения на протяжении длительного времени имеет очевидный приоритет для научных исследований и инженерных разработок. Разработка СВЧ-источников мультимегаваттного уровня мощности миллиметрового диапазона длин волн важна и для ряда приложений. Среди них – системы питания ускорителей заряженных частиц со сверхвысоким темпом ускорения (1 ГэВ/м и более) [1, 2], радиолокационные устройства [3, 4] и другие. Отметим также возможность применения таких источников как систем накачки для реализации рассеяния волн на релятивистских электронных потоках (см., например, [5]), позволяющих получать мощные СВЧ-импульсы терагерцового диапазона частот. Наиболее перспективным классом таких источников представляются гирорезонансные приборы с релятивистскими электронными потоками. Успешное освоение диапазона сантиметровых волн при помощи таких устройств [6, 7] создало предпосылки для дальнейшего укорочения их рабочей длины волны.

Отметим, что возможности современных слаборелятивистских гиротронов по наращиванию выходной мощности единичного прибора в настоящее время близки

\*Статья написана по материалам доклада, прочитанного на XVI Международной зимней школе-семинаре по радиофизике и электронике СВЧ. Саратов, Россия, 2–7 февраля 2015

к пределу [8]. В частности, существенным фактором, ограничивающим мощность и эффективность таких гиротронов, является провисание потенциала винтового электронного пучка  $\Delta U$ , вызванное его собственным пространственным зарядом,

$$\Delta U = \frac{2I}{v} \sqrt{1+g^2} \ln\left(\frac{R}{r}\right). \quad (1)$$

Здесь  $I$  – ток электронного пучка;  $g = v_{\perp}/v_{\parallel}$  – питч-фактор;  $v$ ,  $v_{\perp}$ ,  $v_{\parallel}$  – соответственно полная, вращательная и поступательная скорости электронов в пространстве взаимодействия;  $R$  и  $r$  – радиусы резонатора гиротрона и ведущих центров винтового электронного пучка. Особенно значима роль провисания потенциала для импульсных систем с длительностью импульса  $\tau < 10^{-5}$ – $10^{-4}$  с, в которых процессы ионной компенсации квазистатического пространственного заряда еще не успевают развиться. В мощных гиротронах, где для снижения омических потерь используются высшие моды с отношением  $R/r \sim 2$ , величина провисания потенциала может составлять 15–20% от анодного напряжения  $U_a$ , что существенно снижает мощность электронного потока. Соответственно рабочий ток прибора в этих условиях составляет уже заметную долю (30–40%) по отношению к предельному току транспортировки

$$I_{\max} = \frac{mc^3}{2e} \frac{(\gamma_a^{2/3} - 1)^{3/2}}{\sqrt{1+g^2} \ln(R/r)}, \quad (2)$$

где  $\gamma_a = 1 + eU_a/(mc^2)$ ,  $e$  и  $m$  – заряд и масса электрона,  $c$  – скорость света. Известно, что влияние провисания потенциала на параметры винтового электронного пучка выражено гораздо сильнее, чем в случае прямолинейных электронных пучков [9]. Формирование электронного потока с приемлемым скоростным разбросом частиц и его транспортировка в такой ситуации существенно усложняются.

Максимальный уровень мощности, достигнутый в слабoreлятивистских гиротронах, на текущий момент составляет 2.2 МВт [10, 11]. Естественным способом повышения мощности до уровней 5 МВт и более является увеличение энергии частиц винтового электронного пучка гиротрона, то есть переход в «релятивистскую» область энергий. Условной границей «релятивистской» области параметров для гиротронов может считаться энергия порядка 200 кэВ, когда нормированный импульс частиц  $p/(mc)$  становится близок к единице. Очевидно, что переход к релятивизму (при одной и той же частоте генерируемого излучения) требует создания более сильных магнитных полей, что следует из условия синхронизма

$$\omega \approx \omega_B = \frac{|e|B_0}{m\gamma_0 c}, \quad (3)$$

где  $\omega$ ,  $\omega_B$  – частота колебаний и циклотронная частота вращения электронов;  $B_0$  – индукция ведущего магнитного поля;  $\gamma_0 = 1 + eU_0/(mc^2)$  – начальный гамма-фактор электронов. Вместе с тем, максимум КПД в гиротронах реализуется при определенных значениях нормированной расстройки синхронизма [12]

$$\Delta = \frac{2}{\beta_{\perp 0}^2} \frac{\omega_0 - \omega_B}{\omega_0}, \quad (4)$$

где  $\beta_{\perp 0} = v_{\perp 0}/c$ ,  $\omega_0$  – критическая частота резонатора гиротрона. Из этого соотношения легко получить оценку оптимального магнитного поля

$$B_{opt} = \frac{m_0 c}{|e|} \gamma_0 \omega_0 \left( 1 - \frac{\Delta_{opt}}{2} \frac{g^2}{1+g^2} \left( 1 - \frac{1}{\gamma_0^2} \right) \right). \quad (5)$$

Оптимальное значение расстройки синхронизма  $\Delta_{opt}$  находится в области положительных значений. Для модели гиротрона с низкодобротным резонатором  $\Delta_{opt} = 0.6$  [13], соответственно при повышении энергии от 100 кэВ до 250 кэВ винтового электронного пучка с питч-фактором 1.3 магнитное поле необходимо будет увеличить примерно в 1.35 раза.

КПД релятивистского гиротрона в предположении, что в процессе электронно-волнового взаимодействия происходит изменение только поперечного импульса электронов, имеет следующий вид [14]:

$$\eta = \frac{g^2}{2(1+g^2)} \left(1 + \frac{1}{\gamma_0}\right) \eta_{\perp}, \quad (6)$$

где  $\eta_{\perp} = 1 - \overline{p_{\perp}^2/p_{\perp 0}^2}$ ;  $p_{\perp}$ ,  $p_{\perp 0}$  – поперечный импульс электронов и его начальное значение. Черта сверху означает усреднение по начальным фазам влета электронов в пространство взаимодействия. Величина  $\eta_{\perp}$  для слабoreлятивистских частиц имеет смысл относительной потери их вращательной энергии и обычно называется поперечным КПД. Для релятивистских частиц выделение доли энергии, связанной только с вращательным движением, невозможно. Соответственно в этом случае данная характеристика прямого энергетического смысла не имеет и ее название следует понимать как условное.

Повышение энергии электронов, при условии сохранения величины поперечного КПД, в целом негативным образом сказывается на эффективности гиротрона. Так, в предельном случае  $\gamma_0 \gg 1$  КПД снижается двукратно относительно значения в области слабого релятивизма  $\gamma_0 \approx 1$ . Долгое время считалось, что поперечный КПД гиротронов значительно уменьшается в релятивистской области, что, в свою очередь, приводит к ограничению полного КПД на уровне 20–30%. Однако детальное численное моделирование процессов электронно-волнового взаимодействия в резонаторах гиротронов показало, что независимо от энергии электронов возможна реализация условий, при которых поперечный КПД будет достигать больших значений  $\eta_{\perp} \sim 1$  [15]. Таким образом, даже в сильно-релятивистских гиротронах становятся достижимыми значения КПД на уровне 35–45% без использования рекуперации, в то время как в практически значимой области умеренно-релятивистской энергии частиц при  $\gamma \sim 1.5$ –2.5 КПД может достигать значений 50% и более. Экспериментально это было подтверждено путем реализации в ИПФ РАН релятивистских гиротронов на частотах 9.2 и 30 ГГц с рекордными значениями уровня мощности (до 10 МВт) и КПД (более 50%) [6, 7].

Успех в реализации данных приборов predetermined постановку задачи создания гиротрона с аналогичными характеристиками в W-диапазоне частот. Новый гиротрон создается на основе электронного ускорителя «Сатурн-F», позволяющего формировать винтовой электронный пучок с энергией до 500 кэВ, током до 200 А и частотой повторения до 10 Гц [16]. Криогенная система откачки ускорителя рассчитана на обеспечение уровня вакуума в рабочем объеме  $5 \times 10^{-5}$  Торр в дежурном режиме и  $10^{-6}$  Торр в рабочем режиме. Для обеспечения вакуумных условий, близких к параметрам отпаянных приборов, предусмотрена возможность прогрева компонентов электродинамической системы до 400°C перед началом рабочей сессии. Как показывает опыт, данная мера позволяет стабилизировать параметры системы на протяжении, как минимум, двух суток, после чего может потребоваться повторный прогрев [17]. Расчетные значения рабочего магнитного поля позволяют использовать типовой криомагнит НПП «Гиком», применяемый в слабoreлятивистских ги-



ротронах диапазона 140–170 ГГц с традиционной схемой вертикального расположения теплового отверстия. Сложность разработки гиротрона обусловлена общими особенностями проектирования и функционирования систем с релятивистскими электронами и связана с большими габаритами высоковольтных устройств питания, применением массивной защиты от неиспользуемого рентгеновского излучения и др. Очевидно, что существенные изменения конструкции в таких системах оказываются чрезвычайно ресурсоемкими. Эти обстоятельства в итоге ведут к необходимости выбора компромиссных вариантов режимов работы и конструкции прибора, не всегда оптимальных с точки зрения, например, достижения высокой электронной эффективности. В частности, это проявилось при адаптации существующего в ускорителе катодного узла к задаче формирования винтового электронного пучка, параметры которого значительно отличаются от использованного ранее.

Принципиальная схема гиротрона представлена на рис. 1. Внешний вид катодно-анодного узла и криомагнита представлены на рис. 2. Магнетронно-инжекторная пушка построена по трехэлектродной схеме, в которой напряжение на первом аноде формируется из полного ускоряющего напряжения с помощью активного делителя. Используется импрегнированный алюминатно-бариевый катод с рабочей температурой 1050–1100°C. Для устойчивого получения рабочих токов 80–100 А при сохранении приемлемых значений толщины пучка диаметр эмиттирующего пояса выбран равным 50 мм, угол наклона – 50°. Оптимизация параметров винтового электронного пучка осуществлялась программным комплексом ANGEL (ANalyzer of a Gyrating Electrons), основанном на традиционных алгоритмах анализа электронно-оптических систем методами трубок тока и дискретных источников [18, 19].

На рис. 3 представлены расчетные зависимости питч-фактора и разброса поперечных скоростей от тока электронного пучка при различных значениях анодного напряжения. Точная подстройка радиусов ведущих центров (и, соответственно, границ пучка) электронного пучка будет осуществляться путем изменения напряженности магнитного поля на катоде корректирующим соленоидом. Возможность такой подстройки позволяет минимизировать зазор между зеркалами и пучком и, соответственно, снизить потери на рассеяние выходного излучения за счет максимизации апертуры зеркал.

Следует отметить, что повышение анодного напряжения ограничено предельными значениями напряженности электрического поля на поверхности катода. На практике предельное значение напряженности поля на поверхности катода, выше которого в течение импульса ускоряющего напряжения происходит пробой промежутка анод–катод, составляет 8–9 кВ/мм. В силу этого, напряжение на первом аноде ограничивалось значением равным 150 кВ. Согласно расчетам, при ускоряющем напряжении 250 кВ возможно формирование винтового электронного пучка с питч-фактором 1.3, током 80–100 А и приемлемой величиной относительного разброса поперечных скоростей 20–25%. В качестве общего замечания можно отметить, что переход к высоким напряжениям ведет к увеличению перемагничивания, соответствующего увеличению радиуса катода и ряда других эффектов [9], которые должны учитываться при проектировании электронно-оптических систем релятивистских гироприборов.

Особое внимание было уделено проектированию канала транспортировки пучка до входа в резонатор. Предшествующие эксперименты показали, что в канале транспортировки без применения специальных поглощающих элементов возможно возникновение паразитной генерации, инициирующей СВЧ-пробой и высоковольтный пробой пушки. Оптимизация профиля резонатора проводилась на осно-

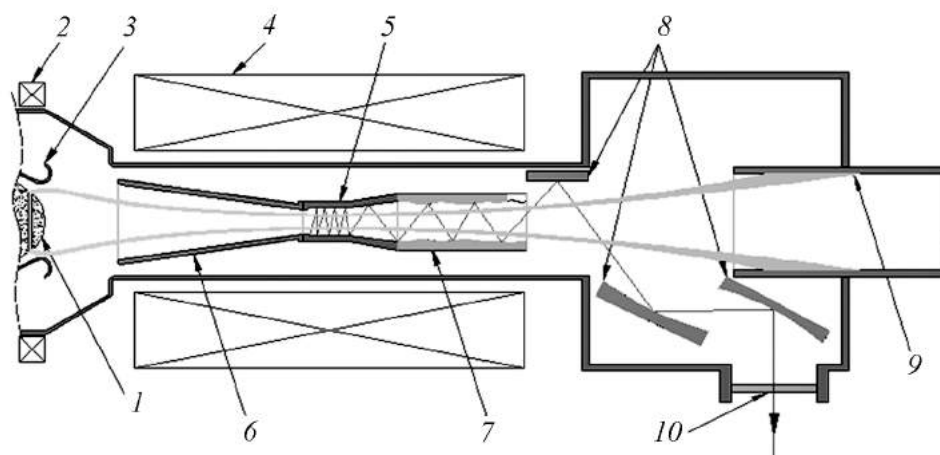


Рис. 1. Принципиальная схема релятивистского гиротрона на частоту 94.4 ГГц: 1 – катод, 2 – корректирующий соленоид, 3 – анод, 4 – криомагнит, 5 – резонатор, 6 – канал транспортировки пучка, 7 – излучатель рабочей волны, 8 – зеркала квазиоптического преобразователя, 9 – коллектор, 10 – выходное окно

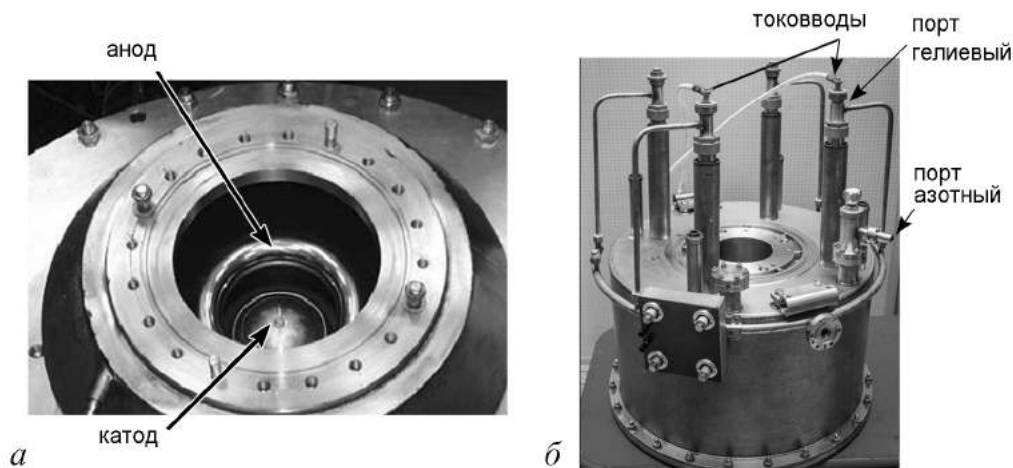


Рис. 2. Внешний вид катодно-анодного узла (а) и криомагнита (б)

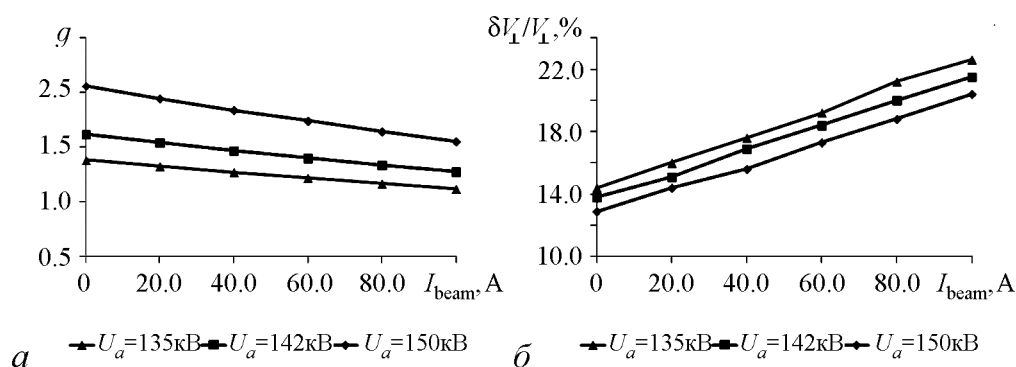


Рис. 3. Расчетные зависимости питч-фактора (а) и относительного разброса по поперечным скоростям (б) от тока электронного пучка при различных значениях анодного напряжения

ве стационарной модели с самосогласованной нефиксированной структурой поля с учетом омических потерь в резонаторе и начального разброса электронов по поперечным скоростям [15]. При определенной свободе выбора рабочей моды было принято решение ориентироваться на хорошо отработанные в данном частотном диапазоне решения. Предпочтение было отдано моде  $TE_{12,5}$ , ранее применявшейся в качестве рабочей, к примеру, в непрерывном 200 кВт гиротроне диапазона 84 ГГц [20]. При оптимизации профиля резонатора, наряду с основной задачей повышения эффективности электронно-волнового взаимодействия, решалась задача минимизации переизлучения рабочей моды в другие моды. В ранее реализованных релятивистских гиротронах сантиметрового диапазона, в силу относительно низких значений индексов мод ( $TE_{01}$ ,  $TE_{53}$ ), было допустимым использование резонаторов, выход которых представлял собой сочетание нескольких (двух или трех) конусов. Однако на длине волны 3 мм на «изломах» между конусами происходит значительное переизлучение рабочей моды в моды с другими поперечными индексами. К примеру, для простейшего выходного профиля в виде конического расширения в паразитные моды переизлучается около 5% мощности [21]. В этой связи применяется более сложная технология изготовления, при которой профиль перехода между резонатором и выходным излучателем задается в виде совокупности дуг окружностей с плавными переходами. В результате проведенной оптимизации профиля перехода удается кардинально уменьшить переизлучения до уровня порядка 0.1%. На рис. 4 представлены распределение ведущего магнитного поля, оптимизированный профиль резонатора и распределение амплитуды и фазы рабочего колебания  $TE_{12,5,1}$ . На рис. 5 представлены зависимость КПД от ведущего магнитного поля для тока пучка 80 А и зависимость максимальной мощности генерации от тока пучка. Следует отметить, что повышение тока пучка приводит к снижению питч-фактора и как следствие уменьшению эффективности генерации. В свою очередь, со-

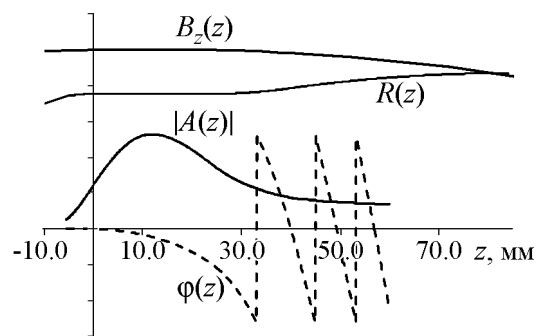


Рис. 4. Распределение продольной компоненты поля криомагнита  $B_z(z)$ , профиль резонатора  $R(z)$ , распределение амплитуды  $|A(z)|$  и фазы  $\varphi(z)$  рабочей моды  $TE_{12,5,1}$

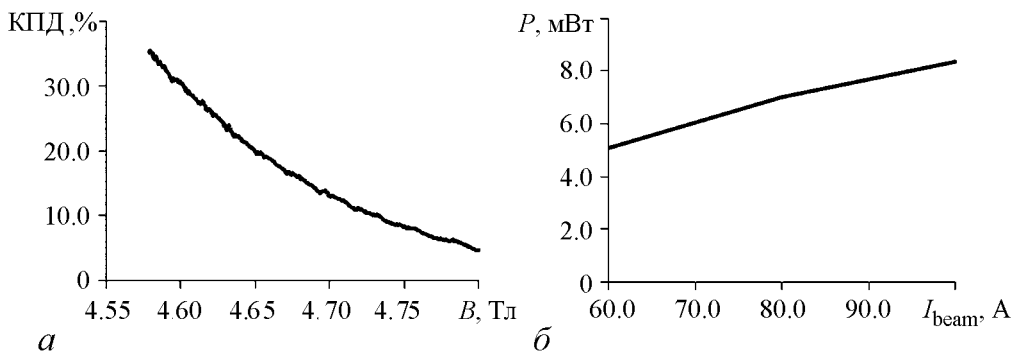


Рис. 5. Зона генерации по магнитному полю для тока пучка 80 А (а) и зависимость максимальной выходной мощности от тока пучка (б) при  $U_0 = 250$  кВ,  $g = 1.3$

хранение значения питч-фактора на уровне 1.3 при токах, превышающих 80 А, сопряжено с повышением анодного напряжения и увеличением риска возникновения пробоев анодно-катодного промежутка.

В реализованных ранее в ИПФ РАН релятивистских гиротронах была использована концепция осевого вывода энергии на рабочей моде. В такой схеме выходной волновод одновременно осуществляет функцию коллектора для отработанных электронов. Кроме очевидной проблемы неизбежного переизлучения рабочей моды на неоднородностях выходного волновода и, как следствие, возрастания потерь при дальнейшей транспортировке излучения, данная схема имеет еще один существенный недостаток, связанный со снижением порога развития мультипакторного разряда в области спада ведущего магнитного поля [22]. В разрабатываемом гиротроне предполагается использовать располагаемый в вакуумном объеме встроенный квазиоптический преобразователь излучения рабочей моды в гауссов пучок. Проектируемый преобразователь (см., например, [23]) включает в себя излучатель рабочей волны  $TE_{12,5}$  в свободное пространство, квазипараболическое зеркало и два поворотных зеркала. Расчетная величина потерь в квазиоптическом преобразователе не превышает 5%. Выходное окно с апертурой 63.5 мм изготавливается из керамики на основе нитрида бора с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = \varepsilon_w(1 + i \tan \delta)$ ,  $\varepsilon_w \approx 4.6$ ,  $\tan \delta \sim 10^{-3}$ .

### Заключение

Выполнено проектирование релятивистского гиротрона W-диапазона с выходной мощностью 5–10 МВт, включающее в себя выбор условий функционирования электронно-оптической системы для формирования винтового электронного пучка, оптимизацию профиля резонатора, разработку квазиоптического преобразова-

Таблица

Проектные параметры гиротрона

Ускоряющее напряжение	250 кВ
Напряжение анод–катод	120–160 кВ
Ток пучка	80–100 А
Питч-фактор	1.3
Радиус ведущих центров пучка в рабочем пространстве	6.5 мм
Длительность импульса	0.5–1.0 мкс
Рабочая частота	94.4 ГГц
Рабочая мода	$TE_{12,5}$
Дифракционная добротность резонатора на моде $TE_{12,5}$	1400
Омическая добротность резонатора на моде $TE_{12,5}$	30300
Радиус однородного участка резонатора	15.039 мм
Оптимум магнитного поля	4.58 Тл
Максимум электронного/волнового КПД	37.1/35.4

теля излучения рабочей моды в гауссов волновой пучок. Основные проектные параметры гиротрона представлены в таблице.

Предшествующий опыт создания в ИПФ РАН релятивистских гиротронов диапазона 3 см и 1 см с рекордными значениями выходной мощности и КПД и слаборелятивистских гиротронов мегаваттного уровня мощности [24,25] позволяет рассчитывать на успешную реализацию данного проекта. В дальнейшем предполагается использовать полученные наработки для создания усилителя с аналогичными параметрами на основе гироклистронной схемы, ранее успешно отработанной для диапазонов 1 см и 8 мм [26,17].

*Работа выполнена при поддержке РФФ, грант № 14-29-00192.*

## Библиографический список

1. *Tantawi S.G.* Advanced high frequency acceleration // IEEE International Vacuum Electronics Conference. Monterey, CA, 22–24 April 2014.
2. *Fazio M.V., Tantawi S.G., Dolgashev V.A.* Bridging the gap between conventional RF acceleration and laser driven acceleration // Proceedings of LINAC 2014. Geneva, Switzerland, 31 August–5 September 2014. P. 358.
3. *Manheimer W.M., Mesyats G.A., Petelin M.I.* Super-high-power microwave radars // Proceedings of the International «Workshop Strong Microwaves in Plasmas». Moscow–Nizhny Novgorod–Moscow, 15–22 August 1993. Vol. 2. P. 632. <http://www.ipfran.ru/biblio/smp2.html>
4. *Skolnik M.* Role of radar in microwaves // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2002. Vol. 50, № 3. P. 625.
5. *Реутова А.Г., Ульмаскулов М.Р., Шарыпов А.К., Шнак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И., Белоусов В.И., Гинзбург Н.С., Денисов Г.Г., Зотова И.В., Розенталь Р.М., Сергеев А.С.* Экспериментальное наблюдение эффекта сверхизлучения при вынужденном встречном рассеянии мощной микроволновой волны накачки сильноточным релятивистским электронным сгустком субнаносекундной длительности // Письма в ЖЭТФ. 2005. Т. 82, вып. 5. С. 295.
6. *Zaitsev N.I., Ginzburg N.S., Ilyakov E.V., Kulagin I.S., Lygin V.K., Manuilov V.N., Moiseev M.A., Rosenthal R.M., Zapevalov V.E., Zavolsky N.A.* X-band, high-efficiency relativistic gyrotron // IEEE Trans. on Plasma Sci. 2002. Vol. 30, № 3. P. 840.
7. *Зайцев Н.И., Завольский Н.А., Запелов В.Е., Иляков Е.В., Кулагин И.С., Лыгин В.К., Моисеев М.А., Нечаев В.Е., Петелин М.И., Розенталь Р.М.* Десяти-мегаваттный импульсный гиротрон с длиной волны 1 см и КПД 50% // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 10. С. 914.
8. *Запелов В.Е.* Гиротрон: Пределы роста выходной мощности и КПД // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 10. С. 864.
9. *Цимринг Ш.Е.* Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков / Пер. с англ. Нижний Новгород: Институт прикладной физики РАН, 2012. 576 с.
10. *Rzesnicki T., Piosczyk B., Kern S., Illy S., Jianbo J., Samartsev A., Schlaich A., Thumm M.* 2.2-MW Record Power of the 170-GHz European Preprototype Coaxial-Cavity Gyrotron for ITER // IEEE Transactions on Plasma Science. 2010. Vol. 38, № 6. P. 1141.
11. *Thumm M.* Recent advances in the worldwide fusion gyrotron development // IEEE Transactions on Plasma Science. 2014. Vol. 42, № 3. P. 590.
12. *Моисеев М.А., Нусинович Г.С.* Некоторые результаты численных исследований уравнений гиротрона / Гиротрон. Горький: ИПФ АН СССР, 1981. С. 41. <http://www.ipfran.ru/biblio/g1.html>
13. *Ginzburg N.S., Nusinovich G.S., Zavolsky N.A.* Theory of non-stationary processes in gyrotrons with low Q resonators // International Journal of Electronics. 1986. 61:6. 881.
14. *Bratman V.L., Ginzburg N.S., Nusinovich G.S., Petelin M.I., Strelkov P.S.* Relativistic gyrotrons and cyclotron autoresonance masers // Int. J. Electronics. 1981. Vol. 51, № 4. P. 541.
15. *Завольский Н.А., Запелов В.Е., Моисеев М.А.* О повышении КПД релятивист-

- ского гиротрона // Изв. вузов. Радиофизика. 2001. Т.44, №4. С.345.
16. Zaitsev N.I., Zapevalov S.A., Ilyakov E.V., Kornishin S.Yu., Kofanov S.V., Kryltsov M.Yu., Kulagin I.S., Lygin V.K., Malygin A.V., Manuilov V.N., Movshevich B.Z., Perminov V.G., Petelin M.I., Fiks A.Sh., Shevchenko A.S., Tsalolikhin V.I., Kladukhin V.V., Krasnykh A. 500 keV, 200A microsecond electron accelerator with a repetition rate of 10 Hz // Proceedings of XXI Russian Accelerator Conference. Zvenigorod, 2008. P. 339.
  17. 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.
  18. Планкин О.П., Семенов Е.С. Комплекс программ ANGEL–2DS для моделирования пушки гиротрона: Инструкция для пользователя. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2011. 32 с.
  19. Планкин О.П., Семенов Е.С. Траекторный анализ электронно-оптической системы технологического гиротрона // Вестник НГУ. Серия «Физика». 2013. Т. 8, № 2. С. 44.
  20. Belousov V.I., Bogdashov A.A., Denisov G.G., Kurbatov V.I., Malygin V.I., Malygin S.A., Orlov V.B., Popov L.G., Solujanova E.A., Tai E.M., Usachov S.V. The test results of the 84 GHz/200 kW/CW gyrotron // 13th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating. Nizhny Novgorod, Russia, May 17–20, 2004.
  21. Цимринг Ш.Е. Аксиально-симметричные волноводные переходы и трансформаторы // Гиротроны: Сб. научн. тр. Горький: ИПФ АН СССР, 1989. С. 113. <http://www.ipfran.ru/biblio/gir.html>
  22. Гвоздев А.К., Жарова Н.А., Зайцев Н.И., Семенов В.Е., Сорокин А.А. Развитие мультитактора в выходном тракте мощного импульсного гироклистрона // Журнал технической физики. 2012. Т. 82, вып. 10. С. 72.
  23. Чирков А.В., Денисов Г.Г., Куфтин А.Н., Запевалов В.Е., Малыгин В.И., Моисеев М.А., Корнишин С.Ю. Многочастотный гиротрон с высокоэффективным синтезированным волноводным преобразователем // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33, вып. 8. С. 71.
  24. Litvak A.G., Denisov G.G., Myasnikov V.E., Tai E.M., Azizov E.A., Ilin V.I. Development in Russia of megawatt power gyrotrons for fusion // Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. 2011. Vol. 32. P. 337.
  25. Thumm M. State-of-the-Art of High Power Gyro-Devices and Free Electron Masers (Update 2012). Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2013.
  26. Зайцев Н.И., Иляков Е.В., Кузиков С.В., Кулагин И.С., Лыгин В.К., Моисеев М.А., Петелин М.И., Шевченко А.С. Импульсный гироклистрон на объёмной моде высокого порядка // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48, № 10–11. С. 830.

## References

1. Tantawi S.G. Advanced high frequency acceleration // IEEE International Vacuum Electronics Conference. Monterey, CA, 22–24 April 2014.
2. Fazio M.V., Tantawi S.G., Dolgashev V.A. Bridging the gap between conventional RF acceleration and laser driven acceleration // Proceedings of LINAC 2014. Geneva, Switzerland, 31 August–5 September 2014. P. 358.

3. *Manheimer W.M., Mesyats G.A., Petelin M.I.* Super-high-power microwave radars // Proceedings of the International «Workshop Strong Microwaves in Plasmas». Moscow–Nizhny Novgorod–Moscow, 15–22 August 1993. Vol.2. P. 632.  
<http://www.ipfran.ru/biblio/smp2.html>
4. *Skolnik M.* Role of radar in microwaves // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2002. Vol. 50, № 3. P. 625.
5. *Reutova A.G., Ul'maskulov M.R., Sharypov A.K., Shpak V.G., Shunailov S.A., Yalandin M.I., Belousov V.I., Ginzburg N.S., Denisov G.G., Zotova I.V., Rozental R.M., Sergeev A.S.* Experimental observation of superradiance in the stimulated scattering of an intense microwave pump wave by a counterpropagating subnanosecond high-current relativistic electron bunch // JETP Letters. 2005. Vol. 82, Iss. 5. P. 263.
6. *Zaitsev N.I., Ginzburg N.S., Ilyakov E.V., Kulagin I.S., Lygin V.K., Manuilov V.N., Moiseev M.A., Rosenthal R.M., Zapevalov V.E., Zavolsky N.A.* X-band, high-efficiency relativistic gyrotron // IEEE Trans. on Plasma Sci. 2002. Vol. 30, № 3. P. 840.
7. *Zaitsev N.I., Zavolsky N.A., Zapevalov V.E., Ilyakov E.V., Kulagin I.S., Lygin V.K., Moiseev M.A., Nechaev V.E., Petelin M.I., Rozental R.M.* Ten-megawatt pulsed gyrotron with a 1-cm wavelength and a 50% efficiency // Radiophysics and Quantum Electronics. 2003. Vol. 46, Iss. 10. P. 816.
8. *Zapevalov V.E.* The gyrotron: Constraints on output-power and efficiency increase // Radiophysics and Quantum Electronics. 2006. Vol. 49, Iss. 10. P. 779.
9. *Tsimring Sh.E.* Electron Beams and Microwave Vacuum Electronics. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
10. *Rzesnicki T., Piosczyk B., Kern S., Illy S., Jianbo J., Samartsev A., Schlaich A., Thumm M.* 2.2-MW record power of the 170-GHz European preprototype coaxial-cavity gyrotron for ITER // IEEE Transactions on Plasma Science. 2010. Vol. 38, № 6. P. 1141.
11. *Thumm M.* Recent advances in the worldwide fusion gyrotron development // IEEE Transactions on Plasma Science. 2014. Vol. 42, №3. P. 590.
12. *Moiseev M.A., Nusinovich G.S.* Some results of numerical study of gyrotron equations / Gyrotrons. Gorky: Institute of Applied Physics, 1981. P. 41 (in Russian).  
<http://www.ipfran.ru/biblio/g1.html>
13. *Ginzburg N.S., Nusinovich G.S., Zavolsky N.A.* Theory of non-stationary processes in gyrotrons with low Q resonators // International Journal of Electronics. 1986. 61:6. 881.
14. *Bratman V.L., Ginzburg N.S., Nusinovich G.S., Petelin M.I., Strelkov P.S.* Relativistic gyrotrons and cyclotron autoresonance masers // Int. J. Electronics. 1981. Vol. 51, № 4. P. 541.
15. *Zavolsky N.A., Zapevalov V.E., Moiseev M.A.* Efficiency enhancement of the relativistic gyrotron // Radiophysics and Quantum Electronics. 2001. Vol. 44, Iss. 4. P. 318.
16. *Zaitsev N.I., Zapevalov S.A., Ilyakov E.V., Kornishin S.Yu., Kofanov S.V., Kryltsov M.Yu., Kulagin I.S., Lygin V.K., Malygin A.V., Manuilov V.N., Movshevich B.Z., Perminov V.G., Petelin M.I., Fiks A.Sh., Shevchenko A.S., Tsalolikhin V.I., Kladukhin V.V., Krasnykh A.* 500 keV, 200A microsecond electron accelerator with a repetition rate of 10 Hz // Proceedings of XXI Russian Accelerator Conference. Zvenigorod, 2008. P. 339.
17. *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 gyrokylystron //

- Journal of Communications Technology and Electronics. 2014. Vol. 59, Iss. 2. P. 16.
18. *Plankin O.P., Semenov V.E.* ANGEL 2DS Program Package for Gyrotron Gun Modeling: User's Guide. Nizhny Novgorod: IAP RAS, 2011 (in Russian).
  19. *Plankin O.P., Semenov V.E.* Trajectory analysis of the electronic-optical system of technological gyrotron // *Vestnik NSU. Series: Physics.* 2013. Vol. 8, Iss.2. P. 44 (in Russian).
  20. *Belousov V.I., Bogdashov A.A., Denisov G.G., Kurbatov V.I., Malygin V.I., Malygin S.A., Orlov V.B., Popov L.G., Solujanova E.A., Tai E.M., Usachov S.V.* The test results of the 84 GHz/200 kW/CW gyrotron // 13th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating. Nizhny Novgorod, Russia, May 17–20, 2004.
  21. *Tsymring Sh.E.* Axially symmetric waveguide tapers and transformers // in: *Gyrotrons.* Gorky: Institute of Applied Physics, 1989. P. 113 (in Russian).  
<http://www.ipfran.ru/biblio/gir.html>
  22. *Gvozdev A.K., Zharova N.A., Zaitsev N.I., Semenov V.E., Sorokin A.A.* Development of a multipactor discharge in the output channel of a powerful pulsed gyroklystron // *Technical Physics.* 2012. Vol. 57, Iss.10. P. 1394.
  23. *Chirkov A.V., Denisov G.G., Kuftin A.N., Zapevalov V.E., Malygin V.I., Moiseev M.A., Kornishin S.Yu.* // *Technical Physics Letters.* 2007. Vol. 33, Iss. 4. P. 350.
  24. *Litvak A.G., Denisov G.G., Myasnikov V.E., Tai E.M., Azizov E.A., Ilin V.I.* Development in Russia of megawatt power gyrotrons for fusion // *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves.* 2011. Vol. 32. P.337.
  25. *Thumm M.* State-of-the-Art of High Power Gyro-Devices and Free Electron Masers (Update 2012). Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2013.
  26. *Zaitsev N.I., Ilyakov E.V., Kuzikov S.V., Kulagin I.S., Lygin V.K., Moiseev M.A., Petelin M.I., Shevchenko A.S.* Pulsed high-order volume mode gyroklystron // *Radio-physics and Quantum Electronics.* 2005. Vol. 48, Iss. 10–11. P. 737.

*Поступила в редакцию 7.04.2015*

## **DESIGN OF W-BAND 5–10 MW OUTPUT POWER RELATIVISTIC GYROTRON**

*E. B. Abubakirov, Yu. M. Guznov, G. G. Denisov, V. E. Zapevalov,  
N. A. Zavolsky, S. A. Zapevalov, O. P. Plankin, R. M. Rozental,  
A. S. Sedov, E. S. Semenov, A. V. Chirkov, A. S. Shevchenko*

Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences

The 3-mm band relativistic gyrotron excited by 250 keV electron beam with record output parameters (power 5–10 MW, efficiency 35–40%, microwave pulse duration 0.5–1  $\mu$ s) was developed. The main design solutions of components, such as the electron-optical system forming helical electron beam, the interaction space and the electrodynamic system of microwave output, are presented.

*Keywords:* Relativistic gyrotron, millimeter wave radiation.





*Абубакиров Эдуард Булатович* родился (1957) в Горьком. Окончил радиофизический факультет Горьковского госуниверситета (1980) по специальности «радиофизика и электроника», защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук (2007). С 1980 года работает в Институте прикладной физики АН (с 1991 – ИПФ РАН), в настоящее время – ведущий научный сотрудник отдела высокочастотной релятивистской электроники. Область научных интересов включает высокочастотную электронику и электродинамику, физику сильноточных электронных потоков. Является автором и соавтором более 70 научных работ.

603950 Нижний Новгород, ГСП–120, Ульянова, 46  
Институт прикладной физики РАН  
E-mail: edward@appl.sci-nnov.ru



*Гузнов Юрий Михайлович* родился (1987) в деревне Слободское Борского района Горьковской обл. Окончил радиофизический факультет ННГУ по специальности «радиофизика и электроника» (2012). С 2012 года работает в ИПФ РАН сначала в должности инженера, а потом в должности младшего научного сотрудника. Количество публикаций: 2 статьи в рецензируемых журналах, 6 статей в сборниках.

603950 Нижний Новгород, ГСП–120, ул. Ульянова, 46  
Институт прикладной физики РАН  
E-mail: yuguznov@rambler.ru



*Денисов Григорий Геннадьевич* родился (1956) в Горьком. Окончил радиофизический факультет Горьковского госуниверситета (1978). Защитил кандидатскую диссертацию (1985, ИПФ АН) и докторскую диссертацию (2002, ИПФ РАН). В настоящее время заместитель директора ИПФ РАН (Нижний Новгород), глава консультационного совета в НПП ГИКОМ. Член-корреспондент РАН. Область научных интересов: разработка гиротронов для электронно-циклотронного нагрева плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза, а также для технологических приложений; релятивистские генераторы и усилители (в т.ч. лазеры на свободных электронах); методы измерения и контроля параметров квазиоптических пучков; разработка линий передачи СВЧ-излучения и антенных систем. Лауреат международной премии за отличие в технике термоядерного синтеза (1996), лауреат Государственной премии РФ за достижения в науке (2003) и премии Правительства РФ в области науки и техники (2011).

603950 Нижний Новгород, ГСП–120, ул. Ульянова, 46  
Институт прикладной физики РАН  
E-mail: den@appl.sci-nnov.ru



*Запёвалов Владимир Евгеньевич* родился (1949) в городе Бор Горьковской области. Окончил радиофизический факультет Горьковского государственного университета (1972) по специальности «радиофизика». После окончания работал в Горьковском государственном университете, а с 1985 и до текущего момента работает в Институте прикладной физики Академии наук СССР (в настоящее время ИПФ РАН). В настоящее время – заведующий лабораторией мощных гиротронов для управляемого термоядерного синтеза. Защитил диссертации – кандидатскую (1985) и докторскую (2008). Докторская диссертация посвящена проблемам повышения эффективности генерации мощных гиротронов. Область научных интересов: теоретическое и экспериментальное исследование электронно-волновых процессов в мощных электронных приборах, а также разработка гиротронов для управляемого термоядерного синтеза, спектроскопии и технологических приложений. Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники (2011).

603950 Нижний Новгород, ГСП–120, ул. Ульянова, 46  
Институт прикладной физики РАН  
E-mail: zapev@appl.sci-nnov.ru



*Завольский Николай Александрович* родился (1956) в Ворсме Горьковской области. Окончил Горьковский государственный университет (1978) по специальности «математика». После окончания и до настоящего момента работает в Институте прикладной физики Академии наук СССР (в настоящее время ИПФ РАН) Область научных интересов: численные методы и разработка программного обеспечения в решении задач акустики, распространения радиоволн и электронно-волнового и взаимодействия в гиротронах.

603950 Нижний Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова, 46  
Институт прикладной физики РАН  
E-mail: zavolsky@appl.sci-nnov.ru



*Запезалов Сергей Анатольевич* родился (1955) в Ростове-на-Дону. Образование высшее (1977). С 2006 года ведущий электроник в отделе высокочастотной релятивистской электроники ИПФ РАН. Имеет 6 публикаций в соавторстве.

603950 Нижний Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова, 46  
Институт прикладной физики РАН  
E-mail: saturnf@appl.sci-nnov.ru



*Планкин Олег Петрович* родился (1978) в Балахне Горьковской области. Окончил ННГУ (2001) по специальности «микроэлектроника и полупроводниковые приборы». Область научных интересов: электроника СВЧ, электронная оптика. В настоящее время работает в Институте прикладной физики РАН программистом. Количество публикаций – 2.

603950 Нижний Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова, 46  
Институт прикладной физики РАН  
E-mail: plankin@appl.sci-nnov.ru



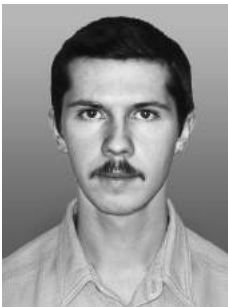
*Розенталь Роман Маркович* родился (1977) в Горьком. Окончил радиофизический факультет ННГУ по специальности «электроника» (1999). С 1998 года работает в ИПФ РАН научным сотрудником. Основная область научных интересов – нестационарные процессы в мощных приборах вакуумной СВЧ-электроники. Автор и соавтор более 25 научных работ.

603950 Нижний Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова, 46  
Институт прикладной физики РАН  
E-mail: rrz@appl.sci-nnov.ru



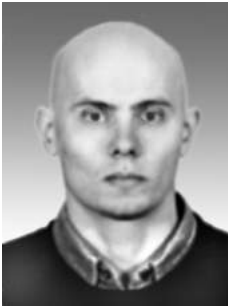
*Седов Антон Сергеевич* родился (1984) в Горьком, получил диплом бакалавра по научному направлению «физика» (2005, ННГУ) и диплом магистра по научному направлению «физика» (2007, ННГУ). После окончания ННГУ работает в ИПФ РАН младшим научным сотрудником. Область интересов – электронно-волновое взаимодействие в гиротронах миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Опубликовал около 10 научных статей по данной тематике.

603950 Нижний Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова, 46  
Институт прикладной физики РАН  
E-mail: anton-sedov@mail.ru



*Семенов Евгений Сергеевич* родился (1980) в Дзержинске Горьковской области. Окончил ННГУ (2003) по специальности «математика». Защитил кандидатскую диссертацию (2009). С 2001 года по настоящее время – научный сотрудник ИПФ РАН. Область научных интересов: математическое моделирование. Область смежных интересов: программирование, параллельные вычисления. Количество публикаций: 6 статей в рецензируемых журналах, 3 статьи в сборниках, 2 препринта.

603950 Нижний Новгород, ГСП–120, ул. Ульянова, 46  
Институт прикладной физики РАН  
E-mail: semes@appl.sci-nnov.ru



*Чирков Алексей Васильевич* родился (1965) в городе Йошкар-Ола. Окончил Горьковский политехнический институт им. А.А. Жданова по специальности «радиотехника» (1987). С 1987 года и по настоящее время работает в ИПФ РАН. Кандидат ф.-м. н. (1995), д. ф.-м. н. (2009). Область интересов – методы анализа и синтеза волновых полей в сверхразмерных электродинамических системах гиротронов. Имеет около 100 опубликованных работ.

603950 Нижний Новгород, ГСП–120, ул. Ульянова, 46  
Институт прикладной физики РАН  
E-mail: chirkov@appl.sci-nnov.ru



*Шевченко Александр Сергеевич* родился (1960) в городе Ровеньки Ворошиловградской области, окончил Полтавское Высшее военное командное училище связи (1982). С 1998 года работает ведущим электроником в ИПФ РАН. Принимал непосредственное участие в разработке, изготовлении и экспериментальных исследованиях релятивистских гиротронов и гироклистронов сантиметрового и длинноволновой части миллиметрового диапазонов. Имеет 17 публикаций в соавторстве.

603950 Нижний Новгород, ГСП–120, ул. Ульянова, 46  
Институт прикладной физики РАН  
E-mail: saturnf@appl.sci-nnov.ru



**ВЛИЯНИЕ АЗИМУТАЛЬНОЙ НЕСИММЕТРИИ  
ЭЛЕКТРОННО-ВОЛНОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ГИРОТРОНОВ  
СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА\***

*М. Ю. Глявин<sup>1,2</sup>, Н. А. Завольский<sup>1</sup>, В. Е. Запелов<sup>1</sup>,  
В. Ю. Заславский<sup>1,2</sup>, К. А. Лецева<sup>2</sup>, Р. М. Розенталь<sup>1</sup>, А. С. Седов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

<sup>2</sup>ННГУ им. Лобачевского, Нижний Новгород

Применительно к реализованному в ИПФ РАН непрерывному гиротрону с рабочей частотой 263 ГГц киловаттного уровня мощности различными методами выполнено моделирование взаимодействия электронного потока с высокочастотным полем резонатора. С использованием системы уравнений для медленно меняющихся амплитуды и фазы поля, а также трехмерного метода крупных частиц (программные коды CST и KARAT) исследовано влияние нарушения азимутальной симметрии инжектируемого электронного пучка на выходные характеристики гиротрона. Соответствие результатов, полученных различными методами, позволяет утверждать о корректности использования трехмерных кодов для анализа приборов с нарушениями азимутальной симметрии электродинамической системы и электронного потока в субмиллиметровом диапазоне длин волн. Показано, что при практически возможных значениях несимметрии относительное снижение КПД может достигать 40%.

*Ключевые слова:* Субмиллиметровое излучение, гиротрон, азимутальная неоднородность, численное моделирование, эффективность.

Освоение гиротронами субтерагерцового и терагерцового диапазона вплотную приближает значения рабочих длин волн к пределам технологической точности сборки, точности юстировки прибора в магнитном поле и масштабам неоднородностей эмитирующей поверхности катода. Учитывая, что к настоящему моменту уже реализованы гиротроны на длине волны 0.5 мм с уровнем мощности сотни киловатт [1] и на длине волны 0.3 мм с киловаттной мощностью выходного излучения [2], возрастает актуальность учета указанных факторов для обеспечения реализуемости и устойчивости расчетных режимов генерации.

\*Статья написана по материалам доклада, прочитанного на XVI Международной зимней школе-семинаре по радиофизике и электронике СВЧ. Саратов, Россия, 2–7 февраля 2015

Ряд причин, таких как технологические погрешности при изготовлении гиротрона или неточная юстировка магнитного поля соленоида, могут привести к образованию так называемой несоосности, то есть ситуации, когда ось ведущих центров орбит электронного пучка не совпадает с осью резонатора [3]. Эффекты, возникающие в данной ситуации, связаны с нарушением аксиальной симметрии системы резонатор–пучок. С увеличением частоты работы прибора и, соответственно, укорочением длины волны эта проблема значительно обостряется. К примеру, интерпретация данных экспериментов с гиротроном диапазона 260 ГГц, возбуждаемым винтовым электронным пучком с энергией 15–20 кэВ, током 0.5 А и питч-фактором<sup>1</sup> 1.2–1.4 [4], позволяла сделать вывод, что в системе имела место несоосность электронного пучка и резонатора, создающая условия для генерации паразитных мод [5]. Следует отметить значительное число работ в последнее время, анализирующих эффекты, связанные с азимутальной несимметрией электронного потока и пространства взаимодействия (см., например, [6–9]). Большинство этих работ используют традиционный для теории гиротронов подход, основанный на решении самосогласованной системы уравнений [10], включающей уравнение движения электронов и уравнения для медленно (в масштабах времени пролета) меняющихся амплитуды и фазы высокочастотного поля. Представляется актуальным исследовать возможность прямого трехмерного моделирования гиротрона, что позволит одновременно учесть различные факторы и неоднородности как электронного потока, так и электродинамической системы, предварительно протестировав достоверность тех или иных методов расчета.

В данной работе исследование влияния нарушений аксиальной симметрии пучка осуществлено применительно к реализованному в ИПФ РАН для задач спектроскопии гиротрону с рабочей частотой 263 ГГц [11]. Данный гиротрон построен на основе криомагнита JMTD10T100 (производство JASTEC Ltd. [12]), не требующего заливки жидким гелием и обеспечивающего интенсивность магнитного поля до 10 Тл. Расчетные номинальные параметры электронного пучка гиротрона – ток до 0.4 А, энергия 15 кэВ, питч-фактор 1.3. В качестве рабочего типа колебаний используется мода TE<sub>5,3</sub> на первой гармонике гирочастоты. Выходное излучение преобразуется встроенным квазиоптическим преобразователем в гауссов пучок. Преобразователь с расчетной величиной потерь не более 7% построен по традиционной схеме (см., например, [13]) включающей в себя излучатель на срезе волновода, параболическое зеркало и три фазовых корректора. При выводе микроволнового излучения из вакуумного объема лампы еще порядка 7% мощности теряется за счет поглощения в диэлектрическом окне из нитрида бора. Указанное значение потерь подтверждено экспериментально панорамными измерениями.

Моделирование режимов генерации гиротрона выполнялось как в рамках традиционного подхода, базирующегося на усредненных нестационарных уравнениях [10], так и с использованием трехмерных PIC (particle-in-cells) кодов CST Studio Suite (CST) [14] и KARAT [15]. Таким образом, кроме прикладной цели исследования влияния данного эффекта на выходные характеристики работы гиротрона, так же ставилась задача сравнить эффективность и правильность расчета различными методами при рассмотрении такой достаточно сложной системы, как гиротрон со смещенным пучком.

Программный код CST использует аппроксимации для идеальных граничных условий применительно к достаточно общему методу конечных интегралов. Для

<sup>1</sup>Питч-фактор – отношение вращательной скорости электронов к скорости их поступательного движения.

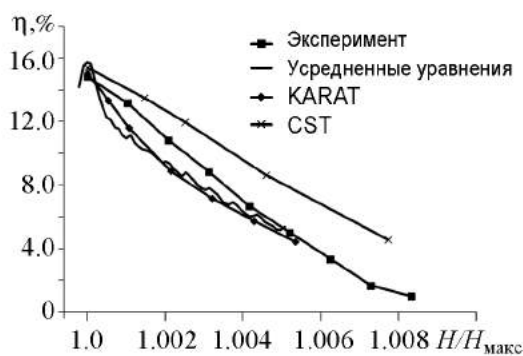


Рис. 1. Зависимость полного КПД гиротрона от магнитного поля (нормированного на значение в максимуме КПД)

разностную схему с перешагиванием на прямоугольных сетках со сдвигом. Конкретная реализация схемы, примененная в коде, обладает свойством точного описания граничных условий на поверхностях расчетной области [15,17]. Код KARAT успешно используется для широкого круга задач вакуумной электроники и физики плазмы. Ранее с его помощью было выполнено моделирование стационарных и нестационарных режимов генерации в мощном релятивистском гиротроне диапазона 9 ГГц, продемонстрировавшее соответствие результатов экспериментальным данным [18, 19].

Результаты моделирования стационарных режимов генерации исследуемого гиротрона в рамках усредненных уравнений и описанными выше PIC-кодами в случае несмещенного пучка с оптимальным радиусом центров электронных орбит представлены на рис. 1. Следует отметить полное совпадение найденных значений максимального КПД генерации для всех методов расчета и экспериментальных данных. Определенные различия наблюдаются в значениях КПД для неоптимальных по КПД режимов генерации, при отстройке магнитного поля от оптимального значения. Выяснение этих причин требует дополнительного исследования.

Рассмотрим возможные механизмы влияния несоосности электронного пучка на работу гиротрона. В рамках одномодового приближения основной эффект связан с понижением эффективности электронно-волнового взаимодействия за счет различных (в том числе меньших оптимального) значений амплитуды поля волны для различных азимутальных фракций смещенного пучка, что отражается на изменении фактора связи между волной и пучком. Для симметричного электронного пучка фактор связи может быть рассчитан по известной [20,21] формуле

$$G_{mp} = \frac{J_{m-n}^2(v_{mp}R_0/R_p)}{J_m^2(v_{mp})(v_{mp}^2 - m^2)}, \quad (1)$$

где  $v_{mp}$  – корень уравнения  $J'_m(v_{mp}) = 0$ , соответствующий рассматриваемой  $TE_{m,p}$  моде;  $J_m(v_{mp})$  – функция Бесселя;  $R_p$  – радиус цилиндрической части резонатора;  $R_0$  – радиальная координата ведущего центра электронных орбит.

В первом приближении для оценки снижения КПД можно использовать простую модель, введя эффективный фактор связи, проведя усреднение выражения (1) по угловой координате. Радиус пучка для каждой азимутальной фракции можно выразить следующим образом:  $R_0 = R_{00} + d \cos(\psi)$ , где  $R_{00}$  – радиус несмещенного пучка,  $d$  – расстояние от оси пучка до оси резонатора (величина смещения).

повышения точности счета применяется тетраэдральная сетка. Следует отметить, что с помощью программы CST ранее была продемонстрирована возможность достоверного моделирования нелинейной динамики экспериментально реализованного гиротрона с рабочей частотой 1 ТГц при значительной сверхразмерности (отношение и диаметра, и длины резонатора к длине волны примерно равны 10) электродинамической системы [16].

Программный код KARAT для решения уравнений Максвелла использует

В итоге эффективный фактор связи будет иметь вид

$$G_{mp} = \frac{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} J_{m-n}^2(v_{mp}(R_{00} + d \cos(\psi))/R_p) d\psi}{J_m^2(v_{mp})(v_{mp}^2 - m^2)}. \quad (2)$$

В практически важных случаях смещение пучка мало, что позволяет разложить функцию Бесселя под интегралом в ряд по величине  $v_{mp}d/R_p$ . При этом, так как невозмущенный пучок соответствует максимуму функции Бесселя, первым ненулевым членом разложения будет квадратичный

$$J_{m-n}(v_{mp}(R_{00} + d \cos(\psi))/R_p) \cong J_{m-n}(v_{mp}R_{00}/R_p) + \frac{\alpha}{2} \cos^2(\psi),$$

$$\alpha = (1/4)(J_{m-n-2}(v_{mp}R_{00}/R_p) - 2J_{m-n}(v_{mp}R_{00}/R_p) + J_{m-n}(v_{mp}R_{00}/R_p))(v_{mp}d/R_p)^2.$$

После интегрирования выражение для эффективного фактора связи примет вид

$$G_{mp} = G_{mp0} \left( 1 + \frac{\alpha}{2J_{m-n}^2(v_{mp}R_{00}/R_p)} \right), \quad (3)$$

где  $G_{mp0}$  – фактор связи несмещенного пучка.

Для рассматриваемого нами гиротрона с рабочей модой  $TE_{5,3}$  несоосность пучка с величиной отклонения  $d = 0.3$  мм приведет к уменьшению эффективного фактора связи на 40% по сравнению с несмещенным пучком. Для оценки изменения значения КПД можно воспользоваться результатами работы [20], где представлены зависимости эффективности преобразования вращательной энергии электронов в энергию высокочастотного поля (так называемый поперечный КПД) от безразмерных параметра тока и длины резонатора. Для рассматриваемых нами параметров гиротрона уменьшение параметра тока (в который фактор связи входит линейно) на 40%, приведет к уменьшению поперечного (и, следовательно, полного) КПД приблизительно на 20%.

Полученные оценки хорошо соответствуют результатам численного моделирования, выполненного на основе усредненных уравнений и с использованием РИС-кода KARAT (рис. 2). Отметим, что для учета несоосности пучка и резонатора в укороченные уравнения [21], описывающие электронно-волновое взаимодействие в гиротроне, в уравнение возбуждения резонатора вводится дополнительное усреднение

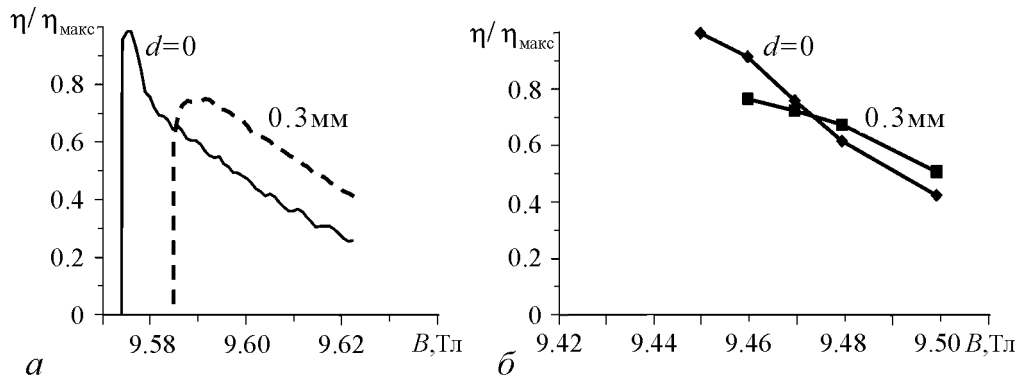


Рис. 2. Зоны генерации гиротрона с несмещенным и смещенным пучком:  $a$  – усредненные уравнения,  $b$  – метод крупных частиц (код KARAT). КПД нормирован на максимальное значение для несмещенного пучка

по азимутальному углу  $\psi$ , а в уравнения движения вводится коэффициент перед амплитудой поля, который характеризует отличие поля для данной фракции от поля для невозмущенного пучка.

Из рис. 2 видно, что относительное снижение КПД при смещении пучка  $d = 0.3$  мм (примерно  $\lambda/3$ ) составляет величину 25%. Некоторое различие в значениях резонансного магнитного поля, при котором достигается максимум КПД (в модели на основе усредненных уравнений (рис. 2, а) оно составляет 9.575 Тл, а при расчете методом крупных частиц (рис. 2, б) – 9.45 Тл), объясняется дискретностью сетки второго метода. Как результат, реальный радиус резонатора при моделировании методом крупных частиц отличается от изначально задаваемого на величину в пределах половины шага сетки по поперечной координате. В данном случае это различие составляет примерно 1.3%.

Следует отметить, что проведенный численный анализ был выполнен в предположении симметричного углового распределения питч-фактора и тока пучка относительно оси пучка. Вместе с тем, детальное моделирование электронно-оптической системы гиротрона с близкими параметрами [22] показывает, что смещение оси пучка приводит к значительному нарушению симметрии питч-фактора, отклонения которого от среднего значения могут достигать 15% и объясняются асимметрией магнитного поля на эмиттере, которая затем усиливается адиабатической накачкой [23]. Влияние такого пучка на параметры генерации в гиротроне будет являться предметом последующих исследований.

Наряду с влиянием несоосности значительный интерес представляет учет перекоса электронного пучка относительно оси резонатора. Адекватный учет такого эффекта в рамках усредненных уравнений уже не может быть сведен к вычислению эффективного коэффициента связи, поскольку последний также будет зависеть и от продольной координаты. В этой связи первоначальные оценки были выполнены в рамках метода крупных частиц. Перекос пучка формировался за счет наклона ведущего магнитного поля. Полученный результат демонстрирует, что при величине перекоса в 1 градус относительное снижение эффективности генерации составляет почти 40% (рис. 3).

Таким образом, проведенный численный анализ показывает существенное влияние нарушений азимутальной симметрии винтового электронного пучка на режим генерации субтерагерцового гиротрона, значительно большее, чем было предсказано в [24] для длинноволновых гиротронов, используемых, например, в технологиче-

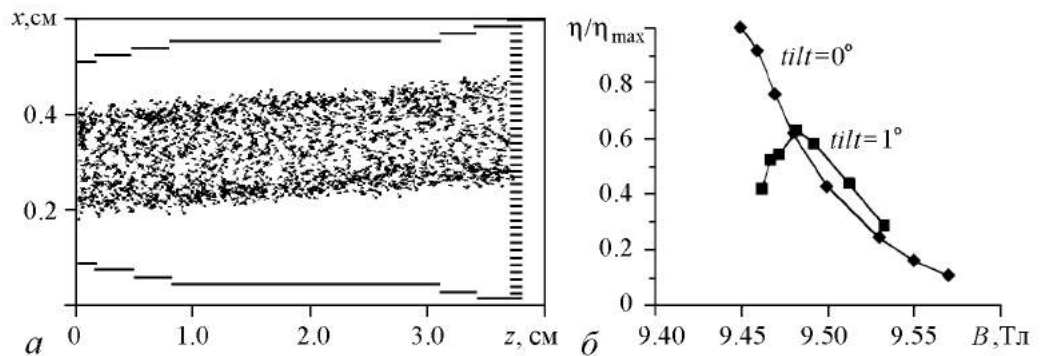


Рис. 3. Трехмерное моделирование перекоса электронного пучка (код KARAT): а – сечение пространства взаимодействия и векторы скорости макрочастиц, б – зоны генерации. КПД нормирован на максимальное значение для несмещенного пучка



ских комплексах микроволновой обработки материалов. Последнее легко объяснить, если учесть, что абсолютные величины погрешностей юстировки и изготовления отдельных узлов примерно одинаковы, а относительные значения растут с укорочением длины волны.

Полученные результаты предполагается использовать при проектировании гиротронов диапазона 500–800 ГГц для выработки требований на точность изготовления и сочленения отдельных узлов. Дальнейшие исследования предполагается сосредоточить в области реализации «сквозного» моделирования, при котором результаты расчетов параметров винтового электронного пучка, сформированного в несимметричной системе, будут использованы в качестве входных данных для программ моделирования электронно-волнового взаимодействия в трехмерном пространстве с нарушениями азимутальной симметрии.

Авторы глубоко признательны В.П.Тараканову за помощь в адаптации кода для расчета субмиллиметровых гиротронов.

*Работа выполнена при поддержке РФФ, грант №14-12-00887.*

### **Библиографический список**

1. Глявин М.Ю., Лучинин А.Г., Богдашов А.А., Мануилов В.Н., Морозкин М.В., Кашин Д., Родин Ю.В., Денисов Г.Г., Роджерс Дж., Ромеро-Таламас К.А., Пу Р., Шкварунец А.Г., Нусинович Г.С. Экспериментальное исследование импульсного терагерцового гиротрона с рекордными значениями мощности и эффективности // Известия вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 8–9. С. 550.
2. Глявин М.Ю., Лучинин А.Г. Терагерцовый гиротрон с импульсным магнитным полем // Известия вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 10–11. С. 831.
3. *Dumbrajs O.* Eccentricity of the electron beam in a gyrotron cavity // Int. J of Infrared and MM Waves. 1994. Vol. 15, № 7. P. 1255.
4. Венедиктов Н.П., Дубров В.В., Запелалов В.Е., Корнишин С.Ю., Котов А.В., Куфтин А.Н., Малыгин О.В., Седов А.С., Фикс А.Ш., Цалолыхин В.И. Экспериментальное исследование непрерывного высокостабильного гиротрона на второй гармонике для спектроскопии динамически поляризованных ядер // Известия вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 4. С. 260.
5. Завольский Н.А., Запелалов В.Е., Мусеев М.А., Седов А.С. Влияние несоосности электронного пучка и резонатора на характеристики гиротрона // Известия вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54, № 6. С. 444.
6. *Nusinovich G.S., Vlasov A.N., Botton M., Antonsen T.M., Cauffman S.* Effect of the azimuthal inhomogeneity of electron emission on gyrotron operation // Phys. Plasmas. 2001. Vol. 8, № 7. 3473.
7. *Nusinovich G.S., Sinitsyn O.V., Antonsen T.M.* Mode switching in a gyrotron with azimuthally corrugated resonator // Phys. Rev. Lett. 2007. Vol. 98. 205101.
8. *Dumbrajs O., Nusinovich G.S.* Effect of electron beam misalignments on the gyrotron efficiency // Phys. Plasmas. 2013. Vol. 20. 073105.
9. *Khutoryan E.M., Dumbrajs O., Nusinovich G.S., Idehara T.* Theoretical study of the effect of electron beam misalignment on operation of the gyrotron FU IV A // IEEE Trans. on Plasma Science. 2014. Vol. 42, № 6. P. 1586.
10. *Ginzburg N.S., Nusinovich G.S., Zavolsky N.A.* Theory of nonstationary processes in gyrotrons with low-Q resonators // Int. J. Electron. 1986. Vol. 61, № 6. P. 881.

11. Glyavin M.Yu., Chirkov A.V., Denisov G.G., Fokin A.P., Kholoptsev V.V., Kuftin A.N., Luchinin A.G., Golubyatnikov G.Yu., Malygin V.I., Morozkin M.V., Manuilov V.N., Proyavin M.D., Sedov A.S., Sokolov E.V., Tai E.M., Tsvetkov A.I., Zapevalov V.E. Experimental tests of 263 GHz gyrotron for spectroscopy applications and diagnostic of various media // *Rev. Sci. Instr.* 2015. 86(5). 054705.
12. [www.jastec-inc.com/e\\_products\\_cryogen/index.html](http://www.jastec-inc.com/e_products_cryogen/index.html)
13. Чирков А.В., Денисов Г.Г., Куфтин А.Н., Запезалов В.Е., Малыгин В.И., Моисеев М.А., Корнишин С.Ю. Многочастотный гиротрон с высокоэффективным синтезированным волноводным преобразователем // *Письма в ЖТФ*. 2007. Т. 33, № 8. С. 71.
14. <https://www.cst.com/Products/CSTS2>
15. Тараканов В.П. Универсальный электромагнитный код KAPAT // *Математическое моделирование. Проблемы и результаты* / Под ред. О.М. Белоцерковского. М.: Наука, 2003. 477 с.
16. Zaslavsky V.Yu., Ginzburg N.S., Glyavin M.Yu., Zhelezov I.V., Zotova I.V. Three-dimensional particle-in-cell modeling of terahertz gyrotrons with cylindrical and planar configurations of the interaction space // *Phys. Plasmas*. 2013. Vol. 20. 043103.
17. Тараканов В.П. Теоретический и численный анализ нелинейных задач физики плазмы посредством кода KAPAT. Дисс. д.ф.-м.н. М., 2011.  
<http://test.vak.ed.gov.ru/common/img/uploaded/files/TarakanovVP.pdf>
18. Зайцев Н.И., Гинзбург Н.С., Завольский Н.А., Запезалов В.Е., Иляков Е.В., Кулагин И.С., Куфтин А.Н., Лыгин В.К., Моисеев М.А., Новожилова Ю.В., Розенталь Р.М., Цалолыхин В.И. Высокоэффективный релятивистский гиротрон сантиметрового диапазона длин волн с микросекундной длительностью СВЧ импульса // *Письма в ЖТФ*. 2001. Т. 27, № 7. С. 8.
19. Гинзбург Н.С., Зайцев Н.И., Иляков Е.В., Кулагин И.С., Розенталь Р.М. Наблюдение автомодуляционных режимов генерации в релятивистском гиротроне с запаздывающей обратной связью // *Письма в ЖТФ*. 2002. Т. 28, № 9. С. 85.
20. Нусинович Г.С., Эрм Р.Э. КПД МЦР-монотрона с гауссовым продольным распределением ВЧ поля // *Электронная техника. Сер 1. Электроника СВЧ*. 1972. № 8. С. 55.
21. Моисеев М.А., Нусинович Г.С. К теории многомодовой генерации в гиромонотроне // *Известия вузов. Радиофизика*. 1974. Т. 17, № 11. С. 1709.
22. Запезалов В.Е., Корнишин С.Ю., Котов А.В., Куфтин А.Н., Малыгин О.В., Мануилов В.Н., Седов А.С., Цалолыхин В.И. Система формирования электронного пучка для гиротрона с частотой 258 ГГц, предназначенного для экспериментов по динамической поляризации ядер // *Известия вузов. Радиофизика*. 2010. Т. 53, № 4. С. 251.
23. Семенов Е.С., Планкин О.П., Розенталь Р.М. Развитие методов анализа электронно-оптических систем гиротронов с нарушениями азимутальной симметрии // *Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 2015. Т.23, №3 (в печати).
24. Malygin A.S., Pagonakis I.G., Piosczyk B., Kern S., Weggen J., Thumm M., Jelonnek J., Avramides K.A., Ives R.L., Marsden D., Collins G. Design and 3-D simulations of a 10-kW/28-GHz gyrotron with a segmented emitter based on controlled porosity-reservoir cathodes // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2013. Vol. 41, № 10. P. 2717.

## References

1. Glyavin M.Yu., Luchinin A.G., Bogdashov A.A., Manuilov V.N., Morozkin M.V., Kashin D., Rodin Yu.V., Denisov G.G., Rogers G., Romero-Talamas C.A., Pu R., Shkvarunetz A.G., Nusinovich G.S. Experimental investigation of the pulsed terahertz gyrotron with record-breaking power and efficiency parameters // Radiophysics and Quantum Electronics. 2013. Vol. 56, № 8-9. P. 550.
2. Glyavin M.Yu., Luchinin A.G. A terahertz gyrotron with pulsed magnetic field // Radiophysics and Quantum Electronics. 2007. Vol.50, № 10-11. P.755.
3. Dumbrajs O. Eccentricity of the electron beam in a gyrotron cavity // Int. J. of Infrared and MM Waves. 1994. Vol. 15, № 7. P. 1255.
4. Venediktov N.P., Dubrov V.V., Zapevalov V.E., Kornishin S.Yu., Kotov A.V., Kuftin A.N., Malygin O.V., Sedov A.S., Fiks A.Sh., Tsalolikhin V.I. Experimental study of a continuous-wave high-stability second-harmonic gyrotron for spectroscopy of dynamically polarized nuclei // Radiophysics and Quantum Electronics. 2010. Vol. 53, № 4. P. 237.
5. Zavoł'skiy N.A., Zapevalov V.E., Moiseev M.A., Sedov A.S. Influence of the axial misalignment of the electron beam and the cavity on the gyrotron parameters // Radiophysics and Quantum Electronics. 2011. Vol. 54, № 6. P. 402.
6. Nusinovich G.S., Vlasov A.N., Botton M., Antonsen T.M., Cauffman S. Effect of the azimuthal inhomogeneity of electron emission on gyrotron operation // Phys. Plasmas. 2001. Vol. 8, № 7. 3473
7. Nusinovich G.S., Sinitsyn O.V., Antonsen T.M. Mode switching in a gyrotron with azimuthally corrugated resonator // Phys. Rev. Lett. 2007. Vol. 98. 205101.
8. Dumbrajs O., Nusinovich G.S. Effect of electron beam misalignments on the gyrotron efficiency // Phys. Plasmas. 2013. Vol. 20. 073105.
9. Khutoryan E.M., Dumbrajs O., Nusinovich G.S., Idehara T. Theoretical study of the effect of electron beam misalignment on operation of the gyrotron FU IV A // IEEE Trans. on Plasma Science. 2014. Vol. 42, № 6. 1586.
10. Ginzburg N.S., Nusinovich G.S., Zavolsky N.A. Theory of nonstationary processes in gyrotrons with low-Q resonators // Int. J. Electron. 1986. Vol. 61, № 6. 881.
11. Glyavin M.Yu., Chirkov A.V., Denisov G.G., Fokin A.P., Kholoptsev V.V., Kuftin A.N., Luchinin A.G., Golubyatnikov G.Yu., Malygin V.I., Morozkin M.V., Manuilov V.N., Proyavin M.D., Sedov A.S., Sokolov E.V., Tai E.M., Tsvetkov A.I., Zapevalov V.E. Experimental tests of 263 GHz gyrotron for spectroscopy applications and diagnostic of various media // Rev. Sci. Instr. 2015. 86(5). 054705.
12. [www.jastec-inc.com/e\\_products\\_cryogen/index.html](http://www.jastec-inc.com/e_products_cryogen/index.html)
13. Chirkov A.V., Denisov G.G., Kuftin A.N., Zapevalov V.E., Malygin V.I., Moiseev M.A., Kornishin S.Yu. Multifrequency gyrotron with high-efficiency synthesized waveguide converter // Technical Physics Letters. 2007. Vol. 33, issue 4. P. 350.
14. <https://www.cst.com/Products/CSTS2>
15. Tarakanov V.P. Universal'nii elektromagnitnii kod KARAT// Matematicheskoye modelirovaniye. Problemy i rezul'taty / Pod red. O.M. Belotserkovskogo. M.: Nauka, 2003. 477 s. (in Russian).
16. Zaslavsky V.Yu., Ginzburg N.S., Glyavin M.Yu., Zheleznov I.V., Zotova I.V. Three-dimensional particle-in-cell modeling of terahertz gyrotrons with cylindrical and

planar configurations of the interaction space // *Phys. Plasmas*. 2013. Vol. 20. 043103.

17. *Tarakanov V.P.* Teoreticheskiy i chislennyy analiz nelineynykh zadach fiziki plazmy posredstvom koda KARAT. Diss. d.f.-m.n. M., 2011 (in Russian).  
<http://test.vak.ed.gov.ru/common/img/uploaded/files/TarakanovVP.pdf>
18. *Zaitsev N.I., Ginzburg N.S., Zavolsky N.A., Zapevalov V.E., Ilyakov E.V., Kulagin I.S., Kuftin A.N., Lygin V.K., Moiseev M.A., Novozhilova Yu.V., Rozental R.M., Tsololikhin V.I.* Highly efficient relativistic SHF gyrotron with a microsecond pulse width // *Technical Physics Letters*. 2001. Vol.27, № 4. P.266.
19. *Ginzburg N.S., Zaitsev N.I., Ilyakov E.V., Kulagin I.S., Rosenthal R.M.* Self-modulated generation observed in a delayed feedback relativistic gyrotron // *Tech. Phys. Lett.* 2002. Vol.28, № 5. P.395.
20. *Nusinovich G.S., Erm R.E.* // *Elektronnaya Tekhnica. Ser.1. Elektronika SVCh*. 1972. Vol. 8. S.55 (in Russian).
21. *Moiseev M.A., Nusinovich G.S.* Concerning the theory of multimode oscillation in a gyromonotron // *Radiophysics and Quantum Electronics*. 1974. Vol.17, № 11. P.1305.
22. *Zapevalov V.E., Kornishin S.Yu., Kotov A.V., Kuftin A.N., Malygin O.V., Manuilov V.N., Sedov A.S., Tsololikhin V.I.* System for the formation of an electron beam in a 258 GHz gyrotron designed for experiments on dynamic polarization of nuclei // *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2010. Vol. 53, № 4. P. 229.
23. *Semenov E.S., Plankin O.P., Rozental R.M.* Razvitiye metodov analiza elektronno-opticheskikh sistem girotronov s narusheniyami azimutal'noy simmetrii // *Izvestiya vuzov. Prikladnaya nelineynaya dinamika*. 2015. T. 23, № 3 (in Russian, in print).
24. *Malygin A.S., Pagonakis I.G., Piosczyk B., Kern S., Weggen J., Thumm M., Jelonnek J., Avramides K.A., Ives R.L., Marsden D., Collins G.* Design and 3-D simulations of a 10-kW/28-GHz gyrotron with a segmented emitter based on controlled porosity-reservoir cathodes // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2013. Vol. 41, №10. P. 2717.

*Поступила в редакцию 20.04.2015*

## **THE INFLUENCE OF THE AZIMUTHAL INHOMOGENEITY OF ELECTRON BEAM-MICROWAVE INTERACTION ON THE OPERATION REGIME OF SUBTERAHERTZ GYROTRONS**

*M. Yu. Glyavin<sup>1,2</sup>, N. A. Zavolsky<sup>1</sup>, V. E. Zapevalov<sup>1</sup>,  
V. Yu. Zaslavsky<sup>1,2</sup>, K. A. Lescheva<sup>2</sup>, R. M. Rozental<sup>1</sup>, A. S. Sedov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences

<sup>2</sup>Nizhny Novgorod State University

The investigation of operation regimes of CW/263 GHz/1kW gyrotron, developed at IAP RAS/GYCOM Ltd., was made by various numerical methods. The influence of the azimuthal inhomogeneity (such as electron beam radial misalignments and tilt) has been studied. The method of average equations and 3D PIC codes (CST Studio Suite and KARAT) were used. Results, achieved by different methods, are in agreement with

experimental data. It is shown, that for feasible values of asymmetry, relative efficiency reduction can reach 40% from initial value. The possibility of future three-dimensional analysis of THz band gyrotrons with overside cavities and simultaneous azimuthal asymmetry of the electron beam and electrodynamic system by PIC codes has been demonstrated.

*Keywords:* Asymmetry of the electron beam and electrodynamic system has been demonstrated by PIC codes.

*Глявин Михаил Юрьевич* родился (1965) в Горьком. По окончании (1988) Горьковского политехнического института принят на работу в Институт прикладной физики РАН. Защитил кандидатскую диссертацию (1999), а затем – докторскую (2009). Научная деятельность связана с разработкой и исследованиями мощных источников СВЧ-излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазона длин волн – гиротронов и разработкой технологических комплексов микроволновой обработки материалов на их основе. По этой тематике опубликовал около 100 работ в изданиях, индексируемых в Web of Science. С 2011 года заведует лабораторией микроволновых технологий ИПФ РАН, профессор ВШОПФ ННГУ, ведущий научный сотрудник ЗАО НПП ГИКОМ – признанного мирового лидера в промышленном производстве гироприборов. С 1999 года сотрудничает с Центром по разработке источников дальнего инфракрасного диапазона (Фукуи, Япония) и с университетом Мерилленда (США) в области реализации ТГц гиротронов и создания импульсных магнитных систем со сверхсильными полями.



603950 Нижний Новгород, ГСП–120, ул. Ульянова, 46  
Институт прикладной физики РАН  
603950 Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
E-mail: glyavin@appl.sci-nnov.ru

*Завольский Николай Александрович* родился (1956) в Ворсме Горьковской области. Окончил Горьковский государственный университет (1978) по специальности «математика». После окончания и до настоящего момента работает в Институте прикладной физики Академии наук СССР (в настоящее время ИПФ РАН). Область научных интересов: численные методы и разработка программного обеспечения в решении задач акустики, распространения радиоволн и электронно-волнового взаимодействия в гиротронах.



603950 Нижний Новгород, ГСП–120, ул. Ульянова, 46  
Институт прикладной физики РАН  
E-mail: zavolsky@appl.sci-nnov.ru

*Завезалов Владимир Евгеньевич* родился (1949) в городе Бор Горьковской области. Окончил радиофизический факультет Горьковского государственного университета (1972) по специальности «радиофизика». После окончания работал в Горьковском государственном университете, а с 1985 и до текущего момента работает в Институте прикладной физики Академии наук СССР (в настоящее время ИПФ РАН). В настоящее время – заведующий лабораторией мощных гиротронов для управляемого термоядерного синтеза. Защитил диссертации – кандидатскую (1985) и докторскую (2008). Докторская диссертация посвящена проблемам повышения эффективности генерации мощных гиротронов. Область научных интересов: теоретическое и экспериментальное исследование электронно-волновых процессов в мощных электронных приборах, а также разработка гиротронов для управляемого термоядерного синтеза, спектроскопии и технологических приложений. Лауреат премии правительства РФ в области науки и техники (2011).



603950 Нижний Новгород, ГСП–120, ул. Ульянова, 46  
Институт прикладной физики РАН  
E-mail: zapev@appl.sci-nnov.ru



*Заславский Владислав Юрьевич* родился в 1981 году. Поступил в Нижегородский государственный университет (1998) на радиофизический факультет на специальность «радиофизика и электроника». Получил диплом бакалавра по направлению «радиофизика» (2002) и диплом магистра по направлению «радиофизика» (2004). Поступил в очную аспирантуру ННГУ на специальность 01.04.03 «Радиофизика». Защитил (2009) диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по теме «Исследование механизмов селекции мод в лазерах на свободных электронах с двумерной распределенной обратной связью». Старший научный сотрудник Института прикладной физики РАН, кандидат физ.-мат. наук. Область научных интересов – теория релятивистских электронных СВЧ-приборов, моделирование динамики СВЧ-генераторов со сверхразмерными электродинамическими системами. Опубликовал около 60 статей в отечественных и зарубежных журналах.

603950 Нижний Новгород, ГСП–120, ул. Ульянова, 46  
Институт прикладной физики РАН  
603950 Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
E-mail: zas-vladislav@appl.sci-nnov.ru



*Лещева Ксения Александровна* родилась (1991) в Дзержинске Горьковской обл. Магистрант кафедры электроники радиофизического факультета ННГУ. В 2014 году получила диплом бакалавра по научному направлению «радиофизика». Область научных интересов: вакуумная электроника, методы численного моделирования электронных приборов СВЧ-диапазона.

603950 Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
E-mail: ksenilescheva@mail.ru



*Розенталь Роман Маркович* родился (1977) в Горьком. Окончил радиофизический факультет ННГУ по специальности «электроника» (1999). С 1998 года работает в ИПФ РАН научным сотрудником. Основная область научных интересов – нестационарные процессы в мощных приборах вакуумной СВЧ-электроники. Автор и соавтор более 25 научных работ.

603950 Нижний Новгород, ГСП–120, ул. Ульянова, 46  
Институт прикладной физики РАН  
E-mail: rrz@appl.sci-nnov.ru



*Седов Антон Сергеевич* родился (1984) в Горьком, получил диплом бакалавра по научному направлению «физика» (2005, ННГУ) и диплом магистра по научному направлению «физика» (2007, ННГУ). После окончания ННГУ работает в ИПФ РАН младшим научным сотрудником. Область интересов – электронно-волновое взаимодействие в гиротронах миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Опубликовал около 10 научных статей по данной тематике.

603950 Нижний Новгород, ГСП–120, ул. Ульянова, 46  
Институт прикладной физики РАН  
E-mail: anton-sedov@mail.ru



## ВЛИЯНИЕ ЗАЗОРА МЕЖДУ СЛОЯМИ ФЕРРИТА И СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКА В МУЛЬТИФЕРРОИДНОЙ СТРУКТУРЕ КОНЕЧНОЙ ШИРИНЫ НА СВОЙСТВА СОБСТВЕННЫХ ГИБРИДНЫХ ВОЛН\*

*К. В. Бубликов, А. В. Садовников, М. А. Константинова, С. Е. Шешукова*

Саратовский государственный университет

Рассмотрена слоистая мультиферроидная структура типа феррит–сегнетоэлектрик, ограниченная в поперечном направлении. Исследовано влияние воздушного зазора между слоями волноведущей структуры на свойства поперечных мод гибридных волн, образованных в результате взаимодействия волн парциальных систем. С помощью решения электродинамической задачи методом конечных элементов показано, что с увеличением расстояния между ферритом и сегнетоэлектриком связь между волнами парциальных систем ослабевает ввиду уменьшения перекрытия их электромагнитных полей. Полученные данные могут быть использованы для объяснения экспериментальных результатов, поскольку при создании феррит-сегнетоэлектрических слоистых структур возможно появление воздушного зазора между слоями.

*Ключевые слова:* Мультиферроидная структура, слоистая структура, феррит, поперечные моды, гибридизация волн, метод конечных элементов.

### Введение

В настоящее время представляется перспективной разработка устройств СВЧ-диапазона на основе слоистых структур феррит–сегнетоэлектрик (мультиферроидных структур) [1]. В таких направляющих системах имеется возможность управлять свойствами распространяющихся в них волн вариацией приложенных внешних статических магнитного и электрического полей. Активно проектируются фильтры, фазовращатели, ответвители мощности и другие устройства, чему посвящено множество теоретических и экспериментальных работ (см., например, [2–4]).

При создании экспериментальных макетов существует два основных метода изготовления слоистых структур: напыление слоя сегнетоэлектрика, либо закрепление пленки вариконда на поверхности феррита [5,4]. Первый метод имеет преимущество ввиду отсутствия зазора в структуре и невозможности смещения слоев

\*Статья написана по материалам доклада, прочитанного на XVI Международной зимней школе-семинаре по радиофизике и электронике СВЧ. Саратов, Россия, 2–7 февраля 2015.

относительно друг друга. Однако в случае изготовления магнотно-кристаллических структур оказывается невозможным создание сегнетоэлектрической нагрузки путем напыления на поверхность, ввиду наличия периодической структуры на поверхности магнитной пленки. Данное обстоятельство приводит к необходимости изучения влияния воздушного зазора на результаты эксперимента. Имея ввиду в перспективе разработку миниатюрных гиротропных направляющих структур сложной формы необходимо учитывать поперечные (ширинные) моды, распространяющиеся в таких системах. Ввиду того, что для волноведущих структур с гиротропными средами уравнения Максвелла не распадаются на системы ТМ- и ТЕ-волн [6], электродинамическую задачу следует решать численно, например, методом конечных элементов (МКЭ) [7].

В данной работе приводятся результаты детального изучения влияния воздушного зазора между слоями феррита и сегнетоэлектрика в мультиферроике на свойства гибридных волн, распространяющихся в такой структуре.

## 1. Модель структуры

Рассмотрим структуру (рис. 1), состоящую из пленки железо-иттриевого граната (ЖИГ) толщиной 20 мкм, выращенной на поверхности галлий-гадолиниевого граната (ГГГ) толщиной 500 мкм. ЖИГ сверху нагружен пленкой сегнетоэлектрика толщиной 300 мкм, расстояние между слоями ЖИГ и сегнетоэлектрика (обозначим его как  $d$ ) при численном моделировании изменялось. Ширина всех пленок слоистой структуры составляла 2 мм. Постоянное магнитное поле направлено касательно к ферриту в поперечном направлении (в направлении оси  $x$ ). При этом в пленке ЖИГ могут распространяться поверхностные волны [6]. Расчётной областью для решения задачи с помощью МКЭ являлось поперечное сечение волновода (направление распространения волны перпендикулярно сечению:  $k \updownarrow z$ ). В настоящее время большинство волноведущих устройств в магнетоэлектронике являются открытыми планарными. Поэтому для моделирования открытой структуры с целью минимизации влияния граничных условий на результаты расчетов левая и правая границы расчетной области (магнитные стенки не отмечены на рис. 1) были расположены от краев пленки ЖИГ на расстоянии, равном ширине самой пленки (по 2 мм).

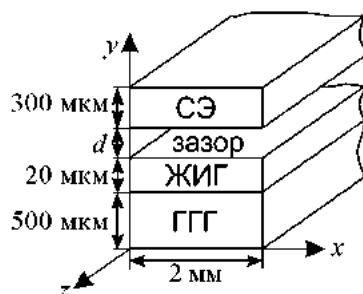


Рис. 1. Схематическое изображение исследуемой волноведущей структуры

Расстояние до верхней металлической стенки от поверхности сегнетоэлектрика составляло 700 мкм, что обеспечивало отсутствие значительного влияния верхней границы при уменьшении этого расстояния в случае подъема блока сегнетоэлектрика для моделирования зазора в мультиферроике. Расстояние от нижней границы феррита до нижней металлической стенки составляло 600 мкм (верхняя и нижняя границы тоже не отмечены на рис. 1).



При такой постановке задачи рассматриваемые волны в структуре являлись квази-ТЕ-волнами, с преобладающими электрическими компонентами в направлении распространения (далее приставку квази- будем опускать). Поперечные моды характеризуются номером  $n$ , равным числу вариаций электрического поля по ширине волновода. Электродинамический расчет аналогичной структуры, проведенный авторами ранее [8], показывает, что имеется область частот, где происходит эффективное взаимодействие электромагнитных волн парциальных систем, рассчитанных независимо для диэлектрического и ферритового волноводов. При этом в слоистой структуре распространяются гибридные ТЕ-волны, дисперсионные характеристики которых с удалением от области пересечения дисперсионных кривых ферритового и диэлектрического волноводов асимптотически стремятся к дисперсионным кривым волн в парциальных системах с соответствующими номерами  $n$  мод (первая мода к первой, вторая мода ко второй и т.д.).

## 2. Результаты расчета

Рассмотрим влияние зазора в мультиферроидной структуре на свойства распространяющихся в ней гибридных волн. Материальные параметры для численного моделирования соответствовали значениям используемых в экспериментальных исследованиях пленок ЖИГ и сегнетоэлектрика (см., например, [3,5,9]). Значение диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрического слоя устанавливалось равным  $\varepsilon_{СЭ} = 8000$ , что соответствует материалу ВК-8 [9]. Диэлектрическая проницаемость слоя ГГГ составляла  $\varepsilon_{ГГГ} = 9.0$ . Диэлектрическая проницаемость пленки ЖИГ полагалась равной  $\varepsilon_{ЖИГ} = 12.7$ , тензор магнитной проницаемости  $\hat{\mu}$  и зависимость компонент тензора от частоты  $f$  определялись соотношениями [6]

$$\hat{\mu} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \mu(f) & i\mu_a(f) \\ 0 & -i\mu_a(f) & \mu(f) \end{bmatrix}, \quad \mu(f) = \frac{f_H(f_H + f_M) - f^2}{f_H^2 - f^2}, \quad \mu_a(f) = \frac{f_M f}{f_H^2 - f^2},$$

где  $f_M = \gamma 4\pi M_0 = 4.9$  ГГц;  $f_H = \gamma H_0 = 3.64$  ГГц;  $\gamma = 2.8$  МГц/Э – гиромагнитное отношение в ЖИГ;  $H_0 = 1300$  Э – напряженность внешнего постоянного магнитного поля;  $M_0 = 1750/(4\pi)$  Гс – намагниченность насыщения пленки ЖИГ;  $\sqrt{f_H(f_H + f_M)} = f_{\perp} = 5.57$  ГГц – частота ферромагнитного резонанса в касательно намагниченной ферритовой пленке, являющаяся нижней отсечкой магнитостатической волны в ферритовом волноводе [10].

Рассмотрим приведенные на рис. 2 дисперсионные характеристики волн в парциальных системах на примере низших нечетных поперечных мод ( $n = 1, 3$ ) ферритового и диэлектрического волноводов. Данные моды выбраны для рассмотрения из-за наибольшей эффективности возбуждения в эксперименте [11]. Здесь: ТЕ<sub>СЭ1</sub> и ТЕ<sub>СЭ3</sub> – первая и третья моды сегнетоэлектрического волновода как парциальной системы; ТЕ<sub>ЖИГ1</sub> и ТЕ<sub>ЖИГ3</sub> – аналогично для ферритового волновода как парциальной системы; ТЕ<sub>ОС-ж1</sub> и ТЕ<sub>ОС-ж3</sub> – первая и третья моды слоистой структуры (зазор  $d = 0$  мкм), с ростом частоты соответствующие волнам сегнетоэлектрического волновода; ТЕ<sub>ОЖ-с1</sub> и ТЕ<sub>ОЖ-с3</sub> – первая и третья моды слоистой структуры (зазор  $d = 0$  мкм), с ростом частоты соответствующие волнам ферритового волновода; при

наличия зазора  $d = 300$  мкм аналогичные моды слоистых структур обозначены как  $TE_{300C-J1}$  и  $TE_{300C-J3}$  и  $TE_{300J-C1}$  и  $TE_{300J-C3}$ .

Вблизи области пересечения дисперсионных кривых волн, распространяющихся в пленке ЖИГ и сегнетоэлектрике, наблюдается связь этих волн, приводящая к образованию гибридных волн в слоистой структуре (см. рис. 2) с хорошо известным эффектом расталкивания [12]. При этом наиболее эффективно взаимодействуют поперечные моды одинаковых номеров. Возникновение воздушного зазора толщиной 300 мкм между слоями сегнетоэлектрика и феррита приводит к тому, что область взаимодействия парциальных систем (по частотам и волновым числам) значительно сужается к точке пересечения соответствующих мод волн парциальных систем.

Кривые с малыми углами наклона к оси абсцисс соответствуют волнам в ферритовом волноводе, с большими углами – в диэлектрическом волноводе. Наибольший интерес представляют ветви дисперсионных характеристик гибридных волн, с ростом  $k$  асимптотически переходящие в волну ферритового волновода, так как именно эти типы волн возбуждаются в эксперименте. Рассмотрим детальнее влияние зазора на данную дисперсионную ветвь первой поперечной моды гибридной волны.

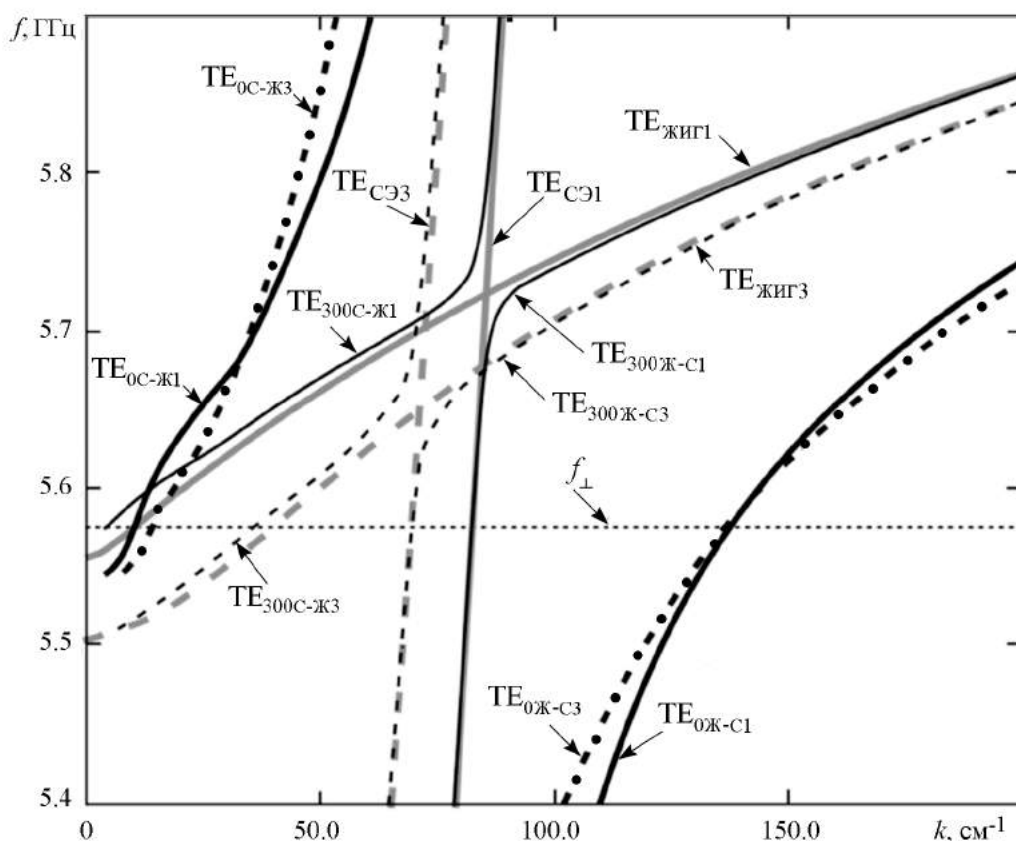


Рис. 2. Дисперсионные характеристики волн парциальных систем и гибридных волн в слоистой структуре без зазора и с зазором между слоями мультиферроика

На рис. 3 представлены результаты расчета дисперсионных характеристик первой поперечной моды в рассматриваемой слоистой структуре в зависимости от толщины воздушного зазора между слоями ЖИГ и сегнетоэлектрика. Видно, что максимальный эффект гибридации проявляется при  $d = 0$  мкм, когда перекрытие полей парциальных систем максимально. С увеличением зазора между слоями ЖИГ и сегнетоэлектрика дисперсионная кривая первой поперечной моды гибридной волны смещается вверх по частоте. Очевидно, что в предельном случае ( $d \rightarrow \infty$ ) будет наблюдаться отсутствие взаимодействия волн ферритового и сегнетоэлектрического волноводов, при котором дисперсионная кривая будет соответствовать первой поперечной моде волны ферритового волновода.

На рис. 4 приведена разница по частоте  $\Delta f$  между дисперсионной веткой первой моды волны ферритового волновода и первой модой гибридной волны слоистой структуры. Видно, что влияние зазора на частотную разницу носит нелинейный характер. Это вызвано экспоненциальным распределением электромагнитных полей ТЕ-волн по толщине пленки ЖИГ. На вставке рис. 4 приведено распределение  $|E|$  в расчетной области, из которого хорошо видна локализация полей с расположением максимумов в областях феррита и сегнетоэлектрика и перекрытие напряженностей электрического поля волн парциальных систем в области зазора.

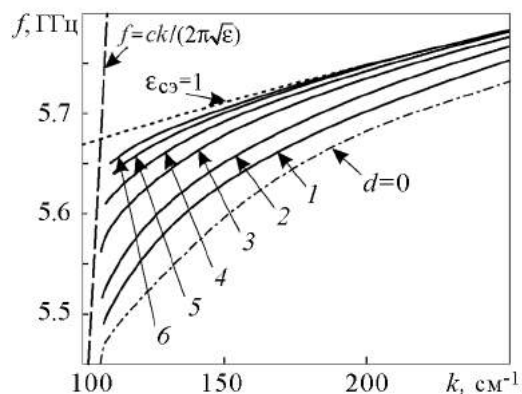


Рис. 3. Зависимость дисперсионной характеристики первой поперечной моды от ширины зазора  $d$ , мкм: 1 – 10, 2 – 20, 3 – 40, 4 – 60, 5 – 80, 6 – 100; пунктирная линия – дисперсионная кривая первой поперечной моды ферритового волновода ( $\epsilon_{сэ} = 1$ , сегнетоэлектрический слой отсутствует); штрих-пунктирная линия – дисперсионная кривая первой поперечной моды слоистой структуры (зазор отсутствует); штриховая линия – закон дисперсии в безграничной среде ( $\epsilon = 8000$ )

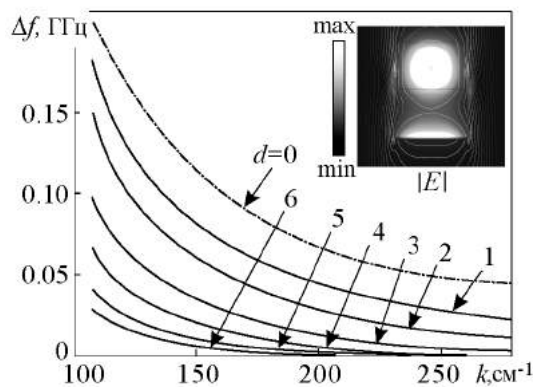


Рис. 4. Зависимость частотной разницы между дисперсионной кривой первой поперечной моды ферритового волновода и первой поперечной моды гибридной волны слоистой структуры без зазора ( $d = 0$ ) и для разных толщин зазора  $d$ , мкм: 1 – 10, 2 – 20, 3 – 40, 4 – 60, 5 – 80, 6 – 100. На вставке приведено распределение  $|E|$  в расчетной области для случая зазора  $d = 300$  мкм

## Выводы

На основе полученных результатов выявлены основные особенности влияния зазора в мультиферроике на свойства гибридных волн, распространяющихся в мультиферроидной структуре. Показано, что с увеличением зазора уменьшается область взаимодействия поперечных мод парциальных систем, а разница по частоте между

волной в ферритовом слое и гибридной волной падает. Данные особенности важно учитывать при конструировании макетов слоистых структур феррит– сегнетоэлектрик и при интерпретации экспериментальных результатов, полученных на макетах с зазорами. Вследствие уменьшения области взаимодействия между поперечными модами парциальных систем введение зазора может быть использовано для детального изучения особенностей формирования гибридных волн с учетом многомодового характера их распространения.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты № 13-07-12409, 14-02-00976, 13-02-00732), РНФ (14-19-00760) и стипендий президента РФ (СП-313.2015.5, СП-1551-2013.5).*

### **Библиографический список**

1. Schmid H. Multi-ferroic magnetoelectrics // *Ferroelectrics*. 1994. Vol. 162. P. 317.
2. Никитин А.А., Устинов А.Б., Семенов А.А., Калиникос Б.А. Планарный тонкопленочный феррит-сегнетоэлектрический СВЧ-фазовращатель // *Письма в ЖТФ*. 2014. Т. 40, вып. 7. С. 1.
3. Устинов А.Б., Калиникос Б.А. Мультиферроидные периодические структуры на основе магнетонных кристаллов для электронно-перестраиваемых сверхвысоко-частотных устройств // *Письма в ЖТФ*. 2014. Т. 40, вып. 13. С. 58.
4. Nikitin A.A., Ustinov A.B., Semenov A.A., Kalinikos B.A., Lahderanta E. All-thin-film multilayered multiferroic structures with a slot-line for spin-electromagnetic wave devices// *Applied Physics Letters*. 2014. Vol. 104. P. 093513.
5. Демидов В.Е., Калиникос Б.А., Кармаленко С.Ф., Семенов А.А., Эденхофер П. Дисперсионные характеристики поверхностных электромагнитно-спиновых волн в слоистых структурах феррит–сегнетоэлектрик–диэлектрик–металл// *Письма в ЖТФ*. 2002. Т. 28, вып. 11. С. 75.
6. Гуревич А.Г. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. М.: Наука, 1973.
7. Lon Y., Koshiba M. Evaluations of loss factor of multilayered inhomogeneous waveguides for magnetostatic wave using efficient finite element formalism// *IEEE Trans.* 1989. Vol. 37, № 4. P. 680.
8. Садовников А.В., Бубликов К.В., Бегинин Е.Н., Никитов С.А. Электродинамические характеристики слоистой структуры металл–диэлектрик– сегнетоэлектрик–диэлектрик–металл конечной ширины // *Радиотехника и электроника*. 2014. № 59. С. 876.
9. Вербичкая Т.Н. Вариконды. М.–Л.: Государственное энергетическое изд-во. 1958. 65 с.
10. Damon R.W., Eshbach J.R. Magnetostatic modes of a ferromagnet slab // *J. Phys. Chem. Solids*. 1961. Vol. 19. P. 308.
11. Vajrai S.N. Excitation of magnetostatic surface waves: Effect of finite sample width// *J. Appl. Phys.* 1985. Vol. 52. P. 910.
12. Демидов В.Е., Калиникос Б.А. Спектр дипольно-обменных спиновых волн в каталитически намагниченных слоистых структурах металл–сегнетоэлектрик–ферромагнетик–сегнетоэлектрик–металл // *Письма в ЖТФ*. 2000. Т. 26, вып. 7. С. 8.

## References

1. *Schmid H.* // *Ferroelectrics*. 1994. Vol. 162. P. 317.
2. *Nikitin A.A., Ustinov A.B., Semenov A.A., Kalinikos B.A.* // *Technical Physics Letters*. 2014. Vol. 40, № 4. P. 277.
3. *Ustinov A.B., Kalinikos B.A.* // *Technical Physics Letters*. 2014. Vol. 40, № 7. P. 568.
4. *Nikitin A.A., Ustinov A.B., Semenov A.A., Kalinikos B.A., Lahderanta E.* // *Applied Physics Letters*. 2014. Vol. 104. P. 093513.
5. *Demidov V.E., Kalinikos B.A., Karmanenko S.F., Semenov A.A., Edenhofer P.* // *Technical Physics Letters*. 2002. Vol. 28, № 6. P. 479.
6. *Gurevich A.G.* *Magnetic resonance in ferrites and antiferromagnets*. Moscow: Nauka, 1973. 591 p. (In Russian).
7. *Long Y., Koshiba M.* // *IEEE Trans.* 1989. Vol. 37, № 4. P. 680.
8. *Sadovnikov A.V., Bublikov K.V., Beginin E.N., Nikitov S.A.* // *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2014. № 9. P. 914.
9. *Verbitskaya T.N.* *Variconds*. Moscow–Leningrad: State Energy Publishing, 1958. 65 p. (In Russian).
10. *Damon R.W., Eshbach J.R.* // *J. Phys. Chem. Solids*. 1961. Vol. 19. P. 308.
11. *Bajpai S.N.* // *J. Appl. Phys.* 1985. Vol. 52. P. 910.
12. *Demidov V.E., Kalinikos B.A.* // *Technical Physics Letters*. 2000. Vol. 26, № 4. P. 272.

*Поступила в редакцию* 10.04.2015  
*После доработки* 18.05.2015

## TRANSFORMATION OF EIGENMODES SPECTRUM OF FINITE WIDTH MULTIFERROIC STRUCTURE DUE TO TUNING OF THE GAP BETWEEN FERRITE AND FERROELECTRIC LAYERS

*K. V. Bublikov, A. V. Sadovnikov, M. A. Konstantinova, S. E. Sheshukova*

Saratov State University

We consider a layered multiferroic structure consists of laterally confined ferrite and ferroelectric layers. We study the influence of the air gap between the layers on properties of transverse modes of hybrid waves. By the solution of the electrodynamic problem with the finite element method we show that with increasing of distance between the ferrite and ferroelectric layer the coupling between the waves of these partial systems weakened. These results can be used to explain the experimental data obtained on the layered structure. In the fabrication process of such structures the air gap between the layers may appear. The artificial weakening of the interaction of waves is also useful for a detailed study of the impact of the phenomenon of hybridization on the separate transverse modes.

*Keywords:* Multiferroic structure, layered structure, ferrite, transverse modes, hybridization phenomenon, finite elements method.



*Бубликов Константин Владимирович* – родился в Энгельсе (1991). Защитил диплом инженера по специальности «радиофизика и электроника» (2013) факультета нелинейных процессов Саратовского государственного университета. Постоянный участник научных конференций. Опубликовал несколько статей в соавторстве по численным расчетам дисперсионных характеристик в направляющих структурах с гиротропными средами. Магистрант факультета нелинейных процессов по специальности «радиофизика», инженер лаборатории магнитных явлений.

410012 Саратов, Астраханская ул., 83  
Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского  
E-mail: olorin91@mail.ru



*Садовников Александр Владимирович* – родился в Саратове (1987). Окончил с красным дипломом факультет нелинейных процессов Саратовского государственного университета, поступил в аспирантуру (2009) по специальностям «радиофизика» и «оптика». Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (2012, СГУ). Работает ассистентом на кафедре «Электроника, колебания и волны».

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



*Константинова Мария Алексеевна* – родилась в Саратове (1995). Студентка второго курса факультета нано- и биомедицинских технологий Саратовского государственного университета по специальности «электроника и наноэлектроника». Участник нескольких научных конференций.

410012 Саратов, Астраханская ул., 83  
Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского  
E-mail: marycale13@gmail.com



*Шешукова Светлана Евгеньевна* – родилась в Саратове (1987), окончила Саратовский государственный университет (2009), защитила диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по теме «Нелинейные магнитостатические волны в слоистых ферромагнитных структурах и магнитных кристаллах» (2012, СГУ). В настоящее время занимает должность ассистента на кафедре физики открытых систем факультета нелинейных процессов СГУ. Область научных интересов – волновые явления в тонких ферромагнитных пленках, физика магнитных явлений, нелинейные процессы в ферромагнетиках. Имеет ряд публикаций по данной тематике.

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



**XVI МЕЖДУНАРОДНАЯ ЗИМНЯЯ ШКОЛА-СЕМИНАР  
ПО РАДИОФИЗИКЕ И ЭЛЕКТРОНИКЕ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ**

*Всероссийская школа-конференция  
молодых ученых, аспирантов и студентов*

**«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
ЭЛЕКТРОНИКИ СВЧ И ТГЦ ДИАПАЗОНОВ»**

Саратов, Россия, 2–7 февраля 2015

**Организаторы**

- Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского
- НОЦ «Сложные системы»
- Саратовский филиал Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН

**При финансовой поддержке**

- Российский фонд фундаментальных исследований
- Фонд некоммерческих программ «Династия»
- Саратовское отделение IEEE
- ОАО «НПП «Алмаз»»

**Программный комитет**

*Трубецков Д.И., д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН, СГУ, Саратов, председатель; Блюх Ю.П., д.ф.-м.н., Технион, Хайфа, Израиль; Братман В.Л., д.ф.-м.н., профессор, ИПФ РАН, Нижний Новгород; Бушуев Н.А., к.ф.-м.н., д.э.н., генеральный директор ОАО «НПП «Алмаз»», Саратов; Галдецкий А.В., к.ф.-м.н., ОАО «НПП «Исток»», Фрязино; Гапонов-Грехов А.В., академик, научный руководитель ИПФ РАН, Нижний Новгород; Гуляев Ю.В., академик, директор ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва; Ерёмка В.Д., к.ф.-м.н., ИРЭ НАН Украины, Харьков, Украина; Калинин Ю.А., д.т.н., профессор, СГУ, Саратов; Клеев А.И., д.ф.-м.н., ИПФ РАН, Москва; Кураев А. А., д.ф.-м.н., профессор, БГУИР, Минск, Беларусь; Магда И.И., д.ф.-м.н., профессор, НИЦ «ХФТИ», Харьков, Украина; Морев С.П., д.ф.-м.н., ФГУП «НПП «Торий»», Москва; Некоркин В.И., д.ф.-м.н., профессор, ИПФ РАН, Нижний Новгород; Никитов С.А., д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва; Петелин М.И., профессор,*

ИПФ РАН, Нижний Новгород; *Солнцев В.А.*, д.ф.-м.н., профессор, МИЭМ, Москва; *Соминский Г.Г.*, д.ф.-м.н., профессор, СПбГПУ, Санкт-Петербург; *Стрелков П.С.*, д.ф.-м.н., профессор, ИОФ РАН, Москва; *Стриханов М.Н.*, д.ф.-м.н., профессор, ректор, Национальный исследовательский ядерный университет (МИФИ), Москва; *Филимонов Ю.А.*, к.ф.-м.н., директор СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Саратов; *Шалфеев В.Д.*, д.ф.-м.н., профессор, ННГУ, Нижний Новгород

#### **Организационный комитет**

*Председатель: Д.И. Трубецков*, чл.-корр РАН, профессор, д.ф.-м.н.; *зам. председателя: Ю.И. Левин*, профессор, к.ф.-м.н., декан факультета нелинейных процессов; *А.Е. Храмов*, профессор, д.ф.-м.н.; *ученый секретарь: Е.Н. Егоров*, доцент, к.ф.-м.н.; *члены оргкомитета: Ю.П. Шараевский*, профессор; *А.А. Короновский*, профессор; *Н.М. Рыскин*, профессор; *И.С. Ремпен*, доцент; *С.А. Куркин*, доцент; *О.И. Москаленко*, доцент; *Г.А. Краснова*, ассистент; *А.В. Титов*, ассистент

### **Рабочая программа**

#### **2 февраля 2015**

##### **Открытие Школы-семинара**

##### **Пленарное заседание: Общие вопросы теории и разработки классических вакуумных приборов СВЧ**

*Ерёмка В.Д.*, ИРЭ им. А.Я. Усикова НАНУ, Харьков, Украина. Вакуумные генераторы и усилители электромагнитного излучения терагерцового диапазона с пространственно развитым электронным потоком

*Мясин Е.А.*, ФИРЭ РАН, Фрязино. История изобретения, создания и исследования работы оротрона в см и мм диапазоне длин волн

#### **3 февраля 2015**

##### **Пленарное заседание: Перспективы продвижения микроволновых приборов и устройств в суб-ТГц и ТГц диапазоны**

*Григорьев А.Д.*, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург. Т-лучи: От идеи к реальности

*Мясин Е.А.*, *Евдокимов В.В.*, *Ильин А.Ю.*, ФИРЭ РАН, Фрязино. Оротрон и другие приборы с открытым резонатором терагерцового диапазона: Современное состояние исследований

*Галдецкий А.В.*, «НПП «Исток»», Фрязино. Вакуумные источники ТГц излучения

*Черепенин В.А.*, ИРЭ РАН, Москва. Мощные источники микроволнового излучения

##### **Устные доклады**

##### **Секция. Перспективы продвижения микроволновых приборов и устройств в суб-ТГц и ТГц диапазоны**

*Бенедик А.И.*, *Рыскин Н.М.*, *Рожнев А.Г.*, *Торгашов Г.В.*, СГУ, Саратов. Расчет электродинамических характеристик планарной замедляющей системы для при-



боров вакуумной микроэлектроники терагерцового диапазона частот  
*Бенедик А.И., Рыскин Н.М.*, СГУ, Саратов. Расчет электродинамических характеристик фотонно-кристаллического резонатора

*Андреев В.Г., Вдовин В.А.*, МГУ, Москва. Термоакустический метод регистрации импульсов СВЧ и ТГц диапазонов

*Каретникова Т.А., Рожнёв А.Г., Рыскин Н.М., Торгашов Г.В., Сеницын Н.И., Григорьев Ю.А., Бушуев Н.А., Бурцев А.А., Шалаев П.Д.*, СГУ, Саратов. Исследование и разработка усилителя О-типа субтерагерцового диапазона с ленточным электронным пучком

*Краснова Г.М., Трубецков Д.И.*, СГУ, Саратов. К линейной теории взаимодействия электронного потока и электромагнитной волны (шумовые явления, фото-ЛБВ, карсинотрод)

*Давидович М.В., Бушуев Н.А.*, СГУ, Саратов. Автоэмиссионная электронная пушка с ленточным пучком для терагерцовых ЛБВ

*Канаков В.А., Чуркин С.С.*, ННГУ, Нижний Новгород. Фазометрический комплекс КВЧ диапазона

*Шампоров В.А., Мясников А.С., Панкратова Е.В., Панкратов А.Л.*, ННГУ, Нижний Новгород. Параметрическая оптимизация условий узкополосной генерации терагерцовых частот в параллельных цепочках джозефсоновских контактов

*Азов Г.А., Ефремова М.В., Хриткин С.А.*, ОАО «Плутон», Москва. Результаты моделирования основных узлов импульсной ЛБВ W-диапазона с выходной мощностью 30–50 Вт

#### **Пленарное заседание: Из истории науки**

*Трубецков Д.И.*, СГУ, Саратов. Две лекции о великих уравнениях. Ч. 1

*Левин Ю.И., Гусякова О.И.*, СГУ, Саратов. Кавендишская лаборатория

#### **4 февраля 2015**

#### **Пленарное заседание: Теория СВЧ усилителей и генераторов. Из истории науки**

*Кузнецов А.П., Кузнецов С.П., Рожнев А.Г., Рыскин Н.М.*, СГУ, Саратов. Теория взаимодействия электронного потока с электромагнитной волной вблизи границы полосы пропускания. Волновая теория

*Кузнецов А.П., Кузнецов С.П., Рожнев А.Г., Рыскин Н.М.*, СГУ, Саратов. Теория взаимодействия электронного потока с электромагнитной волной вблизи границы полосы пропускания. Дискретная теория

*Григорьев А.Д., Джалилов Б.О.*, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург. Многоззорные резонаторы для клистронов миллиметрового диапазона длин волн

*Комаров Д.А.*, ФГУП «НПП “Торий”», НИЯУ МИФИ, Москва. Конкуренция «многоствольности» и «многолучевости»: Пути развития сверхмощных и сверхширокополосных клистронов

#### **Пленарное заседание: Из истории науки. Теория СВЧ усилителей и генераторов**

*Петелин М.И.*, ИПФ РАН, Нижний Новгород. Относительность по-древнегречески

*Трубецков Д.И.*, СГУ, Саратов. Две лекции о великих уравнениях. Ч. 2

*Рыскин Н.М.*, СГУ, Саратов. Синхронизация многомодовых электронных генераторов

## Стендовые доклады

5 февраля 2015

### Пленарное заседание: Гиротроны, гиросилители

*Лукиша О.И., Архипов А.В., Дворецкая Н.В., Колмакова Н.Г., Самсонов Д.Б., Соминский Г.Г., Трофимов П.А.,* СПбГПУ, Санкт-Петербург. Новые методы диагностики и повышения качества винтового электронного потока в гиротронах  
*Соминский Г.Г., Сезонов В.Е., Тарадаев Е.П., Тумарева Т.А., Илькив И.В., Задиранов Ю.М., Корнишин С.Ю., Степанова А.Н.,* СПбГПУ, Санкт-Петербург. Перспективные полевые эмиттеры для высоковольтных электронных устройств  
*Глявин М.Ю.,* ИПФ РАН, Нижний Новгород. Терагерцовые гиротроны: Состояние и перспективы  
*Запелалов В.Е.,* ИПФ РАН, Нижний Новгород. Современные тенденции развития гиротронов

### Устные доклады

#### Секции. Релятивистская и плазменная электроника больших мощностей. Применения приборов СВЧ в телекоммуникационных системах, медицине, ускорительной технике, радарх, системах безопасности

*Корниенко В.Н., Черепенин В.А.,* ИРЭ РАН, Москва. Особенности сверхизлучения поливинтового электронного потока в статических электрическом и магнитном полях  
*Бадарин А.А., Куркин С.А., Храмов А.Е.,* СГУ, СГТУ, Саратов. Исследование процессов генерации в релятивистском виркаторе на высших гармониках основной частоты осцилляций виртуального катода  
*Фролов Н.С., Куркин С.А., Бадарин А.А., Храмов А.Е., Короновский А.А.,* СГУ, СГТУ, Саратов. Источник излучения субмиллиметрового диапазона на основе электронного потока с виртуальным катодом  
*Межеряков В.В., Воробьев С.И., Семенов С.Н.,* ООО «Apstec Labs», СПбГЭТУ, Санкт-Петербург. Микроволновая система дистанционного досмотра  
*Соболев Д.И., Денисов Г.Г.,* ИПФ РАН, Нижний Новгород. Увеличение углового диапазона системы дистанционного управления направлением пучка  
*Дмитриев А.С., Емельянов Р.Ю., Герасимов М.Ю.,* ИРЭ РАН, Москва. Экспериментальное исследование динамики ансамбля осцилляторов Курамото в активных беспроводных сетях  
*Садовников А.В., Гришин С.В., Шараевский Ю.П., Никитов С.А., Davies C.S., Kruglyak V.V.,* СГУ, Саратов. Ответвление магнитостатических спиновых волн в ферромагнитных микроволноводах

### Устные доклады

#### Секция. Гиротроны, гиросилители

*Рожнев А.Г.,* ОФНС НИИ ЕН СГУ, Саратов. Простой способ расчета комплексных мод резонатора гиротрона  
*Завольский Н.А., Запелалов В.Е., Лецева К.А., Розенталь Р.М., Седов А.С.,* ИПФ РАН, Нижний Новгород. Влияние азимутальной несимметрии электронного пучка и резонатора на характеристики гиротрона  
*Глявин М.Ю., Завольский Н.А., Запелалов В.Е., Нусинович Г.С., Петелин М.И.,*

*Седов А.С.*, ИПФ РАН, Нижний Новгород. Оптимизация параметров маломощных терагерцовых гиротронов

*Глявин М.Ю., Морозкин М.В., Цветков А.И., Фокин А.П., Холопцев В.В.*, ИПФ РАН, Нижний Новгород. Разработка микроволнового комплекса для медико-биологических исследований

*Планкин О.П., Розенталь Р.М., Семенов Е.С.*, ИПФ РАН, Нижний Новгород. Развитие методов анализа электронно-оптических систем гиротронов с нарушениями азимутальной симметрии

*Абубакиров Э.Б., Денисов Г.Г., Гузнов Ю.М., Завольский Н.А., Запезалов В.Е., Запезалов С.А., Планкин О.П., Розенталь Р.М., Седов А.С., Семенов Е.С., Шевченко А.С.*, ИПФ РАН, Нижний Новгород. Проект 100 ГГц релятивистского гиротрона с выходной мощностью 5 МВт

## **6 февраля 2015**

### **Пленарное заседание: Специальные вопросы СВЧ электроники**

*Морев С.П.*, ФГУП «НПП “Торий”», НИЯУ МИФИ, Москва. Возможности промышленного применения углеродных наноразмерных структур с полевой эмиссией в качестве катодов мощных СВЧ приборов: Состояние дел, перспективы  
*Гинзбург Н.С.*, ИПФ РАН, Нижний Новгород. Квазиоптическая теория стимулированного черенковского излучения релятивистских электронных пучков и сгустков, движущихся над периодически гофрированными поверхностями

### **Пленарное заседание: Магнитоэлектроника**

*Гришин С.В., Морозова М.А., Романенко Д.В., Шараевский Ю.П.*, ОФНС НИИ ЕН СГУ, Саратов. Диссипативные структуры и хаос в кольцевых автоколебательных системах при трехволновом взаимодействии спиновых волн

*Никитов С.А., Хивинцев Ю.В., Филимонов Ю.А.*, СФ ИРЭ РАН, Саратов. Разработка элементной базы электроники СВЧ на принципах магноники

### **Устные доклады**

#### **Секция. Теория и разработка классических вакуумных приборов СВЧ**

*Комаров Д.А.*, ФГУП «НПП “Торий”», НИЯУ МИФИ, Москва. Принципиальные ограничения использования автоэмиссионных структур с минимальным уровнем управляющих напряжений в мощных импульсных ЭВП СВЧ

*Гамюнов Ю.Г., Патрушева Е.В.*, СГУ, Саратов. О клинотронном эффекте

*Накрап И.А., Савин А.Н.*, СГУ, Саратов. Условие выполнения теоремы Флоке для почти периодических волноведущих систем в режиме вынужденных колебаний

*Калинин Ю.А., Стародубов А.В., Фокин А.С.*, СГУ, Саратов. Экспериментальное исследование генератора с многоскоростным электронным пучком

*Кудряшов А.Г., Сивяков Б.К.*, СГТУ, Саратов. Уменьшение фазовой чувствительности лампы с бегущей волной

*Нестеров Д.А., Царев В.А.*, СГТУ, Саратов. Синтез многоканального двухзороного резонатора с кратными резонансными частотами, нагруженного индуктивными стержнями

*Иванов А.А., Дармаев А.Н., Морев С.П.*, ФГУП «НПП “Салют”», Нижний Новгород. Разработка электронно-оптической системы для низковольтной лампы бегущей волны W-диапазона

*Иванов А.А.*, ФГУП «НПП “Салют”», Нижний Новгород. Разработка замедляющей системы для низковольтной лампы бегущей волны W-диапазона  
*Дармаев А.Н., Комаров Д.А., Морев С.П.*, ФГУП «НПП “Торий”», Москва. Об одной возможности ввода магнитного поля на катод ЭОС с высокой компрессией интенсивного электронного потока

#### **Устные доклады**

##### **Секция. Нелинейная динамика и задачи СВЧ электроники и радиофизики**

*Кульминский Д.Д., Караваев А.С., Прохоров М.Д., Пономаренко В.И.*, СФ ИРЭ РАН, Саратов. Широкополосная система передачи информации на основе генератора с запаздыванием с переключаемым временем задержки

*Дмитриев Б.С., Жарков Ю.Д., Садовников С.А., Скороходов В.Н.*, СГУ, Саратов. Мощные СВЧ генераторы широкополосных и сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов

*Сафин А.Р., Устинов А.Б.*, НИУ «МЭИ», Москва. Теоретическое исследование релаксационного механизма ограничения нелинейного сдвига частоты колебаний

*Санин А.Л., Смирновский А.А.*, СПбПУ, Санкт-Петербург. Квантовый диссипативный осциллятор с пространственно-временным потенциалом четвертой степени

*Титов А.В.*, СГУ, Саратов. Приближенная линейная теория двухлучевого оротрона с различной структурой поля в открытом резонаторе

*Максименко В.А., Макаров В.В., Короновский А.А., Храмов А.Е., Баланов А.Г.*, СГУ, СГТУ, Саратов. Влияние параметров контакта коллектора на характеристики высокочастотной генерации в полупроводниковой сверхрешетке

*Макаров В.В., Максименко В.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Баланов А.Г.*, СГУ, СГТУ, Саратов. Исследование механизмов перехода к хаотической генерации в полупроводниковой наноструктуре, помещенной во внешнюю резонансную систему

#### **Устные доклады**

##### **Секция. Магнитоэлектроника**

*Байкенов Е.Ж., Изможеров И.М., Зверев В.В., Филиппов Б.Н.*, УФУ, Екатеринбург. Трехмерное микромагнитное моделирование периодических цепочек переходных областей в асимметричных вихревых доменных стенках

*Бегинин Е.Н., Садовников А.В., Шараевский Ю.П., Шешукова С.Е.*, СГУ, Саратов. Генерация и распространение коротких спиновых волн в нерегулярных ферритовых волноводах

*Бубликов К.В., Садовников А.В., Бегинин Е.Н., Шараевский Ю.П.*, СГУ, Саратов. Трансформация модового состава электромагнитных спиновых волн в структуре феррит-сегнетоэлектрик конечной ширины

*Устинов А.Б., Никитин А.А., Кондрашов А.В., Черкасский М.А., Калиникоз Б.А.*, СПбГЭУ, Санкт-Петербург. Автогенерация солитонов огибающей и динамического хаоса электромагнитно-спиновых волн в мультиферроидных осцилляторах

*Устинов А.Б., Кондрашов А.В.*, СПбГЭУ, Санкт-Петербург. Хаотическая динамика спин-волновых солитонов в ферромагнитных пленках

*Романенко Д.В., Гришин С.В., Шараевский Ю.П., Садовников А.В.*, СГУ, Сара-

тов. Особенности формирования временных диссипативных структур в неавтономной кольцевой автоколебательной системе с ферромагнитной плёнкой  
*Матвеев О.В., Морозова М.А.*, СГУ, Саратов. Нелинейные дисперсионные характеристики гибридных волн в мультиферроидных структурах  
*Тихонов В.В., Литвиненко А.Н.*, СГУ, Саратов. Магнитоакустический генератор с низким уровнем фазового шума

**7 февраля 2015**

**Пленарное заседание: Нелинейная динамика и задачи СВЧ электроники и радиофизики**

*Храмов А.Е., Короновский А.А., Куркин С.А., Магда И.И., Фролов Н.С.*, СГУ, СГТУ, Саратов. Схемы управления электронным потоком с виртуальным катодом с использованием обратной связи: Перспективные генераторы усилители мощного электромагнитного излучения виртуального типа

*Кузнецов А.П., Станкевич Н.В.*, СГТУ, Саратов. Автономные системы с квазипериодической динамикой: Примеры и свойства (обзор)

**Закрытие Школы-семинара**

### **Аналитический обзор материалов XVI Зимней школы-семинара**

XVI Зимняя школа-семинар по радиофизике и электронике СВЧ продолжает традицию Саратовских зимних школ, которые проводятся раз в три года, начиная с 1970-го, и уже вписали самостоятельную страницу в историю отечественной сверхвысокочастотной электроники. Исследования и разработки в этой области активно ведутся во многих научных организациях России, и их результаты были широко представлены на XVI Зимней школе. Состав участников школы включал представителей вузовской (Московский, Саратовский, Нижегородский университеты, Уральский федеральный университет, Саратовский технический университет, С.-Петербургский политехнический университет, С.-Петербургский электротехнический университет «ЛЭТИ», Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»), академической (Институт радиотехники и электроники РАН, его Фрязинский и Саратовский филиалы, Институт прикладной физики РАН (Н. Новгород)) и отраслевой науки (ФГУП «НПП «Торий»» (Москва), ФГУП «НПП «Алмаз»» (Саратов), ОАО «НПП «Исток»» (Фрязино), ОАО «Плутон» (Москва), РФЯЦ ВНИИЭФ (Саров)). Этот список дает представление о том, насколько широко ведутся подобные исследования в России. Кроме того, в работе школы участвовали представители фирмы Spellman High Voltage Electronics Corporation, познакомившие участников конференции со своей продукцией.

Всего на школе были представлены 23 пленарные лекции с обзорами современного состояния исследований в различных актуальных областях СВЧ электроники и радиофизики, 43 устных и 35 стендовых докладов с результатами оригинальных исследований. В них нашли отражение, по сути, все основные направления исследований по тематике конференции, которые выполняются в России и других странах.

Одной из ключевых тенденций развития современной СВЧ электроники является освоение терагерцевого (субмиллиметрового) диапазона. Это научное направление было представлено обзорными лекциями А.Д. Григорьева (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») и А.В. Галдецкого (ОАО «НПП «Исток»»). В этих лекциях был дан анализ состоя-

ния разработок миниатюрных приборов ТГц диапазона (лампы бегущей и обратной волны, клистроны с распределенным взаимодействием, и ряд других приборов). В частности, среди Российских предприятий следует выделить «НПП “Исток”», которое серийно производит миниатюрные ЛОВ малой мощности, перекрывающие диапазон от 258 ГГц до 1.4 ТГц, являясь монополистом в данном классе приборов. Две лекции Е.А. Мясина (ФирЭ РАН) были посвящены истории создания и современному состоянию разработок оротронов. Наиболее активная работа в этом направлении в настоящее время ведется в ФирЭ РАН и ИПФ РАН. Также приборам ТГц диапазона был посвящен целый ряд устных и стендовых докладов. Разработку приборов данного класса в последнее время ведут ЛЭТИ и ОАО «Светлана» (клистроны с ленточным электронным пучком диапазона 95 ГГц). Лампы бегущей волны диапазона 95 ГГц с замедляющей системой типа «петляющий волновод» разрабатываются в ОАО «Плутон» (Москва) и ОАО «НПП “Салют”» (Н. Новгород). Работа по созданию ЛБВ с ленточным пучком диапазона 220 ГГц ведется ОАО «НПП “Алмаз”» совместно с СГУ и СФ ИрЭ РАН (эти исследования поддержаны грантами РФФИ 13-08-00986, 14-02-00976). Коллективами из СГУ и СГТУ были представлены доклады, посвященные исследованию миниатюрных приборов: наноклистронов, нановиркаторов, полупроводниковых сврехрешеток, приборов с фотонно-кристаллическими резонаторами (гранты РФФИ 13-02-00732, 14-02-00976).

Важное место в программе Школы занимают лекции и доклады, посвященные гиротронам и другим приборам на циклотронном резонансе. Так, в лекции В.Е. Запелова (ИПФ РАН) были проанализированы современные тенденции развития гиротронов. Основное внимание уделялось разработке мощных гиротронов непрерывного действия для установок плазменного нагрева, субмиллиметровых гиротронов для применения в установках ЯМР-спектроскопии с динамической поляризацией ядер, а также гиротронам средней мощности для технологических применений (обработка материалов). Лекция М.Ю. Глявина (ИПФ РАН) была посвящена разработке гиротронов терагерцевого диапазона. На сегодняшний день в ИПФ РАН созданы гиротроны, реализующие достаточно мощную генерацию в терагерцевом диапазоне. Пожалуй, это одно из наиболее впечатляющих достижений в области гироприборов за последние годы. Однако для генерации на столь высоких частотах требуются чрезвычайно высокие магнитные поля (примерно 36 Тл). Поэтому обсуждаются альтернативные способы, в частности, работа на высших гармониках циклотронной частоты. Обеспечить устойчивую работу на высших гармониках помогает совершенствование электронно-оптической (многолучевые и приосевые пучки), электродинамической (ступенчатые, планарные и эшелеттные резонаторы), а также магнитной («сухие» криомагниты) систем. В лекции О.И. Лукши (СПбГПУ) обсуждались новые методы экспериментальной диагностики процессов в винтовых электронных пучках гиротронов, в частности, рентгеновская и СВЧ диагностика. Описаны способы улучшения качества пучка: снижение скоростного разброса и повышение питч-фактора за счет оптимизации распределения электрического и магнитного полей в области пушки. Реализация этих методик позволила повысить КПД гиротрона. Еще ряд докладов был посвящен различным конкретным вопросам теории и разработки гиротронов: методам оперативного расчета собственных колебаний в резонаторе, влиянию азимутальной асимметрии, разработке микроволнового комплекса для медико-биологических исследований. Эта тематика поддержана грантами РФФИ 14-02-00976, 14-08-00344, 15-41-02608.

Во многих странах продолжают активно развиваться исследования мощных и сверхмощных приборов релятивистской и плазменной СВЧ электроники. В лекции

Н.С. Гинзбурга (ИПФ РАН) рассказывалось о создании приборов с ленточными и трубчатыми релятивистскими пучками и сверхразмерными или открытыми колебательными системами на основе двумерных брегговских резонаторов. Была развита квазиоптическая теория подобных систем, которая хорошо согласуется с прямым 3D моделированием. В том числе, обсуждались процессы черенковского сверхизлучения электронных сгустков в таких структурах. Исследования в этом направлении проводятся в ИПФ РАН совместно с Институтом электрофизики УрО РАН (Екатеринбург) и ИЯФ СО РАН (Новосибирск). Использование брегговских резонаторов позволяет осуществить селекцию мод при больших поперечных размерах электронного пучка и получить спектр генерации, близкий к монохроматическому при высокой выходной мощности. Лекция А.Е. Храмова (СГТУ) была посвящена разработкам виртодов – генераторов с виртуальным катодом, использующих внешнюю обратную связь. Еще ряд докладов представителей СГУ и СГТУ был посвящен компьютерному моделированию и экспериментальному исследованию виркатодов (гранты РФФИ 13-02-01209, 14-02-00329, 14-02-31149). Доклад В.Н. Корниенко (ИРЭ РАН) был посвящен численному моделированию сверхизлучения циклотронных осцилляторов в электро- и магнитоэстатических полях с целью управления характеристиками импульса.

Значительный объем лекций и докладов был посвящен «классическим» приборам нерелятивистской СВЧ электроники, прежде всего ЛБВ и клистродам. Так, в лекции Д.А. Комарова (ФГУП «НПП “Торий”») был подведен итог большой работы по совершенствованию мощных широкополосных клистронов. В ней были описаны методики синтеза выходных характеристик многолучевых и многоствольных клистронов с мощностью до 100 кВт и полосой до 6%. Изложена концепция создания многополосных клистронов. Лекции Г.Г. Соминского (СПбГПУ) и С.П. Морева (ФГУП «НПП “Торий”») были посвящены проблемам разработки автоэмиссионных катодов для вакуумных СВЧ приборов. Данная тематика в свое время привлекала очень большое внимание, однако, до сих пор имеются лишь единичные примеры работающих приборов с автокатадами. Причины этого, в первую очередь, заключаются в низкой стабильности и недолговечности автокатодов. В лекции Г.Г. Соминского дан обзор перспективных материалов для автоэмиссионных катодов: углеродные нанотрубки, графенсодержащие материалы, нанотрубки из двуокиси титана. Они позволяют получить достаточно высокую плотность тока на катоде. Однако существующие эмиттеры пока не позволяют получать достаточно большие токи эмиссии. Не доказана их работоспособность в высоковольтных электронных приборах при отборе с их поверхности больших по величине токов в условиях технического вакуума. Также Г.Г. Соминским были изложены оригинальные результаты исследований, проводимых в СПбГПУ, направленные на разработку покрытий для защиты многоострийных эмиттеров от ионной бомбардировки. Также предложены новые композитные материалы (например, слоистые структуры гексаборид лантана–углерод). В лекции С.П. Морева был сделан важный вывод о принципиальной непригодности многоострийных катодов спиндтовского типа для высоковольтных СВЧ приборов. Были предложены оригинальные конструкции пушек с автоэммитерами как планарно-торцевой, так и цилиндрической геометрии, для которых разработаны специальные конфигурации электродов, обеспечивающих защиту от ионной бомбардировки. В настоящее время проходят испытания катодов на долговечность. Эта работа проводится «НПП “Торий”» совместно с саратовскими предприятиями «НПП “Алмаз”» и ООО «Волга-Свет». Доклад Д.А. Комарова был посвящен особенностям схемы включения автоэммитеров при работе в качестве катодов в мощных импульсных СВЧ усилителях. Ряд докладов был посвящен улучшению характеристик различных приборов СВЧ: ЛБВ, клистронов, клинотронов,

многоазорных монотронов (гранты РФФИ 13-02-01209, 14-02-00329, 14-02-31410). Подобная тематика традиционна для Саратовских зимних школ.

По-прежнему актуальным является развитие методов теоретического анализа и численного моделирования СВЧ приборов. Две лекции, представленные А.Г. Рожневым и Н.М. Рыскиным (СГУ), были посвящены волновой и дискретной теории нестационарного взаимодействия электронного пучка с электромагнитными волнами вблизи границ полосы пропускания электродинамической структуры. В них изложены результаты моделирования процессов усиления и генерации сигналов с различным спектральным составом, паразитного самовозбуждения и т.д.

Значительное место в программе Саратовских зимних школ в последние годы занимает магнитоэлектроника и спинтроника. В частности, в лекции Ю.А. Филимонова (СФ ИРЭ РАН) были описаны современные технологии создания магнитных наноструктур и различные перспективы их применения для создания элементов памяти на основе упорядоченных массивов магнитных наночастиц, перестраиваемых полосно-заграждающих фильтров, фазовращателей, корректоров отношения сигнал-шум, ограничителей мощности и т.д. Лекция С.В. Гришина (СГУ) была посвящена оригинальным результатам исследований нелинейных явлений в кольцевых системах, содержащих ферромагнитные пленки. Рассмотрены такие вопросы, как генерация диссипативных солитонов, переходы к хаосу. На основе подобных систем могут быть созданы кольцевые генераторы различных сложных сигналов: хаотических, солитоноподобных импульсов и др. Два доклада, посвященные аналогичной тематике, представлены А.Б. Устиновым (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»). Также был представлен ряд устных и стендовых докладов, в которых рассматривались особенности распространения волн в ферритовых волноводах и магнетонных кристаллах (гранты РФФИ 12-07-31009, 13-07-12409офи, 14-07-00273, 14-02-00429, 14-02-00577, 14-07-31142).

Традиционно для Саратовских зимних школ, в программе были представлены доклады, посвященные вопросам нелинейной динамики, теории колебаний и волн с акцентом на приложения к задачам электроники СВЧ. В лекции Н.М. Рыскина (СГУ) были изложены основы теории синхронизации применительно к многомодовым генераторам СВЧ-электроники. Отмечено, что в последние годы наблюдается всплеск интереса к изучению воздействия внешнего сигнала на различные мощные генераторы (гиротрон, релятивистская ЛОВ, релятивистский магнетрон и др.). Воздействие внешним сигналом помогает уменьшить время установления генерации, стабилизировать частоту и фазу генерируемого сигнала, осуществлять быструю скачкообразную перестройку частоты за счет эффекта переключения мод. В лекции были рассмотрены такие вопросы, как синхронизация генераторов с жестким возбуждением, взаимная синхронизация двух генераторов, связанных с задержкой, синхронизация многомодовой резонансной релятивистской ЛОВ. Лекция Н.В. Станкевич (СГТУ) была посвящена обзору автономных систем, генерирующих квазипериодические колебания. Различным проблемам нелинейной динамики было также посвящено большое количество устных и стендовых докладов (гранты РФФИ 14-02-31727, 14-02-00085, 14-02-31064, 14-02-31067, 14-32-50277).

Как обычно, в программе Зимней школы присутствовала «историческая» составляющая. Следует упомянуть две лекции Д.И. Трубецкова (СГУ), посвященные биографии и научному наследию Дж.К. Максвелла. Развитием этой темы послужила лекция Ю.И. Лёвина (СГУ) о Кавендишской лаборатории, первым директором которой был Максвелл. Оригинальную лекцию представил М.И. Петелин (ИПФ РАН), рассказавший о зарождении представлений об относительности пространства и времени в древней Греции. К историко-научному циклу можно отнести и упомянутую



выше лекцию Е.А. Мясина об истории создания оротрона, где было приведено много фактов биографии Ф.С. Русина – создателя этого прибора.

Примерно половину участников Школы составили молодые ученые, аспиранты и студенты. Они представляли в основном СГУ, СФ ИРЭ РАН, СГТУ, ННГУ, ИПФ РАН. Молодых участников делегировали также УФУ, ФГУП «НПП “Торий”», ОАО «НПП “Алмаз”», ОАО «Плутон», РФЯЦ ВНИИЭФ. Вообще, число представителей отраслевой науки по сравнению с предыдущими школами несколько выросло. Можно заключить, что наметившаяся в последние несколько лет тенденция притока молодежи в науку, в том числе, отраслевую, в целом сохраняется. Сопоставляя составы участников этой и нескольких предыдущих школ, можно заключить, что костяк участников остается прежним, однако, многие из тех, кто 5–10 лет назад были студентами и аспирантами, теперь являются сложившимися учеными, кандидатами наук. По-прежнему продолжает активную работу ряд представителей старшего поколения, среди них – выдающиеся ученые и инженеры, традиционно составляющих основу коллектива лекторов на Саратовских зимних школах.

Тематика лекций и докладов в целом соответствует наиболее актуальным проблемам вакуумной СВЧ электроники с точки зрения мировой науки, в чем можно убедиться, сопоставив программу Школы с программами ведущих международных конференций, например, ежегодных Международных конференций по вакуумной электронике (IVEC). По основным направлениям исследования, выполняемые российскими учеными, находятся на мировом уровне.

Анализ опубликованных материалов Школы-семинара показывает, что большинство исследований, выполняемых в вузах и институтах РАН, по-прежнему проводится при финансовой поддержке РФФИ (всего около 20 проектов). По сравнению с предыдущими Школами общее число ссылок на поддержку грантами РФФИ остается примерно постоянным, однако наблюдаются структурные изменения, связанные, в первую очередь, с появлением грантов поддержки молодежных коллективов. Их доля составляет примерно половину. Также встречается ссылка на один проект ориентированных фундаментальных исследований. Исчезли упоминания о международных проектах. Примерное распределение проектов по областям исследований было приведено выше. Среди работ, выполненных на промышленных предприятиях, ссылок на поддержку РФФИ (равно как и других фондов) практически нет. Таким образом, РФФИ, безусловно, принадлежит ведущая роль в поддержке исследований в области сверхвысокочастотной электроники в вузовском и академическом секторе российской науки. Тем не менее, здесь заметны перемены, обусловленные, прежде всего, появлением грантов РНФ (4 проекта, ссылки на поддержку которыми содержат многие доклады, в частности, по гиротронной тематике), а также с появлением ссылок на проекты, выполняемые в вузах по госзаданиям. Эпизодически встречаются ссылки на поддержку другими фондами (фонд «Династия», гранты Президента РФ для молодых кандидатов и докторов наук, гранты ведущих научных школ).

*Е.Н. Егоров,*  
ученый секретарь Школы-семинара