

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Сигов А.С. Главный редактор журнала, Президент Московского технологического университета, академик РАН, д.ф.-м.н., профессор, e-mail: sigov@mirea.ru

Кудж С.А. Ректор Московского технологического университета, д.т.н., профессор, e-mail: rector@mirea.ru

Большаков А.К. Директор Института инновационных технологий и государственного управления Московского технологического университета, к.э.н., доцент, e-mail: bolshakov@mirea.ru

Буслаева Т.М. Профессор, д.х.н., Московский технологический университет, e-mail: buslaeva@mirea.ru

Есипова О.В. Ответственный секретарь, к.х.н., доцент, Московский технологический университет, e-mail: esipova@mirea.ru

Жуков Д.О. Заведующий кафедрой интеллектуальных технологий и систем Московского технологического университета, д.т.н., профессор, e-mail: zhukov_do@mirea.ru

Карнаков В.В. Директор Института комплексной безопасности и специального приборостроения Московского технологического университета, к.т.н., e-mail: karnakov_vv@mgupr.ru

Кимель А.В. К.ф.-м.н., Университет г. Наймеген (Нидерланды), e-mail: a.kimel@science.ru.nl

Кондратенко В.С. Заведующий кафедрой оптических и биотехнических систем и технологий Московского технологического университета, д.т.н., профессор, e-mail: kondratenko_vs@mgupr.ru

Кузнецов В.В. И.о. Директора Физико-технологического института Московского технологического университета, к.т.н., доцент, e-mail: kuznetsov@mirea.ru

Куликов Г.В. Директор Института радиотехнических и телекоммуникационных систем Московского технологического университета, д.т.н., профессор, e-mail: kulikov@mirea.ru

Мыльникова А.Н. Директор Института управления и стратегического развития организаций Московского технологического университета, к.э.н., e-mail: mylnikova@mirea.ru

Перно Филипп. Проректор по научной работе Высшей инженерной школы, профессор, г. Лилль, Франция

Романов М.П. Директор Института кибернетики Московского технологического университета, д.т.н., профессор, e-mail: m_romanov@mirea.ru

Савиных В.П. Президент МИИГАиК, член-корреспондент РАН, д.т.н., профессор, e-mail: president@miigaik.ru

Скотт Джеймс. Профессор, член Лондонского Королевского общества, Университет г. Кембридж, Великобритания, e-mail: jamescott@acm.org

Цветков В.Я. Советник ректората Московского технологического университета, д.т.н., профессор, e-mail: cvj2@mail.ru

РЕДАКЦИЯ

Сигов А.С. Главный редактор журнала, д.ф.-м.н., профессор, e-mail: sigov@mirea.ru

Буслаева Т.М. Профессор, д.х.н., e-mail: buslaeva@mirea.ru

Есипова О.В. Ответственный секретарь, к.х.н., доцент, e-mail: esipova@mirea.ru

Семерня Л.Г. Технический редактор, e-mail: semernya@mirea.ru

Середина Г.Д. Зав. редакцией, к.т.н., e-mail: seredina@mirea.ru

Цветков В.Я. Профессор, д.т.н., e-mail: cvj2@mail.ru

Адрес редакции:

Россия, 119571, Москва, пр. Вернадского, д. 86, оф. Л-119

Тел.: +7 (495) 246-05-55 (#2-88); e-mail: seredina@mirea.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ. ИНФОРМАТИКА. ПРОБЛЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Зуев А.С., Болбаков Р.Г.

О телекоммуникационных сервисах на основе технологий виртуальной реальности 3

Сорокин С.А., Бененсон М.З., Сорокин А.П.

Методики оценки производительности гетерогенных вычислительных систем 11

СОВРЕМЕННЫЕ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Смирнов А.В.

Перспективы применения эвристических методов оптимизации в проектировании радиотехнических и телекоммуникационных устройств и систем 20

МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Лапин Д.Г., Овчинников И.С.

Модель локального ионно-лучевого осаждения платины сфокусированным пучком ионов 34

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ

**Сандуляк А.В., Сандуляк А.А., Полисмакова М.Н., Киселев Д.О.,
Сандуляк Д.А.**

Магнетометр Фарадея с полюсными наконечниками-полусферами: идентификация зоны стабильного силового фактора 43

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Бердников В.П.

Алгоритм определения полных областей устойчивости нестационарных нелинейных систем 55

МИРОВОЗЗРЕНЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ И ОБЩЕСТВА

Бодрова Е.В., Голованова Н.Б.

Модернизация высшей технической школы: исторический опыт и современность 73

УДК 004.7

О ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕРВИСАХ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

**А.С. Зуев[@],
Р.Г. Болбаков**

Московский технологический университет (МИРЭА), Москва 119454, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: Zuev_A@mirea.ru

Технологии виртуальной реальности рассматриваются как перспективное направление развития телекоммуникационных систем и сервисов. Обосновывается возможность формирования уже в краткосрочной перспективе нового сегмента мирового рынка телекоммуникационных сервисов, ориентированного на предоставление услуг связи массовому потребителю и индустрию развлечений, на новые способы продвижения товаров и распространения образовательного контента, на решение прикладных задач управления государственными структурами и социально-экономическими системами. Приводится подход к формированию и тарификации пакетов соответствующих телекоммуникационных услуг, исследуются возможности использования существующей инфраструктуры сотовой связи. Уделено внимание анализу перспектив перехода к новым стандартам мобильной связи пятого поколения, использования новых способов организации доступа в Интернет, а также новых форматов передачи и обработки мультимедийной информации, в том числе с обеспечением иммерсивности в средах виртуальной реальности. Анализируется вероятность опережающего развития в данном направлении телекоммуникационных сервисов и услуг, предоставляемых национальными и транснациональными операторами связи России, при этом в качестве нормативной базы рассматриваются программа «Цифровая экономика Российской Федерации» и Стратегия развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы.

Ключевые слова: виртуальная реальность, сотовая связь, мобильный интернет, телекоммуникационный сервис, цифровая экономика, информационное общество, человеко-машинное взаимодействие.

ON PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF TELECOMMUNICATION SYSTEMS AND SERVICES BASED ON VIRTUAL REALITY TECHNOLOGY

**A.S. Zuev[@],
R.G. Bolbakov**

Moscow Technological University (MIREA), Moscow 119454, Russia

[@]Corresponding author e-mail: Zuev_A@mirea.ru

Virtual reality technologies are considered to be a basis and a promising development trend of telecommunication systems and services. New opportunities and sci-tech problems that need to be solved are currently undergoing analysis. In the nearest future, the possibility of creating a new segment in the international telecommunication services market that is oriented toward providing communication services to the mass consumer and the entertainment industry, new tools for goods promotion and education content delivery, as well as toward solving experimental problems in managing state structures and social economical systems, is being justified. An approach to creating and charging for according telecommunication services is being given, opportunities for using the existing national and international cellular connection infrastructure is researched. A lot of attention is paid to analyzing the prospects of shifting toward new cellular network standards of the fifth generation, employing new ways of connecting to the Internet, as well as new formats of transmitting and processing multimedia, including the provision of immersion in the virtual reality environment. Working on building grounds for the rapid development in this direction of telecommunication services and options provided by the Russian national and transnational cellular network operators, while using the "Digital Economy of the Russian Federation" program and the Strategy for Developing the Information Community of the Russian Federation in 2017–2030 as the regulatory basis. Attention is paid to research agendas, research in the area of equipment and telecommunication services exploitation based on virtual reality equipment safety in terms of consumer health.

Keywords: virtual reality, cellular communication, mobile internet, telecommunication service, digital economy, informational society, human-computer interaction.

Введение

Прогнозируемый в среднесрочной перспективе переход к шестому технологическому укладу потребует существенных преобразований в обеспечивающей структуре всех сфер деятельности общества [1]. Одним из основных элементов данной инфраструктуры является сфера телекоммуникационных технологий, обеспечивающая телекоммуникационные сервисы – механизмы и инструменты передачи и обработки информации, как то: сотовая связь, мобильный интернет, социальные сети, мобильные приложения и т.п. Состав телекоммуникационных услуг, предоставляемый различными провайдерами в рамках одноименных сервисов, сегодня фактически идентичен и отличается в основном отдельными опциями их использования и ценовыми предложениями.

Развитие телекоммуникационной отрасли не может ограничиваться только совершенствованием уже применяемых технологий и программно-аппаратных средств. В контексте ожидаемых масштабных преобразований в функционировании социальных институтов и экономических субъектов для сферы телекоммуникаций необходим поиск направлений опережающего развития, результатом которого должно являться заблаговременное формирование новых, но востребованных в будущем сегментов рынка телекоммуникационных сервисов и входящих в их состав услуг. С точки зрения экономической эффективности предлагать новые телекоммуникационные сервисы и услуги целесообразно в наибольших сегментах существующего рынка, отвечающих наиболее предпочтительным целевым аудиториям: доступ в интернет и мобильная (сотовая) связь [2].

В настоящее время приняты нормативные документы и реализуются программы, регламентирующие развитие информационных и телекоммуникационных технологий в РФ, в том числе:

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 1 ноября 2013 г. № 2036-р «Стратегия развития отрасли информационных технологий в Российской Федерации на 2014 – 2020 годы и на перспективу до 2025 года».

2. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 г. № 1632-р «Цифровая экономика Российской Федерации».

3. Указ Президента Российской Федерации от 09.05.2017 г. № 203 «О стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017 – 2030 годы».

Однако поиск ответа на вопрос о том, какие именно направления опережающего развития возможны в данных сферах, по мнению авторов, целесообразно искать в научных и инженерных сообществах. Одним из таких направлений может являться развитие технологий виртуальной реальности (*virtual reality*, VR) до возможности применения в качестве основы для инновационных телекоммуникационных сервисов и услуг, а также систем управления государственными структурами и социально-экономическими системами [2].

Телекоммуникационные сервисы и услуги на основе виртуальной реальности

В нынешних условиях сотовая связь и мобильный интернет являются общедоступными в большинстве стран мира, а география областей покрытия и аудитория абонентов данных телекоммуникационных сервисов стабильно расширяются. Любой абонент оператора сотовой связи может быть идентифицирован по номеру телефона, и дополнительная телекоммуникационная услуга на основе технологий виртуальной реальности оказывается ему посредством использования уже подключенных услуг мобильного интернета. Рассмотрим концепцию реализации такой дополнительной услуги на основе типовой телекоммуникационной системы (ТКС) сотовой связи:

1. На современных мобильных телефонах и смартфонах выполняются VR-приложения; данные устройства используются в качестве экранов для специальных шлемов (например, http://www.espada-tech.ru/pr_-41025.shtml), то есть выполняют основную функцию оконечных устройств ТКС.

2. Интерактивное взаимодействие с выполняемым приложением VR обеспечивается использованием контроллеров, которые дополняют функционал оконечных устройств ТКС (подобно <http://top3dshop.ru/ar-vr/controller-samsung-gear-vr.html> или <http://top3dshop.ru/ar-vr/vrbox-controller.html>).

3. Сети приема-передающих устройств для подключения абонентов к услуге обеспечиваются уже используемым оборудованием операторов сотовой связи – базовыми станциями, линиями связи, коммутационными центрами и т.д.

4. Для коммутации потребителей дополнительной услуги требуется дополнить типовую ТКС сотовой связи сервером, обеспечивающим синхронизацию абонентов в процессе использования конкретного приложения VR. Заметим, что данный сервер сможет обеспечить также работу абонентов, использующих любые способы доступа в Интернет.

Фактически оператор сотовой связи автоматически предоставляет свою ТКС и мобильный интернет как техническое обеспечение для рассматриваемой дополнительной услуги. При этом основания для взимания оплаты с ее потребителя и/или оператора (провайдера) у него отсутствуют. Помимо мобильных телефонов и смартфонов, в качестве оконечных устройств могут использоваться специализированные устройства вир-

туальной реальности, такие, как шлемы HTC Vive (<https://www.vive.com/ru>) и Oculus Rift (<https://www.oculus.com>).

В общем виде структура сервиса телекоммуникационных услуг в средах виртуальной реальности приведена на рис. 1.

Структура сервера VR-сервиса в общем виде представлена на рис. 2.

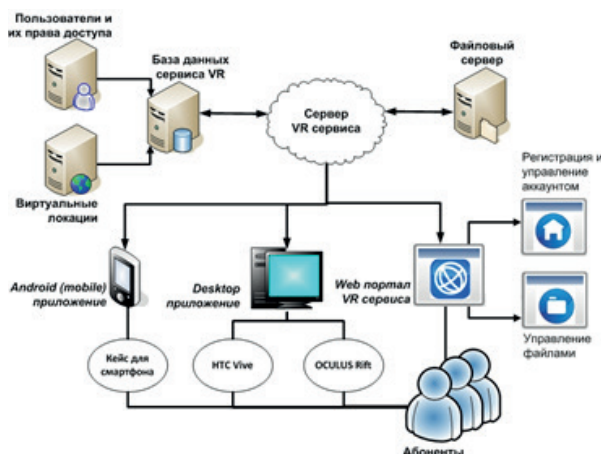


Рис. 1. Общий вид структуры сервиса в средах виртуальной реальности.

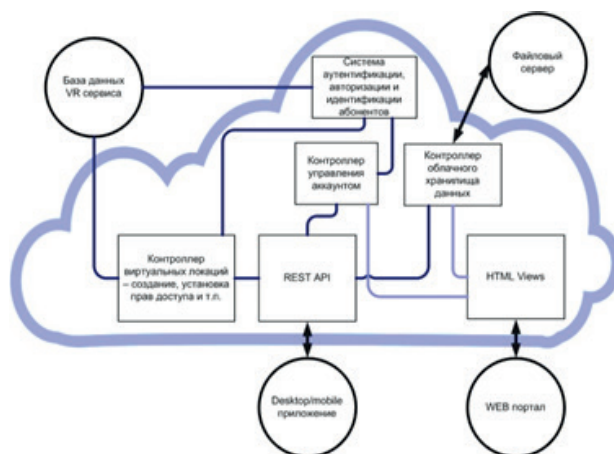


Рис. 2. Общий вид структуры сервера VR-сервиса.

Основными задачами, требующими решения для реализации рассматриваемых телекоммуникационных сервисов и услуг, являются:

- обеспечение достаточных вычислительных мощностей оконечных устройств;
- быстрая передача и обработка больших объемов мультимедийной информации.

Данные задачи в среднесрочной перспективе могут иметь комплексное решение с учетом описанных далее тенденций развития технологий передачи и обработки информации.

1. Ожидающееся внедрение с 2020 года стандартов связи пятого поколения 5G предполагает увеличение скорости передачи данных в 20 раз и сокращение времени задержки более, чем в 10 раз по сравнению со стандартами 4G (Viewon 5G Architecture (Version 2.0). 5 GPPP Architecture Working Group. – 18.07.2017. – 113 p.).

2. Одним из направлений деятельности Международного союза электросвязи (МСЭ, International Telecommunication Union, ITU), специализированного учреждения Органи-

зации Объединенных Наций в области информационно-коммуникационных технологий является разработка к 2022 году специализированного стандарта MPEG Immersive Media (MPEG-I), обеспечивающего не только эффективность передачи, обработки и воспроизведения мультимедийной информации в средах виртуальной реальности, но и ее иммерсивность – создание у пользователя эффекта присутствия в данной среде [3].

3. Наиболее крупные игроки рынка телекоммуникационных сервисов ведут активный поиск новых способов организации доступа в Интернет:

3.1 Проект Aquila от Facebook предполагает использование наземных станций и беспилотных летательных аппаратов (<https://www.facebook.com/notes/mark-zuckerberg/the-technology-behind-aquila/10153916136506634>).

3.2 Проект Project Loon от Google обеспечит использование наземных станций и воздушных шаров в стратосфере (<https://x.company/loon>).

3.3 Проект Falcon от Space X ориентирован на разработку многоразовых средств выведения спутников, в том числе, на низкие орбиты (<http://www.spacex.com/falcon9>).

Тарификация телекоммуникационных услуг на основе виртуальной реальности

Современная практика предоставления телекоммуникационных услуг основана на принципах предварительной оплаты используемого в будущем пакета услуг. Аналогичный принцип может быть использован для тарификации новых услуг в составе телекоммуникационных сервисов VR (таблица).

Пример тарификации пакета услуг телекоммуникационного сервиса VR

	Тарифные планы (варианты пакета услуг)				
	План 1	План 2	План 3	...	План n
Продолжительность сеансов связи (минуты)	A1	A2	A3	...	вариативно
Макс. количество абонентов (человек)	P1	P2	P3	...	вариативно
Максимальный объем трафика (гигабайты)	T1	T2	вариативно	...	вариативно
Объем облачного хранилища (гигабайты)	V1	вариативно	вариативно	...	вариативно
Доступ к социальным сетям (да/нет)	нет	да	да	...	да/нет
Доступ к игровым серверам (да/нет)	нет	да	да	...	да/нет
Он-лайн телевидение (да/нет)	нет	нет	да/нет	...	да/нет
.....				...	
Виртуальный кинотеатр (да/нет)	нет	нет	да/нет	...	да/нет
Стоимость пакета (денежные единицы)	S1	S2	S3	...	Sn

В соответствии с программой «Цифровая экономика Российской Федерации» технологии виртуальной и дополненной реальности являются одним из девяти рассматриваемых в ней направлений основных сквозных цифровых технологий. В данном контексте у национальных и транснациональных операторов связи России появляется возможность организации инновационного телекоммуникационного сервиса, не имеющего конкурентов и представляющего собой новый и потенциально высокоприбыльный сегмент рынка телекоммуникационных сервисов и услуг. С этой точки зрения соответствующий проект не только полностью соответствует Стратегии развития информационного общества в

Российской Федерации на 2017–2030 годы [4], но может рассматриваться как инновационный источник формирования национального дохода в условиях цифровой экономики. Однако с учетом текущего уровня освоения технологий виртуальной реальности в России возникает вопрос о поиске или выборе площадки для выполнения проектирования и прототипирования рассматриваемых сервисов и услуг.

Текущий результат и актуальные научно-технические и прикладные задачи

В Институте информационных технологий Московского технологического университета (ИИТ МИРЭА) разработан и проходит испытания прототип иммерсивного телекоммуникационного сервиса на основе технологий VR. В качестве конечных устройств могут быть использованы мобильные телефоны различных производителей и шлемы HTC Vive и Oculus Rift. Абонентам доступны опции интерактивного синхронного взаимодействия между собой и с объектами виртуальной обстановки, в том числе, воспроизведение мультимедийного контента – аудио и видео, просмотр видео с удаленных камер, работа с графическими изображениями и документами pdf. Реализованы возможность и опции формирования набора персональных виртуальных сред абонента, а также использования в них совместного и персонализированных облачных хранилищ данных. Проект получил название «Виртуальный ситуационный центр», был представлен на хакатоне Junction 2017 и занял первое место в номинации корпорации Microsoft в треке Entertainment (проект SCVR – Situation Center Virtual Reality).

Рассмотрим примеры областей возможного применения инновационных телекоммуникационных сервисов данного вида.

1. Виртуальный ситуационный центр (центр стратегического управления, визионариум, ситуационная комната, командный пункт, мультимедийный центр и т.д.) [2]. Актуальность сервиса на различных уровнях государственного и корпоративного управления обусловлена, в том числе, необходимостью повышения оперативности принятия решений на основании большого количества потоков и источников информации в условиях дефицита времени.

2. Виртуальный офис (переговорная) – телекоммуникационный сервис, обеспечивающий интерактивное взаимодействие с сотрудниками и контрагентами в целях повышения эффективности работы и сокращения затрат времени на организацию проведения встреч и переговоров, обсуждения и согласования документации и т.п.

3. Виртуальный кабинет аналитика (эксперта, следователя) – сервис для организации индивидуальной и коллективной работы экспертов по анализу мультимедийной информации, отображающей аспекты исследуемой ситуации. Обеспечивает возможность визуализации в виртуальной обстановке улик и фактов, персон и юридических лиц, объектов и локаций, предоставляет опции формирования, отображения и анализа связей между ними.

4. Виртуальное общение в социальных сетях и мессенджерах: Facebook, Twitter, ВКонтакте, Skype, Viber, WhatsApp и т.д. (<https://www.facebook.com/spaces>).

5. Индустрия развлечений, образование и продвижение товаров – многопользовательские он-лайн игры в средах виртуальной реальности могут стать одной из основных тенденций развития игровой индустрии; виртуальные экскурсии и образовательный кон-

тент могут быть востребованы на всех уровнях образования, а виртуальная реклама – стать более наглядным способом визуализации свойств и способов использования товаров.

6. Дополнение услуг телефонной и видео связи – использование телекоммуникационного сервиса на основе VR на мобильном устройстве обеспечивает новые возможности и формы коммуникации абонентов операторов сотовой связи.

Заключение

Технологии виртуальной реальности уже в краткосрочной перспективе могут быть использованы для организации новых телекоммуникационных сервисов и услуг. Фактически оператор, первым предложивший данные сервисы и услуги, может не только получить в качестве потенциальных клиентов всех абонентов мобильного и стационарного интернета в планетарных масштабах, но и использовать для формирования нового сегмента телекоммуникационного рынка существующие ТКС и оказываемые услуги прочих операторов сотовой связи без дополнительных затрат.

Работа выполнена в рамках проекта 2.7178.2017/БЧ «Исследование когнитивной семиотики в мультимедиа среде виртуальной реальности»

Литература:

1. Глазьев С.Ю. Стратегия опережающего развития России в условиях глобального кризиса. М.: Экономика, 2010. 256 с.
2. Зуев А.С., Фадеев И.С. Виртуальные ситуационные центры – новый инструмент управления социально-экономическими системами // Информационные технологии. 2016. № 3. С. 229–232.
3. Turban L., Urban F., Guillotel P. Extrafoveal video extension for an immersive viewing experience // IEEE: Transactions on Visualization and Computer Graphics. 2017. № 5. P. 1520–1533.
4. Fischbach M., Latoschik M.E., Wiebusch D. Semantic entity-component state management techniques to enhance software quality for multimodal VR-systems // IEEE: Transactions on Visualization and Computer Graphics. 2017. № 4. P. 1407–1416.

References:

1. Glazyev S. The strategy of Russia advancing development in the conditions of global crisis. Moscow: Ekonomika, 2010. 256 p.
2. Zuev A.S., Fadeev I.S. Virtual command centers – new management tool for socio-economic systems // Informatsionnye tekhnologii (Information Technologies). 2016. V. 3. P. 229–232. (in Russ).
3. Turban L., Urban F., Guillotel P. Extrafoveal video extension for an immersive viewing experience // IEEE: Transactions on Visualization and Computer Graphics. 2017. № 5. P. 1520–1533.
4. Fischbach M., Latoschik M.E., Wiebusch D. Semantic Entity-component state management techniques to enhance software quality for multimodal VR-systems // IEEE: Transactions on Visualization and Computer Graphics. 2017. № 4. P. 1407–1416.

Об авторах:

Зуев Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, директор Института информационных технологий ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Болбаков Роман Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры инструментального и прикладного программного обеспечения Института информационных технологий ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About authors:

Andrei S. Zuev, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of Institute of Information Technologies, Moscow Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow, 119454, Russia).

Roman G. Bolbakov, Associate Professor of the Chair of Instrumental and Applied Software of Institute of Information Technologies, Moscow Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow, 119454, Russia).

УДК 004.272.43

МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ГЕТЕРОГЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

**С.А. Сорокин,
М.З. Бененсон[@],
А.П. Сорокин**

АО «НИИ Вычислительных Комплексов им. М.А. Карцева», Москва 117437, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: mz_ben@mail.ru

Статья посвящена оценке производительности гетерогенных вычислительных комплексов (платформ). В ней обоснована актуальность использования проблемно-ориентированной конфигурации вычислительных комплексов для автоматизированных систем обработки информации и управления. Предложен механизм параллельно-конвейерной обработки данных, позволяющий повысить быстродействие системы. Для организации взаимодействия между модулями предложено использовать MPI-интерфейс передачи сообщений между процессами, выполняющими одну задачу. Измерение производительности выполнено с помощью общепризнанных тестовых наборов Intel «MPI Benchmark» и «HPLINPACK», которые позволяют максимально полно оценить эффективность вычислительной системы и ее соответствие задачам пользователя. Приведены графики производительности гетерогенного вычислительного комплекса «МВП», полученные при решении сложных задач линейной алгебры. Полученные результаты подтверждают высокую эффективность применения «МВП» для решения различных прикладных задач.

Ключевые слова: вычислительная система, тест производительности, оценка производительности, управление параллелизмом операций, характеристики вычислительных систем.

METHODS FOR EVALUATING THE PERFORMANCE OF HETEROGENEOUS COMPUTER SYSTEMS

**S.A. Sorokin,
M.Z. Benenson[@],
A.P. Sorokin**

M.A. Kartsev Scientific and Research Institute of Computing Systems, Moscow 117437, Russia

[@]Corresponding author e-mail: mz_ben@mail.ru

Article is devoted to the performance evaluation of heterogeneous computing systems (platforms). The article substantiates the relevance of the use of problem-oriented configuration of computational systems for automated systems of information processing and management. The proposed mechanism is parallel and pipeline processing allowing to parallelize the task and thereby improve system performance. For interaction between modules it was proposed to use MPI-message passing interface between processes that perform a single task. The performance measurement was performed using recognized test kits Intel "MPI Benchmark" and "LINPACK HPL", which allow to fully assess the effectiveness of the computing system and its relevance for the user. Given the graphics performance of the heterogeneous computing complex "profit center" in dealing with complex problems of linear algebra. The results obtained confirm high efficiency of MVP for various applications.

Keywords: computing system, benchmark, estimation of computer systems performance, control of operation parallelism, characteristics of computer systems.

В последние годы широко и все более быстрыми темпами осуществляется разработка, выпуск и внедрение в автоматизированные системы обработки информации и управления разнообразных многопроцессорных вычислительных систем (платформ). Такие вычислительные системы отличаются повышенной гибкостью и характеризуются высокими показателями производительности, надежности и живучести. Актуальной задачей является разработка для них тестового программного обеспечения, которое позволяет определить исправность и функциональные характеристики системы.

Как известно [1], программирование для многопроцессорных систем связано с распараллеливанием и синхронизацией вычислений. Это выдвигает целый ряд сложных задач, среди которых наиболее важными представляются расчет характеристик времени, требующегося для выполнения параллельных программ на многопроцессорных вычислительных системах, и вычисление производительности таких систем.

В настоящее время в отечественных вычислительных системах типа «Эльбрус» [2] (разработчик и производитель АО «МЦСТ»), вычислительной платформе «ГРИФОН» [3] (разработчик ЗАО «Доломант») и вычислительной платформе «МВП» [4] (разработчик АО «НИИВК им. М.А. Карцева») широко используются параллельные методы обработки информации.

Гетерогенные вычислительные системы

Гетерогенным вычислительным системам сегодня уделяется большое внимание, поскольку эти системы, состоящие из вычислителей различной архитектуры, производят вычисления более эффективно, чем однородные системы, архитектура которых предназначена для решения конкретной задачи.

Предлагаемая нами многопроцессорная вычислительная платформа (МВП) рассчитана на построение вычислительных систем широкого спектра применения, а также систем, нацеленных на решение конкретных прикладных задач.

В МВП могут входить модули, созданные на основе микропроцессоров общего назначения (x86, «Эльбрус», «Байкал»), модули графических процессоров NVIDIA и вычислительные модули, созданные на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Создание проблемно-ориентированной конфигурации МВП достигается,

исходя из максимальной эффективности выполнения алгоритмов решаемых пользователем задач, за счет выбора и установки в вычислительную платформу необходимого набора модулей [4].

В основе концепции МВП лежит решение, позволяющее на одной шине объединять процессорные модули, построенные на базе разнородных архитектур. Связь между процессорами осуществляется через открытый стандарт PCI Express [3] с помощью модуля коммутации KIC551. В аппаратуру МВП входит набор вычислительных модулей CPC512 отечественного производства с архитектурой x86, созданных на базе четырехъядерного процессора Intel Ivy Bridge, с установленной оперативной памятью 8 Гбайт. В качестве графических процессоров использованы модули VIM556 отечественного производства, реализованные на базе высокопроизводительной графической карты NVIDIA Quadro K2100M. В качестве базового программного обеспечения в МВП установлена ОС «Linux Debian 7» с драйверами, реализующими для шины PCI Express технологию TCP/IP. Эти драйверы создают между процессорами стандартное сетевое (Ethernet) соединение, обеспечивающее транспорт пакетов по шине PCI Express, и позволяют работать с контроллером шины PCI Express таким же образом, как с обычной сетевой картой.

Использование гетерогенных вычислительных платформ для решения прикладных задач

В качестве прикладной задачи рассмотрим программу обработки изображений, поступающих по каналам связи от разнородных специализированных информационных систем [5]. Программа должна работать в режиме жесткого реального времени.

Эта задача была реализована нами на основе концепции создания многомодульной архитектуры, в которой несколько вычислительных модулей с разнородной архитектурой могут параллельно обрабатывать информационные потоки. Элементы технологий машинного зрения представляют собой взаимосвязанную технологическую последовательность, которая включает в себя следующие звенья:

- получение изображения от видеокамеры;
- обработку (оцифровку) изображения;
- логический анализ цифрового изображения;
- выделение нужной информации;
- перемещение камеры в пространстве.

Видеокамера и устройство обработки изображения являются главными составляющими системы машинного зрения, их объединяет термин «техническое зрение». Для подобных систем характерно наличие нескольких потоков структурно-разнородных данных (в первую очередь, это видеопотоки от камеры высокого разрешения), необходимость приема данных в нестандартных форматах, необходимость максимизации быстродействия для отработки сценариев по предназначению системы в режиме реального времени. Для обработки каждого из потоков данных целесообразно использовать ту архитектуру, которая будет эффективнее.

Выбор конкретной гетерогенной конфигурации обусловлен комплексом исходных технических требований, типом данных и режимов их обработки. На базе МВП представляется возможным осуществлять конвейерную обработку данных с применением

гетерогенной архитектуры. Идея использования гетерогенных вычислительных конвейеров заключается в том, чтобы на каждом этапе последовательной обработки (участке конвейера) обработчик, выполнив свою работу, передал результат для дальнейшей обработки на следующий участок конвейера для обработки вычислителем другой архитектуры, и одновременно принял новый объем входных данных для следующей итерации цикла конвейерной обработки.

Исходя из постановки задачи, сначала был сконфигурирован аппаратный состав гетерогенного вычислителя, включающего в себя модуль графического процессора VIM301, модуль центрального процессора CPC512, модуль ПЛИС FPU512, модуль диска HDD, модуль источника питания PS510 (все модули отечественного производства). Кроме того, используется дополнительная аппаратура – 4 аналоговые камеры и электролюминесцентный дисплей. Схема параллельно-конвейерной обработки данных на базе ПЛИС представлена на рис. 1 а. ПЛИС позволяет реализовывать любую конфигурацию, поэтому в ней возможна реализация 4-х одинаковых блоков обработки данных, где каждый из блоков осуществляет обработку своего потока по одному из каналов цифрового видеоввода, а результаты обработки по каждому из каналов передаются в свою область ОЗУ. Это позволяет существенно снизить нагрузку центрального процессора и видеопроцессора, за счет реализации требуемых алгоритмов на ПЛИС.

При реализации обработки N каналов входных данных средствами графических процессоров скорость видеообработки значительно возрастает при увеличении количества процессоров, используемых для выполнения параллельных расчетов. Коммутация передаваемых данных осуществляется самостоятельным модулем коммутатора, установленного в систему (рис. 1 б).

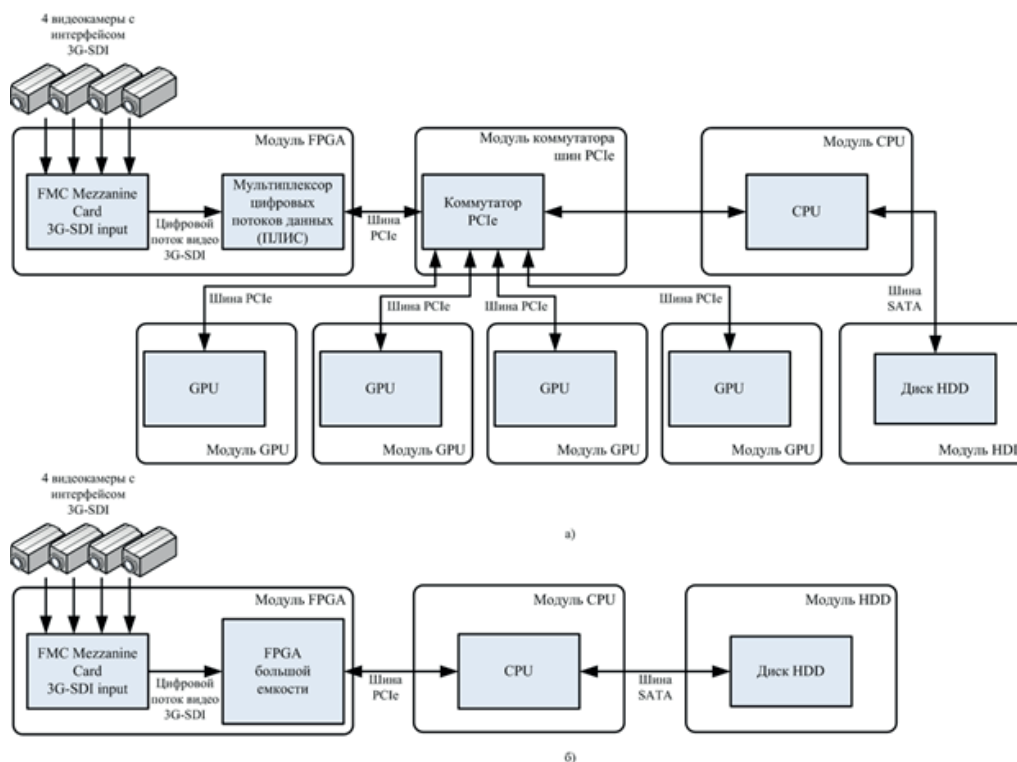


Рис. 1. Гетерогенные конвейерные системы параллельной обработки 4-х входных каналов видео высокого разрешения: а – на базе ПЛИС большой емкости; б – на базе 4 GPU и модуля коммутатора.

Механизм параллельно-конвейерной обработки является признанным классическим методом повышения быстродействия систем обработки данных, и если структура данных и алгоритм позволяют распараллеливать задачу, то это почти всегда повышает эффективность такой обработки. Так, гетерогенность, принятые схемотехнические и программные решения обеспечивают взаимодействие модулей различной архитектуры и позволяют эффективно применять МВП для гетерогенной параллельно-конвейерной обработки данных.

Методики оценки производительности гетерогенных вычислительных систем

Используемые методы оценки производительности вычислительных систем должны отвечать определенным требованиям. Прежде всего, они должны быть общепризнанными, максимально полно оценивать эффективность вычислительной системы и соответствовать задачам пользователя. Пользователю важно время, за которое решается его задача, поэтому в обычно применяемых тестах для измерения производительности вычисляется сумма пользовательского и системного времени.

С целью организации взаимодействия между процессорными модулями CPC 512 выбран наиболее распространенный в параллельном программировании стандарт интерфейса обмена данными MPI [6]. Интерфейс MPI позволяет скрыть от пользователя отображение логической структуры программы на аппаратные ресурсы и, таким образом, воспринимать сложную, возможно, неоднородную среду, как единый вычислительный ресурс. В MPI используются как точечные взаимодействия, при которых один процесс передает сообщение, а второй – его принимает, так и коллективные взаимодействия типа «один-ко-всем», «все-к-одному» и «все-со-всеми».

Программная реализация измерения производительности МВП

Для оценки производительности МВП на языке C++ была разработана система функциональных тестов. Разработку тестов измерения производительности проводили с помощью кроссплатформенных инструментариев: компилятора QT 5.2, библиотеки технической графики QWT, многофункциональной библиотеки boost и интерфейса разработки программных приложений для графических процессоров CUDA.

Функциональные тесты включают в себя тесты для измерения производительности линейки процессоров CPC 512, линейки графических процессоров NVIDIA, среды передачи данных между процессорами, модулей памяти и модулей дисковых накопителей. Общепринятой практикой измерения производительности процессоров x86 стало использование теста LINPACK, разработанного в Арагонской национальной лаборатории США [7].

LINPACK – это пакет фортран-программ, используемых для решения систем линейных алгебраических уравнений. Измерение производительности с помощью LINPACK представляет интерес для многих пользователей, так как алгоритмы линейной алгебры широко используются в самых разнообразных задачах. В основе алгоритмов LINPACK лежит метод декомпозиции. Исходная матрица размером 100×100 элементов сначала представляется в виде произведения двух матриц стандартной структуры, над которыми затем выполняется собственно алгоритм нахождения решения. В LINPACK выделен набор базовых

вых подпрограмм BLAS (*Basic Linear Algebra Subprograms*), каждая из которых выполняет элементарную операцию над векторами. Все операции выполняются над числами с плавающей точкой, представленными с двойной точностью, результат измеряется в Гфлопс.

В МВП предусмотрено использование нескольких графических модулей VIM556 отечественного производства, реализованных на базе высокопроизводительных процессоров NVIDIA. Графические карты соединяются мостами с помощью разработанной NVIDIA технологии масштабируемого интерфейса соединений – SLI [8], которая позволяет распараллелить выполнение прикладной программы на несколько графических процессоров.

Для измерения производительности среды передачи данных между процессорами CPC 512 используется набор тестов Intel MPI Benchmark. Максимальная производительность для данного пакета на тесте pingpong (отправка сообщения и прием его эха) составила 4/35 Гбайт/с, производительность коллективных операций MPI: All reduce и All total составила 0.72 Гбайт/с и 1.2 Гбайт/с, соответственно.

Тест HPL LINPACK предназначен для измерения производительности линейки процессоров CPC512 и используется для суперкомпьютеров с распределенной памятью. Он позволяет оценить верхний и нижний диапазоны реальной производительности для большинства прикладных задач. В случае линейки из 2-х процессоров на тесте HPL LINPACK получена максимальная производительность 376.2 Гфлопс.

Для измерения производительности линейки графических процессоров VIM 556 разработана многопоточная программа на языке Cuda СИ, предназначенная для выполнения скалярного произведения векторов в N-мерном действительном пространстве. При этом на каждом из n процессоров параллельно вычисляется k-ая часть скалярного произведения ($k=N/n$), где n – количество параллельно работающих графических процессоров, и с помощью функций Cuda СИ измеряется общее время выполнения скалярного произведения векторов. Результаты выполнения каждого теста анализируются и выводятся в текстовом и графическом виде. На рис. 2 приведен график работы теста LINPACK для 2-х процессоров МВП, на рис. 3 – результат работы теста pingpong из пакета Intel MPI Benchmark.

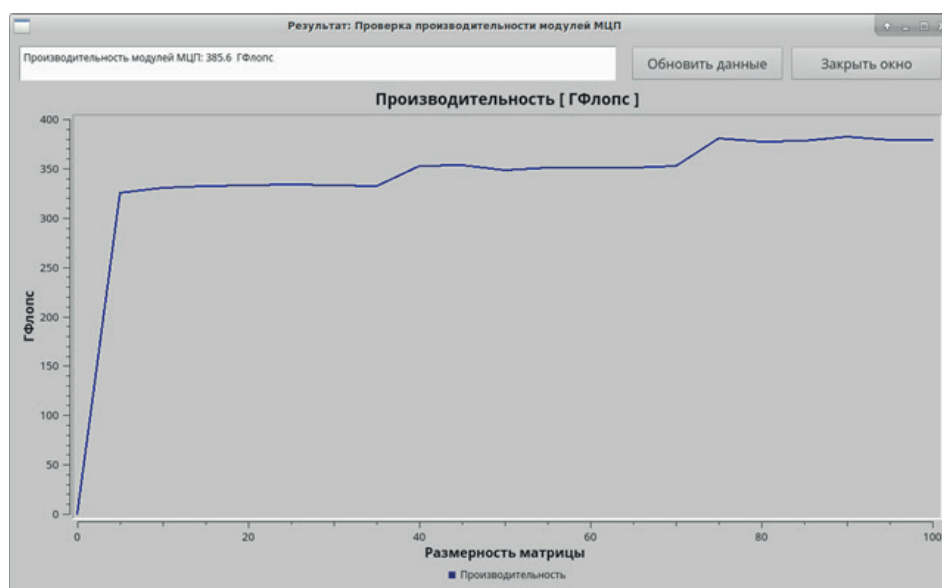


Рис. 2. График производительности линейки процессоров CPC512 на тесте HPL LINPACK.

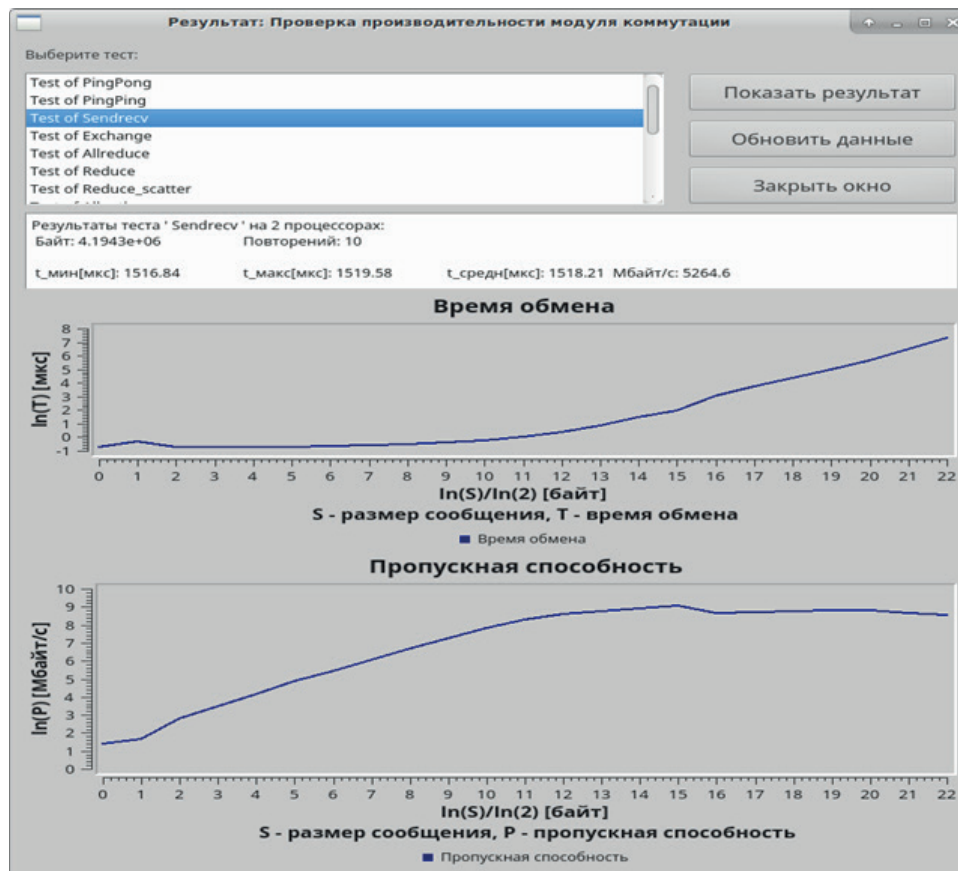


Рис. 3. График производительности среды передачи данных на тесте pingpong пакета Intel MPI Benchmark.

Так как в гетерогенных системах могут использоваться процессорные модули разных производителей, предназначенные для параллельного вычисления независимых задач, максимальная производительность МВП в целом рассчитывается как сумма максимальных производительностей групп однотипных узлов. На всех процессорах каждой группы параллельно решается одна задача, но с разными наборами данных.

Максимальная производительность МВП, включающей в себя два модуля CPC 512 и четыре модуля VIM 556, составила 3.8 Гфлопс.

Таким образом, результаты измерения производительности гетерогенного вычислительного комплекса «МВП» подтверждают высокую эффективность его применения для решения сложных прикладных задач.

Литература:

1. Сорокин С.А., Чудинов С.М., Сорокин А.П., Болгова Е.В. Методы оценки производительности вычислительных комплексов // Научные ведомости БелГУ. Экономика. Информатика. 2017. № 9 (258). Вып. 42. С. 89–97.
2. Бычков И.Н., Молчанов И.А., Фельдман В.М., Юрлин С.В. Вычислительные комплексы на микропроцессорах с архитектурами «Эльбрус» и SPARC для построения автоматизированных систем управления // Качество и Жизнь. 2016. № 4(12). С. 74–81.

3. Галаган П.В. Платформа ГРИФОН для решения задач встраиваемых систем специального назначения // Современные технологии автоматизации. 2015. № 4(77). С. 16–23.
4. Барыбин А.К., Лобанов В.Н., Чельдиев М.И., Чучкалов П.Б. Реконфигурируемая вычислительная платформа с разнородной архитектурой // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 7. С. 70–77.
5. Сорокин А.П., Чудинов С.М. Научный подход к выбору высокопроизводительной гетерогенной вычислительной платформы (ВГВП) для обработки изображений // Радио-промышленность. 2017. № 3. С. 68–73.
6. Gropp W., Lusk E., Skjellum A. Using MPI: Portable parallel programming with the message passing interface (Scientific and Engineering Computation). 2nd Ed. MIT Press, 1999. 386 p.
7. Dongarra J.J. Performance of various computers using standard linear equations software. // Electrical Engineering and Computer Science Department University of Tennessee CS- 89-85 September 9, 2007.
8. Сандерс Дж., Кэндрот Э. Технология программирования CUDA в примерах. Введение в программирование графических процессоров: пер. с англ. / ред. А.В. Боресков. М.: ДМК Пресс, 2011. 232 с. доступ к эл. версии книги открыт на сайте <http://c.lanbook.com>.

References:

1. Sorokin S.A., Chudinov S.M., Sorokin A.P., Bolgova E.V. Methods for evaluating the performance of computer systems // Nauchnye vedomosti BelGU. Ekonomika. Informatika. (Belgorod State University Scientific Bulletin). 2017. № 9(258). V. 42. P. 89–97. (in Russ.)
2. Bychkov I.N., Molchanov I.A., Feldman V.M., Yurlin S.V. Computing microprocessor complexes with “Elbrus” and SPARC architectures for the automated control systems creation // Kachestvo i zhizn' (Quality and Life). 2016. № 4(12). P. 74–81. (in Russ.).
3. Galagan P.V. The GRYPHON platform for solving problems of embedded systems special purpose // Sovremennye tehnologii avtomatizatsii (Contemporary Technologies in Automation). 2015. № 4(77). P. 16–23. (in Russ.).
4. Barybin A.K., Lobanov V.N., Cheldiev M.I., Chuchkalov P.V. A reconfiguration computing platform with diverse architecture // Voprosy radioelektroniki (Questions of radio electronics). 2016. № 7. P. 70–77. (in Russ.).
5. Sorokin A.P. Chudinov S.M. Scientific approach to the election of designing computing platforms for image processing // Radiopromeshlennost' (Radio Industry). 2017. № 3. P. 68–73. (in Russ.).
6. Gropp W., Lusk E., Skjellum A. Using MPI: Portable parallel programming with the message passing interface (Scientific and Engineering Computation). 2nd Ed. MIT Press, 1999. 386 p.
7. Dongarra J.J. Performance of various computers using standard linear equations software. // Electrical Engineering and Computer Science Department University of Tennessee CS- 89-85 September 9, 2007.
8. Sanders J., Kandrot E. CUDA by Example: An Introduction to General-Purpose GPU Programming. M.: DМК Press Publ., 2011. 232 p.

Об авторах:

Сорокин Сергей Александрович, кандидат технических наук, генеральный конструктор АО «НИИ Вычислительных Комплексов им. М.А. Карцева» (Россия, 117437, Москва, Профсоюзная ул., д. 108).

Бененсон Михаил Залманович, кандидат технических наук, главный научный сотрудник АО «НИИ Вычислительных Комплексов им. М.А. Карцева» (Россия, 117437, Москва, Профсоюзная ул., д. 108).

Сорокин А.П., аспирант АО «НИИ Вычислительных Комплексов им. М.А. Карцева» (117437, г. Москва, Профсоюзная ул., д. 108).

About authors:

Sergey A. Sorokin, Ph.D. (Engineering), Chief Designer, M.A. Kartsev Scientific and Research Institute of Computing Systems (108, Profsoyuznaya st., Moscow, 117437, Russia).

Mikhail Z. Benenson, Ph.D. (Engineering), Chief Researcher, M.A. Kartsev Scientific and Research Institute of Computing Systems (108, Profsoyuznaya st., Moscow, 117437, Russia).

A.P. Sorokin, Postgraduate Student, M.A. Kartsev Scientific and Research Institute of Computing Systems (108, Profsoyuznaya st., Moscow, 117437, Russia).

УДК 621.391

**ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭВРИСТИЧЕСКИХ
МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ
РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ
УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ**

А.В. Смирнов

Московский технологический университет (МИРЭА), Москва 119454, Россия

@Автор для переписки, e-mail: avs_ramb@rambler.ru

Эвристические методы оптимизации позволяют находить наилучшие или близкие к ним решения задач, не решаемых строго обоснованными методами, в частности, многоэкстремальные задачи со сложным рельефом целевой функции и задачи многокритериальной оптимизации, решением которых является фронт Парето. В настоящей статье рассматриваются примеры применения эвристических методов для поиска аппроксимаций передаточных функций радиотехнических цепей с выполнением требований одновременно к амплитудно-частотным и фазо-частотным характеристикам (АЧХ и ФЧХ), выбора координат точек сигнальных созвездий многопозиционной модуляции, синтеза импульсов в *Orthogonal Frequency Division Multiplex* (OFDM) радиолокационных систем и формирования лучей в *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) системе связи миллиметрового диапазона. Приведенные примеры подтверждают перспективность применения рассматриваемых методов в радиотехнике и связи. Для их более широкого практического использования необходимо уделить внимание подготовке и публикации учебной и справочной литературы и разработке доступных широкому кругу пользователей программных средств.

Ключевые слова: оптимизация, целевая функция, показатель качества, эвристические методы, метаэвристики, фронт Парето, генетический алгоритм.

**THE PERSPECTIVES OF HEURISTIC OPTIMIZATION
METHODS EMPLOYMENT IN A DEVELOPMENT
OF RADIO AND TELECOMMUNICATION DEVICES
AND SYSTEMS**

A.V. Smirnov

Moscow Technological University (MIREA), Moscow 119454, Russia

@Corresponding author e-mail: avs_ramb@rambler.ru

A development of radio and telecommunication devices and systems in many cases requires derivation of difficult optimization problems with multimodal goal functions having a rugged fitness landscape. Heuristic optimization methods also called metaheuristics are the efficient means for solving of such problems. In this paper, we consider some examples of

metaheuristics applications: approximation of the filter transfer functions with simultaneous optimization of amplitude and phase characteristics, optimization of the APSK signal constellations, optimal forming of the OFDM radar pulses, beamforming in the millimeter wave MIMO communication systems. These and many other examples show the preferences of heuristic algorithms: adaptability to the variations of parameter space dimension and objectives, capacity for solving of suboptimal solutions in a relatively short time, capability to solve the multiobjective optimization problems with simultaneous location of a set of Pareto optimal solutions. To actualize these preferences in engineering practice it is necessary to produce manuals, to introduce modern optimization methods in educational programs for corresponding lines and to develop the applicable software for the implementation of such methods.

Key words: optimization, goal function, objective, heuristic algorithms, metaheuristics, Pareto front, genetic algorithm.

Введение

Одной из важнейших составляющих проектирования радиотехнических и телекоммуникационных устройств и систем является оптимизация объекта проектирования по одному или нескольким показателям качества (ПоК). Постановке задач оптимизации и разработке методов их решения уделялось значительное внимание на протяжении всего процесса развития радиотехники и связи [1, 2].

Задача оптимизации обычно формулируется следующим образом.

Пусть $x = (x_1, \dots, x_n)$ – вектор параметров объекта, $F(x)$ – целевая функция (ЦФ), характеризующая значение оптимизируемого ПоК. Далее будем считать, что по умолчанию улучшению ПоК соответствует уменьшение значения $F(x)$, а противоположная ситуация будет отмечаться особо. Необходимо найти значения x^* и $F(x^*)$ такие, чтобы

$$F(x^*) = \min_{x \in X} (F(x)), \quad (1)$$

где X – множество допустимых значений x , называемое далее областью поиска, которое определяется ограничениями в виде равенств и/или неравенств на значения функций от координат $(x_1, \dots, x_n)$.

В математике разработаны и исследованы разнообразные методы нахождения экстремума функции в области, в которой этот экстремум единственный, то есть поиска локальных экстремумов (ЛЭ). К ним относятся методы, требующие вычисления производных второго порядка от ЦФ (например, метод Ньютона), вычисления производных только первого порядка от ЦФ (градиентные методы), а также методы, не требующие вычисления производных, а использующие только значения самой ЦФ (методы многогранника, прямого поиска и др.). Для таких методов известны классы функций, к которым они применимы, условия достижения решения и оценки скорости сходимости [3, 4]. Известны также методы поиска глобального экстремума (ГЭ) многоэкстремальных ЦФ, но для них строго доказанных результатов значительно меньше [5].

Математические методы оптимизации находят широкое применение в радиотехнике и телекоммуникациях, но круг решаемых с их помощью задач весьма ограничен, особенно в случаях многоэкстремальных ЦФ. В последнее время все шире применяются эвристические методы оптимизации (ЭМО). Они отличаются от математических мето-

дов отсутствием строго доказанных результатов об условиях существования решения, скорости сходимости и близости результата к точному значению экстремума. Поэтому ЭМО в некоторых случаях могут давать неточные и даже неправильные ответы. Однако поскольку в большинстве случаев такие алгоритмы приводят к достаточно хорошим решениям, их практическое применение оказывается целесообразным.

В настоящей статье не ставится цель дать сколько-нибудь полный обзор применений ЭМО в радиотехнике и телекоммуникациях. Объем информации по данной теме весьма велик. Так, например, обзор работ по применению таких алгоритмов только для построения адаптивных цифровых фильтров охватывает более 340 источников информации [6]. Цель представленной работы существенно уже, а именно: рассмотреть несколько примеров применения ЭМО, демонстрирующих достигаемый при этом эффект именно в части улучшения характеристик оптимизируемого объекта, а не в части достижения лучших характеристик самого метода оптимизации, что, кстати, является целью большинства публикаций по этой тематике.

Предварительно приведем некоторые основные понятия.

Методы поиска экстремумов, основанные на эвристических алгоритмах, принято называть *метаэвристиками* (*metaheuristics*) [7]. Такие методы, как правило, помимо собственно алгоритма поиска экстремума, включают еще средства управления, обеспечивающие последовательное или параллельное выполнение многих процессов поиска с целью нахождения ГЭ многоэкстремальной ЦФ. Можно выделить несколько классов метаэвристик.

К первому классу следует отнести различные алгоритмы с мультистартом, в которых многократно осуществляется поиск ЛЭ из разных стартовых точек и выбирается наилучший из найденных ЛЭ. Простейший вариант – случайный выбор стартовой точки каждого поиска. В более совершенных вариантах выбор стартовой точки осуществляется с учетом результатов предыдущих запусков для концентрации поиска в зонах, где нахождение ГЭ наиболее вероятно, и для предотвращения повторных попаданий в уже обследованные ЛЭ.

Ко второму классу относятся метаэвристики с параллельным выполнением процессов поиска. Здесь следует указать многочисленные варианты генетического алгоритма (ГА), методы имитации коллективного поведения типа PSO (*Particle Swarm Organization*) или АСО (*Ant Colony Optimization*) и другие алгоритмы, в большей или меньшей степени использующие аналогии с процессами в биологических или физических системах.

Объединяя свойства двух или более разных метаэвристик, получают гибридные алгоритмы, дающие возможность наилучшим образом распределять время между предварительной разведкой участков области поиска (*exploration*) и детальным обследованием наиболее перспективных из этих участков (*exploitation*).

Особый класс составляют метаэвристики для многокритериальной оптимизации, то есть, одновременно по нескольким ПоК. Решением такой задачи является фронт Парето – гиперповерхность в пространстве, координатами которого являются ПоК $P_1, \dots, P_m$. Каждая точка на этой гиперповерхности представляет собой решение, оптимальное по Парето, то есть такую совокупность значений ПоК, для которой улучшение значения любого ПоК невозможно без ухудшения значения, по меньшей мере, одного из остальных ПоК.

Обычный способ получения фронта Парето состоит в переходе к задаче оптимизации по одному из ПоК, а значения остальных ПоК фиксируются ограничениями. Задавая разные комбинации значений, фиксированных ПоК, и минимизируя оставшийся свободным ПоК, последовательно находят точки фронта Парето. К настоящему времени разработаны метаэвристики на основе ГА, PSO и других методов, которые, благодаря одновременному действию многих поисковых агентов, позволяют в одном цикле оптимизации находить много точек фронта Парето, тем самым значительно ускоряя процесс его построения.

Примеры применения ЭМО

1. Аппроксимация передаточной функции с выполнением требований к АЧХ и ФЧХ

При проектировании радиотехнических устройств во многих случаях необходимо выполнять заданные требования одновременно к амплитудно-частотным (АЧХ) и фазо-частотным (ФЧХ) характеристикам. Как известно, передаточная функция (ПФн) цепи, содержащей элементы с сосредоточенными параметрами, имеет вид

$$H(p) = \frac{N(p)}{D(p)}, \quad (2)$$

где $N(p)$ и $D(p)$ – полиномы комплексной переменной, корни которых являются, соответственно, нулями и полюсами ПФн.

АЧХ $K(\omega)$ и ФЧХ $\Phi(\omega)$ определяются как

$$K(\omega) = |H(j\omega)|; \quad \Phi(\omega) = \arg(H(j\omega)). \quad (3)$$

Выполнение требований к АЧХ необходимо оценивать в полосах пропускания, задерживания и перехода, что требует использования трех ПоК:

- S_p – отклонение значений АЧХ от заданных в полосе пропускания;
- S_s – отклонение значений АЧХ от нуля в полосе задерживания;
- S_t – превышение значений АЧХ допустимого уровня в полосе перехода.

Качество ФЧХ достаточно характеризовать в полосе пропускания. Обычно показателем является неравномерность времени задержки. Присвоим ему обозначение S_d .

Перечисленные ПоК взаимосвязаны: улучшение одних приводит к ухудшению других. Уменьшение сразу всех показателей возможно путем повышения порядка ПФн. Таким образом, получаем многокритериальную задачу оптимизации – при заданном порядке ПФн минимизировать значения всех ПоК. Ее решением должен быть фронт Парето в пространстве ПоК.

Решение поставленной задачи с применением равноволновой аппроксимации на основе критерия Чебышева и другими традиционными методами возможно лишь в некоторых частных случаях [8, 9]. Это обусловлено тем, что указанные выше ПоК выражаются из ПФн (2) сложным образом и не всегда, а в общем случае их необходимо находить посредством расчета значений АЧХ и ФЧХ во всей полосе частот. Кроме того, целевая функция, получающаяся при переходе к однокритериальной задаче путем фиксации части ПоК, оказывается многоэкстремальной. Поэтому применение ЭМО является единственно возможным способом получения решения в общем случае.

В работе [10] был реализован поиск в пространстве координат полюсов и нулей ПФн с использованием метода адаптивного мултистарта, в котором выбор стартовых точек осуществлялся преимущественно в окрестностях лучших из найденных ЛЭ и выполнялся случайный переход в другие зоны при повторном попадании в уже пройденные ЛЭ. Для уменьшения размерности пространства ПоК задавалось условие $S_T = 0$, то есть, АЧХ в полосе перехода не должна превышать некоторый допустимый уровень, например, свое значение в полосе пропускания. При этом значение S_T входило в ЦФ в виде быстро нарастающего штрафного слагаемого, а фронт Парето строился в пространстве (S_p, S_s, S_D) .

Предложенный метод позволил получать множества оптимальных по Парето решений для фильтров с различными типами ПФн. В качестве примера в таблице приведены значения ПоК для минимально-фазовых (фильтров нижних частот) ФНЧ 6-го порядка с $S_s = 0.025$ и разными сочетаниями S_p и S_D . Все ПоК определялись по критерию Чебышева, то есть по максимуму отклонения от заданного значения. При расчете S_s выполнялось условие $F_s = 2F_p$, где F_s – нижняя граница полосы задерживания, F_p – верхняя граница полосы пропускания.

Значения ПоК для минимально-фазовых ФНЧ 6-го порядка

Случай	S_p	S_p	S_D
1	0.76	0.025	0.024
2	0.60	0.025	0.21
3	0.40	0.025	0.33
4	0.25	0.025	0.48
5	0.15	0.025	0.73
6	0.050	0.025	0.92

На рис. 1 для этих шести случаев приведены графики АЧХ $K(F)$ и неравномерности времени задержки $DT(F)$, нормированной на среднее значение времени задержки. По оси абсцисс отложены значения F частоты, нормированной на ширину полосы пропускания. Отметим, что в случае 1 фильтр обеспечивает меньшее значение SD, чем фильтр Бесселя, а в случае 6 получен фильтр, близкий по значениям ПоК к фильтру Чебышева 6-го порядка с неравномерностью АЧХ в полосе пропускания, равной 0.25 дБ. Между этими крайними точками происходит постепенное уменьшение S_p и увеличение S_D .

Таким образом, применение ЭМО позволяет получать общую картину возможных аппроксимаций ПФн с различными сочетаниями значений ПоК. При этом можно видоизменять определения ПоК, а также сравнивать характеристики фильтров с различными соотношениями количеств полюсов и нулей, в том числе и с неминимально-фазовыми ПФн [11].

2. Оптимизация сигнальных созвездий Amplitude-Phase Shift-Keying (APSK) в системах спутниковой связи

Основными факторами, влияющими на ошибки передачи информации по каналам спутниковой связи, являются шум приемника и нелинейные искажения в передатчике, значительный уровень которых был причиной применения в стандарте спутникового ТВ-вещания DVB-S только фазовой модуляции *Quadrature Phase Shift-Keying*¹ (QPSK). В связи с улучшением характеристик каналов связи в стандарте второго поколения DVB-S2

¹QPSK – *Quadrature Phase Shift-Keying* – квадратурная фазовая манипуляция.

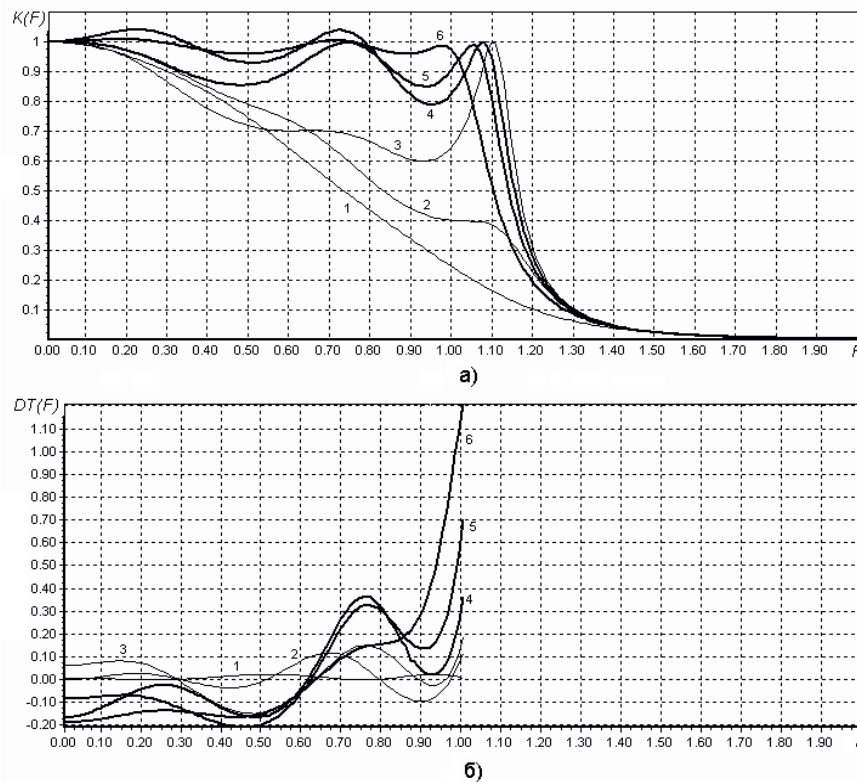


Рис. 1. Графики АЧХ (а) и частотных зависимостей неравномерности времени задержки (б).

предусмотрено использование и двух вариантов амплитудно-фазовой модуляции 16-APSK и 32-APSK, обеспечивающих повышение спектральной эффективности каналов связи. Сигнальные созвездия этих видов модуляции показаны на рис. 2 [12]. Распределение символов по точкам созвездия выполнено в соответствии с кодом Грея – символы соседних точек различаются в одном двоичном разряде.

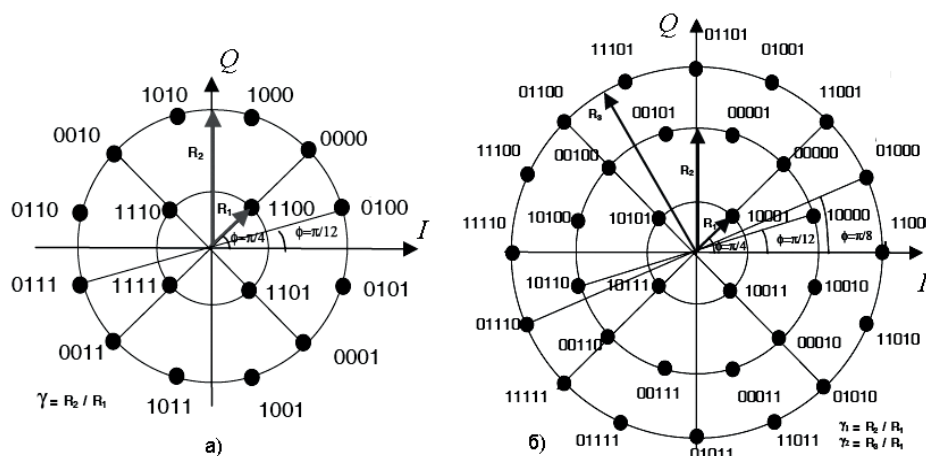


Рис. 2. Сигнальные созвездия модуляции 16-APSK (а) и 32-APSK (б).

Улучшить характеристики каналов связи с APSK можно, оптимизировав расположение точек созвездий и распределение символов по ним. Частота ошибок на выходе приемника без учета помехоустойчивого кодирования определяется величиной PSNR (*Peak Signal Noise Ratio*), где под пиковым значением сигнала следует понимать максимальное

значение символа, а под величиной шума – среднеквадратическое значение разности переданного и принятого символов. Оптимизируемая ЦФ включает только этот ПоК, то есть задача однокритериальная. Размерность пространства поиска определяется количеством коэффициентов γ , определяющих отношения радиусов окружностей, и количеством разных значений фазового угла φ . При этом ЦФ оказывается многоэкстремальной, и необходимо применение ЭМО.

В [13] оптимизацию созвездий APSK производили с применением ГА. В качестве генов брали значения указанных выше координат в пространстве поиска. Каждый индивид в популяции характеризуется набором генов – хромосомой. Процесс поиска включает формирование последовательности поколений. Гены первого поколения обычно задаются случайным образом. Формирование очередного поколения начинается с отбора части хромосом предыдущего поколения, обеспечивающих лучшие значения ЦФ. Затем между отобранными хромосомами выполняется кроссовер – попарное скрещивание, имитирующее половое размножение, в результате которого формируются новые хромосомы, включающие гены от обеих родительских хромосом. Наконец, производятся мутации – случайные изменения некоторых генов. Размер популяции от поколения к поколению не изменяется. Продолжительность поиска задается числом формируемых поколений. Результатом оптимизации является хромосома, обеспечившая наилучшее значение ЦФ, то есть наибольший PSNR. Кратко описанные здесь операции ГА имеют многочисленные вариации [14]. Оптимизацию выполняли в диапазоне значений отношения С/Ш на входе приемника от 0 до 15 дБ при реальной нелинейности характеристики усилителя мощности передатчика. Значение PSNR определяли путем компьютерного моделирования канала связи, на вход которого подавалась псевдослучайная последовательность символов. Координаты точек созвездий задавали в соответствии с генами проверяемой хромосомы текущей популяции. Число хромосом в популяции было равно 80, а число поколений – 130 [13].

В результате экспериментов установлено, что для улучшения среднего PSNR точки созвездий должны располагаться на окружностях неравномерно, внутренняя окружность в случае 16-APSK и средняя окружность в случае 32-APSK должны располагаться ближе к внешней окружности по сравнению со стандартом [12], и распределение символов по точкам созвездия также должно отличаться от стандартного. Выигрыш в PSNR при этом оказался в диапазоне от 3 до 15 дБ в зависимости от величины отношения С/Ш на входе приемника. Дальнейшие исследования авторов показали, что путем частичного отказа от симметрии расположения точек созвездий по квадрантам можно добиться еще некоторого улучшения [15]. Эти результаты неочевидны и не могли быть получены аналитически. Стоит также отметить, что в последней работе сопоставляли результаты, полученные при разных настройках ГА, и среди них наблюдался заметный разброс. Следовательно, эвристические алгоритмы не являются точными в смысле гарантированного нахождения ГЭ, но позволяют найти достаточно хорошие ЛЭ.

3. Оптимизация формы импульса *Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM)* РЛС

Применение OFDM для формирования импульсов РЛС является сравнительно новым методом, в ряде случаев имеющим преимущества перед традиционным основанным на применении линейной ЧМ. В OFDM РЛС-импульс формируется путем соответству-

ющей модуляции N взаимно ортогональных несущих колебаний, частоты которых расположены с шагом Δf в пределах выделенной полосы частот. Импульс может содержать K символов OFDM, в течение каждого из которых параметры модуляции не меняются. В случае фазовой модуляции несущих сигнал OFDM описывается соотношением

$$u(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K A_n r_k(t) \exp(j2\pi n \Delta f t + j\varphi_{n,k}), \quad (4)$$

где A_n – постоянная амплитуда n -ной несущей;

$\varphi_{n,k}$ – фаза n -ной несущей в течение k -го символа OFDM;

$r_k(t)$ – функция временного окна, выделяющая интервал передачи k -го символа.

Сигнал (4) далее переносится в заданный диапазон частот.

Для успешного решения задач, стоящих перед РЛС, излучаемые импульсы должны удовлетворять определенным требованиям, причем как во временной, так и в частотной области. К ним, в первую очередь, относятся длительность импульса и ширина полосы частот, занимаемая его спектром. Данные параметры зависят от назначения РЛС и при оптимизации фиксируются как исходные данные. Качество формы импульса РЛС оценивается по уровням боковых лепестков его автокорреляционной функции $R(\tau)$ двумя ПоК:

- отношение пика максимального бокового лепестка к пику центрального лепестка PSLR (*Peak Sidelobe Level Ratio*);

- отношение суммы пиков боковых лепестков к пику центрального лепестка ISLR (*Integral Sidelobe Level Ratio*).

В случае OFDM задаются также такие связанные друг с другом параметры, как количество несущих и число символов OFDM в импульсе. Важную роль во всех системах с OFDM играет отношение максимальной и средней мощностей огибающей OFDM сигнала PMERP (*Peak-to-Mean Envelope Power Ratio*)

$$PMERP = \frac{\max_n |x(n)|^2}{\sum_n |x(n)|^2}; \quad (5)$$

где n – номер отсчета огибающей.

Этот ПоК определяет необходимый запас мощности передатчика для передачи без искажений наиболее высоких пиков огибающей OFDM сигнала. Если не принимать никаких специальных мер к заданию значений фаз $\varphi_{n,k}$, то при сложении несущих колебаний могут получаться пики, превышающие по мощности средний уровень во много раз. Максимальное значение PMERP тем больше, чем больше число несущих N . Этой проблеме уделяется большое внимание в системах связи и вещания с OFDM.

Задача минимизации PMERP решалась и применительно к OFDM РЛС. В литературе приводятся ссылки на известные правила задания фаз несущих, применение которых позволяет значительно уменьшить PMERP [16]. Существуют также правила задания фаз, обеспечивающие минимизацию PSLR. Однако все эти известные решения получены при условии использования всех N несущих и равенстве их амплитуд. Для расширения воз-

возможностей оптимизации формы импульса OFDM РЛС в указанной работе [16] использован ГА, что позволило получить ряд новых полезных результатов.

Во-первых, обеспечена возможность минимизации PMERP и PSLR при использовании части несущих (разреженный спектр OFDM) и при различных значениях амплитуд несущих. Это позволяет в процессе работы исключать несущие, на которых присутствуют помехи, или задавать амплитуды несущих с учетом различий отражательной способности целей на разных частотах. Следует отметить, что в случае использования всех несущих ГА дает результат, несколько худший по сравнению с известными правилами. Если же часть несущих исключить, то значение PMERP, получаемое при применении ГА, почти не меняется, в то время, как результат, получаемый старым методом, значительно ухудшается. Это вполне объяснимо, так как нарушаются условия, для которых были найдены правила задания фаз.

Во-вторых, обеспечена возможность варьирования определений ПоК. Например, в определении PSLR можно учитывать только часть боковых лепестков. Что касается ISLR, то этот ПоК ранее известными методами не минимизировался.

В-третьих, применение ГА дало возможность решать задачу многокритериальной оптимизации для двух ПоК PSLR и PMERP, сразу для трех ПоК PSLR, ISLR и PMERP или для PSLR и ISLR при задании ограничений на величину PMERP. Получаемые в виде фронтов Парето результаты позволяют связать требования к форме импульса с требованиями к мощности передатчика.

Остановимся на деталях использованного в [16] ГА. Так как рассматривалась только фазовая модуляция несущих OFDM, то гены представляли значения фаз $\varphi_{n,k}$. Для получения достаточно высокой точности эти значения кодировали 18-битовыми двоичными числами, хотя число возможных значений фазы значительно меньше. Таким образом, например, при $N = 500$ и $K = 1$ размер хромосомы составлял 9000 битов. При разных постановках решаемой задачи популяция содержала от 12 до 40 хромосом, эволюция продолжалась от 400 до 10000 поколений и повторялась не менее 20 раз со случайными значениями генов стартовой популяции. В разных случаях задавалась также разная частота мутаций. Для каждого поколения находили минимальное по всем хромосомам значение ЦФ.

При выполнении однокритериальной оптимизации ГА работал так, как было описано в предыдущем примере. В случаях же многокритериальной оптимизации изменялись правила отбора хромосом для формирования следующего поколения. Хромосомы отбирались не только по наилучшему значению ЦФ, но и по принципу разнообразия значений отдельных ПоК, чтобы эволюция продвигалась одновременно к разным точкам фронта Парето.

4. Оптимизация формируемых в системе связи ММО лучей

В системах связи миллиметрового диапазона вследствие значительного поглощения в атмосфере необходимо применять направленную передачу радиоволн. Малые размеры антенн позволяют реализовать такую передачу с помощью антенных решеток. Одним из перспективных средств связи являются системы ММО (*Multiple Input Multiple Output*), в которых передаваемые сигналы излучаются группой антенн и принимаются несколькими антеннами. В случае систем мобильной связи приемные антенны разнесены на значительные расстояния, и для передачи сигнала каждому пользователю на базовой станции необходимо формировать отдельный луч.

В работе [17] рассмотрена модель системы, содержащей M передающих и N приемных антенн. N -мерный вектор выходных сигналов $\mathbf{Y}$ связан с M -мерным вектором входных сигналов $\mathbf{X}$ соотношением

$$\mathbf{Y} = \sqrt{\frac{P}{M}} \mathbf{H} \mathbf{V} \mathbf{X} + \mathbf{Z}, \quad (6)$$

где P – суммарная мощность передатчика;

$\mathbf{Z}$ – N -мерный вектор помех;

$\mathbf{H}$ – матрица $N \times M$, описывающая каналы связи между передающими и приемными антеннами;

$\mathbf{V}$ – матрица $M \times M$, описывающая обработку передаваемых сигналов с целью формирования лучей.

Так как характеристики каналов связи, как правило, точно не известны и меняются со временем, то матрицу обработки $\mathbf{V}$ приходится находить в процессе связи. Процесс передачи информации разбивается на временные интервалы – слоты. В начале каждого слота выполняется настройка формирования лучей для обеспечения требуемого качества связи. При этом на базовой станции каким-либо способом задаются элементы матрицы $\mathbf{V}$, а результат контролируется по сигналам обратной связи от мобильных станций. Предлагается использовать ГА для определения матрицы $\mathbf{V}$ непосредственно в процессе работы системы [17]. Отмечены преимущества такого подхода:

- возможность применения различных вариантов модели системы и различных ПоК без изменения алгоритма оптимизации;
- сокращение времени, затрачиваемого на настройку матрицы $\mathbf{V}$ и, следовательно, увеличение времени на передачу полезной информации.

В качестве оптимизируемого ПоК в рассматриваемой работе взята полная пропускная способность при передаче от базовой станции к абонентам, определяемая как

$$R(k) = (1 - \alpha \cdot k) \sum_{i=1}^N \log_2(1 + SINR_{ik}), \quad (7)$$

где k – номер итерации настройки, т.е. поколения ГА;

$SINR_{ik}$ – отношение сигнала к сумме помех и шумов на входе i -го приемника после выполнения k -й итерации;

α – коэффициент, учитывающий затраты времени на выполнение каждой итерации настройки формирования лучей, снижающие суммарную пропускную способность. Дополнительно в таком ПоК в ряде экспериментов учитывалось ограничение снизу на значение $SINR_{ik}$. При нарушении такого ограничения для какого-либо приемника соответствующее слагаемое в (7) приравнивалось нулю.

Генами в примененном варианте ГА являлись элементы матрицы $\mathbf{V}$, а хромосомой – сама эта матрица. Возможные значения генов предварительно были собраны в так называемой кодовой книге (*codebook*), откуда они извлекались алгоритмом. Особенности выполнения операций отбора, кроссовера и мутаций здесь не рассматриваются. В процессе оптимизации значение $R(k)$ увеличивалось вследствие улучшения направленности лучей

и, следовательно, увеличения значений $SINR_{ik}$. После достижения достаточно хорошей настройки рост $R(k)$ переходил в спад из-за уменьшения множителя перед суммой в (7) при увеличении k . Этот переход и являлся признаком завершения настройки.

Результаты экспериментов показали, что уровень $R(k)$, равный примерно 80% от максимального, достигается за время, в среднем в 5 раз меньшее, чем сам максимальный уровень. Таким образом, ГА позволяет быстро находить близкие к оптимальным решения. Применение такого метода может дать выигрыш в суммарной пропускной способности системы за счет уменьшения затрат времени на настройку формирования лучей.

Выводы

Приведенные примеры, список которых может быть многократно продолжен, продемонстрировали полезные свойства ЭМО:

- способность находить достаточно хорошие ЛЭ в многоэкстремальных задачах со сложным рельефом ЦФ;
- возможность варьировать в широких пределах количество и определения ПоК и другие исходные параметры решаемой задачи;
- возможность получения набора оптимальных по Парето решений в одном цикле поиска.

Применение ЭМО может оказаться полезным для решения широкого круга задач проектирования радиотехнических и телекоммуникационных устройств и систем. Однако на сегодняшний день использование ЭМО в отечественной практике проектирования весьма ограничено.

Первая причина – недостаточный уровень информированности наших специалистов о возможностях и даже о существовании ЭМО. Это связано, в значительной степени, с недостатком учебной и справочной литературы. Помимо уже упомянутой книги [14], можно указать лишь пособия [18, 19], в которых рассматривается только ГА. В то же время количество публикаций, связанных с ЭМО, в мире быстро растет, публикуются монографии и обобщающие статьи, разрабатываются все новые алгоритмы, проводятся их сравнительные испытания [7, 20]. Существующий информационный пробел необходимо заполнить путем написания и опубликования учебников и справочников в печатном и в электронном виде. Кроме того, сведения об ЭМО следует ввести в программы дисциплин, относящихся к численным методам и автоматизации проектирования. Для радиотехнических направлений обучения может быть целесообразным введение, например, в программу подготовки магистров отдельной дисциплины по современным методам оптимизации.

Второй сдерживающий фактор – отсутствие общедоступных средств реализации ЭМО. Написание программы, выполняющей какой-либо эвристический алгоритм, требует серьезной подготовки в области программирования и значительных затрат времени. Существенно упростить эту работу могло бы наличие достаточно универсальной программной рабочей среды (*framework*), дающей пользователю возможность задавать правила расчета ЦФ, количество и диапазоны значений переменных, выбирать и настраивать алгоритм оптимизации. Примером такой рабочей среды может служить один из модулей (*Toolbox*) программы MATLAB, содержащий средства для реализации ГА.

Однако возможности этого модуля ограничены: в нем отсутствуют средства решения многокритериальных задач. Кроме того, традиционный ГА является далеко не самым эффективным ЭМО. Чтобы удовлетворять современным запросам, обсуждаемая программная рабочая среда должна давать возможность использовать гибридные алгоритмы, допускающие при этом ручную или/и автоматическую настройку их параметров, в частности, распределения вычислительных ресурсов между разведкой и обследованием. Разработка соответствующего программного обеспечения вполне может выполняться в университете с привлечением аспирантов и студентов.

Литература:

1. Гуткин Л.С. Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества. М.: Сов. радио, 1975. 368 с.
2. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Я.Д.Ширмана. М.: Радиотехника, 2007. 512 с.
3. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация: Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 509 с.
4. Нинул А.С. Оптимизация целевых функций: Аналитика. Численные методы. Планирование эксперимента. М.: Изд-во Физико-математической литературы, 2009. 336 с.
5. Жиглявский А.А., Жилинскас А.Г. Методы поиска глобального экстремума. М.: Наука, 1991. 248 с.
6. Gotmare A., Bhattacharjee S.S., Paditar R., George N.V. Swarm and evolutionary computing algorithms for system identification and filter design: A comprehensive review // *Swarm and Evolutionary Computation*. 2017. V. 32. P. 68–84.
7. Handbook of Metaheuristics. Second Ed. / Eds M. Gendreau, J.-Y. Potvin. Springer, 2010. 648 p.
8. Роудз Дж.Д. Теория электрических фильтров: Пер. с англ. М.: Сов.радио, 1980. 240 с.
9. Трифонов И.И. Расчет электронных цепей с заданными частотными характеристиками. М.: Радио и связь, 1988. 304 с.
10. Смирнов А.В. Оптимальные по Парето аппроксимации передаточных функций электрических фильтров // *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. 2015. № 05 (76). Часть 1. С. 74–78.
11. Смирнов А.В. О влиянии нулей передаточной функции на оптимизированные характеристики электрических фильтров // *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. 2016. № 07 (90). Часть 1. С. 81–86.
12. Digital Video Broadcasting (DVB). Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital transmission system for cable systems (DVB-C2). DVB Document A138, June 2010.
13. Angioi A., Lixia M., Murroni M. Optimized APSK bit allocation for satellite communication // *5th ASMS and 11th SPSC workshop*. Sept. 2010. P. 407–412.
14. Джонс М.Т. Программирование искусственного интеллекта в приложениях: Пер. с англ. М.: ДМК Пресс, 2006. 312 с.
15. Meloni A., Murroni M. On the genetic optimization of APSK constellations for satellite

broadcasting // URL: <https://arxiv.org/abs/1501.07080v1>, 28 Jan 2015.

16. Lellouch G., Mishra A.K. Design of OFDM radar pulses using genetic algorithm based techniques // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. V.52, Iss.4, Aug. 2016, P. 1953–1966.

17. Guo H., Makki B., Svensson T. A Genetic Algorithm-based Beamforming Approach for Delayconstrained Networks. URL: <https://arxiv.org/abs/1703.03792v1>, 10 Mar. 2017.

18. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. М.: Горячая линия - Телеком, 2006. 452 с.

19. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы / Под ред. В.М.Курейчика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 320 с.

20. Sorensen K., Sevaux M., Glover F. A history of metaheuristics. URL: <https://arxiv.org/abs/1704.00853v1>, 04 Apr. 2017.

References:

1. Gutkin L.S. Multiple quality indexes optimization of radio-electronics devices. Moscow: Sovetskoe Radio Publ., 1975. 368 p. (in Russ.).

2. Radio-electronics Systems: Basic of design and theory. Handbook. The 2-nd edition. / Editor D.Ya. Shirman. Moscow: Radiotekhnika Publ., 2007. 512 p. (in Russ.).

3. Gill Ph., Murrey W., Wright M. Practical Optimization. Academic Press, 1981. 509 p.

4. Ninul A.S. Optimization of goal functions: Analytics. Numerical methods. Experiments planning. Moscow: Phisico-matematicheskoi literatury Publ., 2009. 336 p. (in Russ.).

5. Zhigliavskiy A.A., Zhilinskas A.G. Methods of global extremum search. Moscow: Nauka Publ., 1991. 248 p. (in Russ.).

6. Gotmare A., Bhattacharjee S.S., Paditar R., George N.V. Swarm and evolutionary computing algorithms for system identification and filter design: A comprehensive review // Swarm and Evolutionary Computation. 2017. V. 32. P. 68–84.

7. Handbook of Metaheuristics. Second Ed. / Eds M. Gendreau, J.-Y. Potvin. Springer, 2010. 648 p.

8. Rhodes J. D. Theory of electrical filters: John Wiley & Sons, 1976. 240 p.

9. Trifonov I. I. Design of electronic circuits with specified frequency characteristics. Moscow: Radio i svias' Publ., 1988. 304 p. (in Russ.).

10. Smirnov A.V. Pareto-optimal approximations of electric filters transfer functions // Aktual'nyye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk (Actual problems of the humanities and natural sciences). 2015. № 05 (76). Part 1. P. 74–78. (in Russ.).

11. Smirnov A.V. On effect of transfer function zeros to optimized characteristics of electrical filters // Aktual'nyye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk (Actual problems of the humanities and natural sciences). 2016. № 07 (90). Part 1. P.81–86. (in Russ.).

12. Digital Video Broadcasting (DVB). Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital transmission system for cable systems (DVB-C2). DVB Document A138, June 2010.

13. Angioi A., Lixia M., Murroni M. Optimized APSK bit allocation for satellite communication // 5th ASMS and 11th SPSC workshop. Sept. 2010. P. 407–412.

14. Jones M.T. AI Application Programming. Charles River Media, Inc. 2003. 312 p.

15. Meloni A., Murroni M. On the genetic optimization of APSK constellations for satellite broadcasting // URL: <https://arxiv.org/abs/1501.07080v1>, 28 Jan 2015.
16. Lellouch G., Mishra A.K. Design of OFDM radar pulses using genetic algorithm based techniques // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. V. 52. Iss.4, Aug. 2016. P. 1953–1966.
17. Guo H., Makki B., Svensson T. A Genetic Algorithm-based Beamforming Approach for Delayconstrained Networks. URL: <https://arxiv.org/abs/1703.03792v1>, 10 Mar. 2017.
18. Rutkovskaia D., Pilin'skiy M., Rutkovskiy L. Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems. Moscow: Goryachaya Liniya - Telecom Publ., 2006. 452 p. (In Russ.).
19. Gladkov L.A., Kureichik V.V., Kureichik V.M. Genetic algorithms. Moscow: Phismatlit Publ., 2006. 320 p. (in Russ).
20. Sorensen K., Sevaux M., Glover F. A history of metaheuristics. URL: <https://arxiv.org/abs/1704.00853v1>, 04 Apr. 2017.

Об авторе:

Смирнов Александр Витальевич, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры телекоммуникационных систем Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78)

About author:

Alexander V. Smirnov, Ph.D. (Engineering), Professor of the Chair of Telecommunication Systems, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, Moscow Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow, 119454, Russia).

УДК 54.066

МОДЕЛЬ ЛОКАЛЬНОГО ИОННО-ЛУЧЕВОГО ОСАЖДЕНИЯ ПЛАТИНЫ СФОКУСИРОВАННЫМ ПУЧКОМ ИОНОВ

**Д.Г. Лапин,
И.С. Овчинников[@]**

Московский технологический университет, Москва 119454, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: ivan-ovchinnikov@mail.ru

В работе проанализированы проблемные вопросы, связанные с протеканием процесса локального ионно-лучевого осаждения материала из газовой фазы. Проведенными исследованиями установлено, что при ионно-лучевом осаждении материала из газовой фазы возникает эффект перераспыления, на который значительное влияние оказывает время экспонирования и ток первичного пучка ионов. Обоснована необходимость моделирования процесса ионно-лучевого осаждения, имеющая целью снижение величины области перераспыления. Показано, что существующие модели не учитывают все технологические параметры, оказывающие влияние на процесс локального ионно-лучевого осаждения. Нами предложена уточненная математическая модель прогнозирования скорости осаждения платины из газовой фазы посредством сфокусированного пучка ионов, которая учитывает такой технологический параметр, как величина области перекрытия первичного пучка ионов. На основании проведенного моделирования выявлено, что при увеличении области перекрытия пучка увеличивается скорость осаждения. Найдены значения области перекрытия, при которых процесс осаждения переходит в процесс травления, и получена зависимость, характеризующая ток и область перекрытия пучка, обеспечивающие максимальную скорость осаждения. Показано, что при осаждении структур на максимальной скорости осаждения, определенной при моделировании, величина области перераспыления снижается.

Ключевые слова: сфокусированный ионный пучок, ионно-стимулированное осаждение, наноструктурирование, перераспыление, скорость осаждения.

MODEL OF PLATINUM'S ION BEAM DEPOSITION BY FOCUSED ION BEAM

**D.G. Lapin,
I.S. Ovchinnikov[@]**

Moscow Technological University, Moscow 119454, Russia

[@]Corresponding author e-mail: ivan-ovchinnikov@mail.ru

In this paper, the problems associated with the process of local ion-beam deposition of the material from the gas phase is analyzed. It has been established that the ion-beam deposition of a material from the gas causes a redeposition effect, exposure time and the current of the primary ion beam which significantly influence on it. The necessity of modeling the ion-beam deposition process is substantiated for reducing the size of the area of redeposition. An analysis of existing models has shown that they do not take into account all the technological parameters influencing the process of local ion-beam deposition. The refined mathematical model for predicting the focused ion beam deposition rate of platinum from the gas phase takes into account the magnitude of the region of overlap of the primary ion beam is proposed in this paper. Investigations of simulation results have shown that the deposition rate increases with increasing of overlap area. The values of the overlap region at which the deposition process passes into the etching process is determined and the relationship characterizing the beam current and the overlap region where deposition rate has maximum is established. It is shown that when the structures are deposited at the maximum deposition rate (determined in the simulation), the size of the region of the redispersion decreases.

Keywords: focused ion beam, ion stimulated deposition, nanostructuring, overspray, deposition's rate.

Введение

Метод локального ионно-стимулированного осаждения материалов из газовой фазы является эффективным технологическим инструментом для решения задач наноструктурирования поверхности [1]. В основе данного метода лежит процесс деления молекул газа-прекурсора, адсорбированного на поверхности, на молекулы осаждаемого вещества и летучие компоненты посредством воздействия фокусированного пучка ионов [2]. Основным параметром, характеризующим процесс осаждения, является его скорость V [нм/с].

В процессе формирования новых наноструктур методом ионно-лучевого осаждения происходит избыточное осаждение материала. В работе [3] подобный эффект называют перераспылением. Эффектом перераспыления целесообразно считать избыточное осаждение материала за пределами заданных для формирования границ структуры (т.е. осаждение материала происходит за пределами области ионно-лучевого воздействия). Проявление данного эффекта может существенным образом снизить точность воспроизведения вновь формируемых структур.

Стоит отметить, что процесс ионно-лучевого осаждения материала является частным случаем процесса ионно-стимулированного травления. Теоретические основы процесса локального ионно-лучевого травления изучены на достаточно высоком уровне и описаны в [4]. Однако анализ литературы показал, что моделей, которые описывают процесс ионно-стимулированного осаждения, практически нет.

Целью данной работы являются оценка влияния технологических параметров процесса ионно-лучевого осаждения на величину области перераспыления и разработка уточненной модели прогнозирования результатов осаждения.

Экспериментальная часть

Метод ионно-лучевого осаждения платины (прекурсор – триметил(метилциклопентадиенил)платина(IV) – $C_5H_4CH_3Pt(CH_3)_3$) реализовали на двухлучевой системе FEI Quanta 3D. Наноструктуры формировали на кремниевой пластине.

Оценку области перераспыления производили при изменении следующих параметров, определяющих процесс протекания локального ионно-стимулированного осаждения:

- ток пучка (I_{beam} , пА) – определяет количество ионов Ga^+ , которое будет участвовать в процессе осаждения;
- время осаждения (t , нс) – время взаимодействия сфокусированного пучка ионов с молекулами прекурсора.

Для анализа результатов эксперимента применяли метод сканирующей электронной микроскопии.

Результаты и их обсуждение

На основании проведенного эксперимента нам удалось сформировать ряд наноструктур. Обращает на себя внимание факт, что в окрестностях каждой структуры имеется область перераспыления (r) с различными геометрическими размерами (рис. 1).

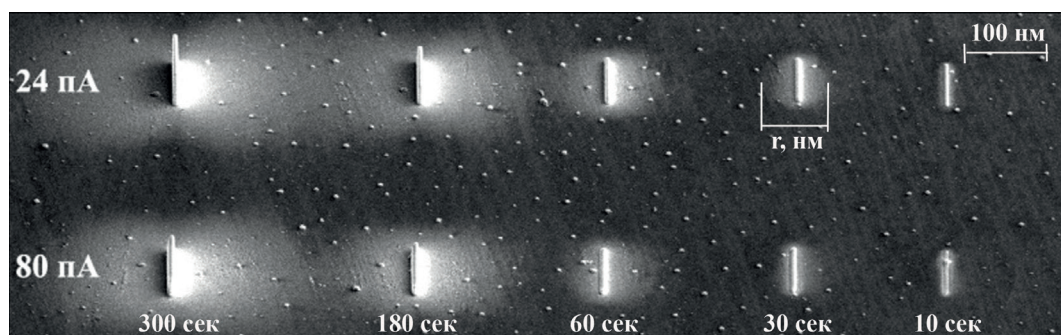


Рис. 1. Наноструктуры из платины на поверхности кремниевой пластины.

Анализ результатов эксперимента свидетельствует о том, что при увеличении тока пучка и времени экспонирования область перераспыления увеличивается. Известно [2], что увеличение тока пучка приводит к увеличению скорости осаждения. Следовательно, время, затраченное на формирование структур с заданными размерами, будет меньше, как и размер образующейся области перераспыления. Отсюда можно сделать вывод, что чем больше скорость осаждения, тем меньше размер области перераспыления при формировании наноструктур заданного объема.

Ранее было показано [5], что интенсивность ионного воздействия удастся увеличить не только за счет увеличения тока пучка, но и за счет увеличения области перекрытия пучка. Область перекрытия пучка (OL) – это расстояние между соседними областями экспонирования, ограниченными диаметром пучка (рис. 2).

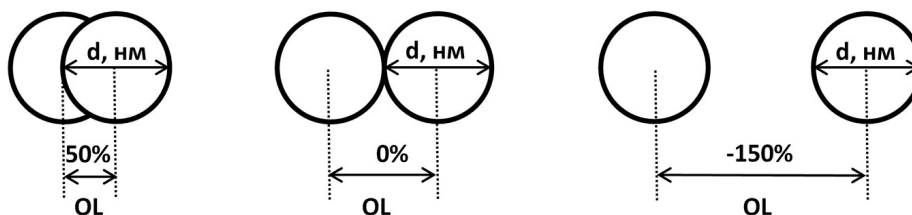


Рис. 2. Схематичное представление области перекрытия пучка.

Аналитических расчетов, подтверждающих результаты, приведенные в работе [5], нет. В то же время модель, предложенная в [6], позволяет наиболее точно спрогнозировать скорость осаждения. Это *модель локального ионно-лучевого осаждения*. Она учитывает только параметры осаждаемого материала и ток пучка ионов.

Модель локального ионно-лучевого осаждения учитывает одновременное протекание четырех процессов:

- адсорбция газа прекурсора на уже сформированном осажденном слое;
- ионная диссоциация адсорбированных молекул прекурсора на молекулы осаждаемого вещества и летучие компоненты;
- ионное распыление адсорбированного слоя прекурсора;
- ионное распыление осажденного слоя.

Для расчета скорости осаждения предложено использовать выражение, предусматривающее зависимость скорости осаждения от тока пучка и характеристик осаждаемого материала [6]:

$$V = 1,6 \cdot 10^{-27} \frac{M_w}{\rho} \frac{i}{S} \left[\sigma n_0 - \frac{Y' Y'_g}{4 n_0 f_x d} i \right] \quad (1)$$

где M_w и ρ – молярная масса и плотность осаждаемого вещества, соответственно;

σ – сечение диссоциации [м^2];

S – площадь сформированной фигуры;

n_0 – количество центров адсорбции;

f_x – скорость сканирования, или диаметр пучка ионов;

Y' и Y'_g – коэффициенты распыления осажденного материала и газа-прекурсора, соответственно.

При малых значениях тока пучка скорость осаждения, как показано на рис. 3, линейно возрастает и достигает максимального значения (V_{max}) при оптимальном токе пучка ($I_{\text{опт}}$). При пороговом значении тока ($I_{\text{гр}}$), которое в 2 раза больше оптимального, скорость осаждения резко падает до 0. За пределами порогового тока пучка процесс осаждения переходит в процесс распыления со скоростями, пропорциональными скорости осаждения. Максимальная скорость осаждения определяется для каждого осаждаемого материала и зависит только от характеристик материала. Численные расчеты проводятся при условии, что воздействие по всей поверхности равномерно и зависит только от тока пучка.

Для оценки влияния области перекрытия пучка на скорость осаждения уточним данную модель, принимая, что пучок сфокусированных ионов описывается согласно закону нормального распределения [7]. При этом его интенсивность определяется как:

$$F_n(x) = \frac{I}{e} \cdot \frac{1}{2\pi\sigma_1^2} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_1^2}\right) \quad (2)$$

где I – ток пучка;

e – элементарный заряд;

x – расстояние от центра пучка;

d – диаметр пучка;

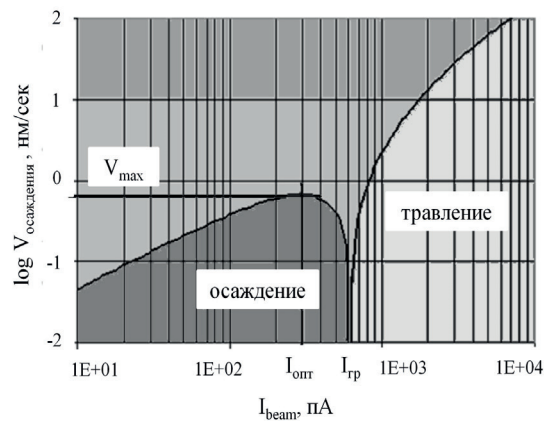


Рис. 3. Зависимость скорости осаждения платины от тока ионного пучка [6].

$$\sigma_1 = d/\sqrt{8\ln 2}.$$

Предположим, что время блокирования пучка ионов во время его перемещения вдоль направления сканирования столь мало, что им можно пренебречь. Рассмотрим случай, когда пучок первичных ионов в один и тот же момент времени оказывает воздействие на поверхность в точке x_i и x_{i+1} . Подчеркнем, что в зависимости от области перекрытия суммарная интенсивность ионного воздействия будет изменяться (рис. 4).

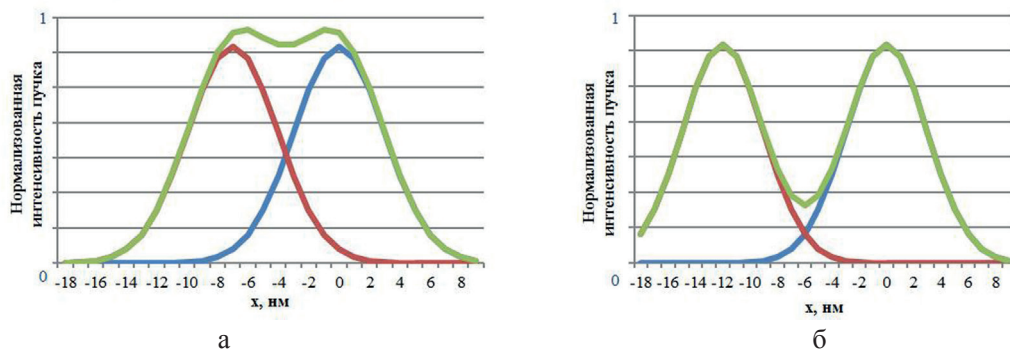


Рис. 4. Суммарная интенсивность ионного воздействия:

а) при величине области перекрытия -50%; б) при величине области перекрытия -130%.

Если ограничить интенсивность ионного пучка согласно правилу трех σ , то отрезок Δx , на котором соседние пучки ионов будут оказывать влияние друг на друга, вычисляется как:

$$\Delta x = (\mu_i - \mu_{i+1}) + 6\sigma \quad (3)$$

где μ_i и μ_{i+1} – математические ожидания.

Исходя из вышесказанного, интенсивность ионного излучения на отрезке $\Delta x(F_{\Delta x})$ имеет вид:

$$F_{\Delta x}(x) = F_i(x) + F_{i+1}(x) \quad (4)$$

где F_i и F_{i+1} – интенсивности пучка в соседних точках воздействия, при этом $F_i = F_{i+1}$, тогда

$$F_{\Delta x}(x) = 2 \frac{I}{e} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\mu_i + 3\sigma}^{\mu_{i+1} - 3\sigma} e^{-x^2/2} dx \quad (5)$$

где

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\mu_i + 3\sigma}^{\mu_{i+1} - 3\sigma} e^{-x^2/2} dx = \Phi(\Delta x) \quad (6)$$

Общая интенсивность ионного воздействия $\Phi_{\text{общ}}$ на отрезке, который характеризует степень воздействия ионного излучения на всей линии сканирования, будет:

$$\Phi_{\text{общ}} = \Phi_{\text{п}} + \Phi_{\Delta x} \quad (7)$$

Таким образом, скорость осаждения материала равна:

$$V = 1,6 \cdot 10^{-27} \frac{M_w}{\rho} \frac{2IS\Phi_{\text{общ}}(\mu_i + 3\sigma)}{e} \left[\sigma n_0 - \frac{Y'Y'_g}{4n_0 f_x x d} \frac{2I\Phi_{\text{общ}}(\mu_i + 3\sigma)}{e} \right] \quad (8)$$

Расчет интенсивности $\Phi_{\text{общ}}$ проводили с использованием таблиц нормального распределения. Для каждого значения тока пучка определяли пороговое значение области перекрытия, а также максимальную скорость осаждения платины. Используя результаты расчетов, определяли зависимость скорости осаждения от интенсивности ионного излучения при различных областях перекрытия и токах пучка (рис. 5). Результаты моделирования позволили модифицировать методику формирования структур из платины посредством процесса локального ионно-лучевого осаждения.

Для подтверждения аналитических расчетов проводили следующий эксперимент. Методом осаждения из газовой фазы, при различных значениях тока пучка и области перекрытия, наносили наноструктуры из платины на кремниевую пластину. Скорость осаждения определяли с помощью измерения их линейных размеров методом сканирующей электронной микроскопии. Полученные результаты эксперимента продемонстрировали высокую степень достоверности предложенной модели прогнозирования скорости осаждения, учитывающей область перекрытия пучка ионов (рис. 5).

Область перекрытия пучка оказывает влияние на скорость осаждения, следовательно, используя меньшие токи пучка, можно получить максимальную скорость формирования заданной структуры.

Анализ результатов моделирования позволил установить зависимость, характеризующую ток и область перекрытия пучка, при которых достигается максимальная скорость осаждения. Интерполируя полученные данные многочленом Лагранжа третьей степени, получим выражение, которое позволяет определить область перекрытия пучка для конкретного значения тока, при котором скорость осаждения будет максимальной:

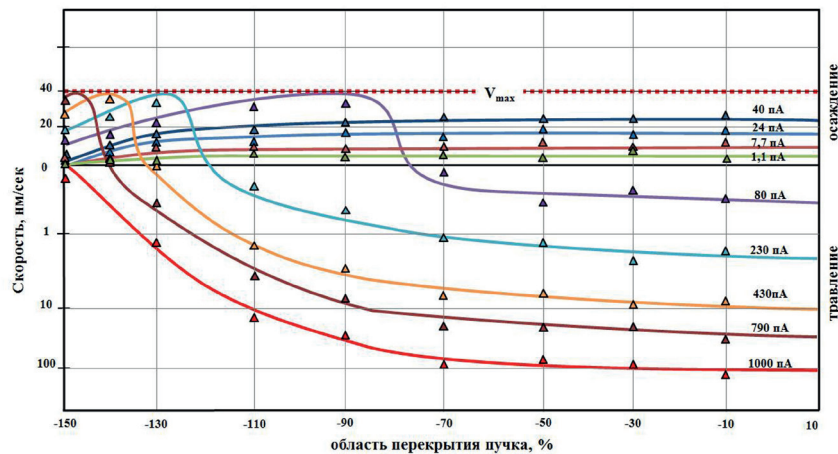


Рис. 5. Зависимость скорости осаждения (травления) от области перекрытия.

$$OL = -9,1521 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 + 0,00139 \cdot I^2 - 0,6602 \cdot I - 45,615 \quad (9)$$

Полученное выражение имеет большую практическую значимость для оптимизации процесса ионно-лучевого осаждения.

Предложенная модель позволяет повысить эффективность метода локального ионно-лучевого осаждения за счет уменьшения времени осаждения формируемых структур. Эксперименты, характеризующие влияние тока пучка на область перераспыления, проводили при одинаковой области перекрытия: -150% (см. рис. 1). Однако, как следует из результатов моделирования, для каждого конкретного тока пучка скорость осаждения будет максимальна при определенной области перекрытия (рис. 5). Сделанный вывод подтвердил соответствующий эксперимент, проведенный при других значениях области перекрытия.

Основываясь на экспериментальных данных, мы построили зависимость области перераспыления от тока пучка при стандартных значениях области перекрытия и при значениях области перекрытия, при которой скорость осаждения максимальна (рис. 6). Размеры формируемых структур в обоих случаях одинаковы.

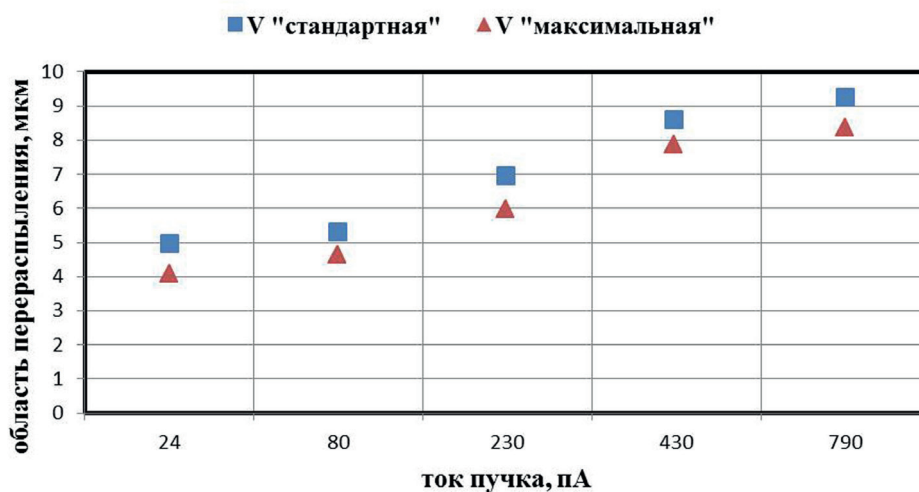


Рис. 6. Величина области перекрытия при скорости осаждения, не учитывающей области перекрытия (стандартная), и с учетом изменения области перекрытия (максимальная).

Таким образом, для снижения проявления эффекта перераспыления при формировании новых структур методом ионно-стимулированного осаждения необходимо устанавливать максимальную скорость осаждения, определяемую на основании модели прогнозирования скорости осаждения.

Заключение

Выполненное исследование позволило сделать ряд существенных выводов:

- 1) существует взаимное влияние соседних областей экспонирования в области их перекрытия, влекущее увеличение интенсивности ионного воздействия;
- 2) область перекрытия пучка влияет на скорость осаждения материала из газовой фазы;
- 3) при токе пучка менее 80 пА, несмотря на увеличение области перекрытия, процесс осаждения не переходит в процесс травления, а при токе, большем или равном 1000 пА, всегда доминирует процесс травления.

Получен ряд практически значимых результатов. Определено выражение, позволяющее выбрать значение области перекрытия, при котором скорость осаждения максимальна. Выявлена возможность уменьшения области перераспыления в процессе формирования новых структур при максимальной скорости осаждения.

Литература:

1. Bassim N., Scott K., Lucille A. Recent advances in focused ion beam technology and applications // Mater. Res. Soc. 2014. V. 39. P. 317–325.
2. Utke I., Hoffmann P., Melngailis J. Gas-assisted focused electron beam and ion beam processing and fabrication // J. Vacuum Sci. & Technol. 2008. V. 26. P. 1197–1276.
3. Lundquist T., Thompson M. Circuit Edit at First Silicon // Microelectronics Failure Analysis. Desk Reference Sixth Edition. 2011. P. 594–606.
4. Боргардт Н.И., Волков Р.Л., Румянцев А.В., Чаплыгин Ю.А. Моделирование распыления материалов фокусированным ионным пучком // Письма в ЖТФ. 2015. № 12. С. 97–104.
5. Dai J., Chang H., Maeda E., Warisawa S., Kometani R. Approaching the resolution limit of W–C nano-gaps using focused ion beam chemical vapour deposition // Appl. Surface Sci. 2017. V. 427. P. 422–427.
6. Rüdenauer F., Mozdzen G., Costin W., Semerad E. Quantitative model of FIB deposition // Adv. Eng. Mater. 2007. V. 9. P. 708–711.
7. Ertl O., Filipovic L., Selberherr S. Three-dimensional simulation of focused ion beam processing using the level set method // Proceed. of the Int. Conf. on Simulation of Semiconductor Processes and Devices, 2010 (SISPAD 2010), Bologna, Italy, 6–8 September, 2010. IEEE, 2010. P. 49–52.

References:

1. Bassim N., Scott K., Lucille A. Recent advances in focused ion beam technology and applications // Mater. Res. Soc. 2014. V. 39. P. 317–325.
2. Utke I., Hoffmann P., Melngailis J. Gas-assisted focused electron beam and ion beam processing and fabrication // J. Vacuum Sci. & Technol. 2008. V. 26. P. 1197–1276.

3. Lundquist T., Thompson M. Circuit Edit at First Silicon // Microelectronics Failure Analysis. Desk Reference Sixth Edition. 2011. P. 594–606.
4. Borgardt N.I., Volkov R.L., Rumyantsev A.V., Chaplygin Yu.A. Simulation of sputtering materials by focused ion beam // Pis'ma v ZhTEF (Technical Physics Letters). 2015. V. 12. P. 97–104. (in Russ.).
5. Dai J., Chang H., Maeda E., Warisawa S., Kometani R. Approaching the resolution limit of W–C nano-gaps using focused ion beam chemical vapour deposition // Appl. Surface Sci. 2017. V. 427. P. 422–427.
6. Rüdener F., Mozdzen G., Costin W., Semerad E. Quantitative model of FIB deposition // Adv. Eng. Mater. 2007. V. 9. P. 708–711.
7. Ertl O., Filipovic L., Selberherr S. Three-dimensional simulation of focused ion beam processing using the level set method // Proceed. of the Int. Conf. on Simulation of Semiconductor Processes and Devices, 2010 (SISPAD 2010), Bologna, Italy, 6–8 September, 2010. IEEE, 2010. P. 49–52.

Об авторах:

Лапин Дмитрий Геннадьевич, аспирант кафедры нанoeлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Овчинников Иван Сергеевич, аспирант кафедры нанoeлектроники Физико-технологического института ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About authors:

Dmitriy G. Lapin, Postgraduate Student, Chair of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, Moscow Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow, 119454, Russia).

Ivan S. Ovchinnikov, Postgraduate Student, Chair of Nanoelectronics, Institute of Physics and Technology, Moscow Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow, 119454, Russia).

УДК 537.621.4

МАГНЕТОМЕТР ФАРАДЕЯ С ПОЛЮСНЫМИ НАКОНЕЧНИКАМИ-ПОЛУСФЕРАМИ: ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЗОНЫ СТАБИЛЬНОГО СИЛОВОГО ФАКТОРА

А.В. Сандуляк,
А.А. Сандуляк,
М.Н. Полисмакова,
Д.О. Киселев,
Д.А. Сандуляк[@]

Московский технологический университет, Москва 107996, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: d.sandulyak@mail.ru

Оценены принципиальные положения и направления в создании устройств для изучения магнитной восприимчивости образцов методом Фарадея. Обращено внимание на существующую проблему идентификации рабочей зоны, ответственной за координацию в ней малообъемных образцов. Сформулированы предпосылки к безусловному проявлению зоны стабильности градиента напряженности (индукции) поля как необходимого, но недостаточного условия наличия зоны стабильности магнитного силового фактора – произведения напряженности или индукции поля на ее градиент. Показано, что наметившаяся тенденция в создании магнетометров Фарадея связана с применением сильного постоянного магнита, обращенного полюсной поверхностью к изучаемому образцу. Однако, по нашему мнению, нецелесообразно рассматривать это направление как перспективное из-за отсутствия предпосылок для проявления зоны стабильности, как градиента, так и силового фактора. Вряд ли приемлемо создание магнетометров Фарадея с применением таких взаимно наклонных катушек, которые формируют поле стабильного градиента, также вследствие отсутствия возможности для проявления зоны стабильности силового фактора. На примере сферических полюсных наконечников, рекомендуемых к использованию в магнетометрах Фарадея, доказано безусловное наличие зон, где индивидуальные значения градиента и магнитного силового фактора являются стабильными, т.е. в окрестности экстремумов этих параметров, установлены и сопоставлены их координаты. Показано, что абсциссы экстремумов остаются практически неизменными для каждого из расстояний между полюсными наконечниками, независимо от токовой нагрузки, причем экстремумы силового фактора располагаются на 30-40% ближе к осевой линии полюсов, чем экстремумы градиента. Обнаружено влияние расстояния между полюсными наконечниками на значения абсцисс экстремумов градиента и силового фактора (логарифмическая связь), а также на значения их ординат (степенная связь).

Ключевые слова: магнетометр Фарадея, индукция, градиент, магнитный силовой фактор, зона в окрестности экстремума.

FARADAY MAGNETOMETER WITH SPHERIC POLE PIECES: IDENTIFICATION ZONE WITH A STABLE FORCE FACTOR

A.V. Sandulyak,
A.A. Sandulyak,
M.N. Polismakova,
D.O. Kiselev,
D.A. Sandulyak@

Moscow Technological University, Moscow 107996, Russia
@Corresponding author e-mail: d.sandulyak@mail.ru

Basic principles and approaches in generation of devices for realization Faraday method are evaluated (for learning magnetic susceptibility of samples). It is noticed that problem exists – it is difficult to identify an operating area to coordinate here samples with a small volume. It was defined a prerequisites for an appearance area with a stable value of magnetic field intensity (induction) gradient of magnetic field. Presence such zone is a necessary but not sufficient condition for presence a zone with a stable value of magnetic forceful factor (as a product of field intensity or pole induction by its gradient). It was shown that developing direction in creating a Faraday magnetometer with a strong permanent magnet which pole surface is faced to sample is impractical because there is no prerequisites for an appearance stable zone both gradient and magnetic forceful factor. A creating Faraday magnetometer with mutually canted coils is hardly practical too. These coils generate magnetic field with a stable gradient but not with a stable magnetic forceful factor.

By the example of spheric pole pieces (recommended for using at Faraday magnetometer) presence an areas with stable gradient and magnetic forceful factor is proved (at the range of their extremum values). Range of such areas is defined and compared to each other. It was shown that absciss values of extremum are almost stable (for each distance between pole pieces, regardless of current load), magnetic forceful factor's extremum are close to axis of magnet pole for about 30-40% than gradient's extremum. There were defined the influence of distance between pole pieces on absciss values of extremums of gradient and magnetic forceful factor (a logarithmic dependence) and on their ordinate values (power dependence).

Keywords: Faraday magnetometer, induction, gradient, magnetic forceful factor, range of extremum values.

Введение

К числу востребованных методов контроля магнитных свойств, в частности, магнитной восприимчивости различных образцов относится пондеромоторный, силовой метод Фарадея. Его применение посредством так называемых весов Фарадея (*Faraday balance, Faraday magnetometer*) делает технически доступным решение задачи получения необходимой информации в широком диапазоне температур [1–10]. Указанное обстоятельство отличает этот метод от других известных методов. Следует особо отметить, что для полноценной реализации метода достаточно использовать всего лишь малые, зачастую оправданно малые, образцы [1, 11, 12] и не только сплошные, но и дисперсные, напри-

мер, порошковые [2, 6, 7, 11, 12]. Так, с объективно малообъемными пробами дисперсной примесной фазы приходится иметь дело в процессах магнитофореза и магнитоконтроля ферропримесей природных и техногенных сред [13–19].

Возможности сравнительно несложного и достаточно точного решения широкого круга задач, преимущества, а в ряде случаев – предпочтительность магнетометра Фарадея в сравнении с альтернативными, например, широко применяемыми SQUID и вибрационными магнетометрами, включая возможности полезного взаимодополнения данных, описаны в [8–10, 12, 20–22]. Зачастую он позиционируется как более чувствительный, чем вибрационный магнетометр, а в [8, 21, 22] констатируется хорошая корреляция данных, полученных с использованием магнетометра Фарадея и SQUID-магнетометра.

1. О принципиальных положениях, направлениях в создании магнетометров для реализации метода Фарадея и необходимости его совершенствования

В основу метода Фарадея (магнетометра Фарадея) положено фундаментальное выражение для магнитной, т.е. пондеромоторной, силы, действующей на магнетик – образец малого объема V магнитной восприимчивостью χ в неоднородном (градиентном) магнитном поле напряженностью H (или индукцией B , причем для воздушной среды $B = \mu_0 H$) [20–25]:

$$F = \mu_0 \cdot \chi \cdot V \cdot H \text{grad}H = \chi \cdot V \cdot B \text{grad}B / \mu_0, \quad (1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная константа.

Градиент поля $\text{grad}H$ (или $\text{grad}B$) может быть определен на основании координатных зависимостей H (или B), получаемых, например, пошаговыми измерениями B датчиком Холла [21, 22, 25]. Для этого получаемые и аппроксимируемые координатные зависимости H (или B) следует продифференцировать [25]. Тогда величина χ при уже известных (измеренных, вычисленных) значениях остальных величин, входящих в (1), определяется расчетом как:

$$\chi = F / (\mu_0 \cdot V \cdot H \text{grad}H) = F \cdot \mu_0 / (V \cdot B \text{grad}B). \quad (2)$$

Что касается вариантов исполнения рабочих органов магнетометра Фарадея, прежде всего тех, которые ответственны за создание градиентного магнитного поля, то они, будучи самыми различными конструктивно, могут иметь, в основном, три принципиальных отличия в выборе способа генерации поля.

Самый распространенный подход – это использование электромагнитной системы, т.е. функционального блока, состоящего из таких характерных элементов, как обмотки намагничивания, сердечники и полюсные наконечники той или иной формы [3, 11, 22, 23, 26].

Еще один принципиальный подход – использование коротких катушек (соленоидов) без сердечников и полюсных наконечников [6, 9, 10, 12, 20, 24, 27]. Здесь сами катушки способны создавать необходимое для проявления достаточной магнитной силы неоднородное и высокое по напряженности магнитное поле, особенно при использовании высокоамперных, получаемых путем криогенного охлаждения, катушек.

Новый подход, обсуждаемый ниже, заключается в использовании сильных постоянных магнитов [21, 28], в частности, магнита, обращенного полюсной поверхностью к изучаемому образцу [21]. Постоянные магниты также способны создавать неоднородное магнитное поле, о чем свидетельствует соответствующая диагностика индукции поля, например, по мере удаления от поверхности магнита.

При использовании любого из магнетометров Фарадея важной задачей является установление местоположения рабочей (локальной) зоны в области созданного градиентного поля – зоны для размещения в ней малообъемного исследуемого образца. В [25] на примере электромагнитной системы с полюсными наконечниками-полусферами диаметром 100 мм показан результативный подход к решению этой задачи и выполнен первый, определяющий, этап исследований, ограничивающийся обоснованием способа выявления местоположения и размеров зоны стабильных значений $gradB$. Необходимым стартовым действием для этого является обязательное получение характеристики индукции B или напряженности H поля [25]. Тогда, располагая именно такой координатной характеристикой, в случае, если эта характеристика извилистая, с четко видимым перегибом, можно судить о наличии и местоположении зоны стабильных значений градиента. Следовательно, сравнительно короткий участок этой характеристики в зоне перегиба, поддающийся линейной аппроксимации, свидетельствует о стабильном, примерно постоянном, значении на этом участке параметра $gradB = dB/dx$. Это демонстрируется наличием экстремума на получаемой путем дифференцирования координатной характеристики параметра $gradB$ – с абсциссой экстремума $x = x_{extr} = (x_{extr})_{gradB}$ в окрестности которого значения $gradB$ практически стабильны.

Тогда вполне можно ожидать, что и координатная характеристика столь же важного параметра $BgradB$ будет иметь экстремум с абсциссой $x = x_{extr} = (x_{extr})_{BgradB}$. При этом искомая зона, где значения $BgradB$ практически стабильны, находится в окрестности экстремума этой характеристики.

Изложенный подход к идентификации рабочей зоны позволяет сделать следующее концептуальное замечание. Если координатная, обычно нелинейная, характеристика, например, B в области создания градиентного магнитного поля того или иного магнетометра не содержит перегиба, то участок, который можно было бы подвергнуть желаемой линеаризации, отсутствует. Следовательно, на соответствующей координатной характеристике $gradB$ будет отсутствовать экстремум, в окрестности которого значения $gradB$ практически стабильны. Тогда однозначным здесь является вывод о неприемлемости такого варианта магнетометра.

Сделанный вывод в полной мере касается системы, выполненной с использованием постоянного магнита (в частности, Nd–Fe–B) [21], обращенного полюсной поверхностью в магнетометре Фарадея к изучаемому образцу.

Некоторые варианты позиционирования источников градиентного поля в магнетометрах Фарадея приведены на рис. 1. Здесь схема (а) – неприемлемая для получения характеристик со стабильными значениями параметра $gradB$ (или $gradH$) и параметра $B \cdot gradB$ (или $H \cdot gradH$); схема (б) – альтернативная приемлемая для получения этих характеристик; схема (в) при рекомендуемом в [27] угле взаимного наклона катушек $\Theta = 290$ (радиус катушек 7.5 см) – приемлемая для получения характеристики со стабильными значениями параметра $gradB$ (или $gradH$) и неприемлемая для получения характеристики со стабильными значениями параметра $B \cdot gradB$ (или $H \cdot gradH$).

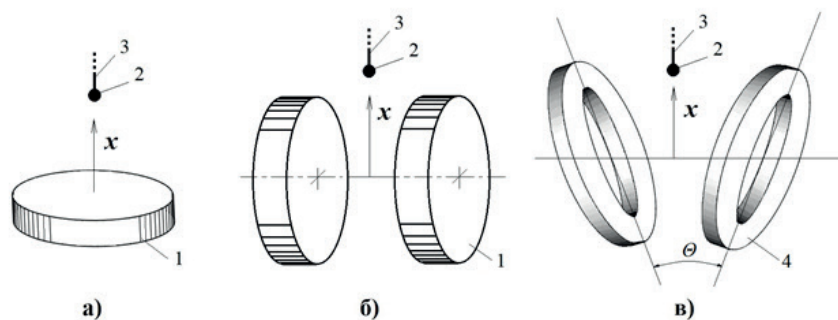


Рис. 1. Некоторые варианты позиционирования источников градиентного поля в магнетометрах Фарадея: а) постоянного магнита [21]; б) двух магнитов; в) взаимно наклонных коротких катушек [27]: 1 – магнит, 2 – изучаемый образец, 3 – подвес образца, соединенный с измерителем силы, 4 – катушка.

Данные диагностики показывают (рис. 2), что как в случае [21] (рис. 2а), так и в других подобных случаях (рис. 2б), каждая из координатных характеристик индукции B создаваемого градиентного поля по мере удаления от полюсной поверхности магнита убывает монотонно, асимптотически. Она вся или хотя бы ее участок не являются линейными, она также не имеет перегиба, что позволило бы выделить участок, поддающийся линейной аппроксимации. Итак, если дополнительно получить (дифференцированием такой координатной характеристики B) координатную характеристику параметра $gradB$, то необходимые признаки – «плато» или экстремум, которые должны были бы свидетельствовать о наличии столь необходимой здесь зоны стабильных значений градиента, будут попросту отсутствовать. Естественно, в этом случае аналогичные признаки будут отсутствовать и на координатной характеристике параметра $BgradB$.

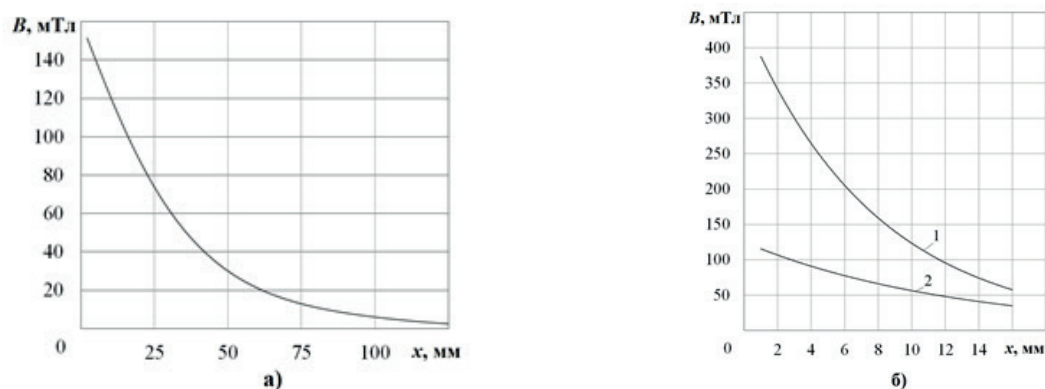


Рис. 2. Изменение индукции градиентного магнитного поля, создаваемого постоянным магнитом, по мере удаления от полюсной поверхности магнита: а) по данным [21] для магнита Nd-Fe-B; б) полученные данные для магнита Nd-Fe-B (1) и магнита типа ЮНДК (2).

Это и есть основной мотив возражений против использования в магнетометрах Фарадея постоянных магнитов по предложенной в [21] схеме их позиционирования (рис. 1а) и, следовательно, против создания таких магнетометров. Тем не менее, такой мотив не должен распространяться на другие возможные магнетометры Фарадея с постоянными магнитами. Оправданным, гарантирующим получение извилистой координатной зависимости индукции (напряженности), было бы решение использовать систему из двух по-

стоянных магнитов (двух блоков магнитов), расположенных в виде противостоящих блоков параллельно друг другу (рис. 1б) или под углом друг к другу [28]. При определенном угле взаимного наклона катушек $\Theta=290$ (радиус катушек 7.5 см), как показано на рис. 1в, между ними гарантируется создание поля одинакового градиента [27], что одновременно исключает возможность создания зоны одинакового магнитного силового фактора. В случае получения, например, протяженной координатной характеристики параметра B (или H) в виде линейно убывающей зависимости [27] типа $B = \text{Const}_1 - \text{Const}_2 \cdot x$ действительно можно говорить о наличии здесь зоны стабильных значений градиента, о чем свидетельствует дифференцирование этой зависимости, а именно $dB/dx = -\text{Const}_2$. Однако это совсем не означает присутствия зоны стабильных (постоянных или близких к ним) значений еще одного ключевого параметра, а именно BdB/dx , поскольку тогда он выступает как величина, зависящая от x : $BdB/dx = -(\text{Const}_1 - \text{Const}_2 \cdot x) \cdot \text{Const}_2 \neq \text{Const}$.

Таким образом, надо стремиться уйти от рекомендации располагать катушки под углом $\Theta=290$. Важно обеспечить такой взаимный наклон катушек, при котором координатная зависимость индукции (напряженности) стала бы извилистой, гарантируя тем самым наличие зоны стабильного градиента и магнитного силового фактора. То же в равной мере относится и к уже упоминавшемуся случаю с противостоящими взаимно наклонными постоянными магнитами [28].

2. Координатная характеристика магнитного силового фактора. Идентификация зоны его стабильности

В [25] с использованием электромагнитной системы, в которой градиентное магнитное поле создавалось при помощи полюсных наконечников-полусфер диаметром 100 мм, экспериментально получены и феноменологически аппроксимированы полиномом четвертой степени координатные характеристики индукции B . Эксперименты выполняли при различных значениях тока питания обмоток I : от 4 А до 30 А и взаимного удаления наконечников b : от 3.5 мм до 15.3 мм. Это позволило найти соответствующие координатные, экстремальные по виду, характеристики параметра $gradB = dB/dx$ (рис. 3), координаты экстремумов которых при увеличении b смещаются в сторону больших значений согласно логарифмическому выражению: $x_{extr} = x_* \ln(b/b_*)$ – при значениях феноменологических параметров $x_* = 5.7$ мм и $b_* = 0.82$ мм (независимо от токовой нагрузки).

Данные, приведенные на рис. 3, позволяют также найти закономерность убывания экстремальных значений градиента ($|gradB|_{extr}$) при увеличении b (рис. 4); квазилинеаризуясь в логарифмических координатах, эта закономерность оказалась убывающей степенной с показателем степени 1.33, причем независимо от токовой нагрузки: $|gradB|_{extr} \sim b^{-1.33}$.

Если вести речь о рабочей зоне магнетометра Фарадея как зоне оговоренного в [3, 23] стабильного значения произведения индукции или напряженности на соответствующий градиент, т.е. как $B \cdot gradB \cong \text{Const}$ или $H \cdot gradH \cong \text{Const}$, именуя такое произведение магнитным силовым фактором, то можно убедиться в следующем. Наличие экстремума на характеристике градиента $gradB$ или $gradH$ гарантирует и наличие столь необходимого здесь экстремума на характеристике $B \cdot gradB$ или $H \cdot gradH$. На рис. 5 в доказательство этого факта показаны соответствующие характеристики $B \cdot gradB$, найденные указанным приемом с использованием первичных характеристик B , а также аналитически установленных на их основе характеристик $gradB$ (рис. 3) [25].

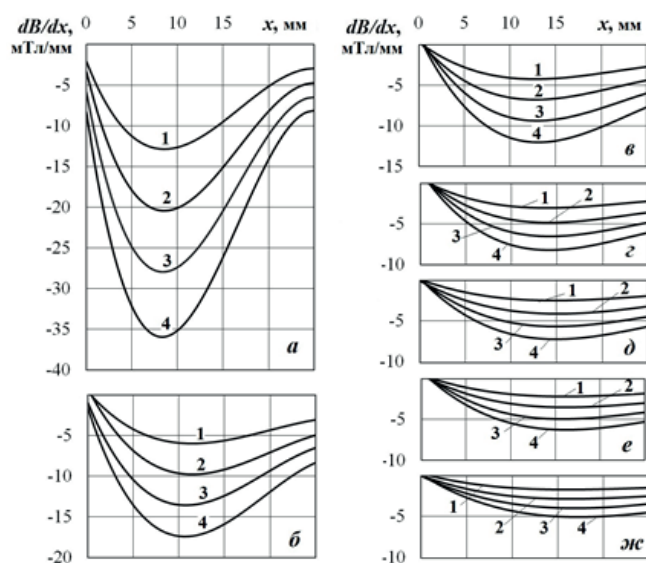


Рис. 3. Координатные характеристики градиента между полюсными наконечниками-полусферами диаметром 100 мм при их взаимном удалении $b=3.5$ мм (а); 6 мм (б); 8 мм (в); 10 мм (г); 11.5 мм (д); 13 мм (е); 15.3 мм (ж); 1 – $I=4$ А, 2 – $I=8$ А, 3 – $I=16$ А, 4 – $I=30$ А.

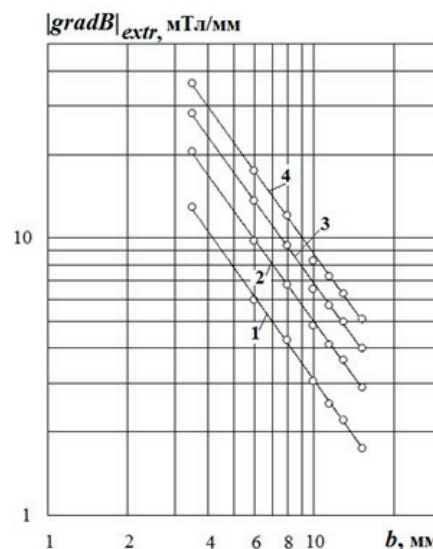


Рис. 4. Иллюстрация степенной зависимости экстремума градиента от взаимного удаления полюсных наконечников-полусфер (по факту квазилинеаризации этих данных в логарифмических координатах): 1 – $I=4$ А, 2 – $I=8$ А, 3 – $I=16$ А, 4 – $I=30$ А.

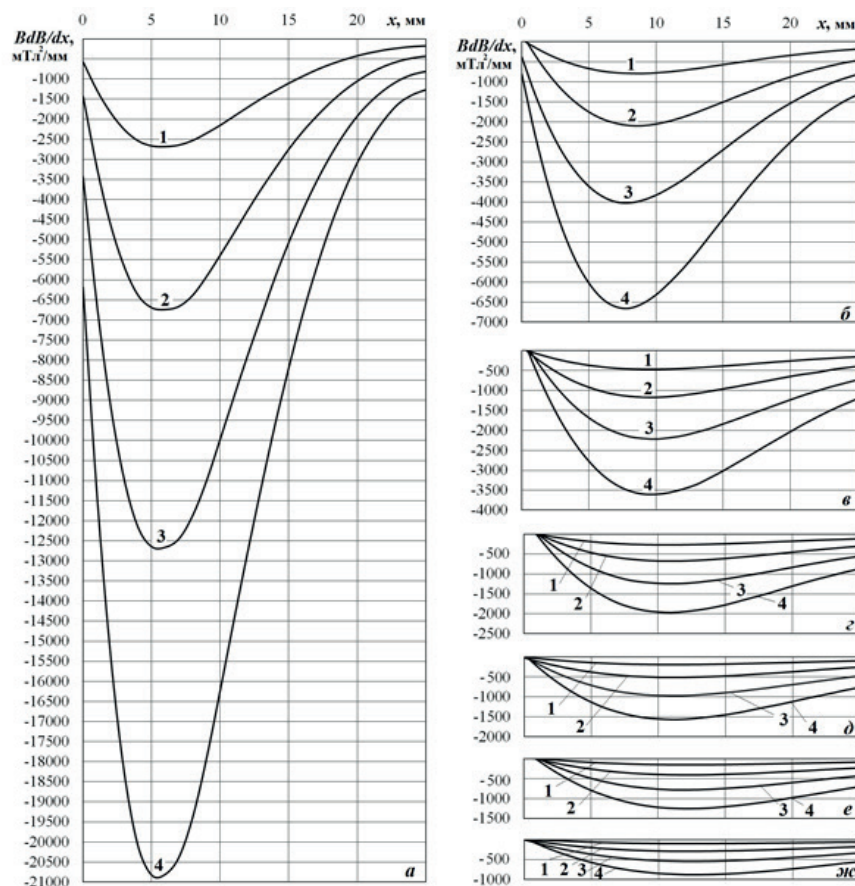


Рис. 5. Координатные характеристики магнитного силового фактора между полюсными наконечниками-полусферами диаметром 100 мм при их взаимном удалении $b=3.5$ мм (а), 6 мм (б), 8 мм (в), 10 мм (г), 11.5 мм (д), 13 мм (е), 15.3 мм (ж); 1 – $I=4$ А, 2 – $I=8$ А, 3 – $I=16$ А, 4 – $I=30$ А.

Как и ожидалось, найденные координатные характеристики $B \cdot gradB$, также хорошо аппроксимируемые полиномом четвертой степени, имеют экстремальный вид, причем такой вид присущ различным случаям взаимного удаления b полюсных наконечников – от $b=3.5$ мм до $b=15.3$ мм (рис. 5). Примечательно, что абсциссы экстремумов магнитного силового фактора $B \cdot gradB$ (рис. 5), несмотря на широкий диапазон изменения токовой нагрузки, для каждого из вариантов b остаются весьма близкими между собой. Это указывает на возможность неизменного позиционирования изучаемого образца в магнитной системе магнетометра при изменении режимов исследований.

Заметим также, что значения абсцисс экстремумов характеристик $BgradB$ (рис. 5) оказались заметно меньше чем значения абсцисс экстремумов характеристик $gradB$ (рис. 3) [25] в 1.3-1.4 раза, практически независимо от взаимного удаления b полюсных наконечников. Другими словами, экстремум значений магнитного силового фактора $BgradB$ между полюсными наконечниками-полусферами находится заметно ниже, на 30-40% ближе к осевой линии полюсов, чем экстремум значений градиента $gradB$.

Разумеется, зону в окрестности экстремума координатной характеристики $BgradB$ вполне можно считать своеобразным «плато» – зоной сравнительно стабильных значений $BgradB$, т.е. ответственной за координацию в ней изучаемого образца. При этом в изучаемой области между указанными наконечниками-полусферами диаметром 100 мм протяженность этой зоны составляет (по x): от $(x_{extr} - 2...3$ мм) до $(x_{extr} + 2...3$ мм). Сама же величина x_{extr} при увеличении значений b смещается в сторону больших значений x (рис. 6а). Используя данные рис.6а, можно получить аналитическую (феноменологическую) зависимость влияния взаимного удаления b полюсных наконечников на значения координаты экстремума магнитного силового фактора x_{extr} . Так, представление этих данных в полулогарифмических координатах показывает, что они достаточно хорошо здесь квазилинеаризуются (рис. 6б), демонстрируя тем самым склонность к логарифмической функции:

$$x_{extr} = x_* \ln \frac{b}{b_*}, \quad (3)$$

где феноменологические параметры x_* и b_* составляют здесь $x_* = 4.7$ мм и $b_* = 1.01$ мм.

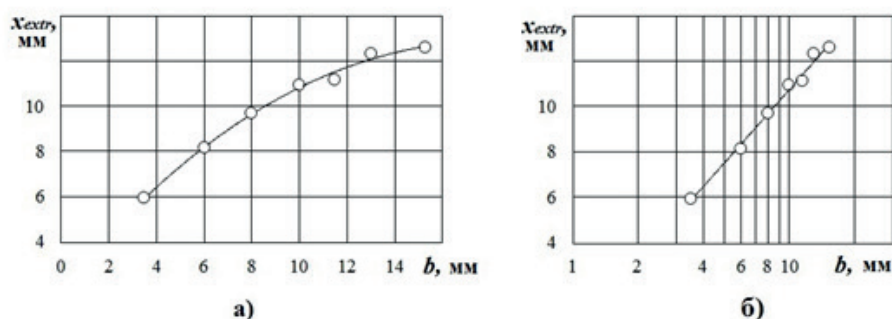


Рис. 6. Зависимость абсциссы экстремума магнитного силового фактора (условного центра зоны его стабильности) от взаимного удаления полюсных наконечников-полусфер (а) и квазилинеаризация этих данных в полулогарифмических координатах (б) – для получения логарифмической функции (3).

Например, при взаимном удалении полюсных наконечников $b=10$ мм координата экстремума магнитного силового фактора составляет $x_{extr} = 11$ мм, а размер зоны практически стабильных значений параметра $BgradB$ (в окрестности экстремума) составляет от $(11 - 2...3)$ мм = 8...9 мм до $(11 + 2...3)$ мм = 13...14 мм, что непосредственно видно на рис. 5г.

Полученный массив данных (рис. 5) позволяет также найти закономерность убывания экстремальных значений магнитного силового фактора, а именно $|BgradB|_{extr}$, при увеличении взаимного удаления полюсных наконечников b (рис. 7). Как и соответствующая закономерность для экстремума градиента $|gradB|_{extr}$ (рис.4), она, квазилинеаризуясь в логарифмических координатах, оказалась убывающей степенной, но здесь – с показателем степени 2.15: $|BgradB|_{extr} \sim b^{-2.15}$.

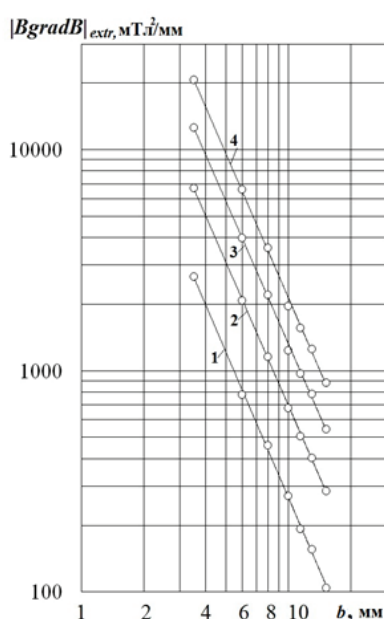


Рис. 7. Степенная зависимость экстремума магнитного силового фактора от взаимного удаления полюсных наконечников-полусфер по факту квазилинеаризации этих данных в логарифмических координатах: 1 – $I=4$ А, 2 – $I=8$ А, 3 – $I=16$ А, 4 – $I=30$ А.

Заключение

В работе дана оценка принципиальным положениям и направлениям в создании устройств (магнетометров) для реализации метода Фарадея. Обосновано критическое отношение к рекомендованному применению постоянных магнитов, не обеспечивающему стабильность градиента и силового фактора, а также к рекомендованному углу взаимного наклона катушек в магнетометрах, обеспечивающему стабильность градиента, но не силового фактора.

Выполнен комплекс исследований, направленных на выявление координат и размеров локальной, ответственной за расположение образцов малых размеров, зоны со стабильными значениями силового фактора между рекомендуемыми полюсными наконечниками-полусферами магнетометра Фарадея диаметром 100 мм.

Найдена связь координаты экстремума силового фактора, которая в 1.3-1.4 раза меньше координаты экстремума градиента, с расстоянием между полюсными наконечниками:

в принятом диапазоне этого расстояния – от 3.5 до 15.3 мм, которая оказалась близкой к логарифмической. В то же время связь экстремальных значений силового фактора с этим расстоянием проявляется как достаточно сильная обратная степенная.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-60034 мол_а_дк и поддержке Минобрнауки РФ по Госзаданию в сфере научной деятельности № 9.9626.2017.

Литература / References:

1. Baskar D., Adler S.B. High temperature Faraday balance for in situ measurement of magnetization in transition metal oxides // Review of Scientific Instruments. 2007. V. 78. P.023908 (1-6).
2. Moze O., Giovanelli L., Kockelmann W., de Groot C.H., Boer F.R., Buschow K.H.J. Structure and magnetic properties of $\text{Nd}_2\text{Co}_{17-x}\text{Ga}_x$ compounds studied by magnetic measurements and neutron diffraction // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1998. V. 189. P. 329–334.
3. Klaase J.C.P. The Faraday balance, Van der Waals- Zeeman Institute, November 1999, URL: <http://www.science.uva.nl/research/cmp/klaasse/fdb.html>, as of December 2014.
4. Gaucherand F., Beaunon E. Magnetic texturing in ferromagnetic cobalt alloys // Physica B. 2004. V. 346-347. P. 262–266.
5. Caignaert V., Maignan A., Pralong V., Hébert S., Pelloquin D. A cobaltite with a room temperature electrical and magnetic transition: YBaCo_4O_7 // Solid State Sciences. 2006. V. 8. P. 1160–1163.
6. Zhang C.P., Chaud X., Beaunon E., Zhou L Crystalline phase transition information induced by high temperature susceptibility transformations in bulk PMP-YBCO superconductor growth in-situ // Physica C. 2015. V. 508. P. 25–30.
7. Bombik A., Leśniewska B., Pacyna A.W. Magnetic susceptibility of powder and single-crystal TmFeO_3 orthoferrite // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2000. V. 214. P. 243–250.
8. Kobayashi H., Tabuchi M., Shikano M., Kageyama H., Kanno R. Structure, and magnetic and electrochemical properties of layered oxides, Li_2IrO_3 // Journal of Materials Chemistry. 2003. V. 13. P. 957–962.
9. Seidov Z., H.-A. Krug von Nidda, Hemberger J., Loidl A., Sultanov G., Kerimova E., Panfilov A. Magnetic susceptibility and ESR study of the covalent-chain antiferromagnets TlFeS_2 and TlFeSe_2 // Physical Review B. 2002. V. 65. P. 014433 (1-7).
10. Slobinsky D., Borzi R.A., Mackenzie A.P., Grigera S.A. Fast sweep-rate plastic Faraday force magnetometer with simultaneous sample temperature measurement // Review of Scientific Instruments. 2012. V. 83. P. 125104 (1-5).
11. Gopalakrishnan R., Barathan S., Govindarajan D. Magnetic susceptibility measurements on fly ash admixed cement hydrated with groundwater and seawater // American Journal of Materials Science. 2012. № 2 (1). P. 32–36.
12. Mexner W., Heinemann K. An improved method for relaxation measurements using a Faraday balance // Review of Scientific Instruments. 1993. V. 64 (11). P. 3336–3337.
13. Sandulyak D.A., Sandulyak A.A., Sleptsov V.V., Sandulyak A.V., Kiselev D.O.,

Matveev V.V. Development of a Combined Empirical and Computational Method of Multiple-Operation Magnetic Monitoring of Ferrous Particles // *Measurement Techniques*. 2016. V. 59. Is. 5. P. 526–531.

14. Сандуляк А.А., Полисмакова М.Н., Ершов Д.В., Сандуляк А.В., Ершова В.А., Сандуляк Д.А. Функциональная экстраполяция массово-операционной характеристики магнитофореза как основа прецизионного метода контроля ферро-частиц // *Измерительная техника*. 2010. № 8. С. 57–60.

Sandulyak A.A., Polismakova M.N., Ershov D.V., Sandulyak A.V., Ershova V.A., Sandulyak D.A. Functional extrapolation of the mass-operational characteristic of magnetophoresis as a basis for a precision method of monitoring ferroparticles // *Measurement Techniques*. 2010. V. 53. Is. 8. P. 914–918.

15. Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Belgacem F.B.M., Kiselev D. Special solutions for magnetic separation problems using force and energy conditions for ferroparticles capture // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2016. V. 401. P. 902–905.

16. Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Ershova V.A. Use of the magnetic test-filter for magnetic control of ferroimpurities of fuels, oils, and other liquids (phenomenological and physical models) // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2017. V. 426. P. 714–720.

17. Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Polismakova M.N. Alternatives of multiparameter expressions for filtration magnetophoresis efficiency // *International Journal of Applied Physics*. 2016. V. 1. P. 62–68.

18. Franzreb M., Siemann-Herzberg M., Hobley T. J., Thomas O.R.T. Protein purification using magnetic adsorbent particles // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2006. V. 70. P. 505–516.

19. Sandulyak D.A., Snedkov A.B., Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Ablueva A.E. Functional properties of granular and quasi-granular ferromagnetic material (filter-matrix) in magnetophoresis technology // *Proceedings of the International Conference on «Materials Engineering for Advanced Technologies»*. London. June 2015. P. 663–665.

20. Blach T.P., Gray E. MacA. A Faraday magnetometer for studying interstitially modified ferro-magnets // *Meas. Sci. Technol.* 1994. V. 5. P. 1221–1225.

21. Riminucci A., Uhlarz M., De Santis R., Herrmannsdörfer T. Analytical balance-based Faraday magnetometer // *Journal of Applied Physics*. 2017. V. 121. P. 094701 (1-5).

22. Hosu B.G., Jakab K., Bánki P., Tóth F.I., Forgacs G. Magnetic tweezers for intracellular applications // *Review of Scientific Instruments*. 2003. V. 74. № 9. P. 4158–4163.

23. Marcon P., Ostanina K. Overview of methods for magnetic susceptibility measurement // *PIERS Proceedings, Malaysia, Kuala Lumpur*. March 27-30, 2012. P. 420–424.

24. Reutzel S., Herlach D.M. Measuring magnetic susceptibility of undercooled co-based alloys with a Faraday balance // *Advanced Engineering Materials*. 2001. V. 3. № 1–2. P. 65–67.

25. Сандуляк А.А., Сандуляк А.В., Полисмакова М.Н., Киселев Д.О., Сандуляк Д.А. Подход к координации малообъемного образца при реализации пондеромоторного метода определения его магнитной восприимчивости // *Российский технологический журнал*. 2017. Т. 5. №2. С. 57–69.

Sandulyak A.A., Sandulyak A.V., Polismakova M.N., Kiselev D.O., Sandulyak D.A. An approach for choosing positioning of small volume sample at instantiation ponderomotive

Faraday method in determining its magnetic susceptibility // Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal (Russian Technological Journal). 2017. № 2. P. 57–69. (in Russ.).

26. Govindarajan D., Gopalakrishnan R. Magnetic susceptibility measurements on metakaolin admixed cement hydrated with ground water and sea water // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. 2009. V. 16. № 3. P. 349–354.

27. Cape J.A., Young R.A. Canted Helmholtz coils for constant-gradient Faraday balance magnetometry // Review of Scientific Instruments. 1971. V. 42. № 7. P. 1061–1063.

28. Finot E., Thundat T., Lesniewska E., Goudonnet J.P. Measuring magnetic susceptibilities of nanogram quantities of materials using microcantilevers // Ultramicroscopy. 2001. V. 86. P. 175–180.

Об авторах:

Сандуляк Александр Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры "Приборы и информационно-измерительные системы" Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (107996, г. Москва, ул. Стромынка, д. 20).

Сандуляк Анна Александровна, доктор технических наук, профессор кафедры "Приборы и информационно-измерительные системы" Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (107996, г. Москва, ул. Стромынка, д. 20).

Полисмакова Мария Николаевна, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник кафедры "Приборы и информационно-измерительные системы" Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (107996, г. Москва, ул. Стромынка, д. 20).

Киселев Дмитрий Олегович, аспирант кафедры "Приборы и информационно-измерительные системы" Института комплексной безопасности и специального приборостроения ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (107996, г. Москва, ул. Стромынка, д. 20).

Сандуляк Дарья Александровна, кандидат технических наук, инженер ООО "Градиент М" (107996, г. Москва, ул. Стромынка, д. 19, корп. 2).

About authors:

Alexander V. Sandulyak, Dr.Sc. (Engineering), Professor, Chair "Instruments and Information-Measuring Systems" of the Institute of Complex Security and Special Instrumentation of the Moscow Technological University (20, Stromynka street, Moscow 107996, Russia).

Anna A. Sandulyak, Dr.Sc. (Engineering), Professor, Chair "Instruments and Information-Measuring Systems" of the Institute of Complex Security and Special Instrumentation of the Moscow Technological University (20, Stromynka street, Moscow 107996, Russia).

Maria N. Polismakova, Ph.D. (Engineering), Senior Lecturer, Chair "Instruments and Information-Measuring Systems" of the Institute of Complex Security and Special Instrumentation of the Moscow Technological University (20, Stromynka street, Moscow 107996, Russia).

Dmitriy O. Kiselev, Postgraduate Student, Chair "Instruments and Information-Measuring Systems" of the Institute of Complex Security and Special Instrumentation of the Moscow Technological University (20, Stromynka street, Moscow 107996, Russia).

Darya A. Sandulyak, Ph.D. (Engineering), Engineer of LLC «Gradient M» (19/2, Stromynka street, Moscow 107996, Russia).

УДК 004.021

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛНЫХ ОБЛАСТЕЙ УСТОЙЧИВОСТИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ

В.П. Бердников

Московский технологический университет (МИРЭА), Москва 119454, Россия
@Автор для переписки, e-mail: berdnikov_vp@mail.ru

В статье предлагается численный алгоритм построения кусочно-линейных функций Ляпунова для исследования абсолютной устойчивости нелинейных нестационарных систем. Такие функции определяют необходимые и достаточные условия устойчивости нелинейных нестационарных систем, удовлетворяющих секторным ограничениям. В случае асимптотической устойчивости системы выполнение алгоритма приведет к построению поверхности функции Ляпунова в виде многогранника размерности, равной размерности исходной системы. Такой многогранник может быть использован для построения кусочно-линейной функции Ляпунова. Количество граней многогранника возрастает по мере приближения системы к границе устойчивости в пространстве параметров, что может приводить к неприемлемым временным затратам на вычисления. В качестве примеров приводятся анализ конкретных систем 2-го и 3-го порядка и результаты сравнения с классическими методами. Даны конкретные рекомендации по выбору начальных условий работы алгоритма.

Ключевые слова: дифференциальные включения, нелинейные нестационарные системы, абсолютная устойчивость, функции Ляпунова, области устойчивости, политоп, радиус кривизны

ALGORITHM OF DETERMINATION OF NON-STATIONARY NONLINEAR SYSTEMS FULL STABILITY AREAS

V.P. Berdnikov

Moscow Technological University (MIREA), Moscow 119454, Russia
@Corresponding author e-mail: berdnikov_vp@mail.ru

The paper proposes a numerical algorithm for constructing piecewise linear Lyapunov functions for investigating the absolute stability of nonlinear nonstationary systems. Such functions define necessary and sufficient conditions for the stability of nonlinear

nonstationary systems satisfying sector constraints. In the case of asymptotic stability of the system, the implementation of the algorithm will lead to the construction of the Lyapunov function level set in the form of a polyhedron of dimension equal to the dimension of the original system. Such a polyhedron can be used for constructing a piecewise linear Lyapunov function. The number of faces of the polyhedron increases as the system approaches to the stability boundary in the parameter space, which can lead to unacceptable time costs for calculations. The analysis of specific systems of the 2nd and 3rd order and the results of comparison with classical methods are given. Specific recommendations on the algorithm initial conditions choice are given.

Keywords: differential inclusions, nonlinear nonstationary systems, absolute stability, Lyapunov functions, stability areas, polytope, radius of curvature.

Традиционно для анализа систем с нестационарными нелинейными элементами и систем с параметрической неопределенностью применяют аппарат теории абсолютной устойчивости, например, частотные методы (круговой критерий) [1]. Данные методы являются лишь достаточными, следовательно, они не способны выделить истинную область устойчивости системы в пространстве параметров. Вместе с тем в работах ряда авторов [2, 3] отмечается, что выполнение частотных критериев эквивалентно существованию у системы квадратичной функции Ляпунова. При наличии нескольких нелинейных нестационарных элементов противоположное утверждение неверно, т.е. у системы может существовать квадратичная функция Ляпунова, а частотные критерии могут не выполняться [3]. Таким образом, аппарат функций Ляпунова является более универсальным средством анализа устойчивости систем с секторными нестационарными нелинейными элементами и систем с параметрической неопределенностью.

В связи с этим были предложены различные типы функций Ляпунова, определяющих необходимые и достаточные условия устойчивости подобных систем. К таким функциям относятся кусочно-линейные функции Ляпунова и гладкие выпуклые функции Ляпунова. Вопросы построения кусочно-линейных функций Ляпунова рассматривались в работах [7, 8]. В них вычисляются верхние и нижние оценки показателя Ляпунова, позволяющие сделать заключение об устойчивости системы. Чтобы получить указанные оценки, авторы вышеуказанных публикаций переходят от исходной системы к ее дискретному аналогу.

Цель настоящей работы – разработать метод определения полных областей устойчивости нестационарных нелинейных систем, не использующий показатель Ляпунова, а также не требующий дискретизации исходной системы.

1. Постановка задачи

В работе исследуется устойчивость системы управления, в структуре которой есть несколько (либо один) нелинейных нестационарных элементов. Уравнение такой системы запишем в виде:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= Ax + \sum_{j=1}^m b^j \varphi_j(\sigma_j, t), \\ \sigma_j &= (c^j, x) = \sum_{i=1}^d c_i^j x_i, \quad \varphi_j(0, t) \equiv 0 \end{aligned} \quad (1)$$

где $x = (x_1, x_2, \dots, x_d)^T \in \mathbb{R}^d$ – d -мерный вектор-столбец переменных состояния;

A – постоянная $(d \times d)$ матрица;

b^j и c^j ($j = 1, \dots, m$) – постоянные d -мерные вектор-столбцы;

m – число нестационарных нелинейных элементов.

Предполагается, что нелинейные нестационарные элементы $\varphi_j(\sigma_j, t)$ удовлетворяют секторным ограничениям:

$$\delta_j^1 \leq \frac{\varphi_j(\sigma_j, t)}{\sigma_j} \leq \delta_j^2$$

$$(-\infty < \delta_j^1 \leq \delta_j^2 < \infty, \quad j = 1, \dots, m)$$

при всех σ_j и t . Частным случаем (1) является система, изображенная на рис. 1, где $W(p)$ – передаточная функция.

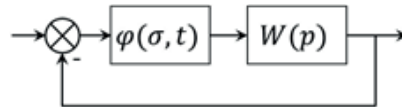


Рис. 1. Структурная схема системы управления.

Как было показано ранее [4–6], проблему устойчивости системы (1) можно свести к вопросу об устойчивости эквивалентного (эквивалентность понимается в смысле совпадения множеств решений при одинаковых начальных условиях) дифференциального включения

$$\frac{dx}{dt} \in F(x), \quad F(x) = \text{conv} \bigcup_{k=1}^N A_k x, \quad (2)$$

где conv – выпуклая оболочка множества;

$\bigcup_{k=1}^N$ – знак объединения;

A_k – квадратные матрицы размера $(d \times d)$.

Дифференциальные включения описывают класс объектов, в которых в каждый момент времени вектор направления движения в фазовом пространстве не определяется некоторым уравнением (в отличие от обычных дифференциальных уравнений), а принадлежит множеству $F(x)$, определяемому правой частью дифференциального включения.

Матрицы A_k для представления системы (1) в виде (2) формируются следующим образом:

$$A_k = A + \sum_{j=1}^m \lambda_j b^j (c^j)^T, \quad k = 1, \dots, 2^m \quad (3)$$

где числа λ_j принимают значения δ_j^1 или δ_j^2 .

Таким образом, общее количество матриц A_k равно 2^m , что соответствует количеству всех возможных комбинаций чисел λ_j . Множество A_k обозначим $\mathcal{A}$.

В [4–6] для исследования устойчивости дифференциального включения (2) вводится единая кусочно-линейная функция Ляпунова, которую описывают следующей формулой:

$$\vartheta(l, x) = \max_{1 \leq v \leq M} \{ \langle l_v, x \rangle \}, \quad (4)$$

здесь: l – множество векторов l_v , при этом в l входят и сами вектора l_v , и противоположно направленные им вектора $-l_v$;

M – общее количество этих векторов.

Пример такой функции приведен на рис. 2.

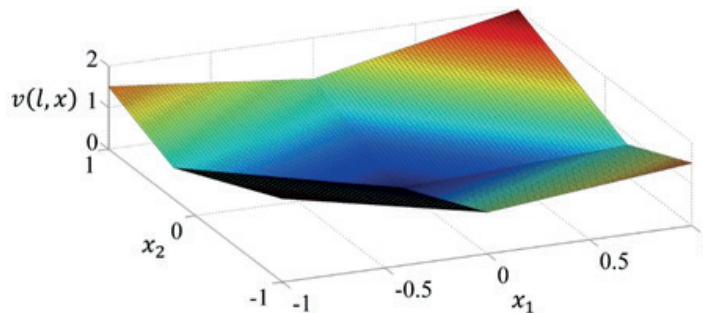


Рис. 2. Кусочно-линейная функция Ляпунова $\vartheta(l, x)$, число граней $M = 4$.

Доказано [4–6], что кусочно-линейные функции определяют необходимые и достаточные условия устойчивости нелинейных нестационарных систем, удовлетворяющих секторным ограничениям. Если система асимптотически устойчива, то можно найти такую функцию (4), что она будет убывать на всех решениях (2). Задачу определения устойчивости дифференциального включения (2), а, значит, и дифференциального уравнения (1), можно рассматривать как задачу построения выпуклого центрально-симметричного многогранника, у которого все вектора $A_k p$ направлены внутрь многогранника, p – любая точка на границе многогранника, $A_k \in \mathcal{A}$.

Действительно, поверхности уровня функции (4) суть выпуклые центрально-симметричные многогранники, l_v являются нормальными к граням этого многогранника, а M определяет число его граней, при условии, что не существует всюду «неактивных» векторов l_v (рис. 3). Отсюда для каждого вектора $l_v \in l$ существует некая точка x : в ней и некоторой ее окрестности $\vartheta(l, x) = \langle l_v, x \rangle$.

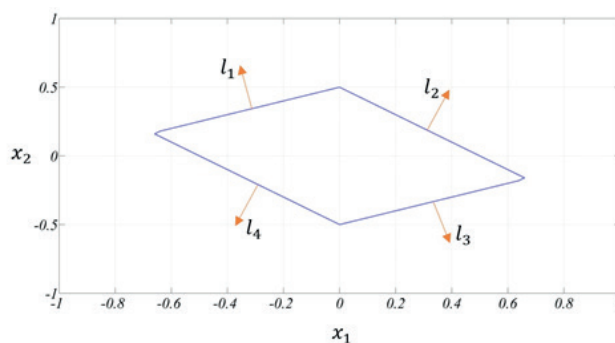


Рис. 3. Поверхность уровня кусочно-линейной функции Ляпунова.

Следует подчеркнуть, что функция (4), в свою очередь, является положительно однородной первой степени, т.е. выполняется следующее условие:

$$\vartheta(l, \tau x) = \tau \vartheta(l, x), \quad (5)$$

где τ – любое положительное действительное число.

Используя свойства скалярного произведения векторов, функции максимума

$$(l, ax) = a(l, x), \max_v \{af_v(x)\} = a \max_v \{f_v(x)\},$$

и (4), непосредственно приходим к уравнению (5).

Таким образом, поверхности уровня кусочно-линейной функции отличаются лишь масштабом и не отличаются по форме. Дифференциальное включение (2) также является однородным. Поэтому если на поверхности уровня кусочно-линейной функции все вектора дифференциального включения (2) направлены внутрь, то они будут направлены внутрь и на всех других поверхностях уровня.

2. Алгоритм «под-над» («beneath-beyond») построения выпуклых многомерных многогранников

Поскольку известный метод построения кусочно-линейных функций Ляпунова основан на конструировании многогранной поверхности уровня, то ниже будут даны некоторые определения, касающиеся многомерных выпуклых многогранников, а также алгоритм их итерационного построения.

Выпуклым многогранником (выпуклым *политопом*) называется выпуклая оболочка конечного числа точек. Выпуклый политоп задается описанием его границы, состоящей из граней. Каждая грань выпуклого политопы является выпуклым множеством (т.е. выпуклым политопом более низкой размерности); k -грань обозначает k -мерную грань (т.е. грань, аффинная оболочка которой имеет размерность k). Если политоп P имеет размерность d , то его $(d-1)$ -границы называются гипергранями, $(d-2)$ -границы – подгранями, 2-границы – ребрами, а 1-границы – вершинами. У трехмерного многогранника (3-политопы) гипергрань – это обычный треугольник, а подгрань одновременно является ребром. Политоп P размерности d называется d -симплексом (или просто *симплексом*), если он является выпуклой оболочкой $(d+1)$ аффинно независимых точек. Для $d = 0, 1, 2$, и 3 соответствующий симплекс представляет собой точку, отрезок, треугольник и тетраэдр. При этом любая k -грань симплекса – это тоже симплекс размерности k .

Симплициальным политопом называется d -политоп, у которого каждая гипергрань является симплексом. Каждая гипергрань симплициального d -политопы, являющаяся $(d-1)$ -симплексом, определяется в точности d вершинами и содержит d подграней. Ввиду того, что политоп – это ограниченный полиэдр, он может быть задан системой неравенств следующего вида [9]:

$$(l_v, x) + b_v \leq 0, \quad 1 \leq v \leq M. \quad (6)$$

В этом случае уравнение $(l_v, x) + b_v = 0$ является аффинной оболочкой соответствующей гиперграней, гиперплоскостью, в которой лежит гипергрань, а l_v – нормаль к этой гиперграней, направленная в сторону от многогранника (рис. 4). Выпуклый политоп всегда полностью лежит в одном полупространстве, определяемом аффинной оболочкой его гиперграней.

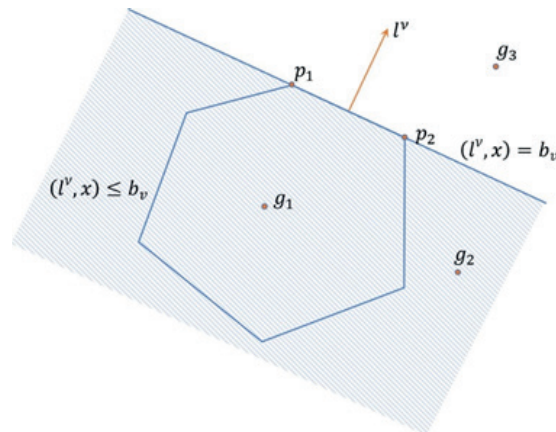


Рис. 4. Аффинная оболочка грани многогранника.

Известно, что через $k+1$ аффинно независимых точки $p_1, p_2, \dots, p_{k+1}$ проходит единственная гиперплоскость размерности k . Так, в d -мерном пространстве значение $(l_v, x) + b_v$, где $(l_v, x) + b_v = 0$ – уравнение гиперплоскости, проходящей через точки $p_1, p_2, \dots, p_d$, вектор l_v – нормаль к гиперплоскости может быть вычислена по следующей формуле:

$$f_v(x) = \det \begin{pmatrix} x^1 & x^2 & \dots & x^d & 1 \\ p_1^1 & p_1^2 & \dots & p_1^d & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ p_d^1 & p_d^2 & \dots & p_d^d & 1 \end{pmatrix}, \quad p_k = (p_k^1, p_k^2, \dots, p_k^d). \quad (7)$$

Для вычисления i -ой компоненты вектора l_v следует в матрице (7) в первой строке i -ый элемент заменить на единицу, а все остальные – на ноль. Для вычисления b_v необходимо все элементы первой строки, кроме последнего, заменить на ноль. Следовательно, чтобы найти вектор l_v и число b_v по заданным точкам, требуется вычислить $(d+1)$ определитель следующего вида

$$\begin{aligned} l_v^1 &= \det \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ p_1^1 & p_1^2 & \dots & p_1^d & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ p_d^1 & p_d^2 & \dots & p_d^d & 1 \end{pmatrix}, \quad l_v^2 = \det \begin{pmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ p_1^1 & p_1^2 & \dots & p_1^d & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ p_d^1 & p_d^2 & \dots & p_d^d & 1 \end{pmatrix}, \\ l_v^d &= \det \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ p_1^1 & p_1^2 & \dots & p_1^d & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ p_d^1 & p_d^2 & \dots & p_d^d & 1 \end{pmatrix}, \quad b_v = \det \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ p_1^1 & p_1^2 & \dots & p_1^d & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ p_d^1 & p_d^2 & \dots & p_d^d & 1 \end{pmatrix}, \\ l_v &= (l_v^1, l_v^2, \dots, l_v^d). \end{aligned} \quad (8)$$

Вычисленная таким образом нормаль к гиперграни многогранника может быть направлена как внутрь многогранника, так и вовне. Если при подстановке в $(l_v, x) + b_v$ вместо

x некоторой внутренней точки многогранника (g_1 на рис. 4) получается отрицательное число, то грань направлена во внешнюю сторону, если положительное – то во внутреннюю. В последнем случае следует l_v и b_v домножить на -1 , чтобы многогранник мог быть представлен в виде (6).

Ниже приведена основная процедура итерационного алгоритма «под-над» («beneath-beyond») построения выпуклой оболочки множества точек [10]. Будем утверждать, что точка p лежит «под» гранью F_v , если $(l_v, x) + b_v < 0$, т.е. p лежит в том же полупространстве, что и многогранник P (точки g_1 и g_2 на рис. 4), а также, что точка p лежит «над» гранью F_v , если $(l_v, x) + b_v \geq 0$. Для описания алгоритма потребуется следующая теорема.

Теорема [11]. В симплицальном политопе некоторая подгрань является общей точно для двух гиперграней, и две гиперграни F_1 и F_2 имеют общую подгрань e тогда и только тогда, когда e определяется общим подмножеством из $(d-1)$ вершины для множеств вершин, определяемых F_1 и F_2 (в этом случае F_1 и F_2 называются смежными по e).

Алгоритм «под-над» («beneath-beyond»). Добавление точки p к многограннику P .

Шаг 1. Определить множество S гиперграней F_v многогранника P , «над» которыми находится точка p . Если точка p лежит «под» всеми гипергранями многогранника (множество S пусто), то она является внутренней точкой, и перестраивать многогранник не требуется. Такие гиперграни называются «видимыми» из точки p (рис 5; на рис. 5а множество S состоит из F_1 и F_2).

Шаг 2. Определить границу множества S , т.е. определить множество T подграней e_j , которые не являются общими для любых пар гиперграней из S . Это означает, что для видимой гиперграни F_1 смежная с ней по $e_1 \in T$ грань F_2 не является видимой. На рис. 5б $T = \{e_1, e_2, e_3, e_4\}$, а e_5 является общей подгранью двух видимых смежных гиперграней.

Шаг 3. Построить конус новых гиперграней из точки p и подграней множества T (рис. 5в). Так как в симплицальном многограннике подгрань – это симплекс размерности $d-2$, составленный из $d-1$ точек, то добавляя к ней одну точку, можно построить симплекс размерности $d-1$, т.е. гипергрань многогранника.

Шаг 4. Удалить множество S старых гиперграней F_v . После добавления внешней точки p гиперграни из S оказываются внутри многогранника (рис. 5г).

Алгоритм «под-над», позволяющий итерационно строить многогранники произвольной размерности путем последовательного добавления к ним точек, создает базу, на которой могут быть созданы итерационные алгоритмы построения кусочно-линейных функций Ляпунова (4). Заметим также, что самым затратным – с вычислительной точки зрения – является шаг 1, так как, возможно, потребуется перебрать все грани многогранника прежде, чем будет сформировано множество S .

3. Алгоритм построения поверхности уровня функции Ляпунова

Как уже отмечалось выше, условие устойчивости системы (1) с геометрической точки зрения означает существование такого выпуклого центрально-симметричного многогранника P , у которого из каждой точки v его границы векторы $A_k v$ направлены во внутреннюю часть. Аналитически это условие можно записать следующим способом:

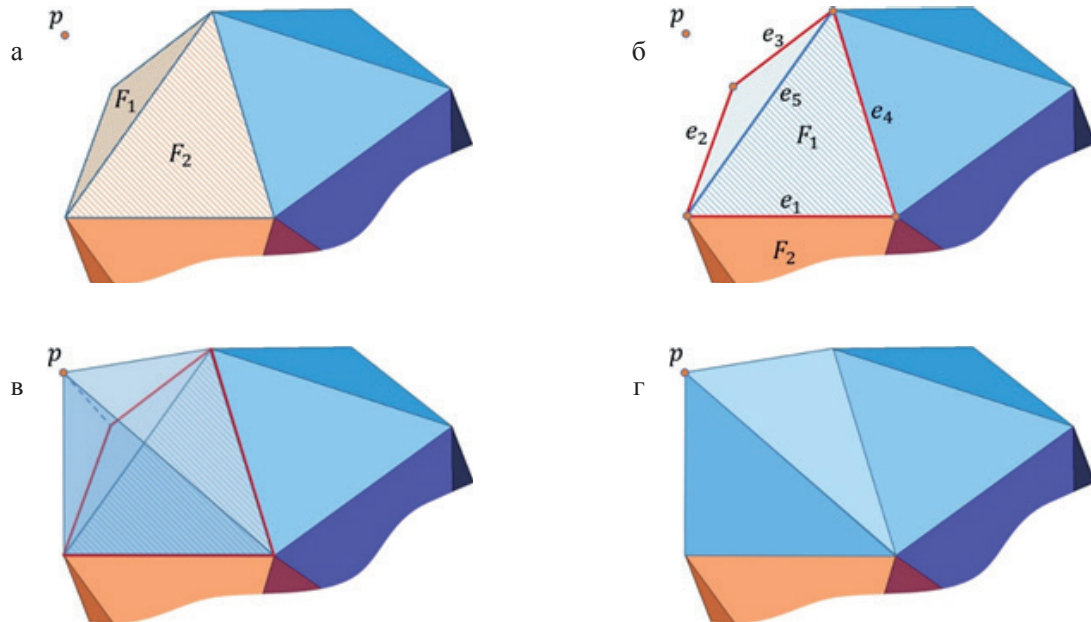


Рис. 5. Иллюстрация работы алгоритма добавления точки к политопу.

$$(A_k v, n) = \|A_k v\| \|v\| \cos \varphi < 0. \quad (9)$$

Здесь $\| \cdot \|$ обозначает норму вектора. Тогда для выполнения неравенства (9) необходимо, чтобы угол между векторами $A_k v$ и n был больше $\pi/2$. Важно заметить, что гиперграни выпуклого d -политопа представляют собой выпуклые многогранники размерности $(d-2)$ [12]. Так как $(A_k v, n)$ – линейный по v функционал, а линейный функционал на выпуклом многогранном множестве достигает максимума в его вершинах [13], то проверку (8) на устойчивость системы (1) можно проводить только в вершинах многогранника P .

Учитывая вышесказанное, новые точки в предлагаемом итерационном алгоритме построения многогранной поверхности уровня кусочно-линейной функции Ляпунова нужно добавлять в направлении $A_k v_1 / \|A_k v_1\|$ на расстоянии h . В этом случае новая гипергрань будет содержать отрезок, соединяющий точку v_1 и точку $v_1 + h A_k v_1 / \|A_k v_1\|$, а это значит, что угол между нормалью n гиперграни и вектором $A_k v_1$ в вершине v_1 будет равен $\pi/2$ (рис. 6).

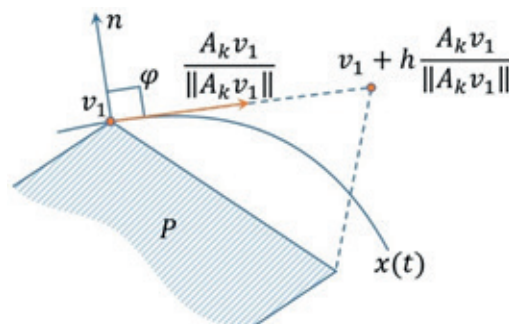


Рис. 6. Построение многогранника с использованием направления $A_k v_1 / \|A_k v_1\|$.

Действительно, так как компоненты нормали определяются формулами (8), а в состав гиперграни входят точки v_1 и $v_1 + h A_k v_1 / \|A_k v_1\|$, то условие (9) можно переписать так:

$$(A_k v_1, n) = \det \begin{pmatrix} (A_k v_1)^T & 0 \\ (v_1)^T & 1 \\ (v_1 + h A_k v_1 / \|A_k v_1\|)^T & 1 \\ \vdots & \vdots \\ (v_d)^T & 1 \end{pmatrix}, \quad (v_i)^T = (v_i^1, \dots, v_i^d).$$

Очевидно, что третья строка является линейной комбинацией первых двух, то есть определитель равен нулю, что, в свою очередь, дает $\varphi = \pi/2$.

Следовательно, остается вопрос выбора шага h . В данной статье величину шага предлагается вычислять пропорционально кривизне решения $x(t) = e^{At} x_0$ (A – матричная экспонента, матрица, зависящая от t , которая используется для универсального решения линейного дифференциального уравнения). Из дифференциальной геометрии [14] известно, что радиус кривизны в многомерном пространстве определяется соотношением:

$$r = \frac{|\gamma(t)|^3}{\sqrt{|\dot{\gamma}(t)|^2 |\ddot{\gamma}(t)|^2 - (\dot{\gamma}(t), \ddot{\gamma}(t))^2}},$$

где $\gamma(t)$ – параметрическая кривая.

В случае $\gamma(t) = x(t)$, т.е. когда надо найти радиус кривизны фазовой траектории линейной системы, $\dot{x} = A_k x$

$$\begin{aligned} \dot{\gamma}(t) &= \dot{x}(t) = A_k x(t), \\ \ddot{\gamma}(t) &= \ddot{x}(t) = A_k^2 x(t). \end{aligned}$$

Таким образом, в каждой точке фазового пространства оказывается возможным найти радиус кривизны соответствующей траектории $x(t) = e^{A_k t} x_0$. Найдя среди всех вершин некоторого многогранника такую вершину v_1 , у которой значение $(A_k v_1, n)$ максимально для всех $A_k \in \mathcal{A}$ и n (под n понимается нормали к граням, содержащим x_0), можно получить новую точку:

$$v_2 = v_1 + \frac{A_k v_1}{\|A_k v_1\|} h, \quad h = \varepsilon r,$$

где ε – заранее заданное положительное число, параметр алгоритма, выбираемый до начала его работы. Окончательно получаем формулу расчета новых точек для многогранной поверхности уровня функции Ляпунова:

$$v_2 = v_1 + \varepsilon \frac{A_k v_1 (A_k v_1, A_k v_1)}{\sqrt{(A_k v_1, A_k v_1) (A_k^2 v_1, A_k^2 v_1) - (A_k v_1, A_k^2 v_1)^2}}. \quad (10)$$

На основании приведенных уравнений предлагается следующий **алгоритм построения поверхности уровня функции Ляпунова (4)**:

Шаг 1. Задается выпуклый центрально-симметричный многогранник P_0 с непустой внутренностью, а также положительное число ε .

Шаг 2. Для вершины v_1 многогранника P_i (i – номер итерации, алгоритм начинается с $i = 0$), у которой значение $(A_k v_1, n)$ максимально, вычисляется точка v_2 по формуле (10).

Шаг 3. С помощью алгоритма «под-над» строится выпуклая оболочка P_{i+1} многогранника P_i и точки v_2 . Если $P_{i+1} \neq P_i$, то начинается новая итерация и шаги 2–4 повторяются. Если на какой-то итерации $P_{i+1} = P_i$, то процедура прекращается, и полученный многогранник является поверхностью уровня функции Ляпунова (4).

Шаг 4. Если количество итераций i превышает некоторый заранее установленный предел N , то это свидетельствует либо о том, что система неустойчива, либо о том, что она находится вблизи границы устойчивости. Тогда следует уменьшить ε и повторить алгоритм сначала. Если алгоритм не останавливается на шаге 3 при любом ε , то система (1) неустойчива.

Подчеркнем, что при уменьшении ε затрачивается больше вычислительных ресурсов, и растет время выполнения алгоритма. Если процедура расчета по алгоритму завершилась успешно, то по полученному многограннику можно восстановить функцию (4), для чего необходимо в качестве l_v взять нормали к граням многогранника, деленные на b_v . На шаге 3, когда требуется построить выпуклую оболочку новой точки v_2 и многогранника P_i , используется алгоритм «под-над».

Как отмечалось выше, самым трудоемким (с вычислительной точки зрения) в этом алгоритме является процесс поиска первой «видимой» грани [10, 11]. Однако в нашем случае для поиска первой «видимой» грани достаточно проверить только грани, содержащие в своем составе v_1 из (10). Если же окажется, что v_2 «под» всеми этими гранями, то добавлять точку v_2 не нужно. Вопросы применения алгоритма построения поверхности уровня функции Ляпунова (4) к конкретным системам рассмотрены ниже.

Пример 1. На рис. 1 дана структурная схема системы управления. Передаточная функция линейной части системы

$$W(p) = \frac{1}{p^2 + 0.5p + 1}.$$

Нелинейный нестационарный элемент $\varphi(\sigma, t)$ удовлетворяет секторным ограничениям.

$$0 \leq \frac{\varphi(\sigma, t)}{\sigma} \leq \delta.$$

Определим граничный коэффициент δ_{cp} такой, чтобы система была устойчива при любом $\delta < \delta_{cp}$ и неустойчива при $\delta \geq \delta_{cp}$.

Чтобы решить эту задачу, преобразуем систему на рис. 1 к виду (2). Линейную часть $W(p)$ представим в виде:

$$\dot{x} = Ax + bu,$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -0.5 \end{pmatrix}, \quad x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}, \quad b = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Переменная u является входом, подаваемым на линейный блок. Как видно из структурной схемы (рис. 1), в данном случае $u = \varphi(\sigma, t)$. Остается заметить, что вход нелинейного элемента записывается следующим образом:

$$\sigma = (c, x), \quad c = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Следовательно, данная система описывается уравнениями вида (1). Поскольку в ней лишь один нелинейный нестационарный блок ($m = 1$), то количество входящих в (2) матриц равно двум, и λ_1 из (3) принимает значения $\delta_1^1 = 0$, $\delta_1^2 = \delta$, которые являются границами сектора нестационарной нелинейности $\varphi(\sigma, t)$.

$$A_1 = A + \lambda_1 bc^T = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -0.5 \end{pmatrix}, \quad (13)$$

$$A_2 = A + \lambda_1 bc^T = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -(1+\delta) & -0.5 \end{pmatrix}.$$

Сформированные матрицы позволяют непосредственно применить алгоритм для анализа устойчивости исходной системы. Чтобы продемонстрировать эффективность предлагаемого алгоритма, найдем наибольшее δ , при котором работают классические методы. При использовании кругового частотного критерия имеем $\delta_{\text{чк}} \approx 1.25$.

Для определения $\delta_{\text{эп}}$ с помощью алгоритма начнем постепенно увеличивать δ , начиная с малых значений, до тех пор, пока алгоритм будет строить поверхность уровня функции Ляпунова. Каждому значению δ необходимо подобрать такой коэффициент ε из (10), при котором может быть успешно построена поверхность уровня функции Ляпунова (4). Результаты численных экспериментов приведены в табл. 1. На рис. 7 представлены соответствующие первому и последнему экспериментам поверхности уровня функций Ляпунова.

Увеличение значения δ требует уменьшения параметра ε , а это, в свою очередь, ведет к росту числа граней поверхности уровня Ляпунова (в данном случае многоугольника, рис. 7). Уже при значении $\delta = 2.2$ не удастся подобрать такое даже очень малое ε , позволяющее построить функцию Ляпунова, что может свидетельствовать о близости к границе устойчивости при таком значении δ . При приближении системы к границе устойчивости количество граней начинает быстро расти. Из табл. 1 видно, что при $\delta = 1.1$ количество граней равно 38, а при $\delta = 2.15$ количество граней уже составляет 1420. Понятно, что при этом требуется больше времени. В первом эксперименте (табл. 1) на построение многогранника

Таблица 1. Количество граней при различных размерах секторных ограничений для системы второго порядка

№ п/п	Количество граней	δ	ε	Затраченное время, с
1	38	1.1	1.190	0.072
2	46	1.25	0.160	0.086
3	56	1.4	0.130	0.109
4	74	1.55	0.095	0.121
5	96	1.7	0.075	0.148
6	144	1.85	0.050	0.207
7	282	2.0	0.025	0.423
8	1420	2.15	0.005	4.655

уходит всего 0.072 с, тогда как в восьмом эксперименте затраченное время составляет уже 4.655 с, но даже такое время является вполне достаточным и позволяет рассматривать возможность применения алгоритма для систем малой размерности в тех случаях, когда требуется рассчитывать устойчивость системы в режиме реального времени.

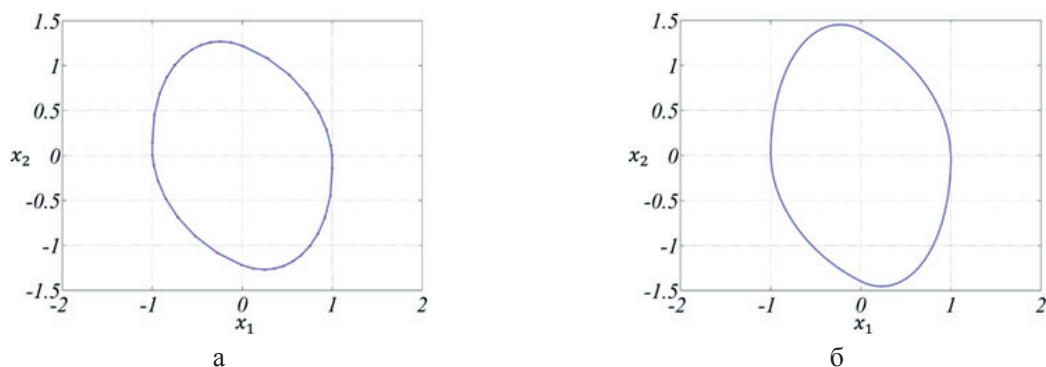


Рис. 7. Поверхности функций Ляпунова: а) $\delta = 1.1$, $\varepsilon = 1.190$; б) $\delta = 1.25$, $\varepsilon = 0.005$.

Наибольшее значение δ , для которого удается построить многогранную поверхность уровня функции Ляпунова (4), равно 2.15, т.е. $\delta_{\text{сп}} = 2.15$. Сопоставление с классическими методами, которые дают максимальное $\delta_{\text{чк}}$, равное 1.25 [7], убедительно показывает, что предложенный алгоритм позволяет существенно (в 1.7 раза) улучшить оценку истинной границы устойчивости. Это может иметь чрезвычайно важное значение, в частности, в системах с высокой степенью управляемости, имеющих ограниченную область устойчивости. Кроме того, при проектировании нечетких регуляторов на первом этапе синтеза определяют максимальный размер сектора, в котором должна лежать нелинейная характеристика нечеткого регулятора [15]. Так как предложенный алгоритм увеличивает границы секторов по сравнению с классическими методами, то появляется возможность обоснованно синтезировать более точные и быстродействующие САУ на основе нелинейных (нечетких) законов управления.

В примере 1 описана система второго порядка. Рассмотрим систему третьего порядка ($d = 3$) и установим, как влияет увеличение порядка системы на время работы алгоритма. В этом случае поверхность уровня функции Ляпунова (4) будет уже не многоугольником, а многогранником в трехмерном пространстве.

Пример 2. Линейная часть системы описывается передаточной функцией

$$W(p) = \frac{p+1}{p^3 + 1.5p^2 + 3p + 1}.$$

В структурной схеме (рис. 1) по-прежнему считаем, что нелинейный нестационарный элемент удовлетворяет секторным ограничениям

$$0 \leq \frac{\varphi(\sigma, t)}{\sigma} \leq \delta.$$

Максимальное значение δ , для которого выполняется круговой частотный критерий, равно $k_{\text{чк}} \approx 2.28$ [16]. Воспользуемся формулой (3).

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -3 & -4 & -1.5 \end{pmatrix}$$

$$A_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -(3+\delta) & -(4+\delta) & -1.5 \end{pmatrix}$$

Составим таблицу численных экспериментов при различных значениях δ (табл. 2). Как и в примере 1, при увеличении δ требуется уменьшать ε , что приводит к увеличению количества граней и, соответственно, времени расчета. Если при $\delta = 1$ на построение поверхности уровня из 372 граней требуется 1.335 с, то при $\delta = 3$ затрачивается уже 27.402 с, что значительно больше, чем для системы второго порядка, также находящейся у границы устойчивости. При $\delta = 3.5$ необходимо брать ε настолько малым, что время работы алгоритма начинает измеряться в минутах.

Таблица 2. Количество граней при различных размерах секторных ограничений для системы третьего порядка

№ п/п	Количество граней	δ	ε	Затраченное время, с
1	372	1.0	0.220	1.335
2	636	1.5	0.175	2.305
3	760	2.0	0.135	8.272
4	1644	2.5	0.095	9.729
5	2936	3.0	0.065	27.402

На рис. 8 приведена поверхность уровня функции Ляпунова для случая эксперимента № 1 и эксперимента № 2.

Из приведенных расчетов видно, что разработанный алгоритм позволяет определить максимальное значение δ , равное 3, что больше $k_{\text{чк}}$, которое было определено с помощью классического метода. Анализ поверхностей, изображенных на рис. 7 и 8 позволяет сделать вывод о достаточно сложной форме поверхности функции Ляпунова системы (2),

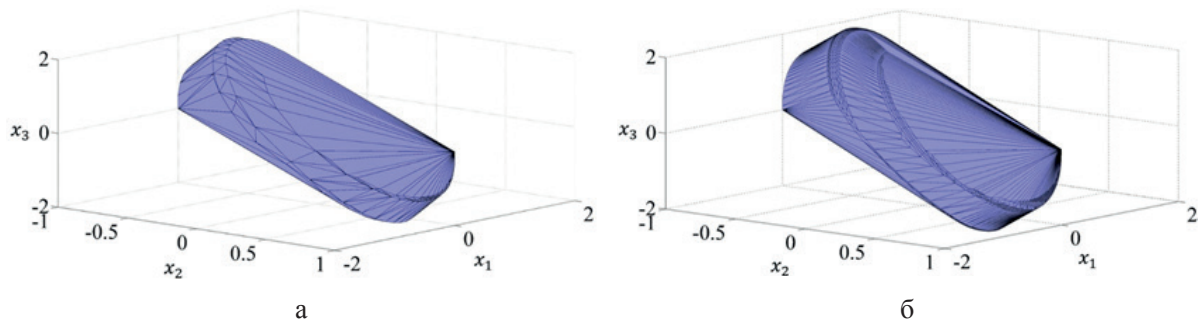


Рис. 8. Поверхность уровня функции Ляпунова: а) $\delta = 1$, $\varepsilon = 0.220$; б) $\delta = 3$, $\varepsilon = 0.065$.

находящейся близко к границе устойчивости. Очевидно, что такая форма не может быть аппроксимирована поверхностью уровня квадратичной функции Ляпунова (эллипсоидом соответствующей размерности), что в известном смысле и объясняет достаточность критериев устойчивости, основанных на квадратичных функция Ляпунова и частотных методах.

4. Анализ влияния начального многогранника на время работы разработанного алгоритма

В примерах 1 и 2 предполагалось, что на первом шаге работы в качестве начального многогранника выбирается выпуклая оболочка точек

$$\begin{aligned} p_1 &= (1, 0, \dots, 0), -p_1, \\ p_2 &= (0, 1, \dots, 0), -p_2, \\ &\vdots \\ p_d &= (0, 0, \dots, 1), -p_d, \end{aligned}$$

где d – размерность пространства.

Общее количество точек равно $2d$, в случае $d = 2$ начальный многогранник – это ромб, при $d = 3$ – октаэдр. Найдем, как задание начального многогранника влияет на время работы алгоритма и количество граней в построенном многограннике на границе устойчивости. Для этого рассмотрим систему из первого примера с $\delta = 2.15$. Будем последовательно задавать различные выпуклые центрально-симметричные четырехугольники и далее применять остальные шаги алгоритма.

На рис. 9 приведены временные затраты при задании 100 вариантов многогранников.



Рис. 9. Время, затрачиваемое алгоритмом, при случайном задании начального многогранника для системы второго порядка.

Из диаграммы на рис. 9 можно сделать вывод, что при определенных конфигурациях начального многогранника время работы алгоритма может существенно увеличиваться и

превышать среднее время расчета более, чем в два раза. Следовательно, корректный выбор начального многогранника может существенно сократить время работы алгоритма на границе устойчивости.

Ниже приведены данные о количестве граней построенных в этих экспериментах многогранников (рис. 10).



Рис. 10. Количество граней построенных многогранников для системы второго порядка.

Как видно, количество граней практически не зависит от конфигурации начального многогранника и колеблется в диапазоне 1342–1400. Для практического применения алгоритма предлагается задавать начальный многогранник как выпуклую оболочку собственных векторов (f_i и $-f_i$) одной из матриц A_k , входящих в (3). Так, если в качестве начального многогранника использовать собственные вектора матрицы A_1 , то затраченное время будет равняться 3.923 с, если матрицы A_2 , то 3.946 с.

Проведем такой же эксперимент для системы третьего порядка из примера 2. Диаграмма времени, затрачиваемого на работу алгоритма, приведена на рис. 11.

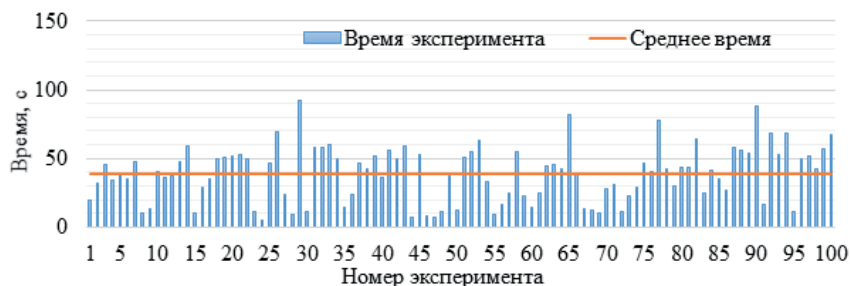


Рис. 11. Время, затрачиваемое алгоритмом при случайном задании начального многогранника, для системы третьего порядка.

Очевидно (рис. 11), что разница между минимальным и максимальным временем выполнения алгоритма достигает 90 с, т.е. корректный выбор начального многогранника имеет большое значение.

На рис. 12 показано количество граней построенных многогранников.

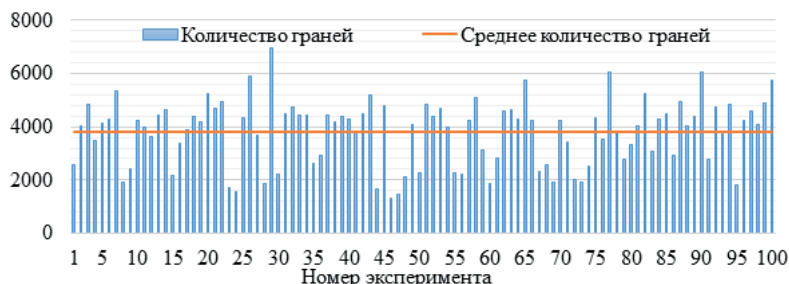


Рис. 12. Количество граней построенных многогранников для системы третьего порядка.

В отличие от системы второго порядка, у системы третьего порядка наблюдается значительный разброс количества граней в различных экспериментах.

Теперь в качестве начальных многогранников зададим выпуклые оболочки собственных векторов матриц A_1 и A_2 . Для матрицы A_1 время работы алгоритма равно 6.165 с, а для матрицы A_2 3.946 с, что значительно меньше среднего времени работы алгоритма (примерно 40 с).

Из полученных экспериментальных данных следует, что задание в качестве начального многогранника выпуклой оболочки собственных векторов (и противоположно-направленных) одной из матриц A_k существенно экономит время работы алгоритма.

Заключение

В работе получен алгоритм, обеспечивающий необходимые и достаточные условия устойчивости нелинейных нестационарных систем. В отличие от частотных методов, он позволяет выявлять полные области устойчивости в пространстве параметров. Даны рекомендации по выбору начальной конфигурации многогранника. Показано, что в качестве начального многогранника следует выбирать выпуклую оболочку обобщенных собственных векторов одной из матриц системы. Конкретные численные примеры подтверждают подобный выбор, который позволяет существенно снизить время работы предложенного нами алгоритма по сравнению с произвольным заданием начального многогранника.

Вместе с тем сложность алгоритма (и, соответственно, время расчета) возрастает по мере роста порядка объекта, поэтому необходимо искать пути повышения быстродействия алгоритма в режиме реального времени. Одним из возможных путей является разработка алгоритма построения гладких функций Ляпунова, определяющих необходимые и достаточные условия устойчивости нелинейных нестационарных систем.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект №16-19-00052).

Литература:

1. Барабанов А.Т., Катковник В.Я., Нелепин Р.А., Хлыпало Е.И., Якубович В.А. Методы исследования нелинейных систем автоматического управления / Под ред. Р.А. Нелепина. М.: Наука, 1975. 448 с.
2. Якубович В.А. Абсолютная неустойчивость нелинейных систем управления. II. Системы с нестационарными нелинейностями. Круговой критерий // Автоматика и телемеханика. 1971. № 6. С. 25–34.
3. Каменецкий В.А. Абсолютная устойчивость и абсолютная неустойчивость систем управления с несколькими нелинейными нестационарными элементами // Автоматика и телемеханика. 1983. № 12. С. 20–30.
4. Молчанов А.П., Пятницкий Е.С. Функции Ляпунова, определяющие необходимые и достаточные условия абсолютной устойчивости нелинейных нестационарных систем управления // Автоматика и телемеханика. 1986. № 3. С. 63–73.
5. Молчанов А.П., Пятницкий Е.С. Функции Ляпунова, определяющие необходимые и достаточные условия абсолютной устойчивости нелинейных нестационарных систем управления II // Автоматика и телемеханика. 1986. № 4. С. 5–15.
6. Молчанов А.П., Пятницкий Е.С. Функции Ляпунова, определяющие необходимые

и достаточные условия абсолютной устойчивости нелинейных нестационарных систем управления III // Автоматика и телемеханика. 1986. № 5. С. 38–49.

7. Барабанов Н.Е. Метод вычисления показателя Ляпунова дифференциального включения // Автоматика и телемеханика. 1989. № 4. С. 53–58.

8. Guglielmi N., Laglia L., Protasov V. Polytope Lyapunov functions for stable and for stabilizable LSS // Foundations of Computational Mathematics. 2017. V. 17. № 2. P. 567–623.

9. Емеличев В.А., Ковалев М.М., Кравцов М.К. Многогранники, графы, оптимизация. М.: Наука, 1981. 344 с.

10. Barber C.B., Dobkin D.P., Huhdanpaa H. The Quickhull algorithm for convex hulls // ACM Transactions on Mathematical Software. 1995. V. 22. Iss. 4. P. 469–483.

11. Препарата Ф., Шеймос М. Вычислительная геометрия: Введение. М.: Мир, 1989. 478 с.

12. Циглер Г.М. Теория многогранников. М.: МЦНМО, 2014. 568 с.

13. Еремин И.И., Астафьев Н.Н. Введение в теорию линейного и выпуклого программирования. М.: Наука, 1976. 192 с.

14. Аминов Ю.А. Дифференциальная геометрия и топология кривых. М.: Наука, 1987. 160 с.

15. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П. Интеллектуальные системы автоматического управления / Под ред. Макарова И.М., Лохина В.М. М.: Физматлит, 2001. 576 с.

16. Баркин А.И. Абсолютная устойчивость систем управления. М.: Либроком, 2012. 176 с.

References:

1. Barabanov A.T., Katkovnik V.Ya., Nelepin R.A., Hlypalo E.I., Yakubovich V.A. Methods for investigating nonlinear automatic control systems / Ed. R.A. Nelepin. Moscow: Nauka Publ., 1975. 448 p. (in Russ.).

2. Yakubovich V.A. Absolute instability of nonlinear control systems. II. Systems with nonstationary nonlinearities. Circle criteria // Avtomatika i telemekhanika. (Automation and Remote Control). 1971. № 6. P. 25–34. (in Russ.).

3. Kameneckij V.A. Absolute stability and absolute instability of control systems with several nonlinear nonstationary elements // Avtomatika i telemekhanika. (Automation and Remote Control). 1983. № 12. P. 20–30. (in Russ.).

4. Molchanov A.P., Pyatnickij E.S. Lyapunov functions that determine necessary and sufficient conditions for absolute stability of nonlinear time-varying control systems. I // Avtomatika i telemekhanika. (Automation and Remote Control). 1986. № 3. P. 63–73. (in Russ.).

5. Molchanov A.P., Pyatnickij E.S. Lyapunov functions that determine necessary and sufficient conditions for absolute stability of nonlinear time-varying control systems. II // Avtomatika i telemekhanika. (Automation and Remote Control). 1986. № 4. P. 5–15. (in Russ.).

6. Molchanov A.P., Pyatnickij E.S. Lyapunov functions that determine necessary and sufficient conditions for absolute stability of nonlinear time-varying control systems. III // Avtomatika i telemekhanika. (Automation and Remote Control). 1986. № 5. P. 38–49. (in Russ.).

7. Barabanov N.E. The method of calculating the Lyapunov exponent of a differential

inclusion // *Avtomatica i telemekhanika*. (Automation and Remote Control). 1989. № 4. P. 53–58. (in Russ.).

8. Guglielmi N., Laglia L., Protasov V. Polytope Lyapunov functions for stable and for stabilizable LSS // *Foundations of Computational Mathematics*. 2017. V. 17. № 2. P. 567–623.

9. Emelichev V.A., Kovalyov M.M., Kravcov M.K. Polyhedra, graphs, optimization. Moscow: Nauka Publ., 1981. 344 p. (in Russ.).

10. Barber C. B., Dobkin D. P., Huhdanpaa H. The Quickhull algorithm for convex hulls // *ACM Transactions on Mathematical Software*. 1995. V. 22. Iss. 4. P. 469–483.

11. Preparata F., Shamos M. Computational Geometry: An Introduction. Moscow: Mir Publ., 1989. 478 p. (in Russ.).

12. Cigler G.M. The theory of polyhedra. Moscow: MCNMO Publ., 2014. 568 p. (in Russ.).

13. Eryomin I.I., Astafev N.N. Introduction to the theory of linear and convex programming. Moscow: Nauka Publ., 1976. 192 p. (in Russ.).

14. Aminov Yu.A. Differential geometry and topology of curves. Moscow: Nauka Publ., 1987. 160 p. (in Russ.).

15. Makarov I.M., Lohin V.M., Manko S.V., Romanov M.P. Intellectual automatic control systems / Ed. I.M. Makarov, V.M. Lohin. Moscow: Fizmatlit Publ., 2001. 576 p. (in Russ.).

16. Barkin A.I. Absolute stability of control systems. Moscow: Librokom Publ., 2012. 176 p. (in Russ.).

Об авторе:

Бердников Василий Петрович, аспирант кафедры проблем управления Института кибернетики ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About author:

Vasily P. Berdnikov, Postgraduate Student, Chair of Control Problems, Institute of Cybernetics, Moscow Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

УДК 3.37

МОДЕРНИЗАЦИЯ ВЫСШЕЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ ШКОЛЫ: ИСТОРИЧЕСКИЙ ОПЫТ И СОВРЕМЕННОСТЬ

**Е.В. Бодрова[@]
Н.Б. Голованова**

Московский технологический университет, Москва 119454, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: evbodrova@mail.ru

На основе опубликованных и ранее не опубликованных документов и материалов в статье исследуются основные концептуальные подходы, этапы и результаты реформирования высшей технической школы России в контексте модернизационных процессов. Формулируется вывод о том, что значительная часть из запланированных в этой сфере задач на первых этапах преобразований не решена из-за просчетов авторов при разработке концепции реформ и неточно выбранной ими стратегии социально-экономического развития страны. В 1990-е гг. высшая школа страны функционировала в режиме выживания, одновременно пытаясь адаптироваться к рыночным условиям. В начале XXI века, несмотря на увеличившиеся объемы финансирования и внедрение новых программ и форм подготовки, добиться значительного повышения качества инженерного образования не удалось. Достаточно острой оставалась проблема трудоустройства выпускников. Рубежом стал 2015 год, когда качественная подготовка инженеров была определена как базовое условие развития экономики страны. В статье констатируются определенные достижения при реализации масштабных проектов Министерства образования и науки в последние годы. Обосновывается утверждение о необходимости привлечения к разработке концепции модернизации высшей технической школы вузовского сообщества; аккумуляции всего позитивного как из зарубежного, так и отечественного опыта.

Ключевые слова: высшая техническая школа, модернизация, приоритетные проекты.

MODERNIZATION OF THE HIGHER TECHNICAL SCHOOL: HISTORICAL EXPERIENCE AND PROSPECTS

**E.V. Bodrova[@],
N.B. Golovanova**

Moscow Technological University, Moscow 119454, Russia

[@]Corresponding author e-mail: evbodrova@mail.ru

In article on the basis of published and previously unpublished documents and materials explores the basic conceptual approaches, stages and results of the reform of the higher technical school of Russia in the context of modernization processes. We conclude unresolved significant part of the planned tasks in the first stages of reforms in this area because of a miscalculation of the authors in developing the concept of reforms and inaccurate their chosen strategy of socio-economic development of the country. In the 1990s high school functioned in survival mode while trying to adapt to market conditions. At the beginning of the XXI century, despite the increased funding and the introduction of new programmes and forms of training, to achieve a significant increase in the quality of engineering education has failed. Sharp enough remained the problem of employment of graduates. Milestone was 2015, when the role of quality training of engineers was designated as the basic conditions of economic development of the country. The article stated some achievements in the implementation of major projects of the Ministry of science and education in recent years. The author argues the need for: involving the development of conceptual frameworks of modernization of the higher technical school University community; the accumulation of all of the positive foreign and domestic experience in conducting such reforms.

Keywords: graduate school of engineering, modernization, priority projects.

Глобальные вызовы обуславливают критическую необходимость осуществления очередной стадии российской модернизации. В свою очередь, согласно утверждениям теоретиков [1, 2] и практике ее реализации в различных странах, успех зависит от научно обоснованной, стратегически точно выверенной и последовательно проводимой государственной внутренней и внешней политики; достаточного промышленного и научно-технического потенциала; вовлечения в модернизационные процессы всего общества, подъема его образовательного и общекультурного уровня, формирования атмосферы созидания, нацеленности на самореализацию каждого. Значимую роль в преодолении начальной стадии – «взлета» – играют университеты. В обществе, основанном на научном знании, формируется модель тройной спирали (как продвижение модели инновационного развития, создана в Англии и Голландии в начале XXI в. Г. Ицковицем и Л. Лейдесдорфом), для которой характерно все более активная роль университетов, тесно взаимодействующих с промышленностью и правительством. Каждая из трех составляющих этой спирали, реализуя функции традиционные, частично берет на себя и функции иной институциональной сферы. Университеты, будучи образовательными и научными центрами, превращаются в мощные бизнес-структуры: создают малые инновационные фирмы, научные парки и центры, венчурные партнерства и т.п.; внедряют предпринимательскую компоненту в лекционные и практические занятия; поощряют ученых, деятельность которых носит, в том числе, и коммерческий характер; всемерно поддерживают пропаганду научно-технических знаний и достижений, предлагая к изучению соответствующие курсы, участвуя в выставках, организовывая конференции и семинары, вовлекая студентов в проектную деятельность, активно сотрудничая в этой сфере со средствами массовой информации, общественными организациями.

Ведущие российские университеты в настоящее время уделяют значительное внимание внедрению самых современных инновационных форм. Однако, согласно Глобальному инновационному индексу в 2017 г., Россия занимает, по состоянию на июнь текущего года, 45-е место, опустившись на 2 позиции по сравнению с прошлым годом. Эксперты

в ряду конкурентных преимуществ нашей страны в инновационной сфере называют: количество выпускников вузов по инженерным и научным специальностям; численность работников, занятых в сфере наукоемких услуг; высокий валовый коэффициент охвата высшим образованием. Однако, если по созданию знаний мы занимаем 22-е место из 127, то по их влиянию – 111-е, по эффективности инноваций – 75-е [3].

В ряду факторов торможения в документах, представленных на официальном сайте Минобрнауки РФ, справедливо названы: слабое взаимодействие сектора исследований и разработок с реальным сектором экономики, несогласованность приоритетов и инструментов поддержки научно-технологического развития страны, не позволяющая формировать производственные цепочки, и др. Для решения обозначенных проблем утверждена Указом Президента от 1 декабря 2016 г. № 642 «Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации», основными целями которой определены: встраивание науки в общеэкономические процессы, эффективное использование интеллектуального потенциала нации. В ряду основных показателей в ней названы: обеспечение глобальной конкурентоспособности результатов научной деятельности через повышение доли публикаций в мировых научных журналах, индексируемых в базе данных Web of Science; востребованность результатов научных исследований реальным сектором экономики, повышение уровня внутренних затрат на НИОКР; увеличение государственного финансирования научных фондов. Опубликованные Министерством отчетные данные свидетельствуют как о значительных достижениях, так и о существовании все еще не решенных проблем. Согласно Стратегии, одним из основных механизмов ее реализации должна стать Национальная технологическая инициатива. В процесс формирования проектных команд – консорциумов – вовлечены ведущие университеты, исследовательские центры, Российская академия наук, бизнес [4].

Преодоление факторов торможения требует, на наш взгляд, внимательного изучения зарубежного и отечественного опыта с целью извлечения уроков, неповторения прежних просчетов и аккумуляции всего позитивного.

Напомним, что российское инженерное образование еще на рубеже XIX–XX вв. признавалось одним из лучших в мире [5], очевидными преимуществами обладала и советская система высшего образования: бесплатное обучение, эффективная система отбора абитуриентов, целевая подготовка и др. Публикации результатов научных исследований финансировались за счет государства. Процент выполнения научной тематики вузов достигал 88.5% [6]. В Советском Союзе был создан культ высшего технического образования, однако в полной мере качество кадрового потенциала для научно-технического комплекса страны обеспечено не было, что явилось одной из причин неуспеха первых попыток осуществить модернизацию в годы «перестройки». Накануне распада СССР на вузы в целом приходилось 1.6-1.8% расходов госбюджета. Ограниченность средств обусловила их дефицит для приобретения оборудования и на капитальные вложения (не более 9%) [7]. Низким оставался конкурс при приеме на инженерные специальности (1.8-1.7 заявлений на одно место) [8]. Значительное количество специалистов в области техники и технологии работали не по специальности. Не была решена возрастная проблема профессорско-преподавательского корпуса, нередко молодые квалифицированные кадры из-за низкой оплаты труда и неудовлетворенности своей деятельностью уходили из ву-

зов. Начавшаяся в 1985 г. реформа образования затронула, прежде всего, организацию учебного процесса в высшей школе, учебные планы и номенклатуру специальностей. Между тем остались практически не решенными такие основные вопросы, как интеграция образования, науки и производства, создание системы непрерывного образования. По данным социологов, в 1991 г. из-за развивающегося экономического кризиса 46% преподавателей технических дисциплин в возрасте до 40 лет намерены были сменить сферу деятельности, каждый пятый специалист и четверть выпускников вузов планировали выехать за границу при условии, что им будут предоставлены рабочие места за рубежом. По данным исследования, проведенного в 1991 г. Минэкономики СССР, потенциальные масштабы эмиграции лиц в трудоспособном возрасте в 1992 г. оценивались в 300-400 тыс. человек. В их числе были физики, математики, биологи, программисты, ученые других специальностей, творческая интеллигенция [9]. Наблюдалась тенденция к сокращению численности аспирантов и выпуска из аспирантуры. Система повышения квалификации удовлетворяла потребности экономики только на 25% по основным специальностям и на 1% – по новейшим [10].

Однако это не исключает того факта, что к началу 1990-х гг. высшие учебные заведения России представляли одну из самых мощных систем высшего образования в мире. В нее входили 514 вузов, в которых обучалось около 3 млн. студентов. По абсолютным показателям подготовки специалистов РФ занимала 2-е место в мире после США, по выпуску специалистов в расчете на 10000 человек – 4-е место среди ведущих стран мира (после США, Канады и Японии) [11]. В то же время в условиях перехода к рынку высшая школа вынуждена была функционировать в режиме выживания.

Трудноразрешимые в настоящее время проблемы высшей технической школы РФ во многом обусловлены задачами и механизмами, которые были определены реформаторами еще в конце XX века. Основные направления государственной политики в области высшего и послевузовского профессионального образования были изложены в «Государственной программе развития высшего образования в Российской Федерации». Анализ состояния высшей школы и первоочередные меры по сохранению ее интеллектуального и материально-технического потенциала содержались и в представленном в 1992 г. Президенту, Верховному Совету и Правительству Российской Федерации докладе «Высшая школа России: состояние и программа развития». Реализация программы предусматривала 3 этапа:

- до 1993 г. должна была проводиться реформа структуры образования, системы управления высшей школой, предусматривалось создание новых рыночных механизмов ее функционирования;
- в 1994–1995 гг. намечалась стабилизация новой системы, практическая отработка и оценка эффективности ее механизмов;
- в 1996–2000 гг. планировалось наращивание ее потенциала и качества, включение в мировую систему высшего образования и разделения труда с обеспечением конкурентоспособностиготавливаемых специалистов [12].

Разработчики предложений Правительству из Министерства науки, высшей школы и технической политики констатировали нарастание проблем высшей школы: бюджетное финансирование высших учебных заведений составляло только 40–60% от минимальной потреб-

ности; практически отсутствовала финансовая поддержка вузов на уровне республик в составе Российской Федерации, краев и областей; поступления средств от коммерческой образовательной, научно-исследовательской, производственной деятельности не превышали 5-7% общего объема используемых финансовых ресурсов [13]. Поэтому они предлагали «гибкую корректировку высшего образования с учетом особенностей реальной социально-экономической ситуации»: ликвидацию ведомственной разобщенности высших учебных заведений, выделение группы вузов приоритетной государственной поддержки; формирование региональных научно-образовательных комплексов как формы интеграции академических, вузовских и отраслевых научно-исследовательских организаций в целях совместной разработки наиболее перспективных направлений науки, технологий и их кадрового обеспечения; осуществление реформы структуры высшего образования с введением, начиная с 1992 г., различных по срокам и уровням подготовки образовательных программ. Планировалось оказание государственной поддержки формирующейся сети негосударственных высших учебных заведений, осуществление «коренной реформы» системы повышения квалификации и переподготовки специалистов. Предполагалось создать систему мониторинга потребности рынка труда в специалистах в масштабах Российской Федерации и отдельных регионов, оптимизировать структуру подготовки специалистов по объему и направлениям будущей деятельности. По мысли разработчиков, использование различных, по большей степени заимствованных, форм и методов коммерциализации вузовского сектора науки могло бы способствовать его превращению в самоуправляемую подсистему вневедомственного научно-технического комплекса, сочетающую проведение фундаментальных исследований с конкурентоспособными разработками коммерческого характера. Вузы должны были всемерно использовать различные виды внебюджетного финансирования за счет контрактного обучения иностранных граждан, преподавательской деятельности за рубежом, развития производственной инфраструктуры системы высшей школы с целью решения задач частичного самообеспечения и создания дополнительных рабочих мест для формирования развитой «студенческой экономики» и др. [14].

В это же время руководством Миннауки был подготовлен специальный доклад Президенту РФ, содержащий констатацию состояния системы образования и обоснования необходимых, с точки зрения авторов, реформ [15]. В ряду предпосылок назывались следующие пороки прежней системы: количественные показатели роста объемов подготовки специалистов превалировали над показателями качества обучения; производственный аппарат экономики был ориентирован на привлечение низкоквалифицированного труда. Отсутствие в экономическом механизме источников саморазвития, стимулов роста, естественных для рыночных систем, обусловили, с точки зрения авторов, стагнацию экономики и снижение требований к качеству рабочей силы в целом и специалистов – в частности. Одновременно наиболее высоким, соответствующим мировому уровню, отмечалось в докладе, являлось качество подготовки по специальностям военно-промышленной ориентации. Поэтому, по их мнению, следовало осуществить «демилитаризацию вузов и вузовской – в рамках Государственной программы – конверсии» [16].

В том же докладе предлагалась следующая причинно-следственная связь: «Многолетний застой в экономике и технологии привел к ориентации на средний, а не на выс-

ший уровень профессиональной деятельности. Отсюда закономерно падение престижа профессионального образования и особенно инженерного. Это, в свою очередь, привело к снижению требований к образованию, и как следствие – к низкому профессионализму преподавателей... Слабые выпускники производят отсталую технологию, которая вновь отбрасывает нас назад» [17].

Ссылками на социологические данные о неудовлетворенности инженеров своей деятельностью и о менее значительной их доле в общем числе занятого населения в США, Франции и Японии обосновывалась необходимость резко снизить прием на инженерно-технические специальности. Называлась и еще одна причина отставания России: неравномерное территориальное распределение потенциала высшей школы. В числе важнейших просчетов советской государственной научно-технической политики СССР называлось разделение науки на академическую, отраслевую и вузовскую. Применительно к вузам указанное обстоятельство привело, по мнению разработчиков реформ, во-первых, к значительному недоиспользованию потенциала научных и научно-педагогических кадров и, во-вторых, к разрыву органических связей научного и учебного процессов, к снижению качественного уровня преподавательского состава и подготовки специалистов, выключенных из сферы научного процесса. Эффективность вузовской науки оставалась низкой. Это связывалось в докладе, прежде всего, с невостребованностью достижений науки экономической системой: в год удавалось внедрить не более половины научных разработок и изобретений, выполненных вузовскими учеными. В 1990 г. ущерб от неиспользования изобретений только вузовских ученых, рассчитанный по средней эффективности изобретений, составил более 4 млрд. руб. Эта сумма оказалась чуть меньше годового объема бюджетного финансирования всей высшей школы в 1991 г. [18]. Удельный вес новых разработок, соответствующих мировому уровню или превосходящих его, составлял в 1990 г. 4.1%. Около 70% НИОКР не содержали изобретений [19].

Главной опасностью для современной России авторы доклада называли невостребованность знаний. Проявлялось это, с их точки зрения, в снижении престижности интеллектуального труда, побудительных мотивов к обучению. В 1988 г. лишь 58% студентов учились в вузе с интересом. В 1990 г. выпуск специалистов сократился по сравнению с 1989 г. на 8% (по дневной форме обучения на 10.5%). Если в 1987 г. 41% старшеклассников намеревались поступить в вуз, то в 1991 г. уже только 28% старшеклассников собирались продолжать обучение в вузе [20]. Характеризовался как низкий уровень подготовки в средней школе, как невысокий – профессиональный и культурный уровень преподавателей средней и высшей школы. Далее формулировался вывод о том, что «интеллектуальный и духовный потенциал общества не использовался на благо Личности, Общества и Государства». Следовало это заключение вслед за весьма нелестными оценками преподавателей, поэтому у читателя должно было создаться впечатление о виновности системы образования в этой невостребованности, которая и приводила к росту желания уехать из страны (из опрошенных в 1990 г. – 18%, в 1991 г. – 24%). Авторы прогнозировали, что к 2000 г. страну покинут около 1.5 млн. специалистов. Констатировался рост социального пессимизма, уверенности в бессмысленности жизни (в 1989 г. так полагали 28% студентов, в 1991 г. – 52%). Это приводило к росту самоубийств в России, которые в целом по РСФСР с 1986 г. по 1990 г. увеличились на 14.8% [21]. Одновременно признавалось, что

жизненный уровень семей вузовских работников был низким. Для большинства семей (72%) заработная плата являлась основным и единственным источником существования, и хватало ее только на покрытие текущих расходов (питание, коммунальные услуги) [22]. Называлась и более точная, на наш взгляд, причина: образование рассматривалось как второстепенная (непроизводительная) сфера. Тогда как в довоенное время на образование инвестировалось 7-9% национального дохода, в 1964 г. этот уровень составлял 6.7%, в 1988 г. он уменьшился до 5.3%. И позже уровень финансирования постоянно снижался, как и уровень образованности трудовых ресурсов [23]. Не мог не беспокоить высокий уровень асоциального поведения в студенческой среде: по данным Миннауки, доминантным психологическим состоянием студенчества определялись пессимизм, неверие и страх. Ценность государственных институтов власти накануне распада СССР была невысока [24].

Изложение основных положений доклада представляется важным, так как в нем дается весьма негативная, как видим, оценка состояния общества в целом, молодого поколения и высшей школы, в частности, в последние годы существования СССР. Авторам настоящей статьи, также работавшим в то время в вузе, представляются подобные заключения, при всех, действительно, обозначившихся тогда негативных тенденциях, не совсем объективными. Полагаем, в студенческой среде, как и во все времена, превалировали все же оптимистические настроения. Наши исследования позволяют сформулировать вывод о том, что в СССР был создан мощный научно-технический потенциал, и при надлежащем управлении, структурной перестройке кризис мог быть преодолен [25, 26].

Однако для создателей доклада предлагаемые ими выводы являлись обоснованием предложений, направляемых Правительству РФ. Преодолеть катастрофическое состояние высшей школы и весьма опасные настроения молодежи возможно было, как полагало руководство Миннауки, в том случае, если будет создана система действий по реформированию государства, экономики и общества. В частности, по мысли авторов, во внешнеполитической сфере преобразования должны были быть ориентированы на углубление сотрудничества в сфере образования и науки: «Политика России – политика открытости для всех народов мира и сотрудничества с ними в деле строительства единой Европы и общечеловеческого мира XXI века. Естественно, что вхождение России в Европу и в Мир начинается с учебных заведений, с системы образования, с глобализации сознания и с формирования ценностей общечеловеческого мира» [27].

Что касается экономических реформ, то главным представлялось обеспечение гарантий прав собственности граждан, создание экономики рыночного типа, которая сама все расставит по своим местам. Рынок явится и механизмом стимулирования потребности в профессионалах, обеспечит рост цены за их труд, поставит человека перед необходимостью постоянного обучения, возбуждая к нему интерес. Особое внимание следует обратить на видение авторами сути будущих реформ образования: «Требуется реализовать новую философию образования, обращенную к личности студента. Эта философия предполагает переход к системным моделям содержания образования, в которых главное состоит в научении понимать мир, общество, себя, свое дело, развертывая обучение от фундаментальных теорий к частным, от понимания к знаниям. Это означает, что необходимо отказаться от традиционных дидактических схем обучения, при которых в студента

«упаковываются» отрывочные знания из разных областей, но не дают ему главного – понимания. Одновременно эта проблема является мировоззренческой, поскольку взгляд на мир во многом определяется пониманием мира, в котором безопасность человека, его свобода обретаются постижением истины» [28]. Авторы цитируемого документа ссылались при этом на бессмертные слова из Библии: «И познайте истину, и истина сделает Вас свободными».

Пока же, приступая к разработке и реализации реформ, оценивая в целом подготовку специалистов как неудовлетворительную, не соответствующую потребностям демократического общества, в котором «развитие способностей личности определяет смысл деятельности государства, общества и их институтов», авторы [29] заключали: «Для решения проблемы неустареваемости знаний необходимы два условия: свобода личности и образование. Государственная политика России, обеспечивающая свободу и образование гражданам, непременно приведет к благополучию россиян и авторитетному положению России в мире. Таким образом, своеобразие реформ в России состоит в двуединстве задач: общественные реформы стимулируют реформы высшей школы, а реформы высшей школы стимулируют общественные преобразования. В этой неразделимой паре задач приоритетным являются реформы системы образования в целом и высшей школы, в частности» [30].

Подобные красноречивые заключения не содержали ни конкретных механизмов преодоления негативных тенденций, ни рецептов, кроме известных: «открытость миру и обретение общечеловеческих ценностей». Воспоминания о достигнутых в ходе реформ результатах позволяют, на наш взгляд, говорить как о чуде спасения в те годы высшей школы и науки, вопреки проводившимся тогда «преобразованиям».

Немного более понятной позиция Миннауки становится при изложении сути реорганизации системы повышения квалификации, планировавшейся в начале 1992 г. Признавая, что «экономическая обстановка в Российской Федерации такова, что технический уровень производства в ближайшие 5-6 лет останется на прежнем уровне, ...повышение квалификации в ближайшие годы потребует и уже потребовалось преимущественно специалистам, спрос на которых возрос под влиянием экономических и политических реформ. Речь идет об экономистах, юристах, управленцах, социологах, политологах и других профессиях общественно-политического профиля» [31]. Далее следовало и более развернутое пояснение: «Износ производственных основных фондов с 1980 г. неуклонно повышался и составил в 1990 г. 42.1%. Капитальные вложения производственного назначения в 1990 г. уменьшились. Сократился и объем ввода в действие основных фондов. Это означает, что процесс создания новых рабочих мест замедляется. В ближайшие годы не возникнет, в силу этого, острой потребности в массовом повышении квалификации специалистов и рабочих кадров. Следовательно, главная задача состоит в создании массовой системы переподготовки кадров, ориентированных на эксплуатацию производственного аппарата невысокого технического уровня» [32].

Таким образом, перспектива деиндустриализации и демодернизации для России разработчиками реформ была обозначена достаточно четко. В качестве обоснования подобного вектора предлагалась ссылка на прогнозы, в соответствии с которыми в 1992-1993 гг. за счет свертывания отдельных производств в России будет высвобождено от 5 до 17 млн. человек. «Переподготовка и трудоустройство этих людей станет серьезной социальной задачей. Нерешение ее, естественно, приведет к массовой безработице» [33].

Миннауки докладывало Президенту РФ и о том, что в начале 1992 г. был разработан и уже стал осуществляться комплекс мероприятий по реализации Указа Президента «О первоочередных мерах по развитию образования в РСФСР» [34]. Речь шла о мерах «чрезвычайного характера по защите высшей школы от деградации и распада в условиях политической нестабильности, экономического кризиса и роста социальной напряженности»: об установлении гарантированного уровня объема финансирования высшей школы; о предоставлении вузам права определять контрольные цифры дополнительного приема студентов по договорам, «предусматривающим полное возмещение затрат на обучение» [35].

В течение 1990-х гг. реализовывались мероприятия, намеченные в указанных выше программных документах: создавалась законодательная база модернизации [36], была утверждена Программа развития инженерного образования в России, предполагающая структурную перестройку системы подготовки специалистов в области техники и технологии; сокращение и адаптацию технических специальностей; развитие перспективных форм интеграции инженерного образования с промышленностью [37]. Обновлялось содержание инженерного образования, внедрялась многоуровневая модель инженерной подготовки «с целью использовать мировой опыт и приблизить российскую вузовскую систему к зарубежным образцам» [38]. Согласно данным Министерства образования РФ, в 1999 г. многоуровневую подготовку реализовывали уже 165 вузов [39]. В эти годы существенно увеличилась доля студентов, поступивших на такие специальности, как информатика и вычислительная техника, сервис и технология продовольственных продуктов, экология и природоиспользование. Абитуриентами отдавалось предпочтение междисциплинарным и естественно-техническим направлениям. Был значительно расширен и изменен перечень специальностей, разрабатывались интегрированные программы подготовки инженерных кадров, формировалась система университетского инженерного образования, появилась новая типологизация вузов. Так, 1 июля 1994 г. Московский институт приборостроения получил новое название – Московская государственная академия приборостроения и информатики (МГАПИ). Позднее вуз стал университетом. В составе технических вузов появлялись факультеты гуманитарного профиля, что весьма неоднозначно оценивалось экспертами. Между тем, подобные меры, включая платное образование, систему грантов, явились одной из немногих возможностей выжить в тот период: расходы на заработную плату работникам образования оказались ниже прожиточного минимума [40]. Финансирование системы образования в 1990-е гг. оказалось в 2-2.5 раза меньше, чем было предусмотрено законодательством, осуществлялось оно по остаточному принципу [41]. Банкротами становились не только предприятия, но и вузы, не имеющие средств оплачивать даже коммунальные расходы.

В этот период были внедрены новые Государственные образовательные стандарты высшего и послевузовского профессионального образования, но практика их реализации выявила существенные недостатки. В частности, не удалось уйти от отраслевого признака инженерных специальностей, многие из которых остались узкими, проявилась несогласованность со стандартами других уровней. В 2000-е гг. были введены Государственные стандарты новых поколений, но и они нуждались в доработке. В высшей технической школе создавались новые организационные и инновационные структуры: технопарки,

учебно-научно-производственные комплексы, центры новых информационных технологий и др. Так, в весьма сложной экономической ситуации, на рубеже веков, в МИРЭА реализовывалась инновационная концепция развития вуза как университетского научно-образовательного комплекса сферы высоких технологий, способного решать важные государственные задачи в условиях ограниченных ресурсов. Придавая первостепенное значение развитию науки в техническом университете, ректор академик А.С. Сигов добивался ежегодного увеличения объема НИОКР, выполняемых вузом.

Отмечая некоторые позитивные итоги реформирования высшего образования РФ в 1990-е гг., представляется важным определить и четко обозначившиеся тогда негативные тенденции: высшая школа страны развивалась в условиях системного кризиса, отсутствия научно-обоснованной программы модернизации системы образования, государственной поддержки, недофинансирования. Правительство по преимуществу игнорировало рекомендации научного и вузовского сообщества, пренебрегало сложившимися в российской высшей школе традициями. Единственной значимой, на наш взгляд, победой вузовской общественности явилась остановка процесса приватизации учреждений научной и образовательной сферы. Процессы перманентной реорганизации сопровождались деградацией материально-технической и исследовательской базы, резким обострением возрастной проблемы профессорско-преподавательского состава, снижением интереса и возможности у преподавателей заниматься научными исследованиями.

Значительное сокращение финансирования сферы науки и образования сказывалось на снижении качества подготовки специалистов по наиболее передовым отраслям экономики. По этому поводу неоднократно высказывался академик Ж.И. Алферов: «...мы не сможем просто жить и работать, наши дети и внуки не смогут жить и работать в XXI веке, если мы не будем их учить, прежде всего, самым передовым направлениям науки, которые ... станут основными направлениями в технологии. Для этого ... нужно биться до конца прежде всего за нормальные государственные инвестиции в науку и образование для технического переоснащения... Мы используем оборудование, разработки начала 80-х годов... Научное приборостроение в стране практически разрушено ... Инвестиции нужны, прежде всего, в наших вузах, в наших академических институтах, мы должны сохранить возможность подготовки кадров на современном оборудовании, современных ученых и специалистов» [42].

В результате либеральных реформ в начале 2000-х гг. количество студентов в российских вузах достигло 7.5 млн. (в конце 1980-х гг. в вузах во всем СССР обучалось около 2.5 млн. человек) [43], но наблюдалось общее сокращение выпуска специалистов в области техники и технологии [44]. Одновременно около половины выпускников инженерных вузов трудоустривались не по профилю [45]. Во многом сложившаяся ситуация была обусловлена катастрофической деиндустриализацией страны: по объемам производства промышленность уменьшилась практически наполовину [46]. Между тем подготовка инженерных кадров в России всегда рассматривалась как системообразующее звено высшего профессионального образования [47]. Выпускники отечественной высшей технической школы всегда отличались широтой профессиональных познаний в сочетании с прочностью их фундаментальной подготовки. Доказательство тому – их востребованность на Западе и трагическое для нашей страны явление тех лет – «утечка умов». В 2011 г. в США работало около 17 тыс. докторов наук – воспитанников отечественных вузов [48].

Характеризуя период с начала 2000-х гг. по весну 2014 г., мы не можем не констатировать общее торможение модернизационных процессов, непоследовательность, несистемность, недостаточную эффективность реализуемых стратегий правительства, «утечку умов» и капиталов за рубеж, недостаточность ассигнований на образование и науку, отказ от активной государственной промышленной политики. Просчеты были и в сфере инженерного образования. Ежегодный выпуск около 200 тыс. инженеров в период с 2000 по 2010 гг., сопровождался их дефицитом, который достиг в 2014 г. 29% [49]. До сих пор неоднозначно оценивается экспертами и вузовским сообществом подключение России к Болонскому процессу. Заметим, что в Германии вузы запросили на переход к двухуровневой системе запросили дополнительное финансирование и десятилетний срок [43].

На заседании Совета при Президенте по науке и образованию в июне 2014 г. уровень профессионализма и компетентности специалистов российских компаний был оценен на 30% ниже, чем у их зарубежных коллег. Это значительно ухудшало конкурентоспособность отечественной промышленности [50]. Большая часть работодателей не была удовлетворена уровнем профессиональной подготовки выпускников.

Государством в сфере финансирования высшей технической школы в этот период было сделано достаточно много: начиная с 2006 по 2014 гг., в развитие материальной базы инженерных факультетов было направлено более 54 млрд. рублей. В результате удалось повысить уровень подготовки специалистов, в том числе, по таким критически важным направлениям, как авиационная, атомная, автомобильная промышленность, металлургия, энергетическое машиностроение. Вырос престиж профессии [50]. Значительную роль в становлении инновационной инфраструктуры, повышении качества инженерного образования и обеспечении большей его интеграции с реальным сектором экономики и наукой сыграли такие Постановления Правительства РФ, как № 218 от 9 апреля 2010 г. «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских образовательных организаций высшего образования, государственных научных учреждений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства», в рамках подпрограммы «Институциональное развитие научно-исследовательского сектора» государственной программы Российской Федерации «Развитие науки и технологий» на 2013 – 2020 годы»; № 219 от 9 апреля 2010 г. «О государственной поддержке развития инновационной инфраструктуры в федеральных образовательных учреждениях высшего профессионального образования» и № 220 от 9 апреля 2010 г. «О мерах по привлечению ведущих ученых в российские учреждения высшего профессионального образования, научные учреждения государственных академий наук и государственные научные центры Российской Федерации» [51].

В 2012 г. впервые за 20 лет были установлены нормативы затрат в расчете на одного бюджетного студента вуза, причем они были дифференцированы по направлениям подготовки и уровням высшего образования, учитывались фондоемкость программ, их трудоемкость и приоритетность для социально-экономического развития страны.

В Послании Президента Федеральному Собранию в 2015 г. роль качественной подготовки инженеров была определена как базовое условие развития экономики страны [52]. Объемы контрольных цифр приема на инженерные направления подготовки и специальности в последние годы превысили 50% от общего объема контрольных цифр приема,

подавляющее большинство будущих инженеров стало обучаться за счет средств федерального бюджета [53]. Под эгидой Минобрнауки проводились олимпиады и конкурсы среди школьников в области инженерии. В рамках проекта «Развитие инженерного образования» был разработан перечень направлений подготовки и специальностей высшего образования в соответствии с международными классификаторами. В нем особо выделена такая область образования, как «Инженерное дело, технологии и технические науки». Реализовывались новые механизмы целевого приема и обучения студентов, которые предусматривали более активное участие работодателей в такого рода подготовке. Значительное число грантов Президента Российской Федерации представлялось студентам, проявившим склонность к техническому и гуманитарному творчеству, изобретательству [53]. С 2015 г. внедряется проект «Инженерный класс». В качестве одной из основных целей его реализации определено обретение школьниками практических навыков работы с оборудованием. Ими изучается не только теория – физика, математика, но и инженерная графика, моделирование, 3D-конструирование, робототехника, ставшая предметом, сочетающим в себе и теоретическую, и практическую составляющие. Для решения более масштабных задач, требующих дорогого оборудования, создаются центры коллективного пользования. Так, например, в Новосибирске, в Академгородке, действуют Детский технопарк и Центр молодежного инновационного творчества.

Однако оборудование в большинстве российских школ, особенно сельских, находится на уровне 1950-60-х гг. В стадии формирования в настоящее время и сама концепция обучения в инженерных классах. Есть риск подмены развития инженерного мышления решением задач для олимпиад [54]. В настоящее время в Москве продолжают реализовываться проекты «Инженерный класс в московской школе» и «Академический класс (научно-технологический) в московской школе», целями которых Департаментом образования г. Москвы обозначены, в том числе, создание условий для развития у обучающихся навыков проведения научных исследований с применением современного оборудования и формирования естественнонаучного кругозора и мышления; создание гибкой, практико-ориентированной модели предпрофессионального образования для качественной подготовки обучающихся к освоению будущей профессии [55]. За последние два года значительно увеличилось количество технических и естественнонаучных кружков, в том числе, с использованием технопарков. На этапе становления сегодня система выявления и «сопровождения по жизни» одаренных детей в центрах, созданных по модели «Сириуса» [56].

В последние годы выстраивается адекватная развитию инновационной экономики структура высшего образования: созданы федеральные и национальные исследовательские университеты, планируется создание целого ряда опорных вузов в регионах. С целью социально-экономического развития субъектов РФ, удовлетворения кадровых потребностей регионов с 2016 г. формируется группа опорных университетов. Конкурсный отбор тогда выявил 11 победителей. Только в 2016 г. на развитие таких университетов из федерального бюджета было выделено 1.25 млрд. руб. [57].

На август 2017 года количество научных публикаций российских ученых достигло 2.46% от мирового количества. Доля молодых исследователей до 39 лет составила 42% [57]. Характерно, что количество вузовских исследований сравнялось с академическим сектором, доля конкурсного финансирования вузов превысила вдвое аналогичный пока-

затель для академических институтов. Фиксируется рост внутренних инвестиций в НИ-ОКР, причем значительная их часть направлена из реальной экономики. Специалистами Минобрнауки разрабатывается закон о научной и научно-технической и инновационной деятельности в РФ, призванный создать полноценную национальную инновационную систему [56].

Между тем задача, связанная с решением проблемы трудоустройства специалистов в области техники и технологии и одновременно – существующего их дефицита, реализовывалась недостаточными темпами. Отметим, что данные о трудоустройстве выпускников существенно разнятся. Так, согласно сведениям Росстата, на июль 2017 г. только 75% из 1.3 млн. выпускников 2015 г. нашли работу, лишь 15% работают по специальности [58]. По данным Минобрнауки России, ежегодно российскими университетами выпускается около 250 тыс. инженеров, из которых лишь около 50 тыс. начинают работать на высокотехнологичных предприятиях, остальные оказываются невостребованными. При этом предприятия высокотехнологичной промышленности сетуют на дефицит квалифицированных кадров, но предлагают работникам достаточно низкую зарплату [59], не разрабатывают прогнозы по уровням и по профессиям. Осложняет ситуацию и отсутствие действенных механизмов, моделей трудоустройства, мониторинга карьеры выпускников. Подтверждены договорами о целевом обучении заявки работодателей на трудоустройство выпускников, осваивающих программы прикладного бакалавриата, не более 15-20% от всех выделяемых вузам контрольных цифр приема на технические направления подготовки [60]. Созданная в 2015 г. система объективного оценивания трудоустройства выпускников вузов дала возможность Минобрнауке в отчете за 2016 г., представленном 3 апреля 2017 г., утверждать, что было трудоустроено 80% выпускников инженерных специальностей [61].

В планах Минобрнауки – создание более благоприятных условий трудоустройства для специалистов без опыта, в частности, изменение правовой базы, совершенствование целевого договора между заказчиком, вузом и абитуриентом, в котором предусматривается обязательная трехлетняя отработка выпускником и выплата неустойки в случае неисполнения договора. За счет ликвидации излишних административных барьеров при создании базовых кафедр вузов на предприятиях их число увеличится, а студенты будут иметь возможность работать по специальности во время обучения, проходить практику на предприятиях, создавать студенческие инновационные предприятия или лаборатории. Реализация Национальной технологической инициативы должна в полной мере способствовать внедрению подобных новых форм [62]. Напомним в этой связи, что в Московском технологическом университете создано 59 базовых кафедр при научно-исследовательских институтах, конструкторских бюро и высокотехнологичных предприятиях России. В вузе успешно реализуется уникальная модель взаимодействия с передовыми предприятиями «базовая кафедра – базовое предприятие», что даст возможность модернизировать учебный процесс, расширить возможности материально-технической базы за счет использования мощностей предприятия, что обеспечит интеграцию образования и производства. Для предприятий – это возможность практически «индивидуального изготовления» специалиста, для которого профессиональная социализация будет проходить значительно проще и быстрее.

В 2016 г. была утверждена ведомственная целевая программа обеспечения высококвали-

фицированными кадрами ОПК, в рамках которой для организаций оборонного комплекса к 2020 г. должно быть подготовлено 9 тыс. выпускников. В этом же году был проведен конкурс проектов, призванных усовершенствовать содержание и технологии целевого обучения студентов вузов, подведомственных Минобрнауке. Победителями стали 349 проектов, присланных из 64 вузов. На их базе в интересах ОПК пройдут углубленную подготовку 3 тыс. чел. [63].

В рамках направления «Образование» реализуется пять приоритетных проектов, рассчитанных на период до 2021–2025 гг., имеющих целью создание современной образовательной среды для школьников, цифровой образовательной среды, доступного дополнительного образования, центров инноваций в вузах и подготовки кадров для передовых технологий. В их ряду и проект «Вузы как центры пространства создания инноваций», который направлен на обеспечение глобальной конкурентоспособности ведущих российских университетов к 2025 г.; создание в регионах университетских центров инновационного, технологического и социального развития. Показателем, в частности, должно стать вхождение ведущих отечественных вузов в ТОП-100 мировых рейтингов. Планируемые значения: в 2017–2020 гг. – 5 университетов, к 2025 г. – не менее 10. В 2017 г. должно быть создано 40 университетских центров инновационного, технологического и социального развития, к 2025 г. их количество должно увеличиться в 80 субъектах РФ до 100. Значительные средства на эти цели выделяются из бюджета и из внебюджетных источников [64].

В настоящее время Департаментом науки и технологий Министерства образования и науки Российской Федерации предложена новая стратегия научно-технического развития страны, предполагающая переключение основного ресурса развития с материально-сырьевого на интеллектуальный. В частности, предлагается определить приоритеты в университетской науке, что должно обеспечить появление новых, университетских «центров превосходства», выделить научное ядро внутри университета со своими приоритетами, где люди работают в лабораториях и одновременно влияют на образовательный процесс, вовлекая молодежь в исследовательский, инженерный процесс. Подобным образом предполагается выделить также профессию высокого уровня, являющуюся «проводниками» нового знания и организаторами их получения [65]. На базе этих центров должны реализовываться:

- проектно-ориентированные образовательные программы инженерного, медицинского, социально-экономического, педагогического профилей и отдельные программы естественно-научного и гуманитарного профилей, предполагающие командное выполнение проектов полного жизненного цикла;
- проектно-ориентированные программы магистратуры и магистратуры по технологическому предпринимательству, по управлению технологическими проектами совместно с предприятиями реального сектора экономики и институтами развития;
- инжиниринговые центры, обеспечивающие продвижение инновационных, научных разработок, способствующие импортозамещению в промышленности [66].

В числе основных проблем экспертами справедливо называется также оторванность значительной части преподавателей от практики, от производства. В последние десятилетия они не работали по заказам промышленных предприятий и не выполняли заказные НИОКР. Президентом Ассоциации инженерного образования России Ю.П. Похолковым

акцентируется внимание на преобладании знаниевой составляющей в инженерном образовании при одновременном повышении требований к компетенциям выпускников, формирование которых возможно только в процессе деятельности. По его мнению, ситуацию осложняет отсутствие согласованных и адекватных методов оценки компетенций, как и отсутствие четкой стратегии управления подготовкой инженеров [67].

Согласно оценкам экспертов Ассоциации инженерного образования России, были признаны удовлетворительными и уровень, и качество подготовки современных инженеров (61.5%), «хорошим» его назвали 11.5%, 23.1% оценили его как «низкий». Одновременно более 50% этих экспертов сочли состояние инженерного дела в России как неудовлетворительное [68]. Со стороны работодателей разрыв между желаемым и фактическим уровнем полученных компетенций существенным образом отличается по целому ряду из них. Прежде всего, речь идет о «способности к самостоятельной работе», об «опыте взаимодействия с реальным сектором» (разрыв 1.5 раза), о «коммуникативных навыках» (разрыв 1.4 раза), о широком контекстном мышлении, наличии комплексного представления об отрасли, понимании экономических контекстов ее функционирования (разрыв в 1.4 раза) [69].

Пока еще не находит массового применения имеющиеся успешные практики реализации уровневого подхода, но созданы различные модели бакалавриата: практико-ориентированный, исследовательский, многопрофильный. Планируется, что к 2018 г. доля прикладных бакалавров составит не менее 30% от всего числа студентов, которые обучаются по программам высшего профессионального образования [70].

В настоящее время продолжается работа над стандартами высшего образования, в том числе, по инженерным направлениям и специальностям. Сегодня на повестке дня стандарты ФГОС 3++. Эволюция стандартов характеризуется изменением их прежней ориентации (знания, умения и навыки) к оценке компетенций и все большей привязкой стандартов к конечным результатам освоения образовательных программ. Неслучайно ФГОС 3++ разрабатываются с учетом требований профессиональных стандартов и – в отличие от стандартов предыдущего уровня – имеют дополнительный раздел «Требования к применяемым механизмам оценки качества образовательной деятельности».

Полагаем, что отечественная система стандартизации все же отстает от потребностей рынка труда, который значительно более динамичен с точки зрения профессионально-квалификационных требований, изменяющихся и повышающихся в соответствии с развитием науки и технологий. Разрабатывая новые стандарты, мы все равно не успеваем: все время существует разрыв между требованиями системы образования и рынка труда, а, следовательно, постоянно воспроизводится проблема их несбалансированности. Кроме того, из-за быстрого «устаревания» знаний за время обучения специалиста, из-за стремительного развития в мире наукоемких мультидисциплинарных технологий каждый день следует заниматься более наукоемкими, интеллектуальноемкими, мультидисциплинарными разработками, чтобы преуспеть и быть конкурентоспособными в глобальном масштабе. Поэтому крайне необходимо обеспечить подготовку не только «традиционных» инженеров и специалистов по эксплуатации высокотехнологичного оборудования, но и, по определению проректора Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого А. Боровкова, «инженерного спецназа», обладающего компетенциями

мирового уровня для проектирования и создания в кратчайшие сроки глобально конкурентоспособной продукции нового поколения в рамках IV промышленной революции, владеющего передовыми наукоемкими мультидисциплинарными и кросс-отраслевыми/кросс-рыночными технологиями, обладающего множеством soft skills и т.п. [66].

Одной из важнейших продолжает оставаться задача по совершенствованию гуманитарной составляющей инженерной подготовки. Решение задач модернизации требует консолидации общества, его активного включения в модернизационные процессы. Министр образования и науки О.Ю. Васильева, констатируя наличие серьезных проблем в сфере гуманитарного образования, прежде всего, в технических вузах, где пытаются «заменить» гуманитарные предметы, справедливо в этой связи задается вопросом: «Разве любая школа XXI века не должна воспитать личность, уважающую свой народ, ценящую труд? И разве молодому человеку не надо внушать, что он должен трудиться на благо себя и своей страны?» [57]. Министр призвала руководство технических вузов вспомнить о том, что выпускники высшей школы должны быть «просто образованными людьми», а это предполагает соответствующие знания и гуманитарных дисциплин при получении технического образования [71]. В ноябре 2017 г. в Москве под эгидой Министерства состоялся 1 съезд преподавателей истории в вузах, призвавший «узаконить» примерную программу по истории России, разработанную с участием преподавателей истории 30 вузов страны для технических и естественно-научных направлений подготовки бакалавров и специалистов и предусматривающую не менее 72 часов аудиторного времени на курс. Предлагается также вернуться к прежней системе повышения квалификации преподавателей истории и восстановить работу ИППК при ведущих университетах страны и др. В резолюции съезда записано: «Если сообщая мы не обеспечим достойное изучение отечественной истории, то негативное отношение к прошлому не будет способствовать воспитанию у молодежи стремления своими действиями служить интересам России, лишит ее возможности гордиться своей страной, быть уверенным в будущем» [72].

Таким образом, в процессе реформирования высшей технической школы на новой стадии российской модернизации можно выделить несколько этапов, начиная с середины 1980-х гг. и по настоящее время: середина 1980-х гг. – 1991 г.; 1990-е гг.; 2001 – 2014 гг.; 2015 г. – по настоящее время. Констатируя определенные достижения, одновременно заметим, что значительная часть задач не была решена из-за отсутствия научно-обоснованной, адекватной глобальным вызовам и одновременно учитывающей специфику российской модели модернизации наиболее оптимальной стратегии развития страны. В последние годы были предприняты значительные меры с целью формирования высококвалифицированного потенциала научно-технического комплекса, обеспечения подлинной интеграции науки, образования и производства. Успех модернизации возможен лишь в том случае, если намеченное не останется декларацией, если будут найдены адекватные механизмы и ресурсы. Реализация обозначенных в стратегических документах задач по реформированию высшей технической школы требует культивирования лучших традиций российского инженерного образования. В основе обретения им мирового уровня всегда были фундаментальность образования, атмосфера уважения и созидания, практикоориентированная подготовка и воспитание гражданина своего Отечества. Успех реформ в этой сфере обеспечивался лишь в случае сотрудничества власти и вузовского сообщества, реализации

последовательной, научно разработанной программы, основанной на лучших мировых и отечественных достижениях в этой области; при мощной поддержке государства, так как наука и образование на всех этапах российской модернизации определялись в качестве национального приоритета. Справедливым представляется в этом случае и слова главы Минобрнауки: «Я полностью за «цифру» в образовании, но ратую, прежде всего, за голову. Ускорилося всё, но голова осталась и должна оставаться при любом инструментарии. Самая главная задача педагога – развить и привить желание учиться» [57]. А раз принципы, лежащие в основе системы образования, не меняются, значит, необходимо использовать прошлый опыт и брать всё самое лучшее, в том числе, из советской системы образования.

Геополитическая и экономическая ситуация не оставляют нам выбора. Страна должна совершить технологический рывок, для чего требуются высококвалифицированные кадры и атмосфера созидания. Осуществляемая в настоящее время модернизация высшего технического образования – не отдельные реорганизации и мероприятия, а целый комплекс преобразований, призванный вывести его на качественно иной уровень, обеспечить подлинное формирование национальной инновационной системы. Модернизация в этой сфере – обязательная составляющая и необходимое условие успешной, мы надеемся, новой стадии российской модернизации.

Литература:

1. Rostow W.W. The Stages of Economic Growth. A Non Communist Manifesto. New York: Cambridge University Press, 1960. 179 p.
2. Rostow W.W. Politics and the Stages of Growth. London: Cambridge University Press, 1971. 395 p.
3. Глобальный инновационный индекс 2017 г.: в рейтингах лидируют Швейцария, Швеция, Нидерланды, США и Соединенное Королевство// [Электронный ресурс]. URL: http://www.wipo.int/pressroom/ru/articles/2017/article_0006.html (дата обращения 10.09.2017)
4. Об итогах деятельности Министерства образования и науки Российской Федерации в 2016 году и задачах на 2017 год // [Электронный ресурс]. URL: [Электронный ресурс]. URL: <http://минобрнауки.рф/документы/9754> (дата обращения 17.10.2017).
5. Бодрова Е.В., Красивская В.Н. Роль государства в становлении технического образования и научно-технический учреждений в России // Российский технологический журнал. 2016. Т. 4. № 5 (14). С. 89–101.
6. Бодрова Е.В., Гусарова М.Н., Калинов В.В. Эволюция государственной промышленной политики в СССР и Российской Федерации / Под общ. ред. Е.В. Бодровой. М.: Регенс, 2014. 940 с.
7. Государственный архив Российской Федерации (ГАРФ) Ф. 10265. Оп. 1. Д. 57. Л. 210.
8. ГАРФ. Ф. 10265. Оп. 1. Д. 57. Л. 197.
9. ГАРФ. Ф. 10265. Оп. 1. Д. 57. Л. 203.
10. ГАРФ. Ф. 10265. Оп. 1. Д. 57. 207–208.
11. ГАРФ. Ф. 10265. Оп. 1. Д. 57. Л. 187.
12. ГАРФ. Ф. 10265. Оп. 1. Д. 55. Л. 143.

13. ГАРФ Ф. 10265. Оп. 1 Д.55. Л.143
14. ГАРФ Ф. 10265. Оп.1. Д. 57. Л. 46–55.
15. ГАРФ Ф. 10265. Оп. 1. Д. 57. Л. 178.
16. ГАРФ Ф. 10265. Оп. 1. Д. 57. Л. 191.
17. ГАРФ Ф. 10265. Оп. 1. Д. 57. Л.191.
18. ГАРФ Ф. 10265. Оп. 1. Д. 57. Л. 204.
19. ГАРФ Ф. 10265. Оп. 1. Д. 57. Л. 204.
20. ГАРФ Ф. 10265. Оп. 1. Д. 57.Л. 199.
21. ГАРФ Ф. 10265. Оп. 1. Д. 57. Л. 183.
22. ГАРФ Ф. 10265. Оп. 1. Д. 57. Л. 183.
23. ГАРФ Ф. 10265. Оп. 1. Д. 57. Л. 184.
24. ГАРФ Ф. 10265. Оп. 1. Д. 57. Л. 183.
25. Бодрова Е.В., Калинов В.В. Государственная научно-техническая политика в период оттепели: прорывы и причины торможения // Российский технологический журнал. 2017. Т. 5. № 5. С. 70–85.
26. Бодрова Е.В., Голованова Н.Б., Калинов В.В., Телегина Е.А. Модели национальных инновационных систем. М.: Изд. центр РГУ нефти и газа имени И.М., Губкина, 2015. 187 с.
27. ГАРФ Ф. 10265. Оп. 1. Д. 57. Л. 185.
28. ГАРФ Ф. 10265. Оп. 1. Д. 57. Л. 185, 187.
29. ГАРФ Ф. 10265. Оп. 1. Д. 57. Л. 197.
30. ГАРФ Ф. 10265. Оп. 1. Д. 57. 187.
31. ГАРФ Ф. 10265. Оп. 1. Д. 57. 207.
32. ГАРФ Ф. 10265. Оп. 1. Д. 57. 207.
33. ГАРФ Ф. 10265. Оп. 1. Д. 57. 207–208.
34. Указ Президента РСФСР от 11 июля 1991 г. №1 «О первоочередных мерах по развитию образования в РСФСР» [Электронный ресурс] URL: <http://base.garant.ru/102690/#ixzz4ip75JTMe> (дата обращения:25.06.2017).
35. ГАРФ Ф. 10265. Оп. 1. Д. 57. Л.228.
36. Закон РФ «Об образовании» от 10.07.1992 №3266-1 (в ред. от 24.04.2008) // Сборник законов РФ: с изменениями и дополнениями на 15 октября 2008 г. М., 2008. С. 727–735; Закон РФ «О высшем и послевузовском профессиональном образовании» от 22.08.1996 №125-ФЗ (в ред. от 24.04.2008) // Сборник законов РФ с изменениями и дополнениями на 15 октября 2008 г. М., 2008. С. 750–764 и др.
37. «О программе развития инженерного образования в России»: Решение коллегии Госкомвуза России от 15.03.1995 №5/1 // Бюллетень Госкомвуза России. 1995. № 7. С. 15.
38. Постановление Министерства науки, высшей школы и технической политики РФ от 13.03.1992 «О введении многоуровневой структуры высшего образования в Российской Федерации». [Электронный ресурс] // Информационные материалы по образованию в РФ. URL: <http://www.education-docs.ru/node/54> (дата обращения: 15.08.2017).
39. Фролкин П.П. Реформирование отечественной высшей школы во второй половине 1980-х - 1990-е годы. Саратов: Изд-во Саратовского ГСЭУ, 2001. 529 с.
40. Архив Государственной Думы Федерального Собрание Российской Федерации

(Архив ГД ФС РФ). Ф. 10100. Оп. 15 п-III. Д. 39. Л. 150.

41. Архив ГД ФС РФ. Ф. 10100. Оп. 15 п-III. Д. 39. Л. 152.

42. Архив ГД ФС РФ. Ф. 10100. Оп. 14. Д. 2153. Л. 40–41.

43. Дульзон А.А. Реформы высшего образования и вузовское сообщество // Инженерное образование. 2017. № 21. С. 9–12.

44. Российский статистический ежегодник. М.: Росстат, 2008. С. 253–254.

45. Вахрушева Д. Дипломы на ветер // Труд. 2009. 3 марта.

46. Архив ГД ФС РФ. Ф.10100. Оп.14. Д.3765. Л.5.

47. Владимиров А. Хождение бакалавра в Россию // Социальное партнерство. 2004. № 4. С. 7–13.

48. О готовности вузов к «переходу» (круглый стол в редакции) // Высшее образование в России. 2011. № 3. С.105–115.

49. Савосин А. Развитие инженерного образования и технической подготовки в России [Электронный ресурс]: презентация / Артем Савосин // MyShared.ru: портал презентаций. – 2014. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.myshared.ru/slide/771583> (дата обращения: 03.09.2017).

50. Под председательством Владимира Путина в Кремле состоялось заседание Совета при Президенте по науке и образованию. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kremlin.ru/news/45962> (дата обращения: 24.08.2017).

51. Постановление Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. N 218 "О мерах государственной поддержки развития кооперации российских образовательных организаций высшего образования, государственных научных учреждений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства, в рамках подпрограммы "Институциональное развитие научно-исследовательского сектора" государственной программы Российской Федерации "Развитие науки и технологий" на 2013 - 2020 годы" (с изменениями и дополнениями) [Электронный ресурс]. URL: <http://base.garant.ru/12174931/>; Постановление Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. N 219 "О государственной поддержке развития инновационной инфраструктуры в федеральных образовательных учреждениях высшего профессионального образования" (с изменениями и дополнениями) [Электронный ресурс]. URL: <http://base.garant.ru/12174942/>; Постановление Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. N 220 "О мерах по привлечению ведущих ученых в российские образовательные организации высшего образования, научные учреждения, подведомственные Федеральному агентству научных организаций, и государственные научные центры Российской Федерации в рамках подпрограммы "Институциональное развитие научно-исследовательского сектора" государственной программы Российской Федерации "Развитие науки и технологий" на 2013 – 2020 годы" (с изменениями и дополнениями) [Электронный ресурс]. URL: <http://base.garant.ru/12174930/> (дата обращения 10.10.2017).

52. Послание Президента Федеральному Собранию от 4 декабря 2014 года. Электронный ресурс. URL: <http://kremlin.ru/news/47173> (дата обращения: 19.09.2017). 53. Развитие инженерного образования [Электронный ресурс]. URL: // минобрнауки.рф/проекты/развитие-инженерного-образования (дата обращения 22.10.2017)

54. В инженеры бы пошел, пусть меня научат [Электронный ресурс]. URL: <https://>

sibmama.ru/inginiring-v-shkole.htm (дата обращения 17.10.2017)

55. Приказ Департамента образования города Москвы № 561 от 14 июля 2017 г. // [Электронный ресурс]. URL: <http://profil.mos.ru/images/docs/561.pdf> (дата обращения 29.10.2017).

56. Минобрнауки – 2017: новые задачи и новые принципы управления [Электронный ресурс]. URL: <http://profiof.com/about/news/detail.php?ID=4201> (дата обращения 17.10.2017).

57. Васильева О.Ю. «Задач впереди больше, чем удалось сделать». 07.08.2017 [Электронный ресурс]. URL: http://ruskline.ru/opp/2017/avgust/07/oyu_vasileva_zadach_vpered_i_bolshe_chem_udalos_sdelat/ (дата обращения 17.10.2017)

58. Карлина Е. Получил диплом. А что потом? // Союзное вече. 2016. № 25. [Электронный ресурс]. URL: https://www.souzveche.ru/articles/the_view_from_moscow/31244/ (дата обращения 17.10.2017).

59. Утверждён паспорт приоритетного проекта «Вузы как центры пространства создания инноваций» [Электронный ресурс]. URL: <http://government.ru/news/25681/>; Проблемы инженерного образования // [Электронный ресурс]. URL: <http://csr.ru/news/1867/> (дата обращения 17.10.2017).

60. Ребрин О.И. Новые модели инженерного образования / О.И. Ребрин, И.И. Шолина // Университетское управление: практика и анализ. 2016. № 2. С. 61–71.

61. Об итогах деятельности Министерства образования и науки Российской Федерации в 2016 году и задачах на 2017 год [Электронный ресурс]. URL: http://минобрнауки.рф/новости/9834/файл/9062/ОЮВ_итоговая%20коллегия%202017_29%2003%2017.pdf (дата обращения 17.10.2017).

62. В Военной академии Генерального штаба вооруженных сил РФ состоялась лекция Министра образования и науки России О.Ю. Васильевой [Электронный ресурс]. URL: <http://минобрнауки.рф/m/новости/10055/> (дата обращения 17.10.2017).

63. Об итогах деятельности Министерства образования и науки Российской Федерации в 2016 году и задачах на 2017 год [Электронный ресурс]. URL: <http://минобрнауки.рф/документы/9754/> (дата обращения 17.10.2017).

64. Об итогах деятельности Министерства образования и науки Российской Федерации в 2016 году и задачах на 2017 год. Министр образования и науки Российской Федерации О.Ю. Васильева [Электронный ресурс]. URL: http://moodle.ginfo-edu.org:7777/PDF_W/%212017/SMI/minobr2017.pdf (дата обращения 17.10.2017).

65. Матвеев С.Ю. Сформировав новую культуру коммуникации, мы увидим взрывной рост науки и технологий» // Коммерсантъ Наука. 2017.12.05 № 3. // [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/3283554> (дата обращения 17.10.2017).

66. Проблемы инженерного образования [Электронный ресурс]. URL: <http://csr.ru/news/1867/> (дата обращения 17.10.2017).

67. Похолков Ю.П. Инженерное образование и воспроизводство инженерных кадров: проблемы и опыт // Инженерное образование. 2017. № 21. С. 4–5.

68. Качество инженерного образования в России: материалы эксперт. семинара: презентация / Общерос. обществ. орг. Ассоц. инж. образования России. Томск. 2014 [Электронный ресурс]. URL: http://aeer.ru/files/ES_1.pdf, = (дата обращения 13.07.2016).

69. Банникова Л.Н., Боронина Л.Н., Вишневский Ю.Р. Инженерное образование и воспроизводство инженерных кадров: практика и актуальные проблемы // Инженерное образование. 2017. № 21. С. 19–23.

70. Развитие образования на 2013–2020 годы: гос. программа Рос. Федерации: утв. постановлением Правительства Рос. Федерации от 15 апр. 2014 г. № 295. М.2015]. 146 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://cdnimg.rg.ru/pril/95/79/95/295>. (дата обращения: 19.09.2017).

71. Васильева заявила о «проблемах» с гуманитарным образованием в России. 22.11.2016 [Электронный ресурс]. URL: <https://ria.ru/science/20161122/1481938410.html> <http://csr.ru/news/1867/> (дата обращения 10.10.2017)

72. Резолюция Первого Всероссийского съезда преподавателей истории в вузах России. 16-17 ноября 2017 г. М.: Изд-во МАИ. С.2.

References:

1. Rostow W. W. The Stages of Economic Growth. A Non Communist Manifesto. New York: Publ.Cambridge University Press, 1960. 179 p.

2. Rostow W. W. Politics and the Stages of Growth. London: Publ.Cambridge University Press, 1971. 395 p.

3. The global innovation index 2017: are leaders Switzerland, Sweden, the Netherlands, the USA and the United Kingdom// [Electronic resource]. URL: http://www.wipo.int/pressroom/ru/articles/2017/article_0006.html (accessed 10.09.2017) (in Russ.).

4. About results of activity of the Ministry of education and science of the Russian Federation in 2016 and objectives for 2017 //[Electronic resource]. URL: [Electronic resource]. URL: <http://минобрнауки.рф/документы/9754> (accessed 17.10.2017). (in Russ.).

5. Bodrova E. V., Krasivsky And V. N. The role of the state in the development of technical education and science and technology institutions in Russia// Journal of Russian technology. 2016. Vol. 4. N. 5 (14). Pp. 89-101. (in Russ.).

6. Bodrova E. V., Gusarova M. N., Kalinov V. V. Evolution of state industrial policy in the USSR and the Russian Federation. Under the General editorship of E. V. Bodrova. M.: Publ. Regens, 2014. 940 p. (in Russ.).

7. State archive of the Russian Federation (GARF) F. 10265. Op. 1. D. 57. L. 210.

8. GARF. F. 10265. Op. 1. D. 57. L. 197.

9. GARF. F. 10265. Op. 1. D. 57. L. 203.

10. GARF. F. 10265. Op. 1. D. 57. 207–208.

11. GARF. F. 10265. Op. 1. D. 57. L. 187.

12. GARF. F. 10265. Op. 1 55. L. 143.

13. GARF. F. 10265. Op. 1 55. L. 143

14. GARF. F. 10265. Op.1. D. 57. L. 46–55.

15. GARF. F. 10265. Op. 1. D. 57. L. 178.

16. GARF. F. 10265. Op. 1. D. 57. L. 191.

17. GARF. F. 10265. Op. 1. D. 57. L. 191.

18. GARF. F. 10265. Op. 1. D. 57. L. 204.

19. GARF. F. 10265. Op. 1. D. 57. L. 204.

20. GARF. F. 10265. Op. 1. D. 57. L. 199.
21. GARF. F. 10265. Op. 1. D. 57. L. 183.
22. GARF. F. 10265. Op. 1. D. 57. L. 183.
23. GARF. F. 10265. Op. 1. D. 57. L. 184.
24. GARF. F. 10265. Op. 1. D. 57. L. 183.
25. Bodrova E. V., Kalinov V. V. State scientific and technical policy in the period of the thaw: breakthroughs and causes inhibition //Journal of Russian technology 2017. Vol. 5. N. 5. P. 70–85. (in Russ.).
26. Bodrova E. V., Golovanova N. B., Kalinov V. V., Telegina E. A. Models of national innovation systems. M.: Publishing center of the Russian state University of oil and gas named I. M. Gubkin, 2015. 187 p. (in Russ.).
27. GARF. F. 10265. Op. 1. D. 57.L. 185.
28. GARF.F. 10265. Op. 1. D. 57.L. 185,187.
29. GARF. F. 10265. Op. 1. D. 57.L.197.
30. GARF. F. 10265. Op. 1. D. 57. 187.
31. GARF. F. 10265. Op. 1. D. 57. 207.
32. GARF. F. 10265. Op. 1. D. 57. 207.
33. GARF. F. 10265. Op. 1. D. 57. 207–208.
34. The decree of the President of the Russian Federation of July 11, 1991 №1 "On priority measures for the development of education in the Russian Federation" [Electronic resource] URL: <http://base.garant.ru/102690/#ixzz4ip75JTMe> (date accessed:25.06.2017). (in Russ.).
35. GARF, F. 10265. Op. 1. D. 57. L.228.
36. The law of the Russian Federation "About education" from 10.07.1992 №3266-1 (as amended on 24.04.2008) // Collection of laws of the Russian Federation: with amendments and additions on October 15, 2008 Moscow, 2008. P. 727–735; Law of the RF "On higher and postgraduate professional education" from 22.08.1996 №125 - FZ (ed. from 24.04.2008) // Collection of laws of the Russian Federation with changes and additions on October 15, 2008 Moscow, 2008. P. 750–764. (in Russ.).
37. "About the program of development of engineering education in Russia": the Decision of the Collegium of state Committee of higher education of Russia from 15.03.1995 N. 5/1 // Bulletin of high education of Russia. 1995. N. 7. S. 15. (in Russ.).
38. The resolution of the Ministry of science, higher school and technical policy of the Russian Federation dated 13.03.1992 "On the introduction of multilevel structure of higher education in the Russian Federation". [Electronic resource] // Information materials on education in the Russian Federation. URL: <http://www.education-docs.ru/node/54> (date accessed: 15.08.2017). (in Russ.).
39. Frolkina p. P. reform of the domestic higher school in the second half of the 1980s-1990-ies. Saratov: Publishing house Saratov GSEU. 2001. 529 p. (in Russ.).
40. The archives of the State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation (The state Duma). F. 10100. Op. 15 p-III. D. 39. L. 150.
41. Archive of the state Duma. F. 10100. Op. 15 p-III. D. 39. L. 152.
42. Archive of the State Duma. F. 10100. Op. 14. D. 2153. L. 40–41.
43. Dul'zon A. A. reform of higher education and higher education community //Engineering

education. 2017. No. 21. With. 9 – 12. (in Russ.).

44. Russian statistical Yearbook. M., Publ. Rosstat, 2008. P. 253-254. (in Russ.).

45. Vakhrusheva D. Diplomas on the wind // Difficulty. 2009. 3 Mar. (in Russ.).

46. Archive of the State Duma. F. 10100. Op.14. D. 3765. L. 5.

47. Vladimirov A. Circulation of BS in Russia // Social partnership. 2004. N. 4. P. 7–13. (in Russ.).

48. About the readiness of universities to "transition" (the round table of editors)//Higher education in Russia. 2011. N. 3. Pp. 105 –115. (in Russ.).

49. Savosin A. the Development of engineering education and technical training in Russia [Electronic resource]: presentation / Artem Savosin // MyShared.ru: portal presentations. – 2014.

[Electronic resource]. URL: <http://www.myshared.ru/slide/771583> (date accessed: 03.09.2017). (in Russ.).

50. Under the chairmanship of Vladimir Putin in the Kremlin hosted a meeting of the presidential Council on science and education. [Electronic resource]. URL: <http://www.kremlin.ru/news/45962> (date accessed: 24.08.2017). (in Russ.).

51. The resolution of the RF Government of 9 April 2010 No. 218 "On measures of state support of development of cooperation of Russian educational institutions of higher education, state scientific institutions and organizations implementing complex projects on high-tech production, in the framework of the programme "Institutional development of research sector" of the state program of the Russian Federation "Development of science and technologies" for 2013 - 2020" (with amendments and supplements) [Electronic resource]. URL: <http://base.garant.ru/12174931/>; The resolution of the RF Government of 9 April 2010 N 219 "On state support of innovative infrastructure development in Federal educational institutions of higher professional education" (with amendments and supplements) [Electronic resource]. URL: <http://base.garant.ru/12174942/>; Resolution of the Government of the Russian Federation from April 9, 2010 N 220 "On measures to attract leading scientists to Russian educational establishments of higher education, scientific institutions, subordinated to the Federal Agency of scientific organizations, state scientific centers of the Russian Federation in the framework of the programme "Institutional development of research sector" of the state program of the Russian Federation "Development of science and technologies" for 2013 – 2020" (with amendments and supplements) [Electronic resource]. URL: <http://base.garant.ru/12174930/> (accessed 10.10.2017) (in Russ.).

52. The President's address to the Federal Assembly on 4 December 2014. Electronic resource. URL: <http://kremlin.ru/news/47173> (date accessed: 19.09.2017). (in Russ.).

53. The development of engineering education [Electronic resource]. URL: //The Ministry of education. RF/projects/development-engineering-education (accessed 22.10.2017). (in Russ.).

54. The engineers would let me learn//[Electronic resource]. URL: <https://sibmama.ru/inginiiring-v-shkole.htm> (accessed 17.10.2017). (in Russ.).

55. The order of Department of education of the city of Moscow N. 561 of July 14, 2017 // [Electronic resource]. URL: <http://profil.mos.ru/images/docs/561.pdf> (accessed 29.10.2017). (in Russ.).

56. Ministry of Education – 2017: new challenges and new principles of governance / [Electronic resource]. URL: <http://profiok.com/about/news/detail.php?ID=4201> (accessed 17.10.2017). (in Russ.).

57. Vasilyeva O. U.: "The Task ahead is more than able to do." 07.08.2017 [Electronic resource]. URL: http://ruskline.ru/opp/2017/avgust/07/oyu_vasileva_zadach_vpered_i_bolshe_chem_udalos_sdelat/ (accessed 17.10.2017). (in Russ.).

58. Carlin E. Received a diploma. And then what? // The Federal Assembly. 2016. No. 25. // [Electronic resource]. URL: https://www.souzveche.ru/articles/the_view_from_moscow/31244/ (accessed 17.10.2017).

59. Passport approved priority project "Universities as centers of spaces of innovation" // [Electronic resource]. URL: <http://government.ru/news/25681/>; Problems of engineering education // [Electronic resource]. URL: <http://csr.ru/news/1867/> (accessed 17.10.2017).

60. Rebrin O. I. a New model for engineering education / I. O. Rebrin, I. I. Shalina // University management: practice and analysis. 2016. N. 2. Pp. 61–71.

61. About results of activity of the Ministry of education and science of the Russian Federation in 2016 and objectives for 2017 // [Electronic resource]. URL: http://минобрнауки.рф/новости/9834/файл/9062/ОЮВ_итоговая%20коллегия%202017_29%2003%2017.pdf (accessed 17.10.2017).

62. At the Military Academy of the General staff of the armed forces of the Russian Federation held a lecture of the Minister of Education and science of Russia O. U. Vasilyeva // [Electronic resource]. URL: <http://минобрнауки.рф/м/новости/10055/> (accessed 17.10.2017).

63. About results of activity of the Ministry of education and science of the Russian Federation in 2016 and objectives for 2017 // [Electronic resource]. URL: <http://минобрнауки.рф/документы/9754> (accessed 17.10.2017).

64. About results of activity of the Ministry of education and science of the Russian Federation in 2016 and the goals for 2017. The Minister of education and science of the Russian Federation O. Yu. Vasiliev // [Electronic resource]. URL: http://moodle.ginfo-edu.org:7777/PDF_W/%212017/SMI/minobr2017.pdf (accessed 17.10.2017).

65. Matveev S. U. Forming a new culture of communication, we will see the explosive growth of science and technology" // Kommersant Science. 2017.12.05. No. 3. // [Electronic resource]. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/3283554> (accessed 17.10.2017).

66. Problems of engineering education // [Electronic resource]. URL: <http://csr.ru/news/1867/> (accessed 17.10.2017).

67. Pokholkov U.P. Engineering education and the reproduction of engineering specialists: problems and experience // Engineering education. 2017. № 21. С. 4–5.

68. The quality of engineering education in Russia: materials of the expert. seminar: presentation / all-Russian. societies. org. Assots. ing. education of Russia. Tomsk. 2014 // [Electronic resource]. URL: http://aer.ru/files/ES_1.pdf, = (accessed 13.07.2016).

69. Bannikova, L.N. Boronina L.N., J. R. Wisniewski Engineering education and the reproduction of engineering personnel: practice and topical issues of Engineering education. 2017 no. 21. P. 19–23.

70. The development of education for 2013-2020: state program Grew. Federation: approved. the resolution of the Government Grew. Federation of 15 April. 2014 No. 295.

М. 2015]. 146 p. [Electronic resource]. URL: <https://cdnimg.rg.ru/pril/95/79/95/295>. (date accessed: 19.09.2017).

71. Vasilyev said about the "problem" with the humanitarian education in Russia. 22.11.2016 [Electronic resource]. URL: <https://ria.ru/science/20161122/1481938410.html> <http://csr.ru/news/1867/> (accessed 10.10.2017)

72. Resolution of the First all-Russian Congress of teachers of history in Russian universities. On November 16-17, 2017 Moscow. 2017. P.2. (in Russ.).

Об авторах:

Бодрова Елена Владимировна, доктор исторических наук, профессор, заведующий кафедрой истории Института экономики и права ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

Голованова Наталия Борисовна, доктор экономических наук, профессор, заместитель проректора ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About authors:

Elena V. Bodrova, D.Sc. (History), Professor, Head of the Chair of History, Institute of Governance and Strategic Development of Organizations, Moscow Technological University (78, Vernadsky Pr., Moscow, 119454, Russia).

Nataliya B. Golovanova, D. Sc. (Economics), Professor, Deputy Pro-rector, Moscow Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow, 119454, Russia).

Свидетельство о регистрации СМИ Эл № ФС77-65315 от 12 апреля 2016 г.

Дата опубликования 29 ноября 2017 г.

Московский технологический университет
119454, Москва, пр. Вернадского, 78.

<http://rtj.mirea.ru>