

ОБОРОННЫЙ КОМПЛЕКС — научно-техническому прогрессу России



- МАШИНОСТРОЕНИЕ
- ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКА
- ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
- СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ
И ИЗМЕРЕНИЯ



3'2020



Все новейшие достижения и современные разработки предприятий оборонного комплекса — в научно-технических журналах ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»

ФГУП «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас» является издателем следующих научных журналов:



Межотраслевой научно-технический журнал

Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России
(4 выпуска)

Подписной индекс **79379**

Издается с 1984 года



Межотраслевой научно-технический журнал

Конструкции из композиционных материалов
(4 выпуска)

Подписной индекс **80089**

Издается с 1981 года



Научно-технический журнал

Информационные технологии в проектировании и производстве
(4 выпуска)

Подписной индекс **79378**

Издается с 1976 года



Межотраслевой научно-практический журнал

Экология промышленного производства
(4 выпуска)

Подписной индекс **80090**

Издается с 1993 года



Научно-практический журнал

Вопросы защиты информации
(4 выпуска)

Подписной индекс **79187**

Издается с 1974 года

Все издания ФГУП "Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас»:

✓ включены решением ВАК Министерства образования и науки России в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук;

✓ метаданные выпусков включены в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Более подробную информацию об изданиях, подписке, дополнительных услугах можно получить по тел.: 8 (495) 491-43-17, 8 (495) 491-77-67, 8 (495) 491-77-20 (подписка);

факс: 8 (495) 491-44-80.

E-mail: izdanie@ntckompas.ru

3 (147) ОБОРОННЫЙ КОМПЛЕКС - научно-техническому прогрессу России

МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в 1984 г.

Москва 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Иващенко О. Б. Промышленное внедрение автоматизированных платформ бережливого производства: модели и методы 3

Пителинский К. В., Федоров Н. В., Минченко Ю. А., Алещенко А. А. Опыт применения финансовых технологий в РФ 10

Тараскин М. М., Зайцев Е. В. Моделирование автоматизированной информационной системы 19

МАШИНОСТРОЕНИЕ. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

Карнута Д. С. Вычисление безопасных параметров начала маневра легкомоторных самолетов с использованием нейронной сети 26

Волохин В. А., Гракович И. В., Кузнецов Н. П. Параметрические колебания в инженерном деле и проблемы их моделирования (Часть 1) 32

Попов И. П. Годографы суперпозиций вращений 41

ИЗМЕРЕНИЯ. ИСПЫТАНИЯ. КОНТРОЛЬ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

Плиплин А. А., Демин А. Н., Родионов А. В., Тюрин В. Ю. Методика оценки эффективности функционирования авиационных боевых комплексов военно-транспортных самолетов 46

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА И ОБОРУДОВАНИЕ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. РАДИОТЕХНИКА. ЭЛЕКТРОНИКА

Дудкина С. И., Шилкина Л. А., Андрюшин К. П., Андрюшина И. Н., Вербенко И. А., Резниченко Л. А. Особенности технологии производства мультikomпонентных пьезофункциональных сред для радиотехнических применений 50

Главный редактор

И. А. Шеремет, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., заместитель директора Российского фонда фундаментальных исследований по научной работе

Заместители главного редактора

Ю. А. Чаплыгин, академик РАН, д-р техн. наук, проф., президент, заведующий кафедрой «Интегральная электроника и микросистемы», МИЭТ

С. А. Матвеев, канд. техн. наук, начальник Центра автоматических космических систем и комплексов ФГУП "ЦНИИмаш"

Ответственный секретарь — К. В. Трыкина,

начальник отдела научных и информационных изданий ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»

Редакционная коллегия:

В. И. Борисов, академик РАН, д-р техн. наук, проф., научный руководитель — зам. генерального директора по научной работе ОАО «Концерн «Созвездие»; **Б. А. Григорьев**, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., акад. РАЕН, научный руководитель Центра исследований пластовых систем и технологического моделирования ООО «Газпром ВНИИГАЗ», зав. кафедрой «Исследование нефтегазовых пластовых систем» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина; **С. Ю. Желтов**, академик РАН, д-р техн. наук, проф., генеральный директор ФГУП «ГосНИИАС»; **И. А. Каляев**, академик РАН, д-р техн. наук, проф., директор НИИ многопроцессорных вычислительных систем ЮФУ (НИИ МВС ЮФУ); **В. М. Кашин**, чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., генеральный директор — генеральный конструктор ФГУП «Конструкторское бюро машиностроения»; **Ю. Н. Коптев**, д-р техн. наук, проф., председатель научно-технического совета Госкорпорации «Ростехнологии»; **Ю. И. Маевский**, д-р техн. наук, проф., генеральный конструктор систем и средств РЭБ — зам. генерального директора по инновациям и научной работе ОАО «Концерн Радиоэлектронные технологии»; **Б. В. Обносов**, д-р техн. наук, проф., действительный член РАН, генеральный директор — генеральный конструктор ОАО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение»; **В. В. Рыжаков**, д-р техн. наук, заслуженный деятель науки РФ, проф., профессор кафедры «Техническое управление качеством» Пензенского государственного технологического университета (Пенз. ГТУ); **Л. Г. Сидоренко**, д-р техн. наук, проф., чл.-кор. РАН, генеральный конструктор по специальной тематике ОАО «ЦКБ МТ «Рубин»; **П. А. Созинов**, д-р техн. наук, проф., генеральный конструктор ОАО «Концерн ПВО «Алмаз-Антей»; **Н. И. Турко**, д-р воен. наук, канд. техн. наук, заслуженный деятель науки РФ, проф., первый вице-президент Академии военных наук

Учредитель Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас»

Перепечатка материалов и использование их в любой форме, в том числе электронной, без предварительного письменного разрешения редакции не допускаются.

УДК 658.51

ПРОМЫШЛЕННОЕ ВНЕДРЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ПЛАТФОРМ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА: МОДЕЛИ И МЕТОДЫ

О. Б. Иващенко

АО «Федеральный центр науки и высоких технологий «Специальное научно-производственное объединение «Элерон», Москва, Россия

Исследованы автоматизированные (SOFT-решения) системы управления производством, а также мероприятия по развитию и продвижению систем бережливого производства в рамках повышения эффективности компаний. Проведен расширенный анализ базовых и интегрированных систем бережливого производства. На основе проведенного анализа разработана схема автоматизированной платформы бережливого производства общего вида. Обосновано предложение по формированию систем бережливого производства в комплексном плане параллельно-последовательным методом по ряду исследуемых задач и направлений.

Ключевые слова: автоматизированные системы управления, бережливое производство, системы управления развитием производств.

Построение эффективной платформы управления производством на основе интегрированных систем бережливого производства

Успешная конкуренция на рынке промышленных производителей с учетом возрастающей технологичности производств требует проведения мероприятий по совершенствованию подходов к управлению производством. Для производства продукции, отвечающей требованиям сегодняшнего дня по качеству, функциональности, срокам поставок и т. д., требуется систематический подход компаний к совершенствованию управления производственно-технологическим циклом. Данную задачу необходимо реализовывать комплексно параллельно-последовательным методом по целому ряду направлений:

- модернизация оборудования (методики ТО и сервиса в соответствии с действующими и внедряемыми технологическими циклами);
- внедрение новых технологий в производство;
- освоение новых (передовых) компетенций сотрудниками производства;
- совершенствование действующих технологических маршрутов по производимой продукции;
- разработка методик непрерывного производства (восстановление неисправного оборудования на этапе производства в целях недопущения срыва сроков поставок и снижения качества).

Иващенко Олег Борисович, начальник отдела.
E-mail: veknol@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25 июня 2020 г.

© Иващенко О. Б., 2020

Все указанные задачи входят в определение критериев эффективности, где находят свое отражение в задаче эффективного управления производством. С точки зрения конкурентоспособности предприятия определяющим критерием становится реализация планируемых (расчетных) показателей при минимальных затратах и потерях различного типа. В данной задаче только качественного выполнения текущих процессов оказывается недостаточно. Становится актуальной проработка мероприятий по введению на производстве своей системы непрерывного (постоянного) совершенствования, модернизации производственных и сопутствующих обеспечивающих/вспомогательных процессов. Передовые системы бережливого производства (БП) аккумулируют базовые методы и средства, системные решения, реализуемые в отраслях промышленности, и SOFT-решения. Если провести объединение всех необходимых элементов бережливого производства в единую автоматизированную платформу, то в общем виде ее можно представить так, как это показано на рисунке.

На представленном рисунке систематизированы все составные части современной платформы (SOFT-решения, интегрированные модели и базовые методы) с актуальными внутренними составными частями в каждой. Следует отметить, что спецификой отечественного машиностроения является создание технологий двойного назначения с потенциалом применения в перспективных образцах военной и гражданской техники [1, 2]. Зарубежный опыт развития национальных инновационных систем также свидетельствует о глубокой военно-гражданской интеграции процессов производства наукоемкой продукции машиностроения [3, 4].

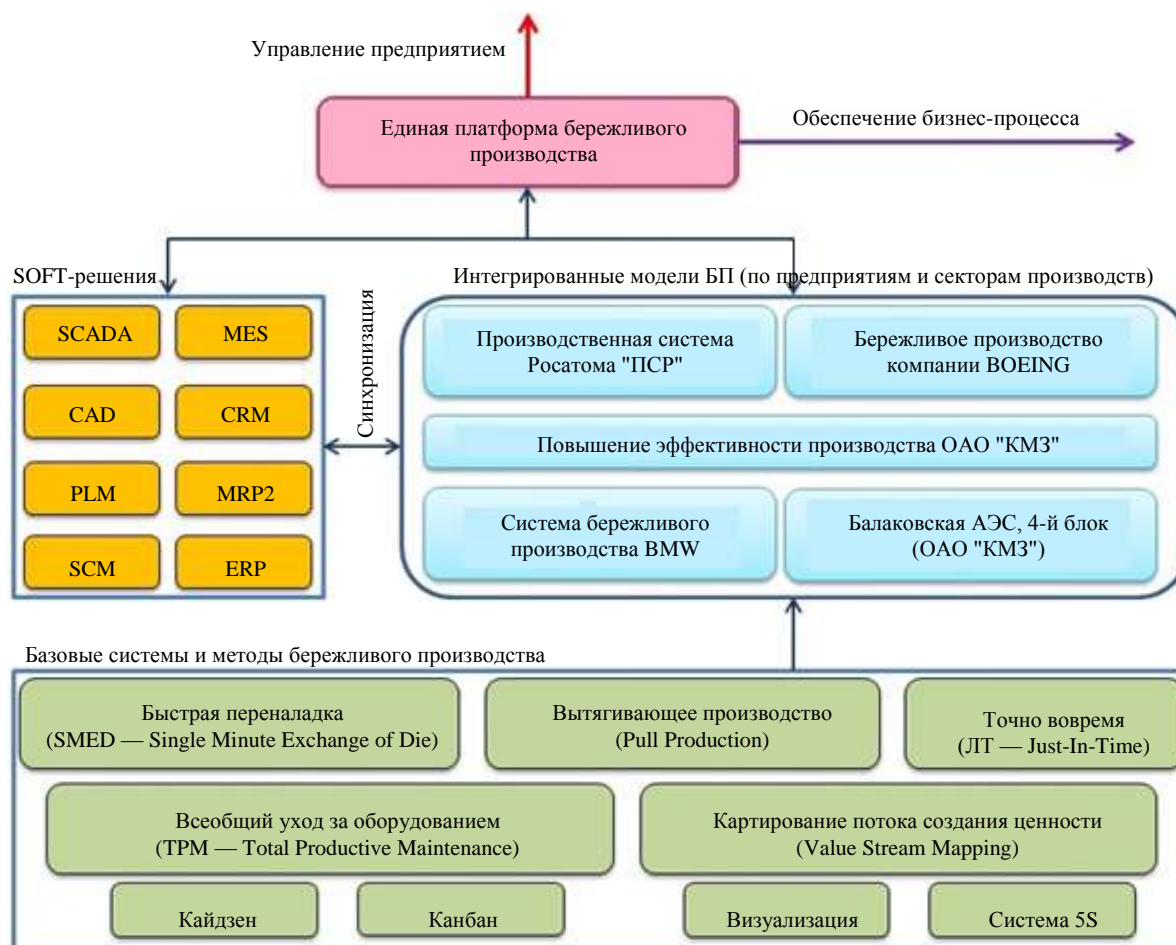


Рис. 1. Автоматизированная платформа бережливого производства общего вида (разработано автором)

Для углубленного понимания алгоритма построения данной платформы разберем ее по блокам и проработаем каждый узел и входную часть по сущности, структуре, назначению и т. д.

Автоматизированные системы (SOFT-решения) управления производством

Основоположником всех подобных систем является Тайити Оно, основатель и идеолог системы устранения потерь в компании Toyota. На принципах данной системы выстроен целый ряд концепций и подходов по совершенствованию производств, таких как Канбан, 5S, Кайдзен, SMED, Пока-Ёкэ и т. д. На современном уровне наряду со стремительным появлением новых технологий, позволяющих реализовывать передовые функциональные возможности в прикладном плане без глобального дорогостоящего перевооружения, вводят различные автоматизированные SOFT-системы, приведенные в табл. 1.

Как видно из характеристик, приведенных в табл. 1, каждая система реализует процесс автоматизации деятельности производства в рамках своего комплекса задач в целях увязки технологических и бизнес-процессов в единое целое. На уровне современного предприятия без учета специфики и вида производства единую автоматизированную платформу управления производством следует понимать как совокупность программных средств, интегрированных в производственную систему, выстроенную по элементам БП, где на верхнем уровне происходит объединение всего цикла реализуемых программно-аппаратных методов и средств.

С точки зрения административного управления эффективность деятельности производства определяют ERP-решения. Именно ERP-система позволяет согласовать все этапы производства от планирования требуемых ресурсов до отгрузки готовой продукции, т. е. охватить полный цикл в плане управляемости.

Таблица 1

Автоматизированные системы управления (SOFT-решения) (систематизировано автором)

Система	Характеристика	Примечание
SCADA [5]	Управление технологическим процессом (Supervisory Control And Data Acquisition). Применяют на производствах, где необходим онлайн-операторский контроль за соблюдением нюансов технологических процессов. Программная среда компасного плана в части обеспечения работы в режиме реального времени по типу "мониторинг"	Актуально применение на производствах с опасными веществами и других предприятиях, где требуется несколько уровней контроля соблюдения процессов
MES [6]	Оперативное управление производством (Manufacturing Enterprise Solutions). Программная среда для обеспечения функций согласования и координации работ на уровне цеха. Содержит расширения для реализации отдельных элементов оптимизации процесса за счет вычленения "узких" участков	Служит для автоматизации процессов, что отражается на времени производства и, как следствие, на себестоимости
ERP [7]	Система управления деятельностью производства (Enterprise Resource Planning). Программная среда управления балансом ресурсов предприятия. Содержит элементы управления трудовыми ресурсами	Подходит для дополнения системы 5S и последующей интеграции в широкий круг отраслей и производств. Частично позволяет на основе выдаваемых данных принимать управленческие решения по оптимизации отдельных элементов производства
CAD [8]	Известная в широких кругах программная среда автоматизации проектирования. Реализуется по широчайшему кругу направлений: от строительства до высокоточной схемотехники и электроники	В России известна под аббревиатурой САПР. Применяется повсеместно на промышленных предприятиях
CRM [9]	Административная среда для решения задач управления взаимоотношениями с клиентами	Служит для автоматизации методов взаимодействия с заказчиком на всех этапах производства (от момента выхода на сделку до поставки готовой продукции и последующего обслуживания)
SCM [10]	Программная среда для управления цепочками поставок	Несет логистические опции на этапах приобретения сырья и его перемещения по участкам производства
MRP2 [11]	Управление системой продаж, проработка элементов планирования и формирования графиков, основанных на расчетах текущей ситуации	Элемент менеджмента и административного управления
PLM [12]	Общее управление жизненным циклом производимой продукции	Административная опция общего вида

ERP-система является программной платформой верхнего уровня для многокомпонентных (сложноструктурных) производств, при внедрении которой достигают следующих эффектов:

- получение среза сведений по текущим производственным операциям (наличие сжатых, но подробных сведений позволяет оперативно прорабатывать мероприятия по совершенствованию технологических процессов), как оптимальный вариант — подбор системы совершенствования производственно-технологических операций на аппаратном уровне;
- контроль запасов для производства (всегда актуальное состояние на момент запроса);
- возможность отказа от методов календарного планирования, переход на цифровой метод;
- получение необходимого объема сведений для реализации более надежного процесса прогнозирования (за счет комплексности данных и их актуальности на момент запроса);

- среднесрочное высоконадежное планирование промышленных бизнес-целей и бизнес-задач производственной компании;

- повышение уровня автоматизации маршрутизации на участках производств.

Реальное достижение данных эффектов при внедрении на производстве описанных программных средств возможно при наличии на более низком уровне или при объединении на среднем уровне соответствующих профилю деятельности аппаратных платформ совершенствования производства.

Комплексная программно-аппаратная модель совершенствования производства позволит достичь следующих оптимизационных мероприятий:

- сокращение издержек производства;
- сокращение текущих складских запасов готовой продукции;
- сокращение запасов сырья, составных частей и материалов для производства продукции;

- совершенствование технологических процедур на серийных и массовых производствах (в результате сокращается время изготовления, что влияет на себестоимость и время поставки продукции и, как следствие, повышает конкурентоспособность компании);

- общее повышение производительности труда при сохранении требуемого качества;

- ускоренное введение новой продукции в серийное и массовое изготовление.

Стоит отметить, что автоматизация процессов на производстве в целях повышения управляемости в вопросах повышения эффективности может решаться только комплексно. Внедрение системы только верхнего уровня или автоматизация отдельных процессов не приведут к желаемому результату. Основой автоматизации является комплекс систем совершенствования производства по системе, отвечающей специфике производства и дорожной карте развития конкретной компании, отрасли, сектора, где средством достижения передовых позиций на профильном сегменте рынка являются координация и увязка всех внутренних взаимосвязей.

Развитие и продвижение систем бережливого производства в рамках повышения эффективности компаний

Идея систематизации принципов повышения эффективности производственной деятельности не нова. В Японии вопросами систематизации методов и средств повышения эффективности производственных процессов и операций занимаются более полувека, в США — более тридцати лет. На производствах российских компаний методы БП начали прорабатывать для внедрения и реализовывать в пилотных проектах в двухтысячных годах.

Двигаясь от известных практических примеров реализации методов БП в промышленной деятельности к теоретическим и методологическим основам, позволившим сформировать отдельные предложения и подходы в конкретно выстроенные парадигмы, необходимо выявить и систематизировать основных исследователей по данной проблематике. Авторы базовых подходов, на идеях которых формируют современные системы, платформы и программы, приведены в табл. 2. На основе их практических результатов и опыта строят основные методы и средства, применяемые в бережливом производстве.

Таблица 2

Исследователи, заложившие основные принципы БП (систематизировано автором)

Автор	Сущность метода
Тайити Оно [13]	Автор производственной системы устранения потерь в компании Тойота. Процесс производства выстраивают в единую цепочку с вычленением слабых мест. Далее идет внедрение механизмов устранения потерь на местах и прочих элементов из описанных инструментов других систем
Джеймс Вумек [14]	Выстраивал концепцию БП на основе результатов, полученных фирмой Тойота, с внедрением идеи совершенствования процессов производства для реализации программы конкурентоспособности на среднесрочную и долгосрочную перспективы
Майкл Вейдер [15]	В качестве системы БП предлагал интегрированную модель 5S+ Канбан+ Just In Time. Выделяя требуемые инструменты для конкретного производства, создают максимально эффективную систему БП, отвечающую специфике конкретного предприятия
Уильям Детмер [16]	Идея метода заключается в фокусировке на ликвидации разногласий в процессе производства, проработке согласованности расходов и их стоимости с качеством и сроками производства
Джеффри Лайкер [17]	Интегрировал подходы стандартная работа+5S+TPM+SMED в различные производства. Идеолог подхода комбинации систем БП с учетом специфики каждой отдельно взятой компании
Масааки Имаи [18]	Автор методики Гемба кайдзен, стремящейся реализовывать принципы БП с точки зрения повышения конкурентоспособности компании
Том Фабрицио, Дон Тэппинг [19]	Идеологи системы 5S, разработавшие принципы и методы устранения потерь на рабочих местах
Сигэо Синга [20]	В рамках формирования на предприятии подходов бережливого производства разработал элементы и механизмы формирования принципов быстрой переналадки оборудования (SMED) без значительных вливаний средств и глобального технического перевооружения производства
Деннис Хоббс [21]	Относил вопросы сбалансированности производственной линии к определяющему фактору бережливого производства. Реализовывал подходы Канбан в промышленность

Как видно из данных, представленных в табл. 2, многие ученые выступают за интеграцию различных систем и методов БП с учетом ряда следующих критериев:

- специфика вида и типа производства;
- текущие и перспективные задачи производства;
- соответствие условиям реализуемой дорожной карты;
- проработка собственных интегрированных программ БП, отвечающих актуальным условиям и требованиям сектора производства.

Далее рассмотрим реализуемые методы и механизмы БП. Для комплексного анализа актуально представить свод данных как по базовым разработанным системам, так и по интегрированным моделям, созданным отдельными компаниями и секторами производств. Стоит отметить, что все известные системы и подходы

в концепции БП формируют на базовых принципах, заложенных исследователями и приведенных в табл. 3. Дополнением является структуризация необходимых элементов БП и их адаптация под специфику конкретного производства, а также различные дополнения и новшества в рамках возрастающей технологичности производств. Такими элементами являются программные среды, элементы аналитических опций, заложенных на высокотехнологичных производствах, видеофиксация с функцией анализа событий и т. д.

Для детального исследования и анализа методов и средств, оказывающих положительный эффект на управляемость и совершенствование производства, структурированы данные по базовым подходам и передовым системам, выстроенным на лучших элементах из различных программ с добавлением специфики конкретной отрасли и типа производства.

Таблица 3

Базовые и интегрированные системы БП (систематизировано и структурировано автором)

Методы и средства	Описание
Базовые системы и методы бережливого производства	
Картирование потока создания ценности (Value Stream Mapping) [22–24]	Наглядно визуализирует текущие потоки и их состояние, проводит анализ оптимальности реализации потока. На основе получаемых данных возможно вычленение слабых мест для проработки мероприятий по совершенствованию и планированию более оптимальных процессов
Вытягивающее производство (Pull Production) [25]	Осуществляет взаимосвязи между потоками. Ключевой особенностью является проработка синхронизации между заказчиками операций разных уровней, где более низкий уровень производства не начинает изготовление без предварительного заказчика с четко обозначенным количеством изделий
Кайдзен [26]	Метод непрерывного совершенствования, основанный на административном механизме управления. Решает задачи взаимодействия административного характера (предложения по совершенствованию, вопросы качества и т. д.)
Канбан [27]	Система модернизации производственных цепочек за счет планомерного распределения нагрузки на участки производства. Преимуществом методики является недопущение перегрузки участков/цехов с оптимизацией процесса по времени
Система 5S [22, 23]	Производственная система, целью которой является совершенствование непосредственно рабочих мест как на самом производстве, так и в подразделениях обеспечения. Часто ее инструментарий заимствуют для других систем БП. Система включает мероприятия по сортировке, уборке, культуре на рабочем месте и по улучшению данных вопросов
Быстрая переналадка (SMED — Single Minute Exchange of Die) [24]	Реализует задачи переналадки оборудования и подручных средств производства за кратчайшее время. Внедрение подобных техник на производстве позволит в перспективе сократить время изготовления изделий серийного и массового производства, а также оперативно переналадить производственные линии под усовершенствованные изделия поточного производства
Всеобщий уход за оборудованием (TPM — Total Productive Maintenance) [28]	Элемент бережливого производства в части обеспечения сервиса производственного оборудования и сопутствующих средств производства. Отличительной чертой является возможность оперативного нахождения сбоев в работе оборудования и проведения своевременных качественных и оперативных мероприятий по их устранению
Точно вовремя (JIT — Just-In-Time) [29]	В концепции бережливого производства реализует функционал управления материалами. Имеет явно логистический уклон в части предоставления материалов в требуемом объеме и в требуемый срок. Способствует высвобождению складов и отсутствию перегрузки непосредственно участков на рабочих производственных местах
Визуализация [22, 23]	Универсальный элемент, входящий в ряд систем бережливых производств. Целью является наглядность достигнутых результатов и мероприятий, позволяющих повысить эффективность на местах с учетом специфики производства

Методы и средства	Описание
Интегрированные модели и системы БП (по предприятиям и секторам производств)	
Производственная система Росатома "ПСП" [22, 23]	<p>Интегрированная передовая платформа бережливого производства, объединившая в себе:</p> <ul style="list-style-type: none"> • инструменты системы 5S; • методы устранения потерь по системе компании Тойота; • картирование потока создания ценности (Value Stream Mapping); • визуализацию; • быструю переналадку (SMED — Single Minute Exchange of Die); • точно вовремя (JIT — Just-In-Time); • другие отдельные элементы из описанных методов и систем. <p>Являясь одним из наиболее сложных секторов производства, атомная отрасль в своей системе собрала лучшие элементы различных успешно внедряемых систем с их комплексной интеграцией на российские производства</p>
Балаковская АЭС, 4-й блок (ОАО "КМЗ") [22, 23]	Реализованы механизмы БП в процессе плановых работ по ремонту и модернизации энергоблока № 4. Данный комплекс работ реализовывали по системе ПРС в части механизмов оптимизации работ, снижения потерь и организации рабочих мест
Повышение эффективности производства ОАО "КМЗ" [22, 23]	Реализуемые мероприятия сводятся к повышению производительности труда за счет применения инструментов 5S, устранения потерь и отдельных элементов Канбан
Система БП немецкого автоконцерна (OPEL, AUDI, BMW) [30]	Реализован компасный механизм устранения потерь и оптимизации потоков. На конвейерах сборки продукции присутствуют методы точной подачи требуемых деталей без перегрузки рабочих мест, а также элементы для быстрой переналадки на модернизированные изделия
БП компании BOEING [31]	В своей сфере компания использует принципы устранения потерь на участках производства при конвейерной сборке. Также реализованы принципы своевременной подачи материалов и адекватной загрузки рабочих мест. Данная модель позволила значительно сократить время сборки отдельных лайнеров, что способствовало выходу на новые рынки сбыта продукции

Видно, что приведенные интегрированные модели отличает дополнение специфики отрасли к уже известным методам и средствам базового типа. Именно конфигурация актуальными эле-

ментами и дополнение, отражающее специфику производства, и приводят к желаемому эффекту — эффективному управлению и развитию производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Дроговоз П. А.** Концептуальное проектирование системы стратегического управления процессами военно-гражданской интеграции в высокотехнологичных отраслях машиностроения // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. "Машиностроение". 2011. № S4. С. 5—19.
2. **Садовская Т. Г., Дроговоз П. А., Куликов С. А., Стрельцов А. С.** Стратегическое управление процессами военно-гражданской интеграции высокотехнологичных предприятий в условиях глобализации экономики // Аудит и финансовый анализ. 2012. № 3. С. 325—344.
3. **Дроговоз П. А., Куликов С. А., Ралдугин О. В.** Национальные модели стратегического развития оборонной промышленности: зарубежный опыт и отечественная практика // Экономические стратегии. 2016. № 4. С. 20—37.
4. **Дроговоз П. А., Пасхина О. М.** Национальные инновационные системы в машиностроении: зарубежный опыт // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. "Машиностроение". 2011. № S4. С. 45—59.
5. Новостная площадка Хабр [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://habr.com/ru/hub/scada/> (дата обращения: 13.03.2020).
6. Государство, Бизнес, IT, TADVISER [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:MES-системы_-_функции_и_преимущества (дата обращения: 10.03.2020).
7. Консультант эффективность бизнес процессов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.trinion.org/blog/chto-takoe-erp-sistema> (дата обращения: 10.03.2020).
8. Мегаобзор [Электронный ресурс]. Режим доступа: — <https://megaobzor.com/Obzor-popul-rn-h-CAD-sistem.html> (дата обращения: 10.03.2020).
9. Новостная площадка Хабр [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://habr.com/ru/company/trinion/blog/249633/> (дата обращения: 11.03.2020).
10. Государство, Бизнес, IT, TADVISER (Supply Chain Management) — управление цепочками поставок (управление запасами) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:SCM> (дата обращения: 11.03.2020).
11. Корпоративный менеджмент [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.cfin.ru/vernikov/mrp/mrp2.shtml> (дата обращения: 11.03.2020).
12. Systems Engineering Thinking Wiki [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://sewiki.ru/PLM->

система (дата обращения: 12.03.2020).

13. Оно Т. Производственная система Тойоты. Уходя от массового производства. — М.: ИКСИ, 2005. — 192 с.

14. Вумек Д., Джонс Д. Бережливое производство. Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании. — М.: Альпина Бизнес Букс, 2009. — 473 с.

15. Вэйдер М. Инструменты бережливого производства. Минируководство по внедрению методик бережливого производства. — М.: Альпина Паблишер, 2015. — 151 с.

16. Ягофаров А. Как выбрать стратегию по реализации программы "Бережливое производство" // Методы менеджмента качества. 2013. № 12. С. 4—9.

17. Лайкер Д. ДАО Toyota. 14 принципов менеджмента ведущей компании мира. — М.: Альпина Бизнес Букс, 2009. — 402 с.

18. Манн Д. Бережливое управление: Бережливым производством // Стандарты и качество. 2009. — 208 с.

19. Сторож И., Ряковский С., Курлаев Н. Анализ применения концепции бережливого производства: российская и западная компании // Научное обозрение. 2016. № 6. С. 202—206.

20. Синго С. Изучение производственной системы Тойоты с точки зрения организации производства. — М.: ИКСИ, 2006. — 312 с.

21. Хоббс Д. Внедрение бережливого производства: практическое руководство по оптимизации бизнеса. — Минск: Гревцов Паблишер, 2007. — 352 с.

22. Академия Росатома, презентационные материалы [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ps-rosatom.ru/files/5C2.pdf> (дата обращения: 09.03.2020).

23. АО "Производственная система "ПСР" [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ps-rosatom.ru> (дата обращения: 11.03.2020).

24. Деловой портал "Управление производством" [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.up-pro.ru/specprojects/shkola-menedjera/kpcs-vsm.html> (дата обращения: 12.03.2020).

25. Бизнес-школа KOGIO [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://kogio.ru/knowledge/pull-production/> (дата обращения: 12.03.2020).

26. Справочник24 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://spravochnik.ru/menedzhment_organizacii/berezhlivoe_proizvodstvo/kayzen_berezhlivoe_proizvodstvo/ (дата обращения: 11.03.2020).

27. Деловой портал "Управление производством" [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.up-pro.ru/encyclopedia/kanban-sistema.html> (дата обращения: 09.03.2020).

28. Управление производством [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.up-pro.ru/encyclopedia/total-productive-maintenance.html> (дата обращения: 13.03.2020).

29. Деловой портал "Управление производством" [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.up-pro.ru/encyclopedia/just-in-time.html> (дата обращения: 14.03.2020).

30. Деловой портал "Управление производством" [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.up-pro.ru/library/production_management/systems/proizvodstvennye_sistemy_nemeckih_avtomobilnyh.html (дата обращения: 12.03.2020).

31. Деловой портал "Управление производством" [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.up-pro.ru/library/production_management/lean/boeing-lean.html (дата обращения: 13.03.2020).

INDUSTRIAL IMPLEMENTATION AUTOMATED LEAN PLATFORMS: MODELS AND METHODS

O. B. Ivashchenko

Joint Stock Company "Federal Center for Science and High Technologies "Special Scientific and Production Association "Eleron", Moscow, Russia

This article explores automated (SOFT solutions) production management systems, as well as measures to develop and promote lean production systems as part of improving the efficiency of companies. Extensive analysis of basic and integrated lean production systems was carried out. Based on the analysis, a scheme of an automated platform for lean general production was developed. The proposal for the formation of lean production systems in an integrated plan, a parallel-sequential method in a number of investigated tasks and directions is justified.

Keywords: automated control systems, lean production, production development management systems.

Bibliography — 31 references.

Received June 25, 2020

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ФИНАНСОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В РФ

К. В. Пителинский, канд. техн. наук; Н. В. Федоров, канд. техн. наук;

Ю. А. Минченко; А. А. Алещенко

ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», Москва, Россия

Рассмотрены виды финансовых технологий, тенденции их развития и влияние на различные субъекты экономики.

Ключевые слова: финансовые технологии, бесконтактные платежи, криптовалюта, блокчейн, P2P-кредитование, платежные системы, онлайн-платежи, традиционный банкинг.

Финансовые технологии (финтех) — отрасль, состоящая из компаний, использующих технологии и инновации, чтобы конкурировать с традиционными финансовыми организациями в лице банков и посредников на рынке финансовых услуг. К финтех относят многочисленные технологические стартапы и крупные состоявшиеся организации, старающиеся улучшить и оптимизировать предоставляемые ими финансовые услуги.

Существует мнение, что компании используют финтех, чтобы вытеснить с рынка финансовых услуг организации с традиционными технологиями. Однако это не совсем так. Финтех также активно поддерживает технологические стартапы, которые могут повлиять на оптимизацию рынка кредитных и платежных услуг. При этом большинство оказываемых услуг предоставляется полностью (или по большей части) через сеть Интернет. Это достаточно логично, поскольку, например, множество звонков заменяет один запрос в Google.

Финтех в жизни

Профессор Патрик Шуфель из школы управления Фрибур дал следующее определение понятия

Пителинский Кирилл Владимирович, доцент кафедры "Информационная безопасность".

E-mail: yekadath@gmail.com

Федоров Николай Владимирович, заведующий кафедрой "Информационная безопасность".

E-mail: fedorovnv31@mail.ru

Минченко Юрий Александрович, студент кафедры "Информационная безопасность".

E-mail: Glacimcinis@yandex.ru

Алещенко Анастасия Андреевна, студентка кафедры "Информационная безопасность".

E-mail: loir1998@mail.ru

Статья поступила в редакцию 26 декабря 2019 г.

© Пителинский К. В., Федоров Н. В., Минченко Ю. А., Алещенко А. А., 2020

тию финтех — это новая финансовая отрасль, которая применяет технологии для улучшения финансовой деятельности. Финтех — достаточно новая отрасль на рынке РФ, которая глубоко преобразовала повседневную жизнь. Так, теперь трудно обойтись без таких технологий, как "Сбербанк Онлайн", "PayPass", "QR code" и т. д.

В Интернете выделяют пять традиционных областей финансовых услуг, в которых сосредоточено большое количество инноваций (см. табл. 1).

Таблица 1

Области финансовых услуг в Интернете

Услуга	Состав услуги
Платежи и денежные переводы	Проверка идентичности и создание учетных записей, на которых можно хранить деньги (например, банковские счета), средства для пополнения и снятия денег (например, чеки и дебетовые карты) и системы безопасного обмена денег между различными сторонами
Заимствование и кредитование	Потребительские институты, которые собирают деньги от вкладчиков, а затем предоставляют кредиты заемщикам (например, кредитные карты, ипотека, автокредитование и т. д.)
Управление капиталом	Советники брокеров и инвестиционных менеджеров, которые предоставляют консультации по вопросам выполнения операций, связанных с финансовыми вложениями (например, инвестиции на фондовом рынке), а также ведут планирование в области пенсионных накоплений и недвижимости (например, пенсии и пособия)
Страхование	Страхование имущества юридических и физических лиц, страхование от несчастных случаев (например, страхование автомобиля, домовладельцев или медицинское страхование), страхование жизни и т. д.
Валюта	Национальные государственные единицы хранения ценности, расчетные единицы и средства обмена (например, доллар США, фунт стерлингов, евро и т. д.)

Во всех этих сферах есть и активно распространяются финтех, они уже стали естественными, их воспринимают как обыденность. Проанализируем состав и свойства каждой ветви финтех подробнее.

Платежи и денежные переводы давно автоматизированы и занимают секунды от момента отправки до момента получения денег адресатом. Основной спрос на данную технологию можно отметить среди банковских организаций. Крупные банки имеют собственные приложения, уровень развития которых полностью влияет на удобство оказываемых банком услуг. Для открытия вклада не надо ходить в банк для получения консультации, звонить по телефону. Все это есть в удобном мобильном приложении, которое экономит время клиента.

Необходимо признать, что экономия времени и сил — залог успешного развития финансового рынка, поскольку это экономит большое количество ресурсов.

Оформление кредитов стало простой и доступной операцией, так как кредитный специалист в данном бизнес-процессе теперь не лицо, самолично решающее вопрос о выдаче кредита, а лишь сборщик персональных данных и специалист по их вводу. Оценку рисков выполняет автоматизированная система кредитного скоринга, основанная на статистических данных, которая и принимает решение о выдаче кредита. Это экономит время, снижая количество очередей в банках и магазинах.

В сфере управления капиталами уже существует много сервисов для инвестиционных, биржевых организаций, позволяющих клиенту самому удаленно управлять финансовыми инструментами. Сложность биржевых спекуляций становится скрытой от человека, его деятельность сводится лишь к контакту с брокером, осуществляющим оптимальное вложение вверенных ему средств.

Валютные операции проводятся и онлайн, требуя от клиента минимального количества

действий, но доставляя ему максимум комфорта и внимания.

Электронная коммерция и финтех

Как уже было сказано, к областям финансовых услуг относятся валютные операции, платежи и денежные переводы, которые являются частью электронной коммерции (ЭК), т. е. финансовые или торговые транзакции и бизнес-процессы, связанные с этими транзакциями, осуществляемые через Интернет. ЭК включает в себя такие виды электронной деятельности, как обмен информацией, движение капитала, торговля, деньги, маркетинг, банкинг, страховые услуги. Она является объектом регулирования различных международных организаций: ООН, Всемирной организации интеллектуальной собственности, Всемирной торговой организации, Международной торговой палаты, Конференции ООН по торговле и развитию, Организации экономического сотрудничества и развития и т. д. Результатом деятельности этих организаций стали разработка и принятие типовых нормативно-правовых актов, которые являются основой правовой регламентации международных коммерческих отношений в электронной среде.

По сегменту потребителей в ЭК выделяют три основные группы (см. табл. 2).

Примерами электронной торговли и электронных денег являются интернет-магазины и виртуальные кошельки. Основная особенность всех систем виртуальных кошельков состоит в том, что это некая система обмена долговыми обязательствами. Каждый раз, когда вы через терминал кладете свои деньги на счет, вы как бы даете в долг той организации, которой они перечисляются. Теперь сумма на вашем счете — это размер долга организации. Каждый раз при переводе денег на счет другого человека вы уменьшаете свой долг и повышаете долг для хозяина счета.

Таблица 2

Группы потребителей в ЭК

Группа	Состав группы	Пример
B2B: "Бизнес для бизнеса"	Оба участника — коммерческие предприятия. Одна компания использует электронный способ заказа у своих поставщиков и электронный способ осуществления платежей	Предприятие-производитель смартфонов ищет оптовиков для сбыта своих товаров (Apple и re:Store)
B2C: "Бизнес для клиента"	Предполагает продажу товара потребителям в Интернете	Интернет-магазин продает товары обычным потребителям (ozon.ru)
C2C: "Потребитель для потребителя"	Обеспечивает торговлю между физическими лицами. Представляет собой интернет-площадки, на которых люди продают и покупают товары друг у друга	Пользователи соцсетей открывают торговые группы, где продают товары. Торговые интернет-площадки ("Юла", "Авито", "Авто.ру" и т. д.)

Рассмотрим, в частности, такую технологию финтех, как виртуальные кошельки, пользующиеся популярностью в РФ (рис. 1).

В ноябре 1998 г. открылся электронный кошелек WebMoney. Его статистику можно узнать на официальном сайте. Статистика по годам дана

на рис. 2. На 2019 г. количество зарегистрированных аккаунтов превысило 40 млн, выполнено более 180 млн транзакций объемом 17 млрд долл.

На основе отзывов пользователей можно составить список достоинств и недостатков данного кошелька (см. табл. 3).

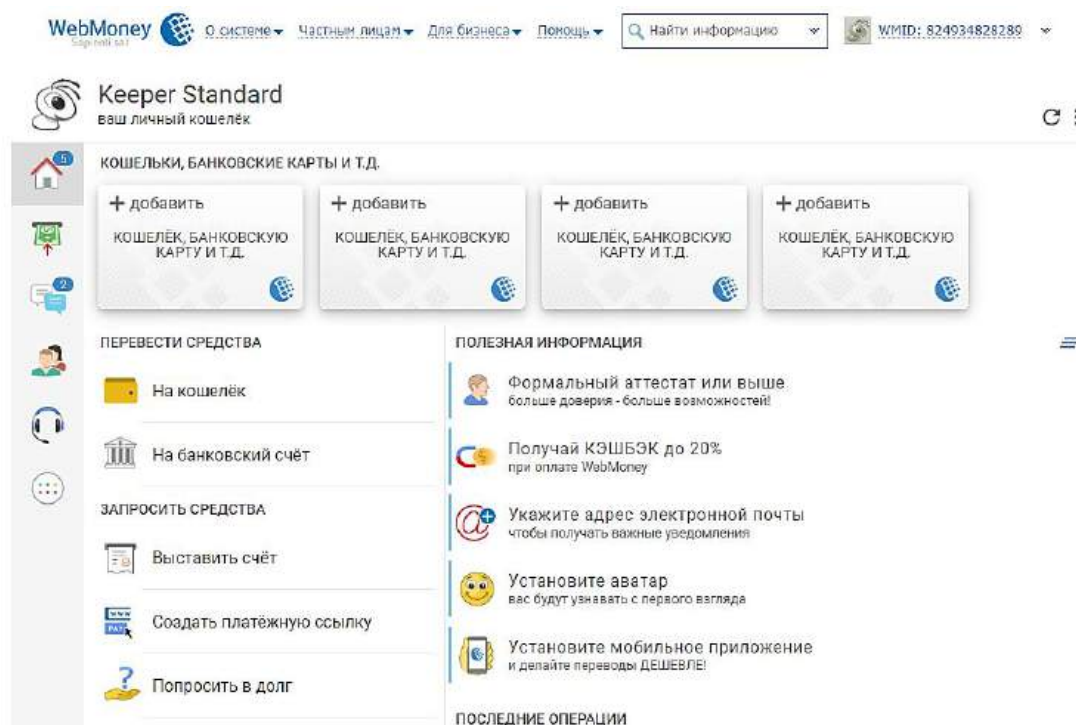


Рис. 1. Основной интерфейс (<https://www.webmoney.ru/>)

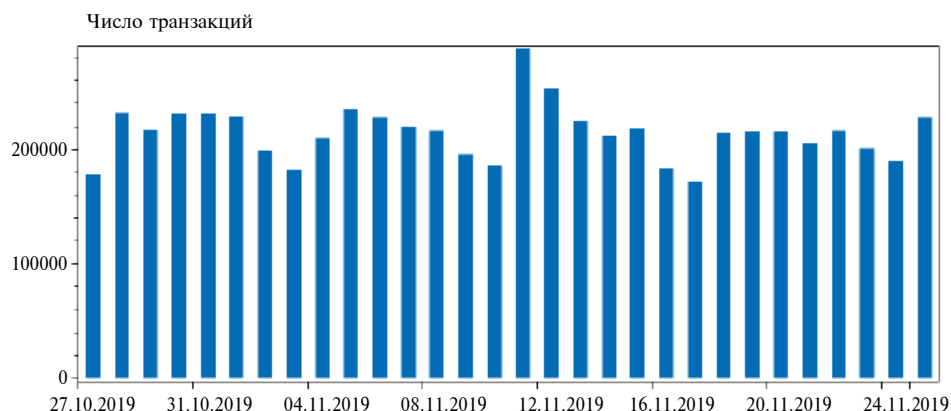


Рис. 2. Число транзакций сервиса WebMoney за месяц [1]

Таблица 3

Функциональные характеристики сервиса WebMoney

Достоинства	Высокий уровень безопасности; мобильность (доступ к кошельку может осуществляться через сайт, мобильное приложение, desktop-приложение или социальные сети); мультивалютность; вывод денег можно осуществлять через платежные терминалы, банковские карты, мобильные телефоны, почтовые переводы и другие платежные системы; адаптивность (сервис "Арбитраж", помогающий решать конфликты между владельцами кошельков)
Недостатки	Неограниченные права администрации; сложная аттестация кошелька; необходимость предоставления персональных данных; сложный интерфейс; множество комиссий с высоким процентом; медленная служба поддержки

В РФ в 2008 г. открылся Qiwi кошелек (рис. 3). На 2019 г. число его активных пользователей превысило 20,3 млн. Объем платежей 914 млрд руб., 152000 терминалов. Платежный сервис Qiwi — универсальная система. Пользователи могут совершать такие операции, как оплата мобильной связи, домашнего Интернета, телевидения, онлайн-игр, ЖКХ и покупок в Интернет-магазинах. Его характеристики приведены в табл. 4.

Сервис Яндекс.Деньги возник в 2002 г. (рис. 4). В силу непрозрачности компании Яндекс трудно найти действительные показатели сервиса. Из сторонних источников известно, что он насчитывает более 46 млн пользователей. Сервис Яндекс.Деньги выпускает собственные пластиковые и виртуальные карты и имеет уже более 800 тыс. пластиковых и 17 млн виртуальных карт. Его характеристики приведены в табл. 5.

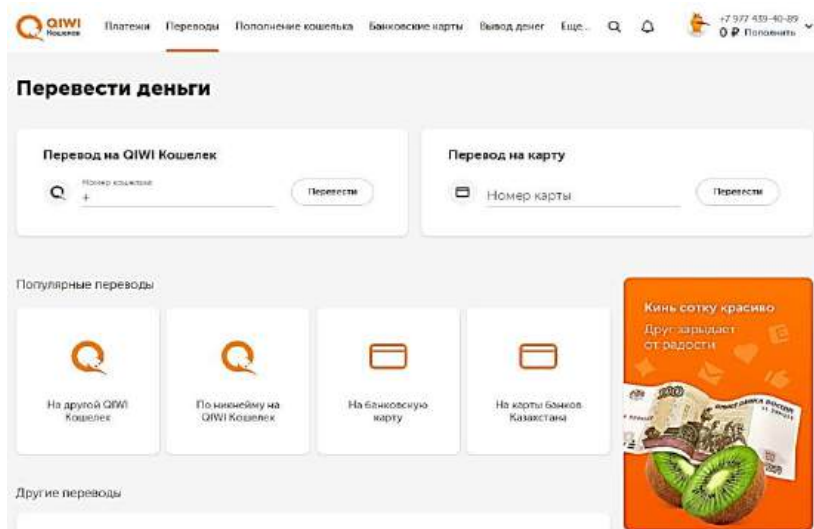


Рис. 3. Интерфейс сервиса Qiwi кошелек (<https://qiwi.com/>)

Функциональные характеристики сервиса Qiwi

Таблица 4

Достоинства	Небольшая комиссия за операции или ее отсутствие; номер кошелька привязан к номеру мобильного телефона; возможность подтверждения транзакций без доступа в Интернет; возможность анонимной работы; мировая распространенность
Недостатки	Ограниченное количество способов вывода денег; лимит на разовые транзакции; автоматическое удаление кошелька со списанием средств при его длительном неиспользовании; блокирование кошелька при потере sim-карты

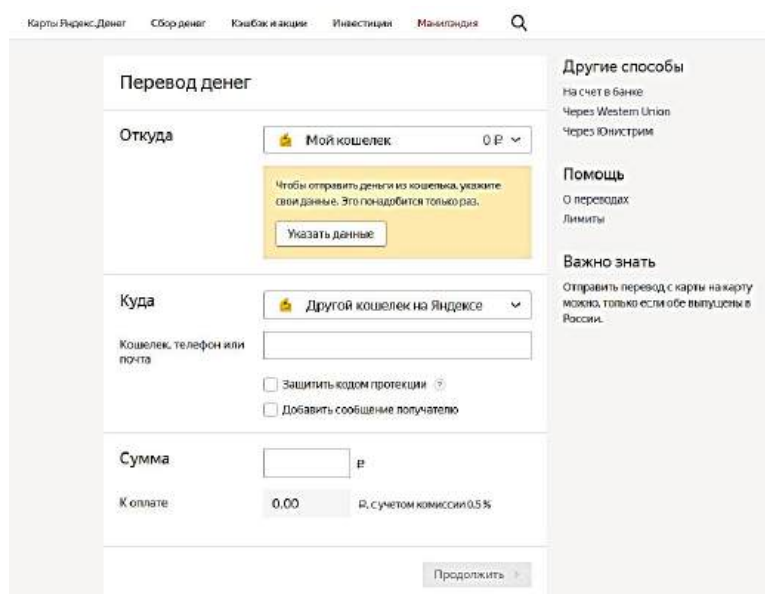


Рис. 4. Интерфейс сервиса Яндекс.Деньги (<https://money.yandex.ru/>)

Таблица 5

Функциональные характеристики сервиса Яндекс.Деньги

Достоинства	Осуществление платежей и переводов без открытия электронного кошелька; широкая распространенность (система работает почти со всеми интернет-магазинами); оплата налогов, штрафов, коммунальных услуг и т. д.; переводы без процентов с привязкой карты
Недостатки	Невозможность использования коммерческими организациями; высокая комиссия на снятие денежных средств; отсутствие кредитования

Направления развития электронной коммерции

Приведенные статистические значения показывают, что сервисы, предоставляющие услуги виртуальных платежей и переводов, имеют достаточно большую аудиторию в РФ. В этом нет ничего удивительного, так как данный инструмент предоставляет возможность для быстрой, удобной и надежной оплаты государственных услуг или интернет-заказов. Для жителей отдаленных районов РФ наличие подобной технологии особенно актуально, поскольку распространенность и доступность банков и центров предоставления государственных услуг в сравнении с крупными городами невелика.

Обороты и масштабы развития ЭК и всей цифровой экономики в целом поражают, учитывая, что до недавнего времени данная отрасль финтех состояла из нескольких стартап-проектов. Согласно статистическим данным, приведенным в журнале ЕУ, РФ находится на третьем месте по уровню проникновения финтех-услуг в целом, а в секторе ЭК является мировым лидером [2].

Цифровая экономика и электронная коммерция ярко проявляются во всех аспектах жизни. Уже сейчас существует понятие "электронное правительство", которое подразумевает набор технологий и организационных мер для сетевого взаимодействия государства, граждан и всех субъектов экономики. Примером может служить портал государственных услуг РФ (<https://www.gosuslugi.ru/>).

Правительство активно развивает все отрасли цифровой экономики. К 2024 г. планируется увеличить количество выпускников высшего и среднего образования по информационным технологиям до 800 тыс. человек в год, а также повысить процент населения с цифровыми навыками до 40 %, увеличить количество жилья с доступом в Интернет со скоростью 100 Мбит/с и выше до 97 %, организовать во всех городах с

населением 1 млн человек и более покрытие 5G, повысить количество успешных проектов в сфере цифровой экономики до 30 % [3].

Финтех активно используют и лидеры бизнеса. К примеру, госкорпорация "Ростех" активно принимает участие в нацпроекте "Цифровая экономика". В рамках данного проекта корпорация помогает развивать и распространять такие технологии, как блокчейн, Интернет вещей (IoT) и 5G-покрытие [4]. Компания "Российские железные дороги" уже в 2019 г. планирует потратить около 40,5 млн руб. на проект по мониторингу смарт-контрактов грузовых перевозок на блокчейне [5]. В начале 2018 г. представитель федеральной антимонопольной службы РФ на заседании Оргкомитета XIV Всероссийского форума-выставки "Госзаказ — за честные закупки" поднимал тему заключения смарт-контрактов и использования технологии блокчейн для государственных закупок [6].

Смарт-контрактами называют компьютерный протокол, предназначенный для упрощения, проверки или обеспечения выполнения переговоров или исполнения контракта в цифровом виде. Смарт-контракты позволяют совершать заслуживающие доверия транзакции без участия третьих лиц. Эти транзакции отслеживаются и необратимы. Видится перспективным применение технологии смарт-контрактов для реализации сделок как между предприятиями, так и между частными лицами. Принцип работы смарт-контракта приведен на рис. 5, а его достоинства и недостатки указаны в табл. 6.

№ шага	Действия
1	Заключается договор, который вносится в АСУ предприятия для выполнения транзакции
2	Договор направляется в информационно-коммуникационную сеть
3	Выполняется проверка договора узлами ПК, образующих компьютерную сеть
4	При выполнении всех оговоренных условий система одобряет статус и проведение транзакции
5	Корректность выполнения операций отслеживает программное обеспечение смарт-контракта
6	После проведения транзакции условия договора хранятся в АСУ предприятия
7	При верном исполнении всех операций обе стороны приобретают то, что прописано в договоре
8	Смарт-контракт считается выполненным
9	Если надо разорвать старый договор и составить новый, вначале создается новая запись о разрыве, а затем формируется новый договор

Рис. 5. Алгоритм работы смарт-контракта [7]

Таблица 6

Достоинства и недостатки смарт-контрактов

Достоинства	Скорость выполнения; независимость; надежность данных; исключение ошибок; экономия расходов
Недостатки	Отсутствие правового регулирования; сложность реализации; невозможность изменения

Технология блокчейн (рис. 6) изначально создана для реализации криптовалюты bitcoin. Однако из-за своей уникальности она получила популярность и в других сферах. На данный момент блокчейн используют во многих направлениях ЭК. Технология представляет собой средство для хранения и передачи данных. Сами данные хранятся в связанной цепочке блоков, в которых находится хеш, построенный на основе самих данных, хеша предыдущего блока, суммы всех предыдущих транзакций и случайного числа. Помимо хеширования в технологии блокчейн используют такие разделы криптографии, как шифрование данных и цифровые подписи, основанные на схемах с открытым ключом (RSA, схемы на основе эллиптических кривых и т. д.) [8].

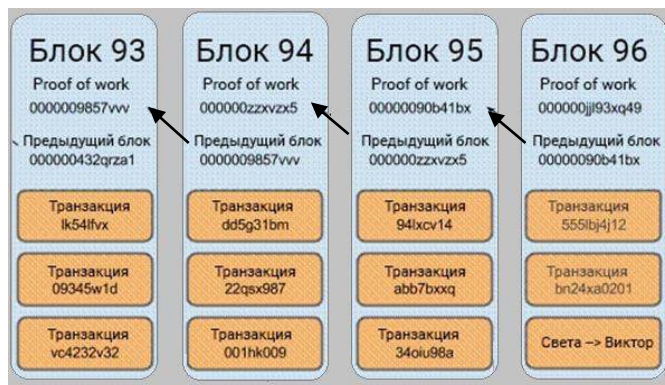


Рис. 6. Технология блокчейн при верификации платежей в сети Bitcoin [9]

Помимо всего прочего основными направлениями цифровой экономики и электронной коммерции остаются правовое регулирование, электронное взаимодействие, обеспечение безопасности и устойчивости применения финтех, развитие цифровых технологий на финансовом рынке.

Практические проблемы применения финтех

К сожалению, финтех, решая старые проблемы, неизбежно порождает новые. Развитие финтех в современном обществе ведет в первую очередь к снижению рынка занятости. Отпадает потребность в финансовых специалистах, консультантах, сотрудниках call-центров и прочих должностях, которые достаточно распространены. Всех их заменят искусственные интеллектуальные системы, что приведет к значительному сокращению штата финансистов. Следует отметить, что человека все же нельзя полностью заменить искусственным интеллектом.

Каждый сталкивался с нынешними автоматизированными call-центрами: "Если у Вас вопрос

по ..., нажмите 1, если у Вас вопрос по ... нажмите 2". Подобную технологию практикуют банки, сотовые операторы и прочие коммерческие организации, получающие огромное количество ежедневных звонков. С одной стороны, это помогает отсеять клиентов, которые найдут ответы на свои вопросы в автоматизированной системе, но с другой стороны, это ничем не лучше долгого ожидания ответа специалиста, только вместо привычного ожидания — прослушивание записи и периодическое нажатие клавиш. Часто встречаются ситуации, когда подлежащая решению проблема отсутствует в списке предложенных. Пока в подобных ситуациях приходится прослушивать всю запись, ожидая переключения на "живого" специалиста, чтобы изложить проблему и получить "человеческое" понимание для ее скорейшего решения. Тем не менее с точки зрения теории массового обслуживания применение автоматизированных call-центров в своей массе оправдано, поскольку статистически невелико число клиентов с трудными вопросами.

К сожалению, информативное человеческое объяснение отходит на задний план, люди постепенно отходят от живого общения, переходя на типичные запросы, что приводит к потерям клиентов, которые еще привыкли к системе традиционного обслуживания.

Вместе с развитием технологий появляются и новые изощренные виды преступлений. Технологии порождают не только способы упрощенного получения каких-либо благ, но также упрощают и мошеннические схемы по отъему их у потребителей. Преступления в ИТ-сфере развиваются так же бурно, как и ИТ-технологии. Главы финансовых организаций уверяют своих клиентов, что их автоматизированные системы несут в себе только положительные аспекты, повышая уровень безопасности хранимых активов и персональных данных клиентов, однако это далеко не так (особенно в РФ). Известно множество случаев краж БД, перехватов денежных операций, онлайн-краж с клиентских счетов и других преступлений. Их масштаб и технологичность будут неуклонно расти вместе с развитием финтех.

Развитие финтех в настоящем и будущем

Еще в 2015 г. по всему миру в финтех было инвестировано 25 млрд долл. Тогда это породило массовые иллюзии того, что вскоре общество отойдет от традиционной банковской сферы. Однако те, кто скажут, что финтех — это явление современное, ошибутся. В XX в. наблюдались две волны финтех: в первую очередь он ознаменовался появлением банкоматов и систе-

мы SWIFT в 1960—1970 гг., а 1990 гг. породили онлайн-банкинг.

Сегодня все инновационные и иные бизнес-процессы идут значительно масштабнее и интенсивнее, чем раньше, поскольку с каждым днем появляются новые технологии, меняющие мир. Так, объем инвестиций в финтех в 2018 г. составлял 39,57 млрд долл., что превышает результат 2017 г. на 120 % (рис. 7).

- 3,1 % искусственный интеллект (1)
- 4,4 % B2B Финтех (2)
- 2,5 % банковские технологии (3)
- 5 % блокчейн (4)
- 5,7 % криптовалюта (5)
- 6,7 % страховые технологии (6)
- 11,2 % инвестиционные платформы (7)
- 10,7 % кредитование (8)
- 0,4 % необанки (9)
- 4,2 % платформы онлайн-финансирования (10)
- 11,5 % остальные (11)
- 19,1 % платежи (12)
- 4,8 % управление частным капиталом (13)
- 1,9 % регулярные технологии (14)
- 2,3 % денежные переводы (15)
- 4,2 % борьба с мошенничеством и аутентификация (16)

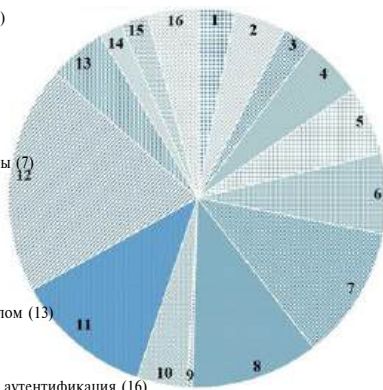


Рис. 7. Финансирование сегмента финтех в мире [10]

По мнению аналитиков "Ассоциации развития финансовых технологий", в будущем финтех претерпит глубокие изменения (создание онлайн-банков, P2P-кредитование, онлайн-кредитование, платежи, краудфандинг, агрегирование и электронное управление активами и т. д.). В этом плане развитие финтех в РФ происходит быстро. По мнению специалистов "Сбербанка", объясняется это тем, что западные стартапы в области финтех направлены на построение глобальных изменений (прорывные технологии), не дающих быстрого эффекта, тогда как отечественные разработки ориентированы на малые изменения, которые за счет кумулятивного и синергетического эффектов в совокупности и становятся финтех.

Несомненно, что на финансовом рынке РФ присутствует много банков, которые пользуются финтех, но лидируют в этой области только два банка: "Тинькофф банк" и "Сбербанк". "Тинькофф банк" активно следит за международным развитием финтех, перенимая их и воплощая в отечественных реалиях. Так, по оценке аналитиков "Тинькофф банка", около 25 % всех инвестиций в финтех в последнее время вкладывается в онлайн-платежи. Например, в Китае этим занимаются крупные интернет-компании, а не банки. Также все технологии, связанные с кредитованием (таким, как P2P), отдают предпочтение именно новым компаниям, а не банкам. По-видимому, монополия банков по осуществ-

лению онлайн-платежей вскоре отойдет на задний план, поскольку их деятельность относительно медленная, неудобная и дорогая.

Эта ситуация порождает следующий вопрос: как физическое или юридическое лицо либо государственный орган сможет доверить свои онлайн-платежи частным организациям? Данная тенденция пока практикуется только на Востоке, там она реализована достаточно успешно, поскольку жестко выполняются требования закона. В случае прихода на рынок РФ частных организаций, несомненно, возникнут проблемы с сохранностью переводов и с их информационной защитой. Также под вопросом будут процессы аккредитации и лицензирования физических и юридических лиц. Все это пока порождает недоверие и много вопросов к конкретным реализациям финтех. Менталитет россиянина традиционен: если нужны деньги, то надо обращаться в банк, если необходимо совершить денежный перевод, то также надо обращаться в банк (не смотря на время перевода, проценты и т. д.). Новшество, предлагаемое финтех, в том, что новый сервис будет более доступным и быстрым. Это и заинтересует широкие массы населения РФ.

Статистика показывает, что еще 10 лет назад банковскими онлайн-сервисами пользовалось только 26 % россиян. Сейчас этот показатель увеличился до 75 %, однако на фоне международных тенденций это выглядит не впечатляюще. Вместе с тем у финтех в РФ есть и свое уникальное направление: тенденция к уходу от формирования организационно-штатных структур финтех на местах. Например, "Тинькофф банк" — один из самых популярных банков РФ — работает совершенно без отделений: все его работники являются сотрудниками call-центра, а все операции клиент может самостоятельно произвести через сайт или приложение. Интересно, что "Тинькофф банк" работал без банкоматов и только в конце 2017 г. установил их большое количество. Банкоматы уже считают пережитком традиционной платежно-финансовой системы, но пока технология удобнее, чем система перевода бумажных накоплений в цифры через банковское приложение, еще не создана.

Может быть традиционный банкинг не так хорош и весь финтех иллюзия? Пока однозначно на этот вопрос никто не может ответить. Однако Центробанк РФ не только позитивно отреагировал на финтех, но и активно стимулирует их развитие. В 2017 г. Центробанк активно занялся разработкой стратегии своей деятельности в сфере финтех и определил две новейшие ИТ-сферы: регуляторные и надзорные технологии, развитию которых планирует уделять

наибольшее внимание (для роста банковских и межбанковских отношений, позитивно влияющих на банковскую политику РФ). При этом от уровня информатизации, технической подготовки и совокупности всех прочих банковских ресурсов зависит прочность единой банковской системы РФ, что позволит минимизировать мошенничество в банковской сфере (и в будущем, возможно, значительно сократит количество банковских преступлений).

Для повышения эффективности финтех постоянно ведут научные исследования и работы по созданию и изменению законодательства, проводят конференции, реализуют образовательные проекты. Развитие данной отрасли в РФ определяется не только "традиционными" банками, но и стремительно растущими финансовыми организациями нового типа. Развитие финтех поддерживает "Ассоциация развития финтех", которая создает условия для глубокой цифровизации экономики РФ (разрабатывая и внедряя новые технологические решения для обеспечения развития финансового рынка РФ). Специалисты ассоциации проводят исследования, которые не просто обобщают международный опыт, но и выделяют фундаментальные тенденции, формирующие оригинальные инновационные технологии. Необходимость выбора приоритетных направлений развития финтех, реализация собственных проектов и проектов других организаций, координация разработки программного обеспечения, стандартов, платформ, протоколов и т. д. — всем этим теперь занимаются не только банковские организации, но и множество частных организаций. Отмеченные мероприятия нацелены на полный охват всех сфер человеческой деятельности. Скоро технологии, подобные финтех, будут внедрены и в других областях жизни общества.

Заключение

Необходимо признать, что финтех — это уже сложившаяся реальность. Эти технологии облегчают повседневную жизнь, и хотя сейчас еще сложно представить, какие конкретно изменения произойдут далее в социально-экономической сфере, они обязательно произойдут. Например, инженер Интернет-магазина Влад Зайцев зашил себе в руку NFC-чип, опубликовав ход операции на сервисе YouTube. Данное устройство энтузиаст использует, чтобы зайти в свой офис и оплатить проезд в городском транспорте Москвы [11].

Традиционное ведение финансовых отношений все больше отходит на задний план, поскольку организации стремятся к упрощению всех своих бизнес-процессов для создания более доступной финансовой площадки для своих гетерогенных клиентов. В финтех инвестируется огромное количество денежных средств, т. к. во всем мире инвесторы осознают, что хотя спрос на подобные технологии только появился, в будущем он станет повсеместным и постоянным. Поэтому подготовительные работы по внедрению финтех ведут на коммерческом и законодательном уровнях, а законодательные органы разных стран активно обсуждают введение новой правоприменительной практики. Будущие финансовые институты будут конкурировать не посредством банковских организаций, предлагающих больший процент по вкладу или меньший по кредиту, а через коммерческие организации, ведущие свой бизнес на инновационных принципах. Можно с уверенностью сказать, что финтех — это будущее, которое уже наступило, и мы уже в нем живем (правда, еще полностью не осознав этого факта).

ЛИТЕРАТУРА

1. Официальный сайт электронной системы расчетов WebMoney [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.webmoney.ru/rus/information/statistic/index.shtml> (дата обращения: 20.12.2019).
2. Журнал EY. Индекс Проникновения услуг финтех 2019 [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-fai-2019-rus/\\$FILE/ey-fai-2019-rus.pdf](https://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-fai-2019-rus/$FILE/ey-fai-2019-rus.pdf) (дата обращения: 20.12.2019).
3. Программа "Цифровая экономика Российской Федерации" [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB79I5v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf> (дата обращения: 20.12.2019).
4. Официальный сайт компании Ростех [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rostec.ru/media/pressrelease/chemezov-otchitalsya-pered-prezidentom-rossii-o-klyuchevykh-itogakh-raboty-goskorporatsii-ros/> (дата обращения: 20.12.2019).
5. Новостной портал TADVISER [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.tadviser.ru/index.php> (дата обращения: 20.12.2019).
6. Официальный сайт федеральной антимонопольной службы [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://fas.gov.ru/publications/14342> (дата обращения: 20.12.2019).

7. Пителинский К. В., Александрова А. В. Смарт-контракты: состав и принцип работы: сб. статей XIX Междунар. науч.-прак. конф. "International innovation research". Пенза. 12.12.2019. — Пенза: МЦНС "Наука и просвещение", 2019. С. 116—118. <https://elibrary.ru/item.asp?id=41490932>.
8. Бутакова Н. Г., Федоров Н. В. Криптографические методы и средства защиты информации: учеб. пособие. — СПб.: ИЦ "Интермедия", 2016. — 384 с.
9. Информационный ресурс Cryptionisation. Blockchain для чайников. Технология блокчейн простыми словами [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cryptionisation.ru/chto-takoye-blokcheyn-prostymi-slovami/> (дата обращения: 20.12.2019).
10. Информационный ресурс Medici. To Understand the Future of the Financial Services Industry, We Must Look Beyond FinTech [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://gomedici.com/understand-future-of-financial-services-industry/> (дата обращения: 20.12.2019).
11. Новостной портал medialeaks [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://medialeaks.ru/1006stas_cyber/ (дата обращения: 20.12.2019).

EXPERIENCE IN APPLYING FINANCIAL TECHNOLOGIES IN RUSSIA

K. V. Pitelinsky, N. V. Fedorov, Yu. A. Minchenko, A. A. Aleshchenko
Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

Types of financial technologies, tendencies of its development and influence on various subjects of economy are considered.

Keywords: financial technologies, contactless payments, cryptocurrency, blockchain, P2P-crediting, payment systems, online payments, traditional banking.

Bibliography — 11 references.

Received December 26, 2019

УДК 004.94

МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

М. М. Тараскин, д-р техн. наук; Е. В. Зайцев
Войсковая часть № 11928, Москва, Россия

Рассмотрены вопросы моделирования информационных систем, в частности автоматизированных информационных систем (АИС). Моделирование АИС является важным этапом как их исследования, так и разработки. Сложность и многообразие процессов функционирования реальных АИС не позволяют строить для них абсолютно адекватные математические модели. Однако в ряде случаев возможно отображение структур и процессов АИС посредством аксиоматики теорий множеств и алгоритмов. Формализованное представление элементов (в широком смысле этого слова) АИС позволяет повысить детализацию научного исследования, перейти к количественным значениям параметров и показателей исследуемых процессов, обосновать дальнейшие направления исследований и т. д.

Ключевые слова: автоматизированная информационная система, моделирование, теоретико-множественное описание, алгоритмическое описание, адекватность.

При проведении научных исследований, в частности написании научно-исследовательских работ, диссертационных работ и т. д., авторы достаточно часто сталкиваются с необходимостью формализованного представления как структур, так и процессов, характерных для исследуемой области. Знания и умения по их представлению в научных исследованиях создают предпосылки к получению обоснованных и достоверных конечных результатов. Одним из способов формализованного описания предметных и проблемных областей является моделирование.

Моделирование — один из наиболее распространенных способов изучения различных процессов и явлений. Известны и широко используются в научных исследованиях и инженерной практике многочисленные методы и приемы моделирования [1–4].

Математическая модель реальной системы является тем абстрактным формально описанным объектом, изучение которого возможно математическими методами, в том числе с помощью математического моделирования. Сложность и многообразие процессов функционирования реальных систем не позволяют строить

для них абсолютно адекватные математические модели. Математическая модель, описывающая формализованный процесс функционирования системы, в состоянии охватить только основные характерные его закономерности, оставляя в стороне несущественные, второстепенные факторы.

Формализации любого реального процесса предшествует изучение структуры составляющих его явлений. В результате появляется так называемое содержательное описание процесса, которое представляет собой первую попытку четко изложить закономерности, характерные для исследуемого процесса, и постановку прикладной задачи. Содержательное описание является исходным материалом для следующего этапа формализации — разработки модели.

Рассмотрим подходы к моделированию автоматизированной информационной системы. Выбор направления исследования обусловлен следующими факторами: моделирование АИС представляется необходимым, так как именно на ее основе реализуются все исследуемые процессы; в условиях роста объема и сложности информации, которая должна быть обработана должностным лицом, проблема ее предварительной селекции (на этапе поддержки выработки решения) приобретает важное значение; наиболее сложная задача, которую решает должностное лицо, — распознавание ситуаций, так как это связано с преодолением неопределенности.

Любую АИС создают для реализации информационного процесса, поэтому разработка модели будет сориентирована именно на данную

Тараскин Михаил Михайлович, сотрудник.

E-mail: rubico@mail.ru

Зайцев Евгений Васильевич, сотрудник.

E-mail: rubico@mail.ru

Статья поступила в редакцию 5 февраля 2020 г.

© Тараскин М. М., Зайцев Е. В., 2020

объективную реальность, хотя возможны и другие варианты моделей, отражающие более детально те или иные свойства АИС. Поскольку в нашем случае АИС не связана с конкретной предметной областью, будем осуществлять ее описание для наиболее общего варианта как, например, изложено в [5–7].

Теоретико-множественное описание АИС

Наиболее абстрактными и поэтому универсальными для описания систем, в том числе и АИС, являются понятия и методы теории множеств [1, 8].

Каждая АИС предполагает наличие языка вопросов, языка ответов, языка, на котором формулируют сообщения об изменениях в моделируемой области реального мира (в результате которых обновляется информация), и языка, на котором формулируют сообщения о необходимости изменения вида завершающей обработки информации. Изучая АИС, будем исходить из того, что накапливаемая в них информация представляет собой модель некоторой области реального мира. Основное требование к каждой АИС — обеспечение адекватности этой модели.

Понятие адекватности как общего явления не формализовано. Однако в каждом конкретном случае обычно известно, каким условиям должна удовлетворять модель, чтобы быть адекватной. При этом адекватность (или неадекватность) зависит от состояния отображаемой области реального мира и особенностей модели, а также от требований, предъявляемых потребителями информации.

В качестве меры, позволяющей судить об адекватности модели реальному миру, выберем показатель старения информации как наиболее объективно характеризующий информационные процессы в АИС любого назначения. Можно утверждать, что если в качестве меры адекватности модели реальному миру нецелесообразно (невозможно) использовать показатель старения информации, то, следовательно, модель разработана не в интересах АИС.

Итак, каждый из описанных языков можно рассматривать как множество его (мыслимых) предложений. Обозначим произвольные элементы этих множеств: a — вопрос; b — ответ; c — сообщение об обновлении информации; s — сообщение об изменении вида завершающей обработки (иными словами, каких-либо действий по обработке информации на последнем этапе).

Множества этих элементов обозначим как

$$A = \{a\}; B = \{b\}; C = \{c\}; S = \{s\}. \quad (1)$$

Кроме того, обозначим через d состояние информационного фонда (или информации, хранящейся в АИС). Это состояние при обновлении информации изменяется, преобразуясь в новое, так что привлечем к рассмотрению еще и множество состояний информационного фонда $D = \{d\}$.

Перечисленные пять множеств будем полагать необходимым окружением АИС. Это предположение сделано для того, чтобы (см. далее) не усложнять формальное представление концептуальной модели АИС.

Заметим, что должно выполняться условие

$$A \cap C \cap S = 0, \quad (2)$$

без которого управляющая процедура АИС не может отличить друг от друга a , c , s . Введем собирательное обозначение z для a , c , s , соответствующее понятию запроса. Под запросом будем понимать вопрос или сообщение. Вопрос — это исходное данное, которое инициирует как информационный поиск в информационном фонде, так и завершающую обработку информации, а сообщение инициирует процесс обновления информационного фонда.

Очевидно, что должно выполняться условие

$$Z = \{z\} = A \cap C \cap S. \quad (3)$$

Процедура информационного поиска сопоставляет вопрос a и текущее состояние информационного фонда d и выбирает (получает) некоторый элемент информации (обозначим его i). Опишем это как выбор (получение) значения некоторой функции f : $i = f(a, d)$.

Функцию f назовем информационным поиском. Процедуру завершающей обработки представим как получение значений функции f_1 : $b = f_1(a, i)$.

Одним из аргументов этой функции является исходный вопрос a . Различным вопросам может соответствовать один и тот же элемент информации i , но разные способы завершающей обработки. Функцию f_1 назовем текущим видом завершающей обработки, а так как в процессе функционирования АИС f_1 может видоизменяться, привлечем к рассмотрению еще одно множество $\Phi = \{f\}$ и назовем его множеством видов завершающей обработки. Это множество также отнесем к окружению АИС. Процедуру обновления информации можно представить как получение значения функции $f_2(c, d)$ и замену этим значением прежнего состояния информационного фонда.

Процедуру изменения вида завершающей обработки представим как получение значения

функции $f_3(s, f_1)$, которое будет новой функцией, принадлежащей множеству Φ , и замену этим значением прежней функции f_1 .

Введем еще одно обозначение:

$$J = (d, f, f_1, f_2, f_3), \quad (4)$$

где J — совокупность состояний информационного фонда D и четырех введенных функций.

Управляющая процедура АИС может быть описана как функция

$$V(z, J), \quad (5)$$

удовлетворяющая условиям

- $V(a, J) = (J, b)$, где $b = f_1(a, f(a, d))$;
- $V(c, J) = (f_2(c, d), f, f_1, f_3)$;
- $V(s, J) = (d, f, f_3(s, f_1), f_2)$.

АИС может быть описана через совокупность состояния информационного фонда и пяти функций:

$$\text{АИС} = (d, f, f_1, f_2, f_3, V). \quad (6)$$

Для того чтобы получить итоговую модель АИС, разработанную с применением аппарата теории множеств, к последней совокупности нужно присоединить уже описанные ранее множества, которые в целях упрощения формального представления АИС были отнесены к ее окружению. Эти множества связаны функциями, входящими в состав АИС, в определенную систему.

Если АИС является стационарной, то функции f_2 и f_3 удовлетворяют условиям

$$f_2(c, d) \equiv d, \quad f_3(c, f_1) \equiv f_1.$$

Иными словами, в стационарной АИС нет функций обновления информационного фонда и изменения вида завершающей обработки. Эти функции не производят преобразования d и f_1 , поэтому должны быть из рассмотрения исключены.

Очевидно, что наиболее существенным из всех перечисленных элементов для процесса поддержки выработки информационного решения является элемент b , так как, во-первых, собственно "ответ" является результатом данного процесса, во-вторых, именно в ответе содержится информация, на основании которой соответствующее должностное лицо делает те или иные выводы, в частности об исследуемой ситуации.

Из сказанного следует, что для того чтобы в полном объеме обработать ответ, должностное

лицо должно вначале с той или иной скоростью считать некоторое количество байт, которое он содержит. Речь в данном случае идет о технической скорости чтения, которая в значительной степени зависит от пропускной способности. Чем больше байт содержит ответ, тем больше времени требуется на его считывание, т. к. пропускную способность различных должностных лиц можно считать величиной постоянной. Если ответ формировать только из существенных признаков, характеризующих среду, то, очевидно, времени на их считывание потребуется меньше, однако в данном случае должностное лицо может, например, установить не все связи, которые существуют между ними, что в результате повлечет за собой снижение величины обоснованности вырабатываемого решения. Отметим, что сокращение времени обработки решения в конечном итоге повышает адекватность анализируемой информации состояния реальной среде.

Таким образом, моделирование АИС с использованием теоретико-множественного описания позволяет сделать вывод о том, что существенное влияние на оперативность работы должностного лица оказывает процесс считывания, характеризуемый величиной пропускной способности, количеством байт информации в ответе b . Очевидно, что для сокращения времени процесса выработки решения количество байт информации в ответе b необходимо сокращать. Иными словами, необходимо представлять в нем только существенные признаки, характеризующие среду, однако при этом устанавливать и величину его обоснованности. Достоинство универсальности описания АИС с помощью понятий и методов теории множеств является одновременно и недостатком, так как не позволяет более детально ее исследовать (например, взаимосвязанность и последовательность происходящих в ней процессов). Поэтому на следующем шаге ее описания используем аппарат теории алгоритмов.

Алгоритмическое описание АИС

Действуя описанным образом, можно, избрав вместо теоретико-множественного аппарата аппарата теории алгоритмов, получить алгоритмическое описание АИС путем экспликации. Однако теория множеств более абстрактна, чем теория алгоритмов. Возможен и другой путь — интерпретация. Изберем его.

Известно [9—11], что по своей структуре алгоритмы очень разнообразны и что для каждого из них существует много эквивалентных как в

одном с ними семействе, так и в других семействах. Под семейством алгоритмов будем понимать такую их совокупность, которая задается единым указанием их выполнения w или индуцируемым ими отображением \tilde{w} . Видимо, неправильно, давая алгоритмическое описание (определение) АИС, ограничить структуру применяемых алгоритмов. Поэтому алгоритмическое описание АИС возможно только с точностью до эквивалентности. При этом целесообразно остановиться на таком описании, которое будет доступно для понимания человеку.

Из аналитической теории алгоритмов [12, 13] известно, что необходимо различать понятие алгоритма, его записи и задаваемого им отображения. Будем обозначать записи алгоритмов буквами (теми же, что и алгоритмы), снабженными сверху чертой, а отображения — теми же буквами, снабженными сверху волнистой чертой. Для единообразия записи операнды будем обозначать буквами, снабженными черточками.

Под операндом будем понимать предложение формального языка, наделенное смыслом.

Предположим, что задан входной язык z (3), произвольное предложение которого обозначим \bar{z} . Будем считать, что \bar{z} , являющееся вопросом, удовлетворяет условию $\tilde{h}(\bar{z})$; \bar{z} , являющееся сообщением об изменении информационного фонда, — условию $\tilde{h}_1(\bar{z})$; \bar{z} , являющееся сообщением об изменении завершающей обработки, — условию $\tilde{h}_2(\bar{z})$. Через B обозначим выходной язык, а произвольное его представление будем обозначать через \bar{b} . Опишем в виде алгоритма функцию V (управляющую процедуру), считая остальные функции (процедуры) ее частями. Кроме того, предположим, что обращаясь к АИС должностное лицо подает некоторый сигнал, после поступления которого она начинает функционировать. Обозначим этот сигнал символом \bar{e} , полагая, что если он подан, то $\bar{e} = 1$, если нет, то $\bar{e} = 0$. Введем понятие сигнала \bar{b}_0 , который будет инициирован должностным лицом, когда им будет закончена обработка произвольного предложения \bar{b} (заметим, что одним из этапов обработки ответа является этап считывания из него количества байт, которое в нем содержится). Иными словами,

$$\bar{b}_0 = \begin{cases} 1, & \text{если обработка завершена;} \\ 0, & \text{если обработка не завершена.} \end{cases} \quad (7)$$

Длительность процесса считывания в значительной степени зависит от количества байт, содержащихся в ответе. Чем меньше длительность процесса считывания, тем раньше должностное лицо вырабатывает сигнал \bar{b}_0 , формирует новый вопрос ($\bar{e} = 1$) и получает на него новый ответ. Цикл общения должностного лица с ЭВМ сокращается, а это значит, что ему для анализа будет поступать более адекватная (менее устаревшая) информация о состоянии реальной среды. Смысл сигнала \bar{b}_0 , когда он равен 1, в том, что по нему исключается из обработки текущий ответ. Если $\bar{b}_0 = 0$, то обработка продолжается (в частности, считывание не завершено, должностное лицо не может сформировать новый вопрос).

Будем считать, что заданы состояние информационного фонда в виде символьной конструкции \bar{d} и запись алгоритма завершающей обработки информации в виде символьной конструкции \bar{f}_1 . Схему АИС приведем на языке аналитической теории алгоритмов.

Модель АИС, выполненная с использованием аппарата теории алгоритмов, будет выглядеть следующим образом:

- 1) if $\bar{e} = 1$, then $\rightarrow 2$, else $\rightarrow 1$;
- 2) $\bar{e} := 0$, $\rightarrow 3$;
- 3) if $\tilde{h}(\bar{z})$, then $\rightarrow 4$, else $\rightarrow 6$;
- 4) $\bar{i} := \tilde{f}(\bar{z}, \bar{d})$, $\rightarrow 5$;
- 5) $\bar{b} := \tilde{f}_1(\bar{z}, \bar{i})$, $\rightarrow 11$;
- 6) if $\tilde{h}_1(\bar{z})$, then $\rightarrow 7$, else $\rightarrow 8$;
- 7) $\bar{d} := \tilde{f}_2(\bar{z}, \bar{d})$, $\rightarrow 1$;
- 8) if $\tilde{h}_2(\bar{z})$, then $\rightarrow 9$, else $\rightarrow 10$;
- 9) $\bar{f}_1 := \tilde{f}_3(\bar{z}, \bar{f}_1)$, $\rightarrow 1$;
- 10) $\bar{b} := \text{"непонятно"}$, $\rightarrow 1$;
- 11) if $\bar{b}_0 = 1$, then $\rightarrow 12$, else $\rightarrow 11$;
- 12) $\bar{b}_0 := 0$, $\rightarrow 1$.

Необходимо иметь в виду, что в рассматриваемой схеме представлены лишь основные процедуры АИС. Всякий алгоритм, реализующий приведенную схему, может служить примером конкретной АИС. На рис. 1 алгоритмическая схема АИС изображена в виде блок-схемы. Разъясним ее содержание.

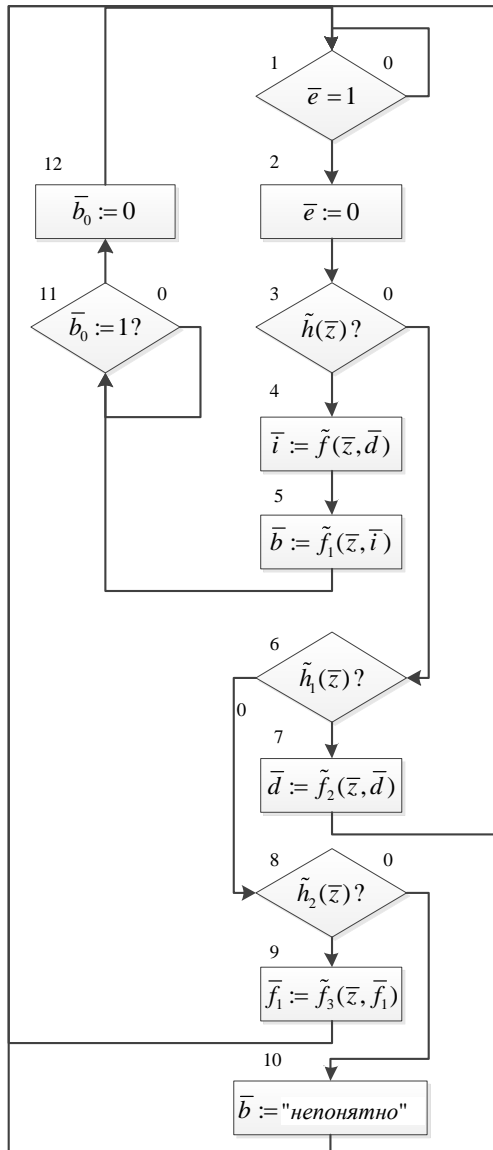


Рис. 1. Блок-схема модели АИС

Обращаясь к АИС, должностное лицо производит запись предложения \bar{z} . В течение этого времени конструкция $\bar{e} := 0$. В блоке 1 производится проверка условия $\bar{e} := 1$ и, так как оно не выполнено, осуществляется переход к выполнению этого же блока. Такой процесс называют ожиданием условия $\bar{e} := 1$. Далее должностное лицо делает $\bar{e} := 1$, что приводит к передаче управления блоку 2. В этом блоке значению \bar{e} присваивается ноль. Для должностного лица $\bar{e} := 0$ означает, что можно готовить новое обращение к АИС и делать $\bar{e} := 1$. Равенство $\bar{e} := 1$ является признаком того, что новое обращение производить еще нельзя.

После блока 2 выполняется блок 3, т. е. осуществляется проверка, является ли \bar{z} вопросом. Если да, то выполняются блоки 4, 5, в результате чего выдается ответ \bar{b} , получаемый как значение $\tilde{f}_1(\bar{z}, \tilde{f}(\bar{z}, \bar{d}))$. Затем управление передается блоку 11, в котором, если обработка ответа завершена (в том числе и считывание), то должностным лицом вырабатывается сигнал $\bar{b}_0 = 1$, по которому обработанный ответ исключается из дальнейшей работы с ним человека (под исключением будем понимать либо сохранение содержащихся в нем байт информации на носителе, либо полное их стирание), и управление переходит к блоку 12, в котором \bar{b}_0 присваивается значение 0 (это действие необходимо для следующего цикла запрос—ответ). Если в блоке 11 $\bar{b}_0 = 0$, то возникает условие ожидания, длительность которого тем больше, чем больше времени должностное лицо тратит на обработку предыдущего ответа (в том числе и на считывание того количества байт, которое оно содержит). Ожидание продолжается до тех пор, пока должностное лицо не выработает $\bar{b}_0 = 1$. Если \bar{z} – не вопрос, то в блоке 6 проверяется, является ли \bar{z} сообщением об изменении информационного фонда. В случае положительного ответа в блоке 7 предусмотрены переработка информационного фонда и возврат к ожиданию (к блоку 1). В противном случае в блоке 8 производится проверка, является ли \bar{z} сообщением об изменении обрабатываемого алгоритма. Если да, то в блоке 9 предусмотрены необходимые изменения и возврат к ожиданию. Если нет, то блок 10 выдает ответ "непонятно" и переходит к ожиданию. Алгоритмическая схема АИС в отличие от теоретико-множественного описания содержит один алгоритм, объединяющий все процедуры, которым соответствуют функции, входящие в совокупность (6), что позволяет исследовать происходящие в ней процессы в их взаимообусловленности и в данном случае подтверждает вывод о том, что для повышения оперативности функционирования АИС, в частности на этапе выработки решений, необходимо сокращать количество байт в ответе, но при этом сохранять информативность предоставляемых должностному лицу признаков, на основе которых делается вывод, например, о состоянии среды.

В реальных условиях процедура обработки ответов должностным лицом обычно обладает существенными отличиями по сравнению с описанными. Так, например, промежуточные отве-

ты, которые могут иметь довольно большой объем, подвергают корректировке. Расходовать время на их ввод вместе с корректирующими указаниями может быть невыгодно. Для их хранения и анализа должностному лицу необходимо предусмотреть еще один массив данных в АИС, который назовем массивом ответов. Появляется еще один вид обращений к АИС: корректирующие указания. Появляется и еще одна функция АИС: корректировка ответов. Для корректировки нужно предусмотреть специальную процедуру корректировки. Конечно, эта процедура в определенном смысле является частью процедуры обработки. Однако она обладает многими существенными особенностями. Поэтому выделим ее в самостоятельную процедуру.

Алгоритмическая схема АИС, предусматривающая корректировку ответов, может быть следующей.

Модель АИС, выполненная в виде алгоритмической схемы с корректировкой ответов:

- 1) if $\bar{e} = 1$, then $\rightarrow 2$, else $\rightarrow 1$;
- 2) $\bar{e} := 0$, $\rightarrow 3$;
- 3) if $\tilde{h}(\bar{z})$, then $\rightarrow 4$, else $\rightarrow 7$;
- 4) $\bar{i} := \tilde{f}(\bar{z}, \bar{d})$, $\rightarrow 5$;
- 5) $\bar{b} := \tilde{f}_1(\bar{z}, \bar{i})$, $\rightarrow 6$;
- 6) $\bar{s} := \tilde{\lambda}(\bar{b}, \bar{s})$, $\rightarrow 15$;
- 7) if $\tilde{h}_1(\bar{z})$, then $\rightarrow 8$, else $\rightarrow 9$;
- 8) $\bar{d} := \tilde{f}_1(\bar{z}, \bar{d})$, $\rightarrow 1$;
- 9) if $\tilde{h}_3(\bar{z})$, then $\rightarrow 10$, else $\rightarrow 12$;
- 10) $\bar{b} := \tilde{f}_4(\bar{z}, \bar{s})$, $\rightarrow 11$;
- 11) $\bar{s} := \tilde{\lambda}(\bar{b}, \bar{s})$, $\rightarrow 1$;
- 12) if $\tilde{h}_2(\bar{z})$, then $\rightarrow 13$, else $\rightarrow 14$;
- 13) $\bar{f}_1 := \tilde{f}_3(\bar{z}, \bar{f}_1)$, $\rightarrow 1$;
- 14) $\bar{b} := \text{"непонятно"}$, $\rightarrow 1$;
- 15) if $\bar{b}_0 = 1$, then $\rightarrow 16$, else $\rightarrow 15$;
- 16) $\bar{b}_0 := 0$, $\rightarrow 1$;

где $\tilde{\lambda}$ — функция формирования массива ответов;

\tilde{h}_3 — условие, при котором запрос является сообщением о видоизменении процедуры информационного поиска;

\tilde{f}_4 — процедура корректировки.

На рис. 2 алгоритмическая схема АИС с корректировкой ответов изображена в виде блок-схемы.

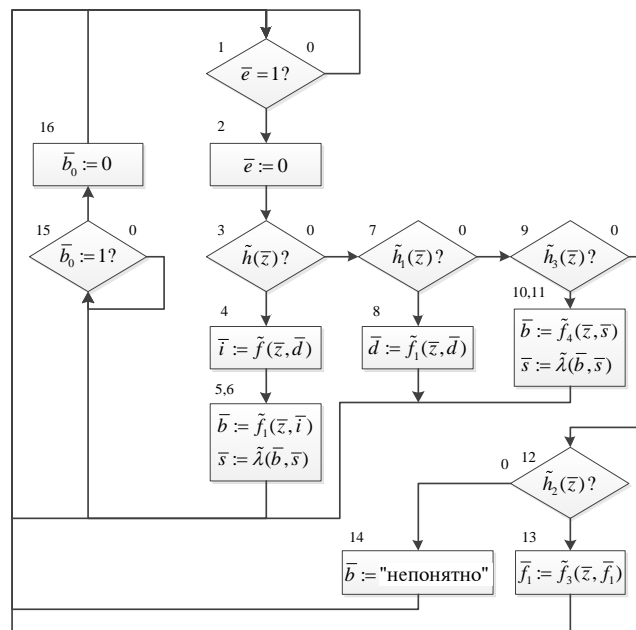


Рис. 2. Блок-схема модели АИС с корректировкой ответов

В алгоритмической схеме, представленной (9), результат завершающей обработки (полученный в блоке 5) перед выдачей включается в массив ответов \bar{s} (блок 6). Если запрос \bar{z} является корректирующим указанием, то это распознает $\tilde{h}_3(\bar{z})$. Корректировку осуществляет процедура \tilde{f}_4 (блок 10), новый ответ фиксируется в массиве ответов (блок 11) и снова выдается должностному лицу. Остальные блоки выполняют действия, аналогичные приведенной схеме, представленные выражением (8).

Очевидно, что при обработке промежуточных ответов, особенно если они имеют большое количество байт информации, должностное лицо будет расходовать значительный ресурс времени, что приведет к снижению адекватности информации о состоянии среды. Единственным выходом является ее обновление, что невозможно осуществить, не сократив время на операцию, в частности, считывания посредством предоставления для анализа должностному лицу только существенных признаков состояния среды.

Таким образом, сформулированное противоречие между обоснованностью выработки решения и ее оперативностью позволяет сделать вывод о необходимости более детального анализа информационного процесса АИС в целях поис-

ка путей, позволяющих частично разрешить его, к примеру за счет автоматизации ряда процессов, предшествующих акту принятия решения, т. е. на этапе поддержки выработки решения. Проведение исследования данной проблемной области можно (и необходимо) осуществлять за счет моделирования. В качестве исходных описаний моделируемых объектов и процессов мо-

гут выступать модели, разработанные на основе теоретико-множественного и алгоритмического подходов. Дальнейшее моделирование (в случае необходимости) должно осуществляться с использованием более "тонких" математических подходов, выбранных на основе сравнительного анализа существующих по обоснованным критериям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. — М.: Наука, 1978. — 399 с.
2. ГОСТ 34.601-90 Информационная технология (ИТ). Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Стадии создания (статус на 2019 год: действующий).
3. Коцюба И. Ю., Чунаков А. В., Шишков А. Н. Основы проектирования информационных систем: учеб. пособие. — СПб.: Университет ИТМО, 2015. — 206 с.
4. Албари Д. С. Справочник. Полное описание языка / Пер. с англ. Изд. 6-е. — М.: ООО "И. Д. Вильямс", 2016. — 1040 с.
5. Николаев В. И., Брук В. М. Системотехника: методы и приложения. — М.: Машиностроение, 1985. — 199 с.
6. Пранявичюс Г. Модели и методы исследования вычислительных систем. — Вильнюс: Мокслас, 1982. — 288 с.
7. <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=551783> (дата обращения: 08.01.2020).
8. <https://habr.com/ru/post/457312/> (дата обращения: 08.01.2020).
9. Нечепуренко М. И., Попков В. К., Майнагашев С. М. и др. Алгоритмы и программы решения задач на графах и сетях. — Новосибирск: Наука. Сибир. отделение, 1990. — 515 с.
10. Канцедаль С. А. Алгоритмизация и программирование: учеб. пособие. — М.: ИД "ФОРУМ": ИНФРА-М, 2014. — 352 с.
11. Игошин В. И. Теория алгоритмов: учеб. пособие. — М.: ИНФРА-М, 2013. — 318 с.
12. Морозов В. П., Дымарский Я. С. Элементы теории управления ГАП: Математическое обеспечение. — Л.: Машиностроение. Лен. отделение, 1984. — 333 с.
13. <https://allrefrs.ru/5-33705.html> (дата обращения: 08.01.2020).

SIMULATION OF AN AUTOMATED INFORMATION SYSTEM

M. M. Taraskin, E. V. Zaitsev

Military unit № 11928, Moscow, Russia

The article deals with the modeling of information systems, in particular, automated information systems (AIS). Modeling of AIS is an important stage of both their research and development. The complexity and variety of processes of functioning of real AIS do not allow to build absolutely adequate mathematical models for them. However, in some cases, it is possible to display the structures and processes of AIS through the axiomatics of set theory and algorithms. The formalized representation of the elements (in the broad sense of the word) of the AIS allows to increase the detail of scientific research, go to the quantitative values of parameters and indicators of the studied processes, justify further research directions, etc.

Keywords: automated information system, modeling, set-theoretic description, algorithmic description, adequacy.

Bibliography — 13 references.

Received February 5, 2020

ВЫЧИСЛЕНИЕ БЕЗОПАСНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАЧАЛА МАНЕВРА ЛЕГКОМОТОРНЫХ САМОЛЕТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Д. С. Карнута

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Россия

Рассмотрены искусственные нейронные сети, которые используют для разработки метода расчетов параметров маневров легкомоторных самолетов. Для представления такой сети использован системный подход, описывающий ее в форме нейронной сети MLP. Для практической реализации такого подхода разработана модель многослойного персептрона. Представлены результаты моделирования поставленной задачи расчета безопасных параметров начала маневра легкомоторных самолетов.

Ключевые слова: потеря высоты, запаздывание на выход из маневра, безопасные параметры начала маневра, система предупреждения, модель многослойного персептрона.

Отсутствие систем предупреждения или специальных требований для обеспечения безопасности полета делает его опасным и рискованным [1, 2].

Цель данной работы — поиск уравнения связи между потерей высоты и скоростью выхода из маневра с ошибками пилотирования любого маневра. Для достижения поставленной цели из-за сложности традиционных методов расчета большого количества маневров использовано моделирование нейронных сетей.

Поставленные задачи: использование модели многослойного персептрона в плане повышения безопасности выполнения маневров для простых легкомоторных самолетов, которые не оснащены сложными системами и автопилотом; вывод уравнения, связывающего безопасность полета и ошибку пилотирования для моделирования нейронной сети.

Классически сложилось так, что нейронные сети могут быть использованы для решения задач по распознаванию образов, обработке и идентификации сигналов, их классификации и т. д. Преимущество нейронных сетей заключается в эффективности решения задач при неполных, ложных данных, а также при создании модели параллельных процессов. Основные проблемы построения и применения нейронных

сетей заключены в трудном процессе их обучения и поиске примеров для обучения, которые могут быть сопоставлены с реальностью.

Основное преимущество нейронных сетей — свободная перенастраиваемая архитектура, что позволяет вносить дополнения в структуру моделей при выявлении новых факторов [3, 4]. Нейронные сети могут восстанавливать совокупную информацию по одной отдельной части, что чрезвычайно необходимо при отсутствии или потере информации об объекте либо при обработке неполной информации. Кроме того, при помощи нейронных сетей можно реализовывать сложные ситуации, которые возникают под влиянием многофакторной природы и размерности, а также применять разнохарактерную информацию, что целесообразно для моделей определения движения при условии неопределенности. Используя нейронные сети, можно решить задачу с помощью объединения статистических данных и экспертных оценок, обработать информационные параметры с различной степенью достоверности и т. д. [2].

В работе рассмотрено влияние ошибок пилота на возникновение критических ситуаций при выполнении конкретных маневров [5].

Практическое решение задачи

Представляется полезным рассмотреть возможность использования для решения задач определения движения маневрирующих объектов такую разновидность математического аппарата семантических сетей, как нейронные сети.

Карнута Дмитрий Сергеевич, научный заместитель
начальника кафедры УВП МО РФ ВУЦ.
E-mail: dima-karnuta@mail.ru

Статья поступила в редакцию 4 июня 2020 г.

© Карнута Д. С., 2020

В задачах компьютерного моделирования искусственных нейронных сетей возникает необходимость использования специальных наборов данных для представления структуры сети и параметров составляющих ее элементов. Рассмотрим структуру многослойного персептрона. Многослойный персептрон состоит из слоя входных элементов (рецепторов), одного или нескольких слоев ассоциативных элементов (нейронов), слоя выходных (реагирующих) элементов. Каждый элемент имеет функцию активации (передаточную функцию), которая в простейшем случае представляет собой алгебраическую сумму всех сигналов, поступающих на вход элемента [4, 6]. Элементы сети связаны между собой послойно. Каждая связь имеет весовой коэффициент, на который умножается сигнал при переходе из одного элемента в другой. Число входов, как и число нейронов в каждом слое, может быть любым. Число слоев тоже может быть любым.

Рассмотрим на примере практическое решение поставленной задачи: изучение безопасности выполнения 600 маневров на авиасимуляторе X-Plane 11 (300 переворот, 100 пикирование, 100 петля Нестерова, 100 поворот на вертикали), которые определяются одинаковой скоростью начала вывода из маневра 210 км/ч.

Путем получения массивов данных при выполнении разных маневров можно использовать сети нейронного программирования для разработки способа расчета безопасных высот любого маневра.

Для моделирования использовали легкомоторный пилотажно-акробатический самолет Як-55М, который предназначен для тренировки и участия в соревнованиях по самолетному спорту летчиков-спортсменов.

Полученные данные, представляющие собой ошибки пилотирования, разделены на:

входные

- время действия до значения угла отклонения руля (X_1);
- значение угла отклонения руля (X_2);
- запаздывание на выход из маневра (X_3);

выходные:

- максимальная потеря высоты при достижении рекомендуемой скорости выхода из маневра (Y_1);
- скорость при выходе из маневра (Y_2);
- максимальная перегрузка (Y_3).

Так как исходные обучающие данные представляют собой сложную функциональную зависимость с числом переменных более двух, использование традиционных методов аппроксимации затруднительно. Поэтому для решения

задачи использовано нейросетевое моделирование [7].

Параметры получены из "Инструмент X-Plane Connect" (ХРС). Это инструмент для исследований с открытым исходным кодом, используемый для взаимодействия с программным обеспечением X-Plane для имитатора полета. ХРС позволяет пользователям управлять самолетами и получать информацию об их состоянии (рис. 1, 2).

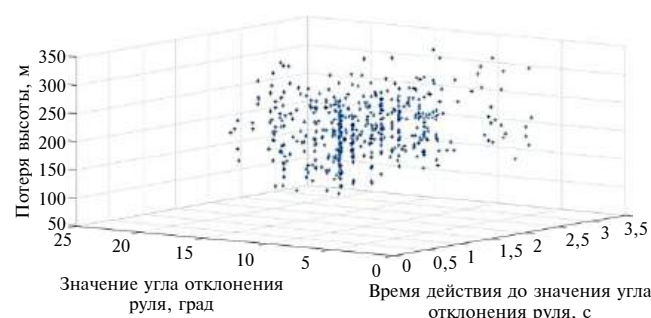


Рис. 1. Зависимость потери высоты при достижении рекомендуемой скорости выхода из маневра

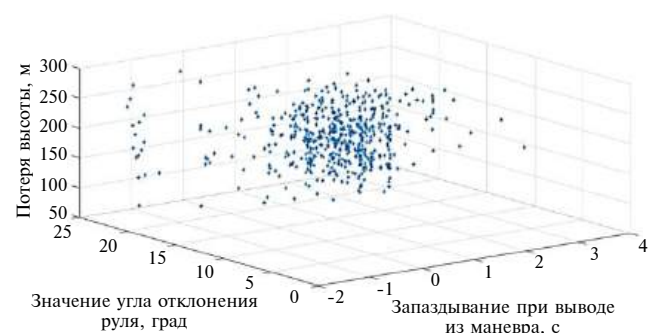


Рис. 2. Зависимость потери высоты при достижении запаздывания при выходе из маневра

Основу нейронного представления параметров траекторий полета летательного аппарата (ЛА) (в контексте определения движения — для ЛА, в контексте обнаружения — для средств обнаружения и слежения) составляет понятие нейрона. Нейрон — это формальный элемент, выходная активность которого определяется уровнем входного возбуждения и меняется в интервале от 0 до 1. На вход поступают возбуждения от других аналогичных нейронов.

Цикл обучения сети многослойного персептрона (на множестве примеров) представлен следующим образом:

- предъявление сети очередного примера (входного и выходного векторов);
- вычисление фактического выходного вектора (прямое распространение сигналов);
- изменение веса связей в целях минимизации ошибки на выходе.

Изменение веса — итерационный процесс. Критерий остановки — исчерпание лимита количества итераций или достижение заданной величины ошибки E .

Построение нейросети

Нейронная сеть будет иметь 3 входа, 3 выхода, несколько скрытых слоев и функцию активации вида

$$f(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1.$$

Для определения компоновки скрытых слоев проведен статистический анализ среднеквадратичного отклонения прогноза нейросети от ожидаемых значений по каждому выходу:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n (\text{in} - \text{out})^2 \right)},$$

где in — ожидаемое значение;

out — прогноз нейросети, а также количество слоев, необходимое для обучения.

Также проанализировано среднеквадратичное отклонение этих величин. Для каждой компоновки скрытых слоев проводили 100 обучений, затем рассматриваемые параметры усредняли и брали среднеквадратичное отклонение всех результатов. Результаты испытаний приведены в таблице.

Как видно из таблицы, чтобы добиться наиболее точных и стабильных прогнозов нейросети, при этом сильно не увеличивая количество связей, достаточно взять 2 скрытых слоя в 5 и 10 нейронов (рис. 3).

Результаты

Необходимо исправить структуру сетевой архитектуры MLP: количество скрытых слоев и нейронов (узлов) в каждом слое. Функции активации для каждого уровня также выбираются на этом этапе, т. е. предполагается, что они известны. Неизвестные параметры, которые должны быть оценены, являются весами и отклонениями (w, b)

Форма модели нейронной сети показана на рис. 4:

Отклонение и среднеквадратичное отклонение в зависимости от компоновки слоев

Компоновка слоев	Отклонение по 1-му выходу (среднеквадратичное отклонение результатов)	Отклонение по 2-му выходу (среднеквадратичное отклонение результатов)	Отклонение по 3-му выходу (среднеквадратичное отклонение результатов)	Число эпох
3_5_3	43,053(14,497)	13,577(8,094)	0,982(0,182)	12,650 (4,758)
3_10_3	41,056(3,121)	12,606(0,711)	1,042(0,171)	11,900 (4,227)
3_15_3	41,134(4,088)	12,603(0,929)	1,089(0,341)	12,130 (4,150)
3_20_3	41,273(3,961)	12,357(0,618)	1,076(0,167)	11,330 (2,598)
3_5_5_3	42,128(11,708)	13,047(2,141)	1,036(0,221)	12,020 (5,365)
3_5_10_3	40,485(2,267)	12,584(0,527)	1,083(0,206)	11,960 (3,808)
3_10_10_3	40,823(2,879)	12,823(1,270)	1,205(0,249)	10,730 (2,247)
3_10_20_3	40,540(3,631)	12,567(0,944)	1,373(0,230)	11,180 (2,739)
3_5_5_5_3	40,371(1,892)	12,624(0,450)	1,007(0,140)	12,180 (3,605)
3_5_10_5_3	41,614(3,504)	12,761(0,747)	1,027(0,191)	11,460 (3,239)
3_10_20_10_3	40,384(2,668)	12,718(0,999)	1,238(0,275)	11,070 (2,544)

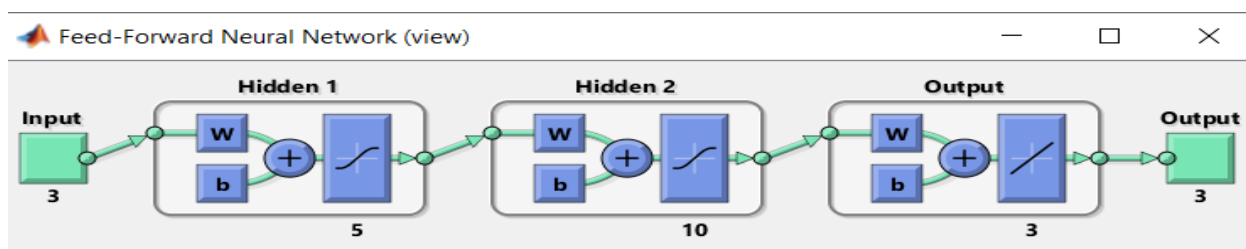


Рис. 3. Нейронная сеть персептрона

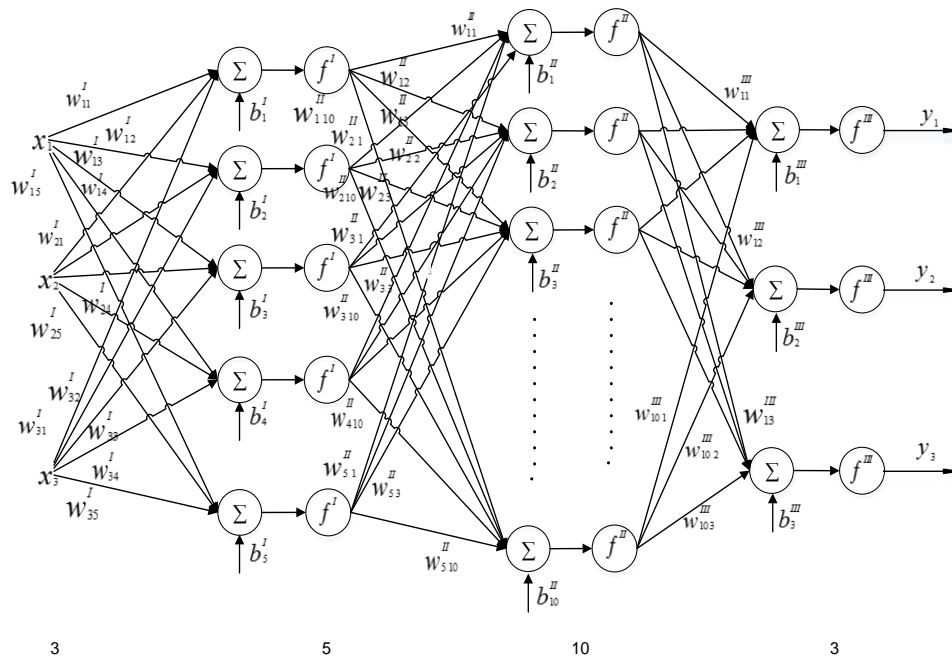


Рис. 4. Нейронная сеть персептрона с двумя скрытыми слоями

На основе приведенной диаграммы может быть записана зависимость между потерей высоты и скоростью выхода из маневра и перегрузкой с ошибками пилотирования:

$$y_i = f^{III} \left\{ \sum_{m=1}^{10} w_{mi}^{III} f^{II} \left[\sum_{j=1}^5 w_{jm}^{II} f^I \left(\sum_{k=1}^3 w_{kj}^I x_k + b_j^I \right) + b_m^{II} \right] + b_i^{III} \right\}, \quad (1)$$

$$f^I(x) = f^{II}(x) = \text{tansig}(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1;$$

$$f^{III}(x) = \text{purelin}(x) = x,$$

где их вес и отклонения уравниваются:

$$w^I = \begin{pmatrix} -2,89876 & -0,73115 & -1,38402 \\ -2,5374 & -1,11718 & 1,20951 \\ 1,401547 & -1,27472 & -0,29141 \\ 2,864299 & 1,28245 & 1,313253 \\ 0,327476 & 0,185202 & 2,113521 \end{pmatrix}; \quad b^I = \begin{pmatrix} 2,638828 \\ 0,961163 \\ -0,79654 \\ 1,853368 \\ 2,011444 \end{pmatrix};$$

$$w^{II} = \begin{pmatrix} 1,888717 & -1,21191 & -0,27868 & 1,065703 & 0,26127 \\ 0,183142 & -1,29727 & -1,7385 & -0,2964 & -1,96771 \\ 2,157063 & -1,59086 & 0,711015 & 0,023215 & 0,778907 \\ 0,677464 & -0,86781 & 1,834701 & 0,2677 & -0,58517 \\ -1,1981 & -1,71788 & -0,10051 & 0,983562 & 0,353897 \\ -0,28119 & -2,30271 & -0,43995 & 1,752488 & 0,833606 \\ -0,74881 & 0,948852 & -1,64536 & 0,658465 & 0,818778 \\ 0,21525 & -1,98715 & -1,78101 & 0,09723 & -0,32221 \\ -0,92554 & 0,408027 & 1,25532 & -1,30027 & 0,692492 \\ -0,66825 & 0,543399 & -0,1627 & -2,06278 & 1,005472 \end{pmatrix}; \quad b^{II} = \begin{pmatrix} -2,25786 \\ -2,25913 \\ -0,67262 \\ -1,54057 \\ 0,916592 \\ -0,75675 \\ -0,37933 \\ 0,94379 \\ 1,277354 \\ -2,37006 \end{pmatrix}; \quad b^{III} = \begin{pmatrix} -0,06381 \\ 0,18381 \\ 0,80328 \end{pmatrix}$$

$$w^{111} = \begin{pmatrix} -0,56323 & -0,50751 & 0,109343 & 0,834185 & 0,70836 & -0,15568 & 0,483652 & -0,19113 & -0,08746 & 0,03742 \\ -1,08916 & -0,31813 & 0,069521 & 0,509097 & 0,092425 & 0,569419 & 0,002108 & -0,23229 & -0,51912 & 0,188493 \\ -0,34302 & 0,927905 & 0,449493 & -0,06265 & -0,15728 & -0,06608 & -0,29453 & 0,654158 & -0,14917 & 0,529759 \end{pmatrix}.$$

Из уравнения (1) можно сделать вывод о том, что сеть MLP является нелинейной параметризованной картой из входного пространства $x \in R^k$ к выходному пространству $y \in R^m$ (здесь $k, m = 3$). Параметры имеют вес w^I, w^{II}, w^{III} и отклонения b^I, b^{II}, b^{III} . Функции активации f обычно считают одинаковыми в каждом слое и известными заранее. На рис. 4 та же функция активации $f^I(x) = f^{II}(x), f^{III}(x)$ использована во всех слоях.

Давая данные входа-выхода $(x, y), i = 1 \dots 3$, и находя оптимальный вариант, MLP-сеть формулируется как проблема подбора данных. Определяемыми параметрами являются (w, b) .

Окончательная проверка должна быть проведена с независимыми данными (рис. 5).

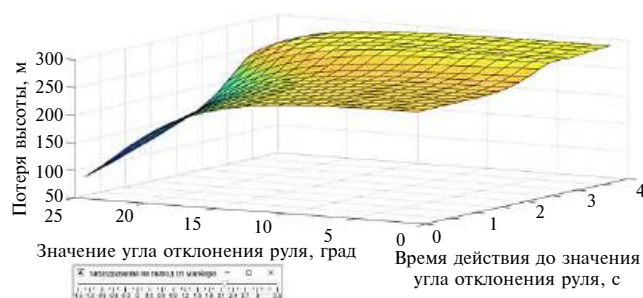


Рис. 5. Моделирование зависимости потери высоты от времени действия и значения угла отклонения руля (запаздывание на выход из маневра 2,15 с)

Интерпретация результатов

Полученные результаты должны быть введены в систему предупреждения, чтобы предупредить пилота о выполнении маневра на несоответствующей высоте и предложить выход из маневра, обезопасив полет и минимизировав рисковую ситуацию.

Рассмотрим применимость нейронных моделей для моделирования различных ситуаций определения движения ЛА и распознавания ситуаций движения.

Для решения задачи использовали многослойный персептрон. Проблематикой учебного процесса многослойного персептрона при применении различных направленных методов минимизации суммы квадратов ошибок является зависимость архитектуры сети от исходных дан-

ных. Если нейронов скрытого слоя относительно небольшое количество, то персептрон нельзя обучить на данных обучающего множества, так как причина неуспеха обучения неочевидна. Зачастую причина скрывается в малом времени обучения. При избыточном числе нейронов скрытого слоя реально избыточное обучение, которое при обучении сети происходит на данных обучающего множества, но может показать неблагоприятные результаты на данных, связанных контрольным множеством [4, 7].

Итак, данное исследование показывает, что благодаря таким свойствам нейронной сети, как нелинейность и хорошая способность к обобщению, она способна успешно обучаться сложным задачам и давать корректный результат для новых исходных данных [2].

Эта модель дает соответствующие результаты при расчете параметров начала маневрирования легкомоторных самолетов, вероятность надежности для выполнения очень большого количества маневров должна соответствовать действительности. Результаты подтверждены выполнением моделирования с использованием нейронных сетей [2].

Заключение

Исследование на основе математического моделирования нейронных сетей с использованием метода многослойного персептрона на образце легкомоторного самолета Як-55М на авиасимуляторе X-Plane с помощью алгоритма цикла обучения сети многослойного персептрона дало положительные результаты.

На анализируемом летательном аппарате отсутствует эффективная система предотвращения столкновений с землей автоматически на основе прогнозируемого курса маневра уклонения. Проблема может быть решена путем разработки взаимосвязи ошибок пилотирования с безопасностью полета и использованием моделирования нейронной сети для ряда маневров, которые связывают параметры скорости и высоты и автоматически сравниваются с предварительно заданными значениями [8]. Это важно для того, чтобы пилот был предупрежден о возможной ситуации и немедленно прекратил маневр.

ЛИТЕРАТУРА

1. Комарцова Л. Г., Максимов А. В. Нейрокомпьютеры. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. — 400 с.
2. Коновалюк М. А., Кузнецов Ю. В., Баев А. Б. Определение параметров многоточечных целей по спектру радиолокационного изображения // Вестник МАИ. 2010. Т. 17. № 3. С. 193—198.
3. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс. — М., СПб., Киев: Изд. Дом "Вильямс", 2006. — 1104 с.
4. Гончаренко В. И. Классификация траекторий летательных аппаратов с помощью методов искусственного интеллекта // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. № 4. С. 54—60.
5. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Пер. с польск. — М.: Горячая линия-Телеком, 2006. — 452 с.
6. Хлопков Ю. И., Хлопков Ю. И., Дорофеев Е. А., Зея Мью Мьинт, Поляков М. С., Хлопков А. Ю., Агаева Илаха Рустам Кызы. Разработка нейронных сетей для расчета аэродинамических характеристик высокоскоростных летательных аппаратов // Фундаментальные исследования. 2013. № 11—9. С. 1834—1840.
7. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / Пер. с англ. — М.: Бином Лаборатория Знаний, 2009. — 798 с.
8. Куссуль Э. М. Ассоциативные нейроподобные структуры. — Киев: Наукова думка, 1992. — 140 с.

CALCULATION OF SAFE PARAMETERS FOR THE BEGINNING OF MANEUVER OF LIGHT-ENGINE AIRCRAFT USING A NEURAL NETWORK

D. S. Karnuta

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

Artificial neural networks that are used to develop a method for calculating maneuver parameters of light-engine aircraft are considered. To represent such a network, a system approach is used that describes it in the form of an MLP neural network. For the practical implementation of this approach, a multi-layer perceptron model was developed. The results of modeling the problem of calculating safe parameters for the beginning of maneuver of light-engine aircraft are also presented.

Keywords: loss of altitude, delay in exiting the maneuver, safe parameters for the beginning of the maneuver, warning system, multi-layer perceptron model.

Bibliography — 8 references.

Received June 4, 2020

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ В ИНЖЕНЕРНОМ ДЕЛЕ И ПРОБЛЕМЫ ИХ МОДЕЛИРОВАНИЯ

(Часть 1)

^{1, 2} В. А. Волохин; ² И. В. Гракович; ² Н. П. Кузнецов, д-р техн. наук

¹ УЧ ПОО «Нефтяной техникум», г. Ижевск, Россия

² Ижевский государственный технический университет им. М. Т. Калашникова,
г. Ижевск, Россия

Приведены примеры технических систем, в которых возможны проявления параметрических колебаний, и принципы выбора их механических аналогов. Рассмотрены особенности выбора аналитических оценок динамической неустойчивости технических систем (механических аналогов), нагруженных внешней возмущающей силой, имеющей периодическую составляющую.

Ключевые слова: колебания, параметрический резонанс, динамическая неустойчивость, механические аналоги, критерии динамической неустойчивости.

Анализ колебательных процессов в технических объектах является одной из главнейших задач в инженерном деле, поскольку характер этих процессов определяет не только надежность функционирования объекта, но и эффективность его эксплуатации [1]. Для описания колебательных процессов в таких технических объектах, как машины, механизмы, энергетические установки и т. д., используют механические аналоги с детерминированными характеристиками, поведение описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями второго порядка, решение которых и определяет характер колебаний [2]. Структура дифференциальных уравнений определяет характер их решения: либо решение является квадратурой, либо его ищут асимптотическими методами [3].

Дифференциальные уравнения второго порядка с постоянными коэффициентами описывают колебательные процессы в так называемом гармоническом осцилляторе, механическим аналогом которого является масса (инерционная характеристика), вывешенная на упругом эле-

менте (пружине) с последовательно соединенным с ним демпфирующим элементом. Решение подобных дифференциальных уравнений представляет собой синусоиду (косинусоиду) с убывающей по времени амплитудой колебаний, которое описывает собственные колебания гармонического осциллятора. При воздействии на гармонический осциллятор внешней силовой гармонической нагрузки в колебательном контуре (гармоническом осцилляторе) возможно возникновение резонансных явлений, которые могут привести к разрушению технического объекта [4].

Изменение во времени инерционной массы, отклонение от линейного закона изменения жесткости упругого элемента при его деформации и т. д. изменяют не только структуру дифференциального уравнения, описывающего динамику механического аналога, но и методы его решения, условия возникновения в технической системе резонансных явлений. Аналогичный эффект создает и изменение во времени в процессе колебаний жесткости упругого элемента колебательного контура. Подобные колебания во многих случаях могут быть отнесены к так называемым параметрическим колебаниям [5]. Параметрические колебания возможны даже в таких простейших механизмах, как пружины [6, 7].

Параметрические колебания определяют особенности возникновения в системах, подверженных таким колебаниям, параметрического резонанса. Математическая модель параметрических колебаний (параметрического резонанса) находит широкое применение при объяснении ряда аварийных явлений в различных областях техники, например в машиностроении. Моделью

Волохин Виктор Аркадьевич, заместитель директора по учебной работе, соискатель ученой степени канд. техн. наук.

E-mail: tmitmm@istu.ru

Гракович Игорь Валентинович, соискатель ученой степени канд. техн. наук.

E-mail: tmitmm@istu.ru

Кузнецов Николай Павлович, профессор.

E-mail: tmitmm@istu.ru

Статья поступила в редакцию 1 июня 2020 г.

© Волохин В. А., Гракович И. В., Кузнецов Н. П., 2020

параметрического резонанса в мостостроении [8] может быть объяснен "танец" Волгоградского моста. Это и проблемы со стендовой наземной отработкой ракетных двигателей, в том числе с имитацией высотных условий [9, 10]. Примером могут служить стендовые испытания ракетных двигателей твердого топлива (РДТТ) (рис. 1) [11]. Параметрические колебания в технической системе обусловлены не только характеристиками механического аналога, но и параметрами внешнего воздействия, имеющего в своем составе периодические составляющие.

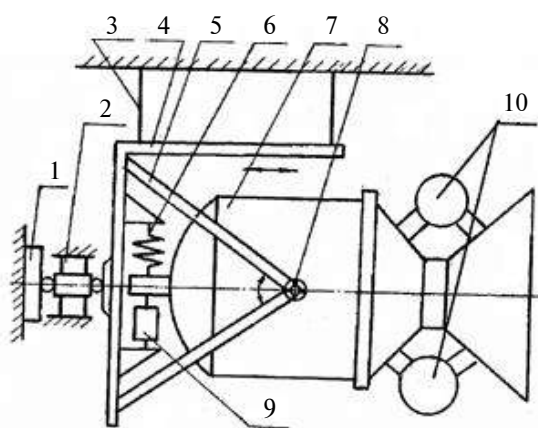


Рис. 1. Схема стенда для газогенераторных испытаний сопловых блоков РДТТ с органами управления вектором тяги типа "вдув" [9, 10]:

1 — датчик осевой силы тяги; 2 — сепаратор-кондуктор; 3 — маложесткие нити-ленты; 4 — динамическая платформа; 5 — консоли; 6 — компенсирующая пружина; 7 — стендовый жидкостный газогенератор; 8 — полые торсионы; 9 — датчик управляющего усилия; 10 — элементы системы управления вектором тяги типа "вдув"

При анализе характера параметрических колебаний особенно важна оценка зон динамической устойчивости колебаний подвижных элементов технического объекта, когда в системе отсутствуют резонансные явления. Сложность получения таких оценок (критериев динамической устойчивости) во многом зависит от числа степеней свободы механического аналога, а также от вида функционала внешнего силового воздействия. В первую очередь эти особенности проявляются в структуре и виде соответствующих дифференциальных уравнений [12] и зависят от особенностей протекающих в объекте физических процессов. Эти особенности хорошо видны на примере одностепенных колебательных контуров, которые являются механическими аналогами, например, испытательных стендов для наземной отработки ракетных двигателей и их органов управления вектором тяги.

Параметрический резонанс при газогенераторных испытаниях сопловых блоков

Одним из видов наземных испытаний сопловых блоков с органами управления вектором тяги являются газогенераторные испытания, когда рабочее тело (горячий газ) создается стендовым жидкостным газогенератором. При газогенераторных испытаниях сопловых блоков изменения массы подвижной части стенда с закрепленным в ней газогенератором не происходит, а подача компонентов топлива в газогенератор осуществляется через полые торсионного типа упругие шарниры, на которых вывешен газогенератор. Типичная схема стенда для газогенераторных испытаний сопловых блоков РДТТ с органом управления вектором тяги типа "вдув" для определения осевой силы тяги и управляющего усилия приведена на рис. 1.

Сила тяги, создаваемая газогенератором, приводит к линейному перемещению динамической платформы и может быть измерена с помощью датчика силы 1. Управляющие усилия приводят к угловым перемещениям газогенератора, которые пропорциональны возникающему усилию и определяются датчиком 9. По каналу замера боковой силы механический аналог стенда имеет вид, приведенный на рис. 2.

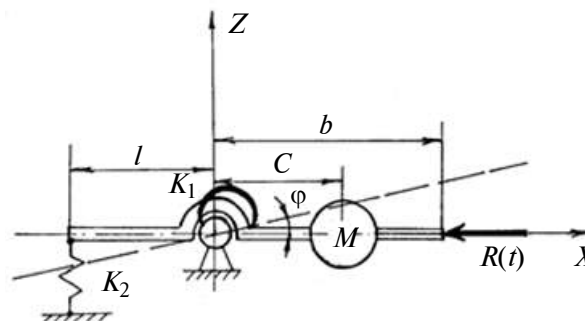


Рис. 2. Механический аналог канала замера управляющей силы

На рис. 2 M — приведенная инерционная характеристика канала; K_1 и K_2 — жесткость упругих шарниров и приведенная линейная жесткость канала соответственно; $R(t)$ — сила тяги соплового блока при отсутствии управляющего усилия.

Приведенные характеристики канала и соответствующие им геометрические параметры l , C , b определяют по результатам тестирования канала [9, 10].

Канал замера боковой силы является упругой системой, находящейся под действием осевой

силы $R(t)$ с полигармонической составляющей, для которой можно записать следующий закон изменения:

$$R(t) = R_0 + \sum_{k=1}^n \Delta R_k \cos f_k t, \quad (1)$$

где R_0 — номинальная сила тяги газогенератора с сопловым блоком;
 $\Delta R_k, f_k$ — амплитуда и частота k -й гармоники.

Периодические составляющие в законе изменения тяги обусловлены акустическими пульсациями давления в камере сгорания.

Рассматривая свободные колебания газогенератора по координате φ (рис. 2), уравнение моментов для механического аналога запишем в виде

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \omega^2 \varphi = 0, \quad (2)$$

где $\omega = \sqrt{(K_1 + K_2 l^2) / MC^2}$ — частота свободных колебаний канала замера управляющих усилий.

Предполагая, что при малых колебаниях по углу φ вектор осевой силы тяги остается коллинеарным своему положению при $\varphi = 0$, и ограничиваясь первой гармоникой для выражения (1), для переменной τ получим [9, 10]

$$\frac{d^2 \varphi}{d\tau^2} + (a - 2q \sin 2\tau) \varphi = 0, \quad (3)$$

$$\text{где } a = 4 \frac{K_1 + K_2 l^2 - R_0 b}{M f_1^2 C^2}; \quad q = \frac{2 \Delta R_1 b}{M f_1^2 C^2}; \quad f_1 t = \tau.$$

Уравнение (3) является уравнением Маттье, решение которого может быть найдено с использованием асимптотических методов. В выражении (3) константы a и q определяются параметрами стенда и газогенератора и характеризуют поведение его решений.

Комбинации параметров a, q , при которых решения уравнения (3) носят устойчивый (амплитуда колебаний ограничена) или неустойчивый (амплитуда колебаний газогенератора растет по ходу испытаний) характер, представляют большой интерес при оценке точности определения управляющих усилий. Существует множество методов отыскания зависимости между параметрами a и q , описывающих границы подобных зон, которые находят из решения уравнения (3). Одно из возможных решений уравнения (3) для условий $a = 1 - \delta$ и $0 < q < 1$ и $0 \leq \delta < 1$ приведено в [10].

При малых значениях параметра q ($0 < q \ll 1$) границы между устойчивыми и неустойчивыми решениями уравнения (3) можно приближенно получить методом малого параметра, используя степенные ряды

$$\varphi(\tau) = \varphi_0(\tau) + q\varphi_1(\tau) + q^2\varphi_2(\tau) + \dots; \quad (4)$$

$$a(q) = a_0 + qa_1 + q^2a_2 + \dots \quad (5)$$

На рис. 3 показано графическое представление областей устойчивых и неустойчивых решений уравнения (3) при $0 < q < 1$ с указанием уравнений границ, разделяющих области, которое называют диаграммой Айнса—Сретта. Исходя из характеристик стендовой системы определяют значения параметров a и q , которые позиционируют так называемую рабочую точку на диаграмме. Если эта точка расположена в одной из незаштрихованных областей, то угловые перемещения газогенератора ограничены по времени. Поэтому можно ожидать для этих соотношений параметров стенда качественной записи управляющих усилий. В случае, когда точка с найденными значениями параметров a и q расположена в заштрихованных областях, анализируемый стенд будет работать в режиме параметрического резонанса.

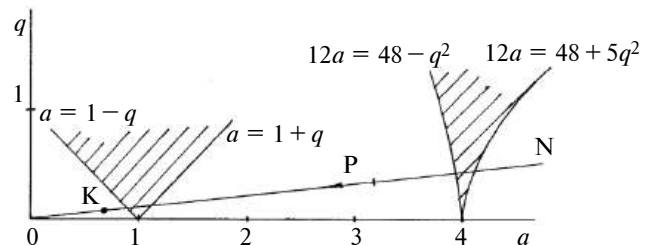


Рис. 3. Диаграмма Айнса—Сретта

В [10] приведена иллюстрация изложенного анализа динамической устойчивости стенда при испытании соплового блока с органом управления вектором тяги типа "вдв". Результаты градуировки стенда дали следующие значения характеристик упругости: $K_1 = 4 \cdot 10^5$ Нм/рад, $K_2 = 5,72 \cdot 10^6$ Н/м. Обработка осциллограммы осевой тяги двигателя дала следующие значения параметров: $R_0 = 83320$ Н, $\Delta R = 1235$ Н, $f_1 = 232$ с⁻¹.

Параметры расчетной схемы имеют следующие значения: $M = 1300$ Н·с²/м; $C = 1,68$ м; $b = 2,17$ м; $l = 2,78$ м.

Тогда $a = 0,898$; $q = 0,272 \cdot 10^{-4}$.

Полученные значения a и q , характеризующие "рабочую точку" стенда, отмечены на рис. 3

позицией "К". Точка К находится в устойчивой области диаграммы. Положение рабочей точки на диаграмме Айнса—Стретта в зависимости от частоты $f_1 = p$ перемещается по прямой линии. При $a = 1$ независимо от величины q стэнд работает в неустойчивой области. Для рассматриваемого случая это происходит при

$$p^* = \sqrt{\frac{4}{MC^2}(K_1 + K_2 l^2 - R_0 b)} = 220 \text{ 1/с.} \quad (6)$$

Частота пульсаций осевой тяги в 232 1/с мало отличается от резонансной частоты в 220 1/с, соответствующей режиму динамической неустойчивости стэнда, в связи с чем трудно ожидать качественного измерения управляющих сил.

В приведенной математической модели возникновения параметрического резонанса при испытаниях ракетных двигателей есть два существенных недостатка. Первый состоит в некоторой произвольности выбора (определения) координаты b (рис. 2), второй — в необоснованном допущении при построении уравнения Матье, состоящем в предположении, что при колебаниях газогенератора вектор тяги параллелен своему первоначальному направлению, соответствующему невозмущенному положению газогенератора. В [10] изложены результаты, исключающие эти проблемы.

Тем не менее описанная модель возникновения в стендовой системе параметрического резонанса фактически основана на явлении перекачки энергии из одного канала замера силового параметра в другой канал. При этом анализ динамической устойчивости может быть произведен графическим методом с помощью диаграммы Айнса—Стретта. Однако явление динамической неустойчивости проведения испытаний ракетных двигателей можно наблюдать и при их испытаниях в однокомпонентных стендах, предназначенных для определения только величины силы тяги двигателя.

Параметрический резонанс при определении силы тяги РДТТ по результатам его огневых стендовых испытаний

Задача определения стендовой тяги усложняется тем, что цепь ее измерения образуют не только датчики силы, но и элементы стапельной оснастки, предназначенной для передачи усилия от изделия к упорной плите стэнда. Поэтому точность ее измерения зависит как от метрологических характеристик датчиков силы, так и от конструкции и качества изготовления и установки стапеля [13].

На рис. 4 показана типичная упрощенная схема измерения тяги РДТТ для одной из конструкций стапеля, взятая из [10].

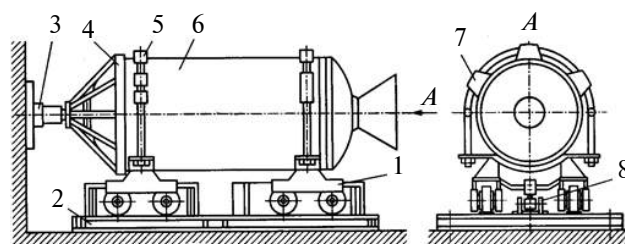


Рис. 4. Стапель кареточного типа:

1 — каретка; 2 — силовая рама; 3 — измерительный преобразователь силы; 4 — поддон; 5 — бандаж; 6 — испытуемый РДТТ; 7 — сухарь; 8 — направляющий ролик

Механический аналог стендовой системы, изображенной на рис. 4, приведен на рис. 5.

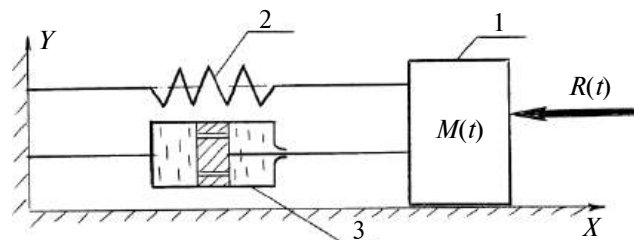


Рис. 5. Механический аналог стендовой системы при измерении силы тяги РДТТ

Этот механический аналог соответствует каналу замера осевой силы тяги РДТТ, где позицией 1 обозначена масса подвижной части (динамическая платформа, состоящая из каретки с установленным на ней двигателем) испытательного стэнда. В процессе горения топлива масса подвижной части стэнда меняется, что является основной особенностью испытаний РДТТ. Позицией 2 обозначена приведенная жесткость стендовой системы по каналу замера силы тяги, в состав которой входят жесткость датчика силы и жесткость системы предварительного нагружения датчика силы. Позицией 3 обозначены подвижные элементы стэнда (стапеля), характеризующие рассеивание энергии в системе. Дифференциальное уравнение, описывающее динамику системы, изображенной на рис. 5, при допущении постоянного расхода топлива G будет иметь вид

$$(M_0 - Gt)\ddot{x} + \mu\dot{x} + \xi x = R(t), \quad (7)$$

где M_0 — приведенная масса динамической платформы стэнда с установленным на ней РДТТ перед началом огневых испытаний;

$G = \text{const}$ — секундный расход твердого топлива при работе РДТТ;
 μ — приведенный коэффициент диссипативности системы;
 ξ — приведенная жесткость системы;
 \ddot{x}, \dot{x}, x — кинематические характеристики движения динамической платформы в ходе проведения испытаний, которые линейно коррелируют с сигналами, снимаемыми с датчика силы тяги.

Значение приведенной жесткости ξ канала замера силы тяги определяют по результатам статической градуировки стенда с закрепленным в нем испытуемым двигателем. Для определения приведенной массы M_0 и приведенного коэффициента диссипативности системы μ проводят динамическую градуировку стенда. В ходе градуировки стенда используют либо ударное воздействие на подвижную (динамическую) платформу стенда в направлении действия силы тяги РДТТ (функция Дирака), либо ступенчатую функцию силового нагружения канала замера осевой силы тяги (функция Хэвисайда) [9]. В результате проведения динамической градуировки стендовой системы в ней возникают затухающие гармонические колебания, которые характеризуются приведенными ее характеристиками, в том числе периодом колебаний T и коэффициентом уменьшения амплитуды колебаний за m полных циклов колебаний H_m , что можно определить по результатам динамической градуировки, откуда получаем [10]

$$M_0 = \frac{T^2 m^2 \xi}{m^2 + \ln^2 H_m}; \quad (8)$$

$$\mu = \frac{2mT\xi \ln H_m}{m^2 + \ln^2 H_m}. \quad (9)$$

Давление в камере сгорания РДТТ изменяется по полигармоническому закону, который можно записать с учетом только первой гармоники:

$$P_k = P_0 + \Delta P \sin pt, \quad (10)$$

где P_0 — постоянная составляющая давления в камере сгорания;
 ΔP — амплитуда пульсаций давления первой гармоники;
 p — частота пульсаций давления в РДТТ (первая гармоника).

Закон изменения скорости горения заряда (закон Бори) имеет вид [14]

$$U = V_1 P_k^v, \quad (11)$$

где V_1 — единичная скорость горения твердого топлива;
 v — степенной показатель в законе горения твердого топлива.

Секундный расход продуктов горения твердого топлива при условии его постоянства имеет вид

$$G = m_T U / e, \quad (12)$$

где m_T — масса заряда твердого топлива;
 e — горящий свод заряда твердого топлива (величина постоянная).

Устойчивость решения уравнения (7) определяется устойчивостью решения его левой части, для которой для простоты положим $\mu = 0$. Тогда левая часть с учетом выражений (10)—(12) примет вид

$$\ddot{x} + \frac{\xi}{M_0 - tA(P_0 + \Delta P \sin pt)^v} x = 0, \quad (13)$$

где $A = m_T U / e = \text{const}$.

В [10] отмечено, что при работе ракетного двигателя пульсации давления в камере сгорания имеют акустическую природу и могут быть описаны в первом приближении с помощью модели резонатора Гельмгольца, в соответствии с которой частота пульсаций давления в резонирующей полости (в камере сгорания ракетного двигателя) определяется как [10]

$$p = \phi \frac{a_H}{2\pi} \sqrt{\frac{S_{\text{крит}}}{L_{\text{к.с}} V_{\text{своб}}}}, \quad (14)$$

где a_H — скорость звука;
 $S_{\text{крит}}$ — характерная площадь поперечного сечения двигателя (площадь критического сечения);
 $L_{\text{к.с}}$ — некоторая характерная длина, например длина камеры сгорания двигателя;
 $V_{\text{своб}}$ — свободный объем камеры сгорания ракетного двигателя;
 ϕ — коэффициент пропорциональности.

В связи с изменением свободного объема РДТТ по мере выгорания топлива частота

первой гармонике пульсаций давления в камере сгорания будет изменяться по закону

$$p = \frac{E}{\sqrt{\Phi + t}}, \quad (15)$$

$$\text{где } E = \phi \frac{a_H}{2\pi} \sqrt{\frac{S_{\text{крит}} \gamma}{GL_{\text{к.с}}}}; \quad \Phi = \frac{\gamma V_0}{G};$$

V_0 — начальный свободный объем в камере сгорания РДТТ;

γ — удельная плотность твердого ракетного топлива;

t — время.

После подстановки выражения (15) в (13) получим

$$\ddot{x} + \frac{\xi}{M_0 - A \left(\frac{E^2}{p^2} - \Phi \right) (P_0 + \Delta P \sin pt)^v} x = 0. \quad (16)$$

Учитывая, что $P_0 \gg \Delta P$, разложим функционал в (16) перед x по малому параметру $\alpha = \Delta P \sin pt$ в ряд Тейлора и ограничимся первыми двумя слагаемыми:

$$\ddot{x} + \left[\frac{\xi}{M_0 - A \left(\frac{E^2}{p^2} - \Phi \right) P_0^v} + \frac{\xi A \left(\frac{E^2}{p^2} - \Phi \right) v P_0^{v-1}}{\left[M_0 - A \left(\frac{E^2}{p^2} - \Phi \right) P_0^v \right]^2} \Delta P \sin pt \right] x = 0. \quad (17)$$

Произведя в уравнении (17) замену переменных вида

$$x(t) = Y(\tau_1); \quad pt = 2\tau_1, \quad (18)$$

запишем его в следующем виде:

$$\ddot{Y}(\tau_1) + (a_1 - 2q_1 \sin 2\tau_1)Y = 0, \quad (19)$$

$$\text{где } a_1 = \frac{4\xi}{p^2 \left[M_0 - A \left(\frac{E^2}{p^2} - \Phi \right) P_0^v \right]};$$

$$q_1 = \frac{2\xi A \left(-\frac{E^2}{p^2} + \Phi \right) v P_0^{v-1} \Delta P}{p^2 \left[M_0 - A \left(\frac{E^2}{p^2} - \Phi \right) P_0^v \right]^2}.$$

По аналогии с предыдущим устойчивость решения уравнения (7) определяется устойчивостью решения уравнения (19). При этом параметры a_1 и q_1 определяют так называемую рабочую точку стеновой системы с испытуемым РДТТ, которая меняет свое местоположение на диаграмме Айнса—Стретта в процессе испытания, причем траекторию перемещения рабочей точки испытательного стенда в процессе проведения испытания РДТТ можно представить в виде

$$q_1 = a_1^2 \frac{p^2}{8\xi} A \left(\Phi - \frac{E^2}{p^2} \right) v P_0^{v-1} \Delta P. \quad (20)$$

Тогда качественный вид диаграммы Айнса—Стретта, соответствующей стеновой системе, предназначенной для отработки крупногабаритных РДТТ, может быть представлен в виде, изображенном на рис. 6.

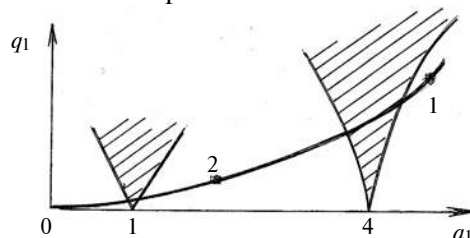


Рис. 6. Типичный вид диаграммы Айнса—Стретта для стеновой системы, предназначенной для испытания крупногабаритных РДТТ

В начале испытания РДТТ частота пульсаций давления в двигателе равна $p^* = E / \sqrt{\Phi}$, а в момент окончания работы двигателя ($t^* = m_T / G$), частота пульсаций p^{**} будет равна

$$p^{**} = E / \sqrt{\Phi + m_T / G}.$$

Характерные точки работы РДТТ в начале и в конце испытаний обозначены на рис. 6 цифрами 1 и 2. При перемещении рабочей точки в ходе испытаний она может оказаться в зоне динамической неустойчивости работы стенда. Это может сопровождаться возникновением в системе параметрических резонансных явлений, которые для современных РДТТ, имеющих в составе зарядов значительное содержание таких высокодетонирующих компонентов, как октоген и гексоген, способны привести к взрыву испытуемого двигателя и разрушению испытательного стенда.

Учет второй гармоники в возмущающей периодической силе существенно усложняет оценку динамической устойчивости испытательного стенда. Для упрощения расчетов пренебрегают

более высокими гармониками, но есть случаи, когда ими нельзя пренебречь. Это может иметь место при газогенераторных испытаниях сопловых блоков с органами управления вектором тяги с имитацией высотных условий [15].

Параметрический резонанс при стендовых газогенераторных испытаниях сопловых блоков с ОУВТ с имитацией высотных условий

Для имитации высотных условий при испытаниях сопловых блоков и ракетных двигателей используют энергию истекающего из сопла газобразного рабочего тела в целях создания в вакуумируемой камере, где размещен сопловый блок, необходимого давления, обеспечивающего безотрывные течения рабочего тела по соплу. Схема использования имитатора высотных условий при газогенераторных испытаниях сопловых блоков с ОУВТ в силоизмерительном стенде (см. рис. 1) приведена на рис. 7.

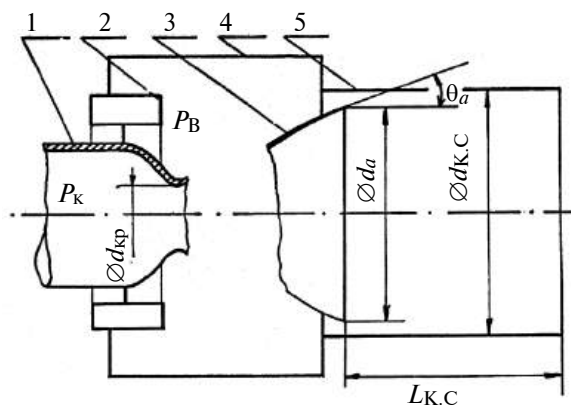


Рис. 7. Схема непроточного выхлопного диффузора с цилиндрической камерой смещения:

1 — корпус газогенератора; 2 — узел компенсации; 3 — сопловый блок испытуемого двигателя; 4 — вакуумная камера (барокамера); 5 — камера смещения

При работе газогенератора за счет перепада давления в вакуумируемой камере относительно окружающей среды появляется усилие, которое, воздействуя на переходное кольцо, уменьшает силу, действующую на датчик силы тяги. Величину противотяги находят по формуле

$$Q = F(P_H - P_B), \quad (21)$$

где F — площадь, определяемая по величине наружного диаметра переходного кольца, устанавливаемого на газогенераторе, на которое крепится узел компенсации.

В общем случае в стационарном режиме истечения газовой струи имеют место пульсации

давления не только в газогенераторе, но и в донной области (в вакуумируемой полости), которые могут быть описаны математической моделью резонатора Гельмгольца [15]:

$$f = \frac{a_H}{2\pi} \sqrt{\frac{S_1}{L_{K.C} W_{B.K}}}, \quad (22)$$

где a_H — скорость звука в окружающей среде (воздухе);

S_1 — площадь поперечного сечения пристеночного слоя;

$L_{K.C}$ — длина камеры смещения;

$W_{B.K}$ — свободный объем вакуумируемой камеры.

В первом приближении можно принять (см. рис. 7), что

$$S_1 = \pi(d_{K.C}^2 - d_a^2) / 4. \quad (23)$$

Механический аналог силоизмерительного стенда при газогенераторных испытаниях соплового блока с органом управления вектором тяги и с имитатором высотных условий, схема которого приведена на рис. 7, по каналу замера управляющей силы приведен на рис. 8.

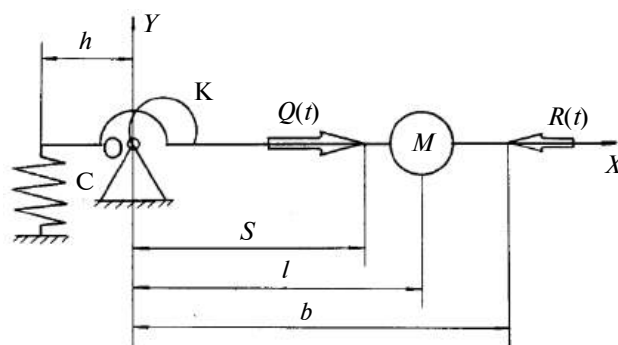


Рис. 8. Механический аналог силоизмерительного стенда с имитатором высотных условий по каналу замера управляющей силы

Ограничимся только главными гармониками в силе тяги и в силе противодействия в соответствующих законах изменения этих параметров в виде

$$Q = Q_0 + \Delta Q \cos ft; \quad R = R_0 + \Delta R \cos pt, \quad (24)$$

где Q_0 — стационарное значение противотяги;

$\Delta Q, f$ — амплитуда противотяги и частота ее изменения;

R_0 — стационарное значение силы тяги;

$\Delta R, p$ — амплитуда и частота пульсации силы тяги.

Тогда по аналогии с ранее изложенным уравнение вынужденных колебаний по каналу замера управляющей силы запишется в виде

$$\frac{d^2\phi}{d\tau} + (\lambda - \mu \cos 2\tau + q\mu \cos 2v\tau)\phi = 0, \quad (25)$$

$$\text{где } \lambda = 4 \frac{K + Ch^2 - R_0b + Q_0S}{ml^2 p^2};$$

$$\mu = \frac{4\Delta Pb}{ml^2 p^2};$$

$$q = -\frac{8\Delta Q}{b\Delta R}; \quad \tau = pt / 2; \quad v = f / p;$$

f, p — частоты пульсаций первых гармоник силы противодействия и силы тяги газогенератора соответственно.

Фактически уравнение (25) описывает поведение системы, нагруженной двухмодальной возмущающей силой.

Если v — отношение целых чисел, то данное уравнение является уравнением Хилла [12]. Поведение его решений определяется соотношением между параметрами λ, μ, q, v . Используя метод малого параметра [3], можно найти их комбинации, при которых решения уравнения (25) имеют устойчивый или неустойчивый характер. Так можно показать, что для $v = 1,5$ и $v = 5$ для первых двух областей неустойчивости ($\lambda \approx 1$; $\lambda \approx 4$) будем иметь следующие выражения:

- для $v = 1,5$

$$\begin{aligned} 1 - \frac{1}{2}\mu + \left(\frac{7}{32} - \frac{1}{10}q^2\right)\mu^2 < \lambda < 1 + \\ + \frac{1}{2}\mu + \left(\frac{7}{32} + \frac{1}{10}q^2\right)\mu^2; \\ 4 - \left(\frac{1}{3} + \frac{8}{7}q^2\right)\mu^2 < \lambda < 4 + \left(\frac{5}{3} - \frac{8}{7}q^2\right)\mu^2; \end{aligned} \quad (26)$$

- для $v = 5$

$$\begin{aligned} 1 - \frac{1}{2}\mu + \left(\frac{7}{32} - \frac{1}{192}q^2\right)\mu^2 < \lambda < 1 + \\ + \frac{1}{2}\mu + \left(\frac{7}{32} + \frac{1}{192}q^2\right)\mu^2; \\ 4 - \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{12}q^2\right)\mu^2 < \lambda < 4 + \left(\frac{5}{3} - \frac{1}{12}q^2\right)\mu^2. \end{aligned} \quad (27)$$

На рис. 9 графически представлены границы зон параметрического резонанса гипотетического огневого стенда при $v = 1,5$ для различных значений q .

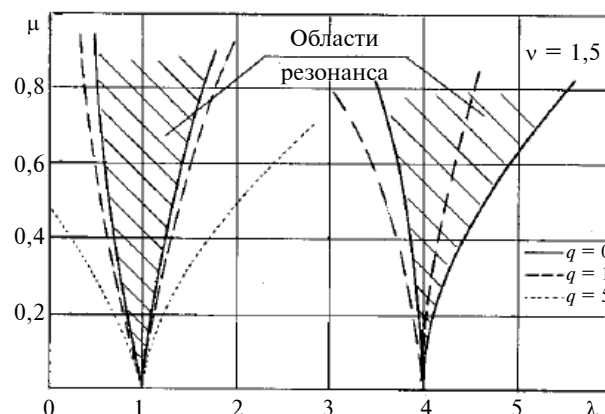


Рис. 9. Типичная диаграмма устойчивости одностепенного высотного стенда

Как следует из выражений (26) и (27), учет второй гармоники искажает форму диаграммы Айнса—Стретта. Более того, для оценки динамической устойчивости колебательного контура с учетом второй гармоники возмущающей силы целесообразней использовать аналитическую оценку в виде зависимостей (26) и (27), а не диаграмму Айнса—Стретта.

Выводы

Существующие методы оценки динамической устойчивости неточны, поскольку точные решения дифференциальных уравнений, описывающих параметрические колебания, например уравнений Матье и Хилла, отсутствуют.

Точность и достоверность оценки динамической устойчивости колебательных процессов в техническом объекте во многом определяется обоснованностью выбора механического аналога технического объекта и сделанными при этом допущениями.

Механические аналоги исследуемых технических объектов являются детерминированными системами, точность определения приведенных характеристик которых, таких как инерционная, демпфирующая и упругая, влияет на эффективность оценки динамической устойчивости.

Расчеты показывают, что сложность использования того или иного метода анализа динамической устойчивости растет в геометрической прогрессии с ростом числа степеней свободы, которое в соответствии с рассмотренными зада-

чами в первом приближении соответствует числу измеряемых (определяемых) составляющих вектора силы тяги испытываемого двигателя.

Поэтому возникает задача по определению границ применимости аналитических моделей оценки динамической устойчивости технических систем. Ответ можно получить только в результате экспериментального моделирования пара-

метрических колебаний, например в рычажных системах.

Особенности получения математических моделей двухстепенных (многостепенных) механических аналогов и проблемы физического моделирования параметрического резонанса будут рассмотрены во второй части настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле. — М.: Физматлит, 1959. — 439 с.
2. Магнус К. Колебания. Введение в исследование колебательных систем. — М.: Мир, 1982. — 304 с.
3. Моисеев Н. Н. Асимптотические методы нелинейной механики. — М.: Физматлит, 1969. — 379 с.
4. Бабаков И. М. Теория колебаний. — М.: Физматлит, 1968. — 559 с.
5. Шмидт Г. Параметрические колебания. — М.: Мир, 1978. — 335 с.
6. Полищук Д. Ф., Матвеев А. С. К вопросу динамической устойчивости цилиндрических пружин // Сопротивление материалов и теория сооружений. Республиканский межведомственный научно-технический сборник. 1972. Вып. 16. С. 185—186.
7. Хвингия М. В. Вибрация пружин. — М.: Машиностроение, 1969. — 287 с.
8. Пановко Я. Г., Губанова И. И. Устойчивость и колебания упругих систем. — М.: Наука, 1964. — 336 с.
9. Черепов В. И., Кузнецов Н. П., Гребенкин В. И. Идентификация силовых характеристик объектов машиностроения. Паспортизация силоизмерительных систем. — М.—Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2002. — 200 с.
10. Испытания ракетных двигателей твердого топлива. В двух частях. Ч. 2. Стендовые огневые и летные испытания / под общ. ред. Кузнецова Н. П. — М.—Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2011. — 668 с.
11. Кузнецов Н. П., Коротаев С. М. Особенности динамики стендовой системы при испытаниях РДТТ // Вестник ИжГТУ. 2007. № 4 (36). С. 41—47.
12. Якубович В. А., Старжинский В. М. Линейные дифференциальные уравнения с периодическими коэффициентами и их приложения. — М.: Наука, 1972. — 720 с.
13. Жарков А. С. Стендовые испытания энергетических установок на твердом топливе: учеб. пособие. — Бийск: Изд-во Алт. гос. тех. ун-та, 2001. — 281 с.
14. Шапиро Я. М. Теория ракетного двигателя на твердом топливе. — М.: Воениздат, 1968. — 536 с.
15. Органы управления вектором тяги твердотопливных ракет: расчет, конструктивные особенности, эксперимент / под ред. Кузнецова Н. П. — М.—Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2006. — 552 с.

PARAMETRIC OSCILLATIONS IN ENGINEERING SCIENCE AND THEIR MODELLING PROBLEMS (Part 1)

^{1, 2} V. A. Volokhin, ² I. V. Grakovich, ² N. P. Kuznetsov

¹ POO "Petroleum Technical College", Izhevsk, Russia

² Izhevsk State Technical University named after Mikhail Kalashnikov, Izhevsk, Russia

The article gives examples of technical systems in which manifestations of parametric oscillations are possible, and the principles of choosing their mechanical analogues. The features of the choice of analytical estimates of the dynamic instability of technical systems (mechanical analogues) loaded with an external disturbing force having a periodic component are considered.

Keywords: oscillations, parametric resonance, dynamic instability, mechanical analogues, criteria of dynamic instability.

Bibliography — 15 references.

Received June 1, 2020

УДК 531.15

ГОДОГРАФЫ СУПЕРПОЗИЦИЙ ВРАЩЕНИЙ

И. П. Попов

Курганский государственный университет, г. Курган, Россия

Установлено, что подобно тому, как результатом сложения двух равномерных прямолинейных движений является также равномерное прямолинейное движение, результатом сложения двух равномерных однонаправленных круговых движений является равномерное круговое движение. Годографом при сложении двух равномерных противоположно направленных круговых движений является эллипс. При сложении двух несинхронных вращений возможны годографы в виде улитки.

Ключевые слова: координаты, вращение, вектор, годограф, эллипс, окружность, улитка.

Если система отсчета $x'O'y'$ движется прямолинейно и равномерно со скоростью v_1 в неподвижной системе отсчета xOy (рис. 1), и точка a движется прямолинейно и равномерно со скоростью v_2 в системе отсчета $x'O'y'$, то в соответствии с принципом относительности Галилея точка a движется прямолинейно и равномерно со скоростью v_3 в системе отсчета xOy , а годографом вектора A , соединяющего точки O и a , является прямая линия [1, 2].

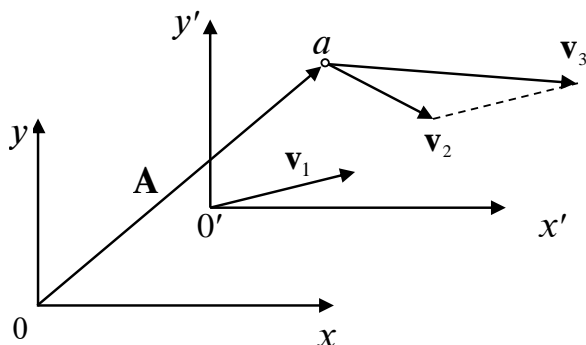


Рис. 1. Сложение движений

Цель работы — установить, как в подобной ситуации обстоит дело при сложении вращательных синхронных движений [3, 4].

Актуальность данного исследования определяется тем, что во многих механизмах, таких как

мультиинертный осциллятор [5–9], планетарные передачи, приводы фрез в машинах для очистки труб больших диаметров и т. п., реализуется суммирование вращательных движений [10]. Форма годографа является полезной информацией при проектировании подобных устройств.

Пусть точка O' вращается вокруг точки O в системе отсчета xOy с постоянной угловой скоростью ω . Расстояние ρ_1 между точками не меняется. Координатные оси обеих систем отсчета всегда попарно параллельны. Точка a вращается вокруг точки O' в системе отсчета $x'O'y'$ с постоянной угловой скоростью $-\omega$ или $+\omega$. Расстояние ρ_2 между точками не меняется.

Разнонаправленные вращения

Теорема 1. При разнонаправленных вращениях точек a и O' годографом вектора A является эллипс.

Доказательство.

Координаты точки O' в системе xOy

$$x_1 = \rho_1 \cos(\omega t + \varphi_1); \quad y_1 = \rho_1 \sin(\omega t + \varphi_1). \quad (1)$$

Координаты точки a в системе $x'O'y'$

$$x_2 = \rho_2 \cos(-\omega t + \varphi_2); \quad y_2 = \rho_2 \sin(-\omega t + \varphi_2).$$

Здесь φ_1, φ_2 — начальные углы.

Координаты вектора A в системе xOy

$$x_A = x_1 + x_2 = \rho_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + \rho_2 \cos(-\omega t + \varphi_2);$$

$$y_A = y_1 + y_2 = \rho_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \rho_2 \sin(-\omega t + \varphi_2);$$

Попов Игорь Павлович, старший преподаватель кафедры "Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты".

E-mail: ip.porow@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 23 августа 2020 г.

© Попов И. П., 2020

$$x_A = \cos \omega t (\rho_1 \cos \varphi_1 + \rho_2 \cos \varphi_2) - \\ - \sin \omega t (\rho_1 \sin \varphi_1 - \rho_2 \sin \varphi_2);$$

$$y_A = \sin \omega t (\rho_1 \cos \varphi_1 - \rho_2 \cos \varphi_2) + \\ + \cos \omega t (\rho_1 \sin \varphi_1 + \rho_2 \sin \varphi_2).$$

Отсюда

$$\sin \omega t = \frac{y(\rho_1 \cos \varphi_1 + \rho_2 \cos \varphi_2)}{\rho_1^2 - \rho_2^2} - \\ - \frac{x(\rho_1 \sin \varphi_1 + \rho_2 \sin \varphi_2)}{\rho_1^2 - \rho_2^2};$$

$$\cos \omega t = \frac{x(\rho_1 \cos \varphi_1 - \rho_2 \cos \varphi_2)}{\rho_1^2 - \rho_2^2} + \\ + \frac{y(\rho_1 \sin \varphi_1 - \rho_2 \sin \varphi_2)}{\rho_1^2 - \rho_2^2};$$

$$\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t = 1;$$

$$\frac{y^2 (\rho_1 \cos \varphi_1 + \rho_2 \cos \varphi_2)^2 + x^2 (\rho_1 \sin \varphi_1 + \rho_2 \sin \varphi_2)^2}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} - \\ - \frac{2xy(\rho_1 \cos \varphi_1 + \rho_2 \cos \varphi_2)(\rho_1 \sin \varphi_1 + \rho_2 \sin \varphi_2)}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} + \\ + \frac{x^2 (\rho_1 \cos \varphi_1 - \rho_2 \cos \varphi_2)^2 + y^2 (\rho_1 \sin \varphi_1 - \rho_2 \sin \varphi_2)^2}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} + \\ + \frac{2xy(\rho_1 \cos \varphi_1 - \rho_2 \cos \varphi_2)(\rho_1 \sin \varphi_1 - \rho_2 \sin \varphi_2)}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} = 1;$$

$$\frac{x^2 [\rho_1^2 + \rho_2^2 - 2\rho_1\rho_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2)]}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} + \\ + \frac{y^2 [\rho_1^2 + \rho_2^2 + 2\rho_1\rho_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2)]}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} - \\ - \frac{4xy\rho_1\rho_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2)}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} = 1. \quad (2)$$

Это уравнение эллипса.
Теорема доказана.

Теорема 2. Большая и малая полуоси эллипса (2), соответственно, равны $\rho_1 + \rho_2$ и $|\rho_1 - \rho_2|$.

Доказательство.

Обратным отсчетом времени можно добиться равенства $\varphi_1 = \varphi_2$, а поворотом координатных осей — равенства $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$. Тогда (2) примет вид

$$\frac{x^2 (\rho_1^2 + \rho_2^2 - 2\rho_1\rho_2)}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} + \frac{y^2 (\rho_1^2 + \rho_2^2 + 2\rho_1\rho_2)}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} = 1; \\ \frac{x^2}{(\rho_1 + \rho_2)^2} + \frac{y^2}{(\rho_1 - \rho_2)^2} = 1 \quad (3)$$

(канонический вид).

Теорема доказана.

Следствие 1. При $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ эллипс (2) вырождается в отрезок прямой линии длиной 4ρ .

Следствие 2. Корни характеристического уравнения эллипса равны

$$\lambda_1 = (\rho_1 + \rho_2)^2; \quad \lambda_2 = (\rho_1 - \rho_2)^2.$$

Следствие 3. Эксцентриситет эллипса равен отношению среднегеометрического значения величин ρ_1 и ρ_2 к их среднеарифметическому значению

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\rho_1\rho_2}}{(\rho_1 + \rho_2)/2}.$$

Следствие 4. Фокусы эллипса (для канонической формулы (3)) равны

$$f_{1,2} = (\pm 2\sqrt{\rho_1\rho_2}, 0).$$

Теорема 3. Оси эллиптического годографа повернуты на угол $(\varphi_1 + \varphi_2)/2$ в системе отсчета xOy .

Доказательство.

При повороте координатных осей на угол $(\varphi_1 + \varphi_2)/2$ выражение (3) принимает вид

$$\frac{\left(x \cos \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} + y \sin \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right)^2}{(\rho_1 + \rho_2)^2} + \\ + \frac{\left(-x \sin \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} + y \cos \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right)^2}{(\rho_1 - \rho_2)^2} = 1;$$

$$\frac{x^2 \left[\rho_1^2 + \rho_2^2 - 2\rho_1\rho_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2) \right]}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} +$$

$$+ \frac{y^2 \left[\rho_1^2 + \rho_2^2 + 2\rho_1\rho_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2) \right]}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} -$$

$$- \frac{4xy\rho_1\rho_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2)}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} = 1,$$

что совпадает с (2).

Теорема доказана.

На рис. 2 $\varphi_1 = 120^\circ$, $\varphi_2 = -30^\circ$, следовательно, оси эллипса повернуты на 45° .

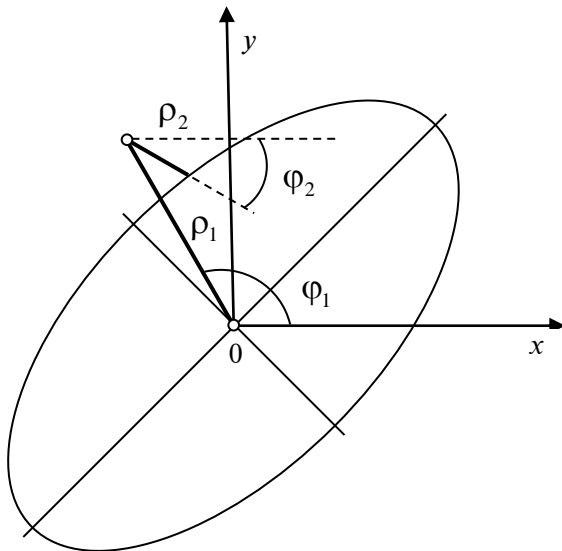


Рис. 2. Эллиптический годограф

Обратным ходом рассуждений можно доказывать теорему 4.

Теорема 4. Если годографом вектора \mathbf{A} является эллипс с полуосями $\rho_1 + \rho_2$ и $|\rho_1 - \rho_2|$, то точка a вращается вокруг точки O' с постоянной угловой скоростью $-\omega$ в системе отсчета $x'O'y'$.

Однонаправленные вращения

Теорема 5. При однонаправленных вращениях точек a и O' годографом вектора \mathbf{A} является окружность с центром в точке O .

Доказательство.

Координаты точки O' в системе xOy заданы выражением (1).

Координаты точки a в системе $x'O'y'$

$$x_2 = \rho_2 \cos(\omega t + \varphi_2); \quad y_2 = \rho_2 \sin(\omega t + \varphi_2).$$

Координаты вектора \mathbf{A} в системе xOy :

$$x_A = x_1 + x_2 = \rho_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + \rho_2 \cos(\omega t + \varphi_2);$$

$$y_A = y_1 + y_2 = \rho_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \rho_2 \sin(\omega t + \varphi_2).$$

Квадрат вектора \mathbf{A} равен

$$\begin{aligned} \mathbf{A}^2 &= x_A^2 + y_A^2 = \rho_1^2 \cos^2(\omega t + \varphi_1) + \rho_2^2 \cos^2(\omega t + \varphi_2) + \\ &+ 2\rho_1\rho_2 \cos(\omega t + \varphi_1) \cos(\omega t + \varphi_2) + \\ &+ \rho_1^2 \sin^2(\omega t + \varphi_1) + \rho_2^2 \sin^2(\omega t + \varphi_2) + \\ &+ 2\rho_1\rho_2 \sin(\omega t + \varphi_1) \sin(\omega t + \varphi_2) = \\ &= \rho_1^2 + \rho_2^2 + 2\rho_1\rho_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2). \end{aligned}$$

Длина вектора \mathbf{A} неизменна, следовательно, его годографом является окружность.

Теорема доказана.

Следствие. Вектор \mathbf{A} вращается с угловой скоростью ω в системе отсчета xOy .

Это вытекает из того, что форма треугольника $OO'a$ неизменна, а его сторона OO' вращается с угловой скоростью ω .

Обратным ходом рассуждений можно доказать теорему 6.

Теорема 6. Если годографом вектора \mathbf{A} является окружность, то точка a вращается вокруг точки O' с постоянной угловой скоростью $+\omega$ в системе отсчета $x'O'y'$.

Теорема 7. Если точка a неподвижна в системе отсчета $x'O'y'$, то годографом вектора \mathbf{A} является окружность радиуса ρ_1 , координаты центра которой в системе отсчета xOy равны $x_{O1} = \rho_2 \cos \varphi_2$, $y_{O1} = \rho_2 \sin \varphi_2$.

Доказательство.

Координаты точки O' в системе xOy заданы выражением (1).

Координаты точки a в системе $x'O'y'$

$$x_2 = \rho_2 \cos \varphi_2; \quad y_2 = \rho_2 \sin \varphi_2.$$

Координаты вектора \mathbf{A} в системе xOy :

$$x_A = x_1 + x_2 = \rho_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + \rho_2 \cos \varphi_2;$$

$$y_A = y_1 + y_2 = \rho_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \rho_2 \sin \varphi_2;$$

$$x_A - \rho_2 \cos \varphi_2 = \rho_1 \cos(\omega t + \varphi_1);$$

$$y_A - \rho_2 \sin \varphi_2 = \rho_1 \sin(\omega t + \varphi_1);$$

$$(x_A - \rho_2 \cos \varphi_2)^2 + (y_A - \rho_2 \sin \varphi_2)^2 = \rho_1^2.$$

Теорема доказана.

Пример сложения кратных вращений

Пусть точка a вращается вокруг точки $0'$ в системе отсчета $x'O'y'$ с постоянной угловой скоростью $+2\omega$ и $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$.

Координаты точки $0'$ в системе xOy

$$x_1 = \rho_1 \cos \omega t; \quad y_1 = \rho_1 \sin \omega t.$$

Координаты точки a в системе $x'O'y'$

$$x_2 = \rho_2 \cos 2\omega t; \quad y_2 = \rho_2 \sin 2\omega t.$$

Координаты вектора A в системе xOy

$$x_A = \rho_1 \cos \omega t + \rho_2 \cos 2\omega t;$$

$$y_A = \rho_1 \sin \omega t + \rho_2 \sin 2\omega t.$$

Годограф вектора A (улитка) при $\rho_1 = \rho_2$ изображен на рис. 3.

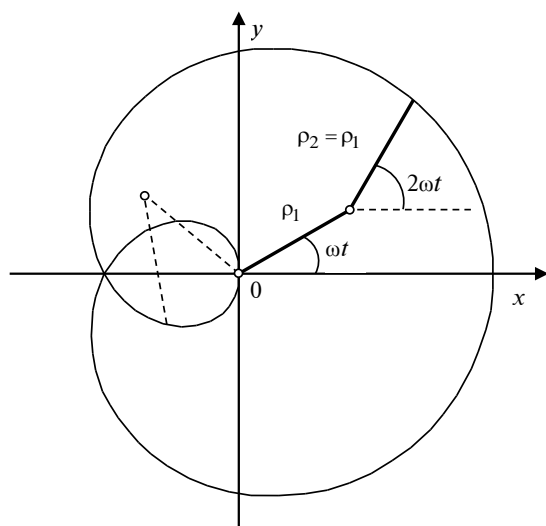


Рис. 3. Улиточный годограф

Уравнение этой улитки в полярных координатах имеет вид

$$\rho = \rho_1 \sqrt{2 + 2 \cos \frac{2}{3} \varphi}.$$

Для сравнения укажем, что формула улитки Паскаля, имеющей заметное внешнее сходство, выглядит как

$$\rho = b + a \cos \varphi.$$

Условием возникновения петли улиточного годографа является

$$\rho_1 \sin \omega t < \rho_2 \sin 2\omega t;$$

$$\rho_1 \sin \omega t < \rho_2 \cdot 2 \sin \omega t \cos \omega t;$$

$$\rho_1 < 2\rho_2 \cos \omega t.$$

При $\rho_1 \geq 2\rho_2$ петля не возникает (рис. 4).

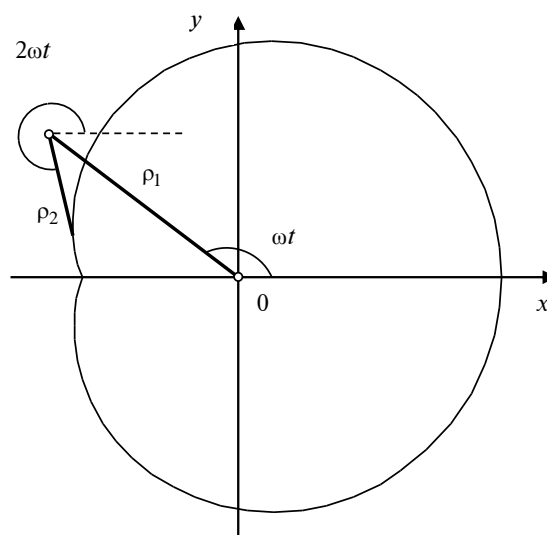


Рис. 4. Улиточный годограф без петли

Заключение

Подобно тому, как результатом сложения двух равномерных прямолинейных движений является также равномерное прямолинейное движение, результатом сложения двух равномерных однонаправленных круговых движений является равномерное круговое движение.

Годографом при сложении двух равномерных противоположно направленных круговых движений является эллипс.

При сложении двух несинхронных вращений возможны годографы в виде улитки.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании механизмов, реализующих сложные вращательные движения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Попов И. П.** Расчетные системы отсчета при относительном движении космических объектов // Инженерная физика. 2019. № 3. С. 40—43. DOI: 10.25791/infizik.03.2019.564
2. **Попов И. П.** Системы отсчета в навигации движущихся объектов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20. № 3. С. 189—192. <https://doi.org/10.17587/mau.20.189-192>
3. **Попов И. П.** Электромагнитный маховик для ориентирования орбитальных объектов // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2019. № 2. С. 15—17.
4. **Попов И. П.** Роторно-реактивный движитель // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2018. № 4. С. 24—26.
5. **Попов И. П.** Теоретические предпосылки создания мультиинертного осциллятора // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2020. № 1(145). С. 15—19.
6. **Попов И. П.** Моделирование триинертного осциллятора // Прикладная математика и вопросы управления. 2018. № 4. С. 73—79. DOI: 10.15593/2499-9873/2018.4.04
7. **Попов И. П.** Моделирование биинертного осциллятора // Приложение математики в экономических и технических исследованиях: сб. науч. тр. / под общ. ред. Мхитаряна В. С. — Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2017. С. 188—192.
8. **Попов И. П., Родионов С. С., Мошкин В. И.** Повышение энергоэффективности приводов решетчатых сортировальных вибромашин. — Курган: Изд-во Курганского государственного ун-та, 2019. — 154 с.
9. **Попов И. П.** Мультиинертный колебательный механизм // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2020. № 2(340). С. 19—25. DOI: 10.33979/2073-7408-2020-340-2-19-25
10. **Попов И. П.** Суперпозиция граничных состояний макрообъектов // Вести вузов Черноземья. 2015. № 2. С. 43—47.

HODOGRAPHS OF SUPERPOSITION OF ROTATIONS

I. P. Popov

Kurgan State University, Kurgan, Russia

It was found that, just as the result of the addition of two uniform rectilinear movements is also a uniform rectilinear movement, the result of the addition of two uniform unidirectional circular movements is also a uniform circular movement. The hodograph when two uniform oppositely directed circular motions are added is an ellipse. When two asynchronous rotations are added, cochlear hodographs are possible.

Keywords: coordinates, rotation, vector, hodograph, ellipse, circle, snail.

Bibliography — 10 references.

Received August 23, 2020

УДК 623.094

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВИАЦИОННЫХ БОЕВЫХ КОМПЛЕКСОВ ВОЕННО-ТРАНСПОРТНЫХ САМОЛЕТОВ

А. А. Плиплин, канд. техн. наук; *А. Н. Демин*, канд. техн. наук
Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

А. В. Родионов, канд. техн. наук
Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

В. Ю. Тюрин, канд. воен. наук
Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А. К. Серова, г. Краснодар, Россия

Дано решение задачи прицеливания на борту военно-транспортного самолета, целью которой является приземление грузов в центр заданной площадки приземления. Результатом решения является определение точки начала выброски грузов. Характеристиками площадки приземления служат ее длина, ширина и центр.

Ключевые слова: десантирование, задача прицеливания, площадка приземления.

Важным этапом при планировании боевых действий самолетами военно-транспортной авиации (ВТА) на десантирование является оценка эффективности функционирования авиационного боевого комплекса (АБК), которая сводится к определению критерия эффективности боевых авиационных комплексов ВТА, а именно определения вероятности выполнения боевого задания на десантирование. При планировании операции на десантирование важное значение имеет выбор площадки приземления (ПП) и ее размеров, по которым определяют оптимальный маршрут захода на ПП, а на борту военно-транспортного самолета решают задачу прицеливания.

Задача прицеливания при десантировании как личного состава, так и вооружения и военной техники (ВВТ) с самолетов ВТА — задача управления летательным аппаратом (ЛА) в целях достижения такого состояния, при котором обеспечивается приземление грузов, ВВТ в центр заданной площадки приземления (ЦПП) [1, 2].

В ходе решения задачи прицеливания на борту самолета производят расчет баллистических характеристик десантируемого объекта, вектора средней скорости ветра. Результатом расчета является определение точки начала выброски (ТНВ), в которой должно произойти отделение объекта от летательного аппарата (ЛА). В системе непрерывно вычисляют расстояние, оставшееся до ТНВ.

Важными характеристиками ПП являются ее длина $L_{ПП}$, ширина $B_{ПП}$ и центр ЦПП (рис. 1).

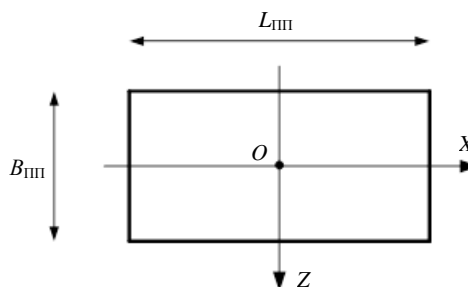


Рис. 1. Размеры площадки приземления

Плиплин Андрей Александрович, преподаватель.

E-mail: samolet31@rambler.ru

Демин Андрей Николаевич, заместитель начальника кафедры.

E-mail: samolet31@rambler.ru

Родионов Алексей Васильевич, доцент, начальник цикла-старший преподаватель.

E-mail: samolet31@rambler.ru

Тюрин Валерий Юрьевич, доцент, начальник кафедры.

E-mail: samolet31@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 28 февраля 2020 г.

© Плиплин А. А., Демин А. Н., Родионов А. В., Тюрин В. Ю., 2020

Рассмотрим вероятность точного приземления десантируемых объектов при серийной выброске по оси OX .

Для того чтобы вся серия попала в рассматриваемую ПП, необходимо, чтобы абсолютное значение ошибки прицеливания для центра серии не превысило величины $\frac{L_{ПП} - l_{сер}}{2}$, т. е.

$$|X| \leq \frac{L_{ПП} - l_{сер}}{2} \text{ (рис. 2).}$$

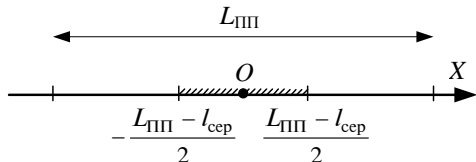


Рис. 2. Определение длины серии десантируемых объектов

Ошибка прицеливания по оси OX — случайная величина, распределенная по нормальному закону с математическим ожиданием (МО), равным нулю, и среднеквадратическое отклонение (СКО) $\sigma_X = n\sigma$.

Вероятность попадания десантируемых объектов на ПП по оси OX находим по формуле

$$\begin{aligned} P\left(|X| \leq \frac{L_{ПП} - l_{сер}}{2}\right) &= \\ &= P\left(-\frac{L_{ПП} - l_{сер}}{2} \leq X \leq \frac{L_{ПП} - l_{сер}}{2}\right) = \\ &= F\left(\frac{\frac{L_{ПП} - l_{сер}}{2}}{n\sigma}\right) - F\left(-\frac{\frac{L_{ПП} - l_{сер}}{2}}{n\sigma}\right) = \\ &= F\left(\frac{L_{ПП} - l_{сер}}{2n\sigma}\right) - F\left(-\frac{L_{ПП} - l_{сер}}{2n\sigma}\right), \end{aligned}$$

где $F(\dots)$ — значение нормированной нормальной функции распределения [3].

Для упрощения формулы расчета вероятности попадания десантируемых объектов на ПП по оси OX запишем ее через функцию Лапласа $\Phi_0(\dots)$:

$$\begin{aligned} P\left(|X| \leq \frac{L_{ПП} - l_{сер}}{2}\right) &= 2P\left(X \leq \frac{L_{ПП} - l_{сер}}{2}\right) = \\ &= 2\Phi_0\left(\frac{\frac{L_{ПП} - l_{сер}}{2}}{n\sigma}\right) = 2\Phi_0\left(\frac{L_{ПП} - l_{сер}}{2n\sigma}\right) = \\ &= 2\Phi_0\left(-\frac{L_{ПП} - l_{сер}}{2n\sigma}\right). \end{aligned}$$

Рассмотрим вероятность попадания десантируемых объектов на ПП по оси OZ .

Проекция длины серии на ось OZ с учетом угла сноса $\Delta\gamma$ равна $l_{пад} \sin \Delta\gamma$.

Для того чтобы вся серия попала на рассматриваемую ПП, необходимо, чтобы абсолютное значение ошибки прицеливания для центра серии не превысило значения

$$|Z| \leq \frac{L_{ПП} - l_{сер} \sin \Delta\gamma}{2}.$$

Ошибка прицеливания по оси OZ — случайная величина, распределенная по нормальному закону с математическим ожиданием, равным нулю, и СКО $\sigma_Z = n\sigma$.

Вероятность попадания десантируемых объектов при серийном десантировании можно рассчитать через нормальную функцию распределения:

$$\begin{aligned} P\left(|Z| \leq \frac{L_{ПП} - l_{сер} \sin \Delta\gamma}{2}\right) &= \\ &= P\left(-\frac{L_{ПП} - l_{сер} \sin \Delta\gamma}{2} \leq Z \leq \frac{L_{ПП} - l_{сер} \sin \Delta\gamma}{2}\right) = \\ &= F\left(\frac{\frac{L_{ПП} - l_{сер} \sin \Delta\gamma}{2}}{n\sigma}\right) - F\left(-\frac{\frac{L_{ПП} - l_{сер} \sin \Delta\gamma}{2}}{n\sigma}\right) = \\ &= F\left(\frac{L_{ПП} - l_{сер} \sin \Delta\gamma}{2n\sigma}\right) - F\left(-\frac{L_{ПП} - l_{сер} \sin \Delta\gamma}{2n\sigma}\right), \end{aligned}$$

через функцию Лапласа:

$$\begin{aligned} P\left(|Z| \leq \frac{L_{ПП} - l_{сер} \sin \Delta\gamma}{2}\right) &= \\ &= 2P\left(Z \leq \frac{L_{ПП} - l_{сер} \sin \Delta\gamma}{2}\right) = \\ &= 2\Phi_0\left(\frac{\frac{L_{ПП} - l_{сер} \sin \Delta\gamma}{2}}{n\sigma}\right) = \\ &= 2\Phi_0\left(\frac{L_{ПП} - l_{сер} \sin \Delta\gamma}{2n\sigma}\right) = \\ &= 2\Phi_0\left(-\frac{L_{ПП} - l_{сер} \sin \Delta\gamma}{2n\sigma}\right). \end{aligned}$$

Вероятность попадания в ПП десантируемых объектов находим через нормальную функцию распределения:

$$W = \left[F\left(\frac{L_{\text{ПП}} - l_{\text{сеп}}}{2n\sigma}\right) - F\left(-\frac{L_{\text{ПП}} - l_{\text{сеп}}}{2n\sigma}\right) \right] \times \\ \times \left[F\left(\frac{L_{\text{ПП}} - l_{\text{сеп}} \sin \Delta\gamma}{2n\sigma}\right) - F\left(-\frac{L_{\text{ПП}} - l_{\text{сеп}} \sin \Delta\gamma}{2n\sigma}\right) \right],$$

и через функцию Лапласа:

$$W = 4\Phi_0\left(\frac{L_{\text{ПП}} - l_{\text{сеп}}}{2n\sigma}\right)\Phi_0\left(\frac{L_{\text{ПП}} - l_{\text{сеп}} \sin \Delta\gamma}{2n\sigma}\right).$$

В случае выполнения задачи на парашютное десантирование несколькими военно-транспортными самолетами в боевом порядке (рис. 3) при условии, что $\Delta\gamma = 0$, важно, чтобы для левого самолета проекция приземлившихся десантируемых объектов не коснулась левой границы ПП, правой — правой границы.

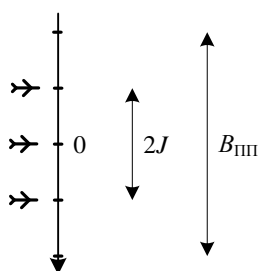


Рис. 3. Выполнение десантирования тремя военно-транспортными самолетами в боевом порядке

Ошибка прицеливания для правого самолета по оси OZ — случайная величина, распределенная по нормальному закону с математическим ожиданием, равным $m_Z = J$, и СКО $\sigma_Z = n\sigma$.

Тогда координата Z должна удовлетворять следующим ограничениям:

$$Z < \frac{B_{\text{НН}}}{2}.$$

Через функцию Лапласа имеем

$$P\left(Z < \frac{B_{\text{НН}}}{2}\right) = 0,5 + \Phi_0\left(\frac{\frac{B_{\text{НН}}}{2} - J}{n\sigma}\right) = \\ = 0,5 + \Phi_0\left(\frac{B_{\text{НН}} - 2J}{2n\sigma}\right).$$

Точно также получается для левого самолета.

Запишем ограничения для крайних военно-транспортных самолетов:

$$\left[0,5 + \Phi_0\left(\frac{B_{\text{НН}} - 2J}{2n\sigma}\right)\right]^2.$$

Таким образом, левый и правый военно-транспортные самолеты попадают в границы (для среднего самолета считаем, что он однозначно попадет в границы).

По оси OX получаем, что все три военно-транспортных самолета должны попасть в границы по оси OX :

$$\left[2\Phi_0\left(\frac{L_{\text{НН}} - l_{\text{НН}}}{2n\sigma}\right)\right]^3.$$

Окончательно в боевом порядке имеем

$$W = \left[2\Phi_0\left(\frac{L_{\text{ПП}} - l_{\text{сеп}}}{2n\sigma}\right)\right]^3 + \left[0,5 + \Phi_0\left(\frac{B_{\text{ПП}} - 2J}{2n\sigma}\right)\right]^2.$$

В результате осуществляется оценка эффективности функционирования авиационного боевого комплекса военно-транспортных самолетов, осуществляющих парашютное десантирование вооружения и военной техники, а также личного состава при планировании боевых действий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бобров В. Н., Родионов А. В., Плиплин А. А., Мотенко Д. А. Влияние изменчивости показателя преломления атмосферы на точность решения задачи прицеливания // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2019. № 1. С. 29—32.
2. Мартынов В. Ю. Радиоэлектронный прицельно-навигационный пилотажный комплекс "Купол" самолетов военно-транспортной авиации: учеб. пособие. — М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1981. — 354 с.
3. Монсик В. Б., Скрынников А. А. Вероятность и статистика: учеб. пособие. Изд. 2 (эл.). — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. — 381 с.

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF THE OPERATION OF AVIATION COMBAT COMPLEXES OF MILITARY TRANSPORT AIRCRAFT

A. A. Pliplin, A. N. Demin

Federal State Official Military Educational Institution of Higher Education Military Educational Research Centre of Air Force "Air Force Academy named after professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin", Voronezh, Russia

A. V. Rodionov

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

V. Yu. Tyurin

Krasnodar Air Force Institute for Pilots, Krasnodar, Russia

The article discusses the solution to the aiming problem on board a military transport aircraft, the purpose of which is to land cargo at the center of a given landing site. The result of the decision is to determine the start point of the ejection. Landing site characteristics are its length, width and center.

Keywords: landing, aiming task, landing pad.

Bibliography — 3 references.

Received February 28, 2020

УДК 538.9

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА МУЛЬТИКОМПОНЕНТНЫХ ПЬЕЗОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СРЕД ДЛЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ

С. И. Дудкина; Л. А. Шилкина; К. П. Андрияшин, канд. физ.-мат. наук;
И. Н. Андрияшина, канд. физ.-мат. наук; И. А. Вербенко, д-р физ.-мат. наук;
Л. А. Резниченко, д-р физ.-мат. наук
Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета,
г. Ростов-на-Дону, Россия

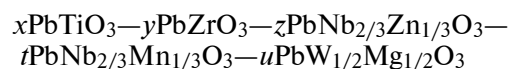
Исследованы твердые растворы (ТР) пятикомпонентной системы $PbTiO_3-PbZrO_3-PbNb_{2/3}Zn_{1/3}O_3-PbNb_{2/3}Mn_{1/3}O_3-PbW_{1/2}Mg_{1/2}O_3$ с использованием метода нахождения аппроксимирующей морфотропной области (МО) на основе известных МО четырехкомпонентных систем и выделения перспективных участков, включающих составы с экстремальными значениями параметров. Определены концентрационные области, в которых локализуются ТР, сочетающие высокие или низкие значения диэлектрической проницаемости и высокие пьезоэлектрические характеристики с низкими потерями или с высокой добротностью, для применений в радиотехнических устройствах (микрофонах, ультразвуковых линиях задержки и т. п.). Показано, что модифицированием ТР изучаемой системы стеклообразующими добавками возможно улучшить их технологичность и показатели пьезоактивности.

Ключевые слова: твердые растворы, многокомпонентные системы, морфотропная область, электрофизические параметры, области применения.

Развитие радиотехники и электроники невозможно без широкого использования пьезофункциональных (сегнетопьезокерамических — СПКМ) сред — материалов с целевыми электрофизическими свойствами. В большинстве случаев их основу составляют композиции с участием титаната-цирконата свинца (ЦТС — $PbTiO_3-PbZrO_3$) [1–4]. При этом наиболее востребованы многоэлементные системы [5–8], а

среди них — пятикомпонентные вида ЦТС — как наиболее эффективные, в которых в окрестности морфотропных фазовых границ (МФГ), обрамляющих области симметричных фазовых переходов, макроотклики экстремальны [8, 9]. Поскольку число возможных композиций в таких многокомпонентных системах (МС) огромно, необходим рациональный метод нахождения оптимальных сочетаний компонентов и их концентраций. Решение задачи облегчает знание положения МО, делящей систему на зоны с существенно различной величиной спонтанной деформации. В связи с этим начальной стадией технологического процесса производства СПКМ является проведение процедур, связанных с поиском МО и выбором перспективных концентрационных полей, далее — с проведением технологических и диагностических операций, и наконец, с определением возможностей улучшения получаемых результатов путем, например, модифицирования исходных объектов.

На примере пятикомпонентной системы



рассмотрим особенности технологии производства ТР подобных систем и покажем их практическую значимость для реального сектора экономики.

Дудкина Светлана Ивановна, научный сотрудник.

E-mail: s.i.dudkina@yandex.ru

Шилкина Лидия Александровна, научный сотрудник.

E-mail: lid-shilkina@yandex.ru

Андрияшин Константин Петрович, ведущий научный сотрудник.

E-mail: vortexblow@gmail.com

Андрияшина Инна Николаевна, старший научный сотрудник.

E-mail: futur6@mail.ru

Вербенко Илья Александрович, директор.

E-mail: ilich001@yandex.ru

Резниченко Лариса Андреевна, заведующая отделом интеллектуальных материалов и нанотехнологий.

E-mail: lareznichenko@sfedu.ru

Статья поступила в редакцию 6 мая 2020 г.

© Дудкина С. И., Шилкина Л. А., Андрияшин К. П.,
Андрияшина И. Н., Вербенко И. А., Резниченко Л. А.,
2020

Методы получения и исследования образцов

Метод поиска МО. По положению МО в $(k-n)$ -компонентных системах, составляющих исследуемую k -компонентную, МО последней аппроксимируется в области составов с максимальными пьезоэлектрическими параметрами частью пространства размерности $(k-2)$. Для составов выделенной области проводят рентгеноструктурные исследования и измерения электрофизических параметров. Методы изображения многокомпонентных систем основаны на использовании многомерных геометрических фигур. Простейшими многомерными фигурами являются симплексы. Систему изображают фигурой, имеющей на единицу меньше измерений, чем число компонентов. Вершин столько, сколько компонентов в системе. Симплексом пространства трех измерений является тетраэдр, четырех измерений — пентагон, пяти — гексагон и т. д. Для наглядного изображения многокомпонентных систем используют методы, основанные на проектировании геометрических фигур и на построении сечений соответствующих фигур. На рис. 1 компоненты пятикомпонентной системы изображены пятью точками (1—5) четырехмерного пространства. Эти точки определяют четырехмерный симплекс (пентагон), каждая точка которого изображает некоторый состав пятикомпонентной системы. Исследование пятикомпонентной системы существенно упрощается, когда она двухфазна. Будем считать, что система состоит из двух фаз: фазы компонента 1 и фазы, определяемой вблизи интересующего нас участка МО остальных компо-

нентов. Если известны МО в четырех двойных системах $((1, 2); (1, 3); (1, 4) \text{ и } (1, 5))$ или в трех тройных $((1, 2, 3); (1, 2, 4) \text{ и } (1, 2, 5))$, или в двух четырехкомпонентных $((1, 2, 3, 4) \text{ и } (1, 2, 3, 5))$, то они определяют трехмерное тело, которое можно считать первым приближением к четырехмерной МО пятикомпонентной системы. В случае, если МО находится в двух- или трехкомпонентных системах, это тело будет определено треугольниками $(1, 2), (1, 3), (1, 4) \text{ и } (1, 2), (1, 3), (1, 5)$, а в случае, если известны участки МО с оптимальными свойствами в двух четырехкомпонентных системах, — четырехугольниками $ABCD$ и $ABFE$. В последнем случае объем исследований существенно уменьшается. Для определения выделенного участка МО и графического представления результатов выберем с заданным шагом достаточно большое число точек, лежащих на $ABCD$ и $ABFE$, и соединим их прямыми линиями так, чтобы равномерно охватить область $ABCDEF$. Затем через точку (1) и каждую из этих прямых проведем плоскости.

Дальнейшее исследование ведем в этих плоскостях как в сечениях. Пусть, например, выбраны точки K и L (рис. 1) и соединены между собой. Делим отрезок KL на несколько равных частей ($M_1' M_2'$ и $M_2' M_3'$) и из точки (1) проводим лучи через точки деления M_n' . Точки P и Q являются точками пересечения крайних лучей с гранью пентагона, противоположной точке (1). Таким образом, получен треугольник (1) PQ .

Поместим в точку (1) $PbTiO_3$ и будем оперировать выделенным треугольником как сечением пентагона.

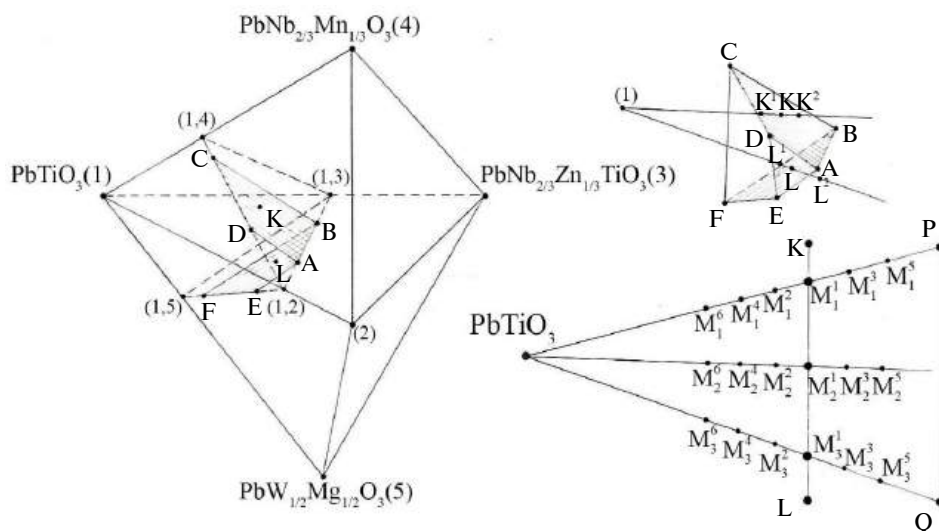


Рис. 1. К определению МО в пятикомпонентной системе $PbTiO_3-PbZrO_3-PbNb_{2/3}Zn_{1/3}O_3-PbNb_{2/3}Mn_{1/3}O_3-PbW_{1/2}Mg_{1/2}O_3$

Несмотря на то, что только для пяти двойных систем известны области сосуществования ТР и области морфотропного фазового перехода (МФП), эти данные позволяют "сконструировать" четырех- и пятикомпонентные системы. Такое возможно благодаря наличию данных о МО в трех- и четырехкомпонентных системах. Описанным методом исследована и система $x\text{PbTiO}_3(1) - y\text{PbZrO}_3(2) - z\text{PbNb}_{2/3}\text{Zn}_{1/3}\text{O}_3(3) - t\text{PbNb}_{2/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_3(4) - u\text{PbW}_{1/2}\text{Mg}_{1/2}\text{O}_3(5)$ (цифрами указано расположение соединений на рис. 1). При аппроксимации МО использованы данные о положении МО в четырехкомпонентных системах $\text{PbTiO}_3 - \text{PbZrO}_3 - \text{PbNb}_{2/3}\text{Zn}_{1/3}\text{O}_3 - \text{PbNb}_{2/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_3$ (тетраэдр I) и $\text{PbTiO}_3 - \text{PbZrO}_3 - \text{PbW}_{1/2}\text{Mg}_{1/2}\text{O}_3 - \text{PbNb}_{2/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_3$ (тетраэдр II). Развертка плоскостей, аппроксимирующих МО четырехкомпонентных систем с выделенными для исследования в пятикомпонентной системе участками, приведена на рис. 2.

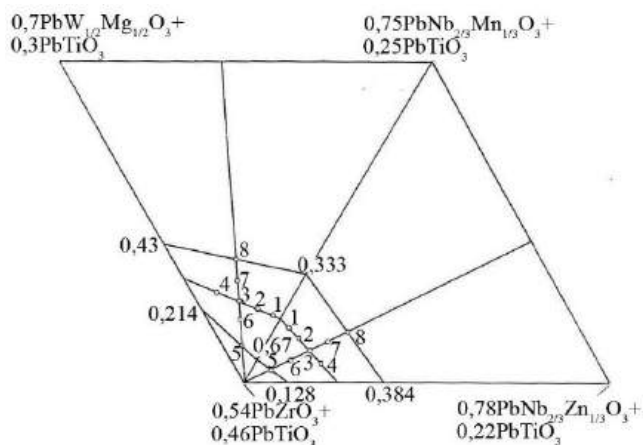


Рис. 2. Развертка плоскостей, аппроксимирующих МО пятикомпонентной системы $\text{PbTiO}_3 - \text{PbZrO}_3 - \text{PbNb}_{2/3}\text{Zn}_{1/3}\text{O}_3 - \text{PbNb}_{2/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_3 - \text{PbW}_{1/2}\text{Mg}_{1/2}\text{O}_3$

Выделенный объем ABCDEF (рис. 1) изучали с помощью 10 сечений, проведенных через точку (1), изображающую PbTiO_3 , и через пару точек, например 1—1', 2—2' и т. д., находящихся на участке плоскости, аппроксимирующей МО каждой из четырехкомпонентных систем. Эти 10 сечений проводили параллельно грани ADE (рис. 1). На выбранных сечениях проводили лучи (по 2 или по 1 на каждом сечении). Лучи проведены через отрезки, соединяющие точки 1—1, 2—2 и т. д. (рис. 2). На каждом из них для исследования выбрано 5—12 составов, лежащих по обе стороны от точек пересечения луча с отрезком. Лучи обозначены цифрами 1, 2, 3, ..., 21. Всего исследовано 155 ТР, в каждом по 8—10 образцов одного состава.

Синтез и спекание образцов. ТР исследуемой системы были получены путем двукратного твердофазного синтеза с последующим спеканием по обычной керамической технологии (ОКТ) или методом горячего прессования (ГП). В качестве реактивов использовали гидроксиды, карбонаты и оксиды соответствующих элементов марок "хч", "осч", "чда" или "ч". Условия синтеза определяли из комплекса термографических, дилатометрических, химических и рентгенографических исследований. Оптимальный режим синтеза: 750 ± 850 °С в течение 4 ч — первый обжиг, окончательный обжиг — при 750 ± 850 °С в течение 10 ч в защитной среде, предохраняющей составы от потерь PbO . Для этого спрессованные таблетки помещали в капсулы, изготовленные из смеси состава 30 вес. % PbO + 70 вес. % ZrO_2 . Для контроля полноты прохождения реакции проводили рентгенофазовый анализ, который позволяет установить факт образования структуры типа перовскита, характер и количество (ориентировочно) примесей в образце. Из синтезированных пресс-порошков изготавливали заготовки диаметром 10,5 мм и толщиной 3 мм, которые спекали или по обычной керамической технологии (лабораторные образцы), или методом ГП (с извне приложенным давлением) на установке УГП-1М (опытные образцы). Суть метода ГП заключена в одновременном приложении к заготовке из пресс-порошка высоких температур и давлений. Это обеспечивает термодинамические условия, способствующие интенсивной подвижности вещества. Как следствие появляется возможность достижения величины плотности, близкой к теоретической. Для всех образцов параметры ГП (давление P_n и время выдержки τ_n) оставались постоянными: $P_n = 20$ МПа, $\tau_n = 40$ мин. Оптимальную температуру спекания $T_{\text{спек}}$ подбирали на серии проб каждого состава с рентгенографическим контролем и определением экспериментальной ($\rho_{\text{эк}}$) плотности образцов; $T_{\text{спек}} = 1090 \pm 1190$ °С.

Методы исследования образцов. Рентгенографический анализ осуществляли на дифрактометре ДРОН-3 (FeK_{α} -излучение, схема фокусировки по Брэггу—Брентано). Исследовали измельченные керамические образцы, что позволило исключить влияние поверхностных эффектов, напряжений и текстур, возникающих в процессе изготовления керамик. Расчет структурных параметров проводили по стандартной методике [10]. Определяли параметры a , c , α , объемы V элементарных перовскитных ячеек и однородный параметр деформации δ [10]. Погрешности измерений структурных параметров: линейных

$\Delta a = \Delta c = \pm(0,002-0,004) \text{ \AA}$, $\Delta V = \pm 0,05 \text{ \AA}^3$, угловых — $3'$.

Экспериментальную плотность образцов $\rho_{\text{эк}}$ определяли методом гидростатического взвешивания. В качестве жидкой среды использовали октан. Рентгеновскую плотность $\rho_{\text{X-ray}}$ рассчитывали по формуле $\rho_{\text{X-ray}} = 1,66M/V$, где M — масса формульной единицы в граммах, приходящаяся на одну ячейку; V — объем перовскитной ячейки в \AA^3 . Относительную плотность ρ_{rel} рассчитывали как $\rho_{\text{эк}}/\rho_{\text{X-ray}}$.

Для определения электрофизических параметров изготавливали образцы диаметром 10 мм и толщиной 1 мм. Electroды наносили двукратным вжиганием серебросодержащей пасты при температуре 800 °С. Поляризацию образцов проводили в силиконовом масле при температуре 140 °С в течение 45 мин в поле напряженностью 3,0—4,5 кВ/мм с последующим охлаждением под полем до 90 °С.

Электрофизические параметры (относительную диэлектрическую проницаемость поляризованных образцов $\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$, тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$, температуру Кюри T_K , коэффициент электромеханической связи K_p , пьезомодули: динамический, $|d_{31}|$, и статический, $d_{33}^{\text{стат}}$, механическую добротность Q_M , скорость звука V_T) определяли в соответствии

с ОСТ 11 0444-87 [11]. Реориентационную поляризацию P_R и коэрцитивное поле E_c определяли на установке с использованием схемы Сойера—Тауэра и компенсации проводимости [1]. Погрешности измерений параметров: $\Delta\varepsilon/\varepsilon = \pm 1,0 \%$; $\Delta\text{tg}\delta/\text{tg}\delta = \pm 5 \%$; $\Delta K_p/K_p = \pm(1,0-2,0) \%$; $\Delta|d_{31}|/|d_{31}| = \pm 2,0 \%$; $\Delta d_{33}^{\text{стат}}/d_{33}^{\text{стат}} = \pm 5,0 \%$; $\Delta Q_M/Q_M = \pm 10 \%$; $\Delta V_T/V_T = \pm 0,15 \%$; $\Delta T_K/T_K = \pm 2,0 \%$.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Относительные плотности всех образцов системы составляют ~98 %, что предельно для ОКТ-объектов, и ~98,8 % для ГП-объектов [12], что свидетельствует об их высоком качестве, надежности и достоверности приведенных экспериментальных результатов.

На рис. 3 представлена наиболее характерная зависимость параметров элементарной ячейки составов по выбранным лучам от содержания PbTiO_3 . Монотонный характер изменения среднего параметра элементарной перовскитной ячейки, наблюдаемый во всех лучах, указывает на образование в системе ТР. Во всех лучах увеличение содержания PbTiO_3 переводит ромбоэдрическую фазу (Рэ) в тетрагональную (Т). Ширина морфотропной области составляет 2,5 мол. %.

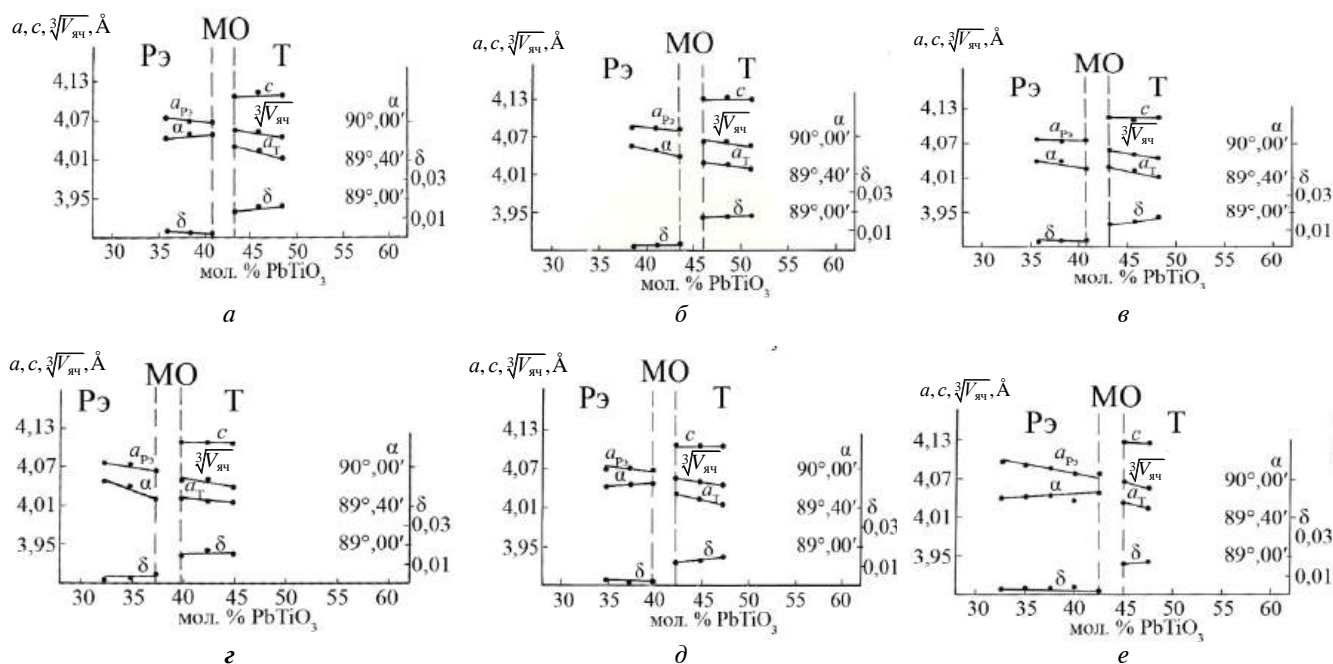


Рис. 3. Зависимость параметров элементарной ячейки от содержания PbTiO_3 на некоторых лучах с выделенной МО: а — на луче 4; б — на луче 8; в — на луче 17; г — на луче 13; д — на луче 11; е — на луче 16

Из рис. 3 видно, что на всех лучах наблюдается снижение значений однородного параметра деформации δ , характеризующего величину спонтанной деформации перовскитной ячейки, при приближении к гетерофазной области, особенно ярко выраженное при переходе из Т-области в гетерофазную и менее четко при подобном переходе из Рэ-области в МО. Таким образом, определение положения МФГ рентгеноструктурным методом позволяет существенно сузить область изучаемых составов в каждом сечении многокомпонентных систем.

Электрофизические параметры исследованы для всех лучей системы (155 ТР, в каждом по 8—10 образцов одного состава). В качестве иллюстрации приведем наиболее характерную зависимость параметров от содержания PbTiO_3 для некоторых лучей (рис. 4).

В окрестности МФГ имеют место экстремальные значения параметров: максимумы $\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$, K_p , $|d_{31}|$, $d_{33}^{\text{стат}}$, минимумы Q_M , V_r и точки излома T_K , E_c . Анализируя связь между

структурными и электрофизическими параметрами, такой характер их изменения можно объяснить следующим образом. Резкое уменьшение δ в МО ведет к росту диэлектрической проницаемости, увеличению числа доменных переориентаций при поляризации и, следовательно, к возрастанию P_r , d и K_p . Можно отметить, что ТР с экстремальными значениями различных параметров занимают некоторую область концентраций, соответствующую гетерофазной зоне. Ширина ее составляет 3—5 мол. %. Исключением является реориентационная поляризация P_r , максимум которой во всех случаях смещается за пределы МО в сторону Рэ-фазы. Реориентационная поляризация определяется величиной спонтанной поляризации и числом возможных доменных переориентаций. В самой МО спонтанная поляризация (как и деформация) падает до столь малой величины, что несмотря на резкое возрастание здесь вклада в поляризацию доменных переориентаций, реориентационная поляризация невелика.

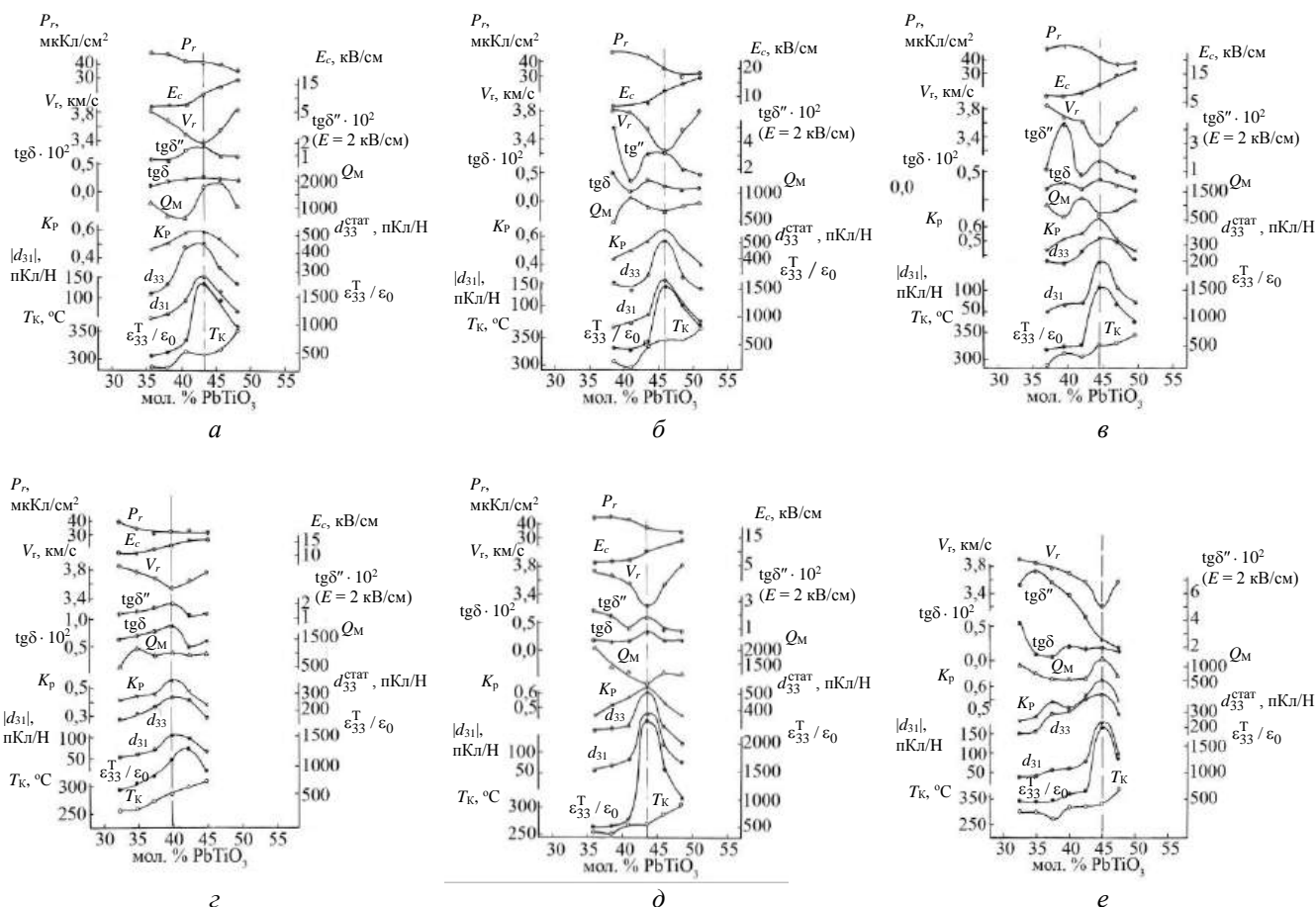


Рис. 4. Зависимость электрофизических параметров ТР от содержания PbTiO_3 на отдельных лучах (пунктирной линией обозначена полученная по результатам рентгеноструктурных исследований МФГ со стороны Т-фазы): а — на луче 4; б — на луче 8; в — на луче 20; г — на луче 13; д — на луче 5; е — на луче 16

Максимум реориентационной поляризации P_r , наблюдается в Рэ-фазе, где спонтанная поляризация достаточно велика, а спонтанная деформация еще не затрудняет доменные повороты, как это имеет место в Т-фазе.

Во всех случаях коэрцитивное поле в Т-фазе имеет большее значение, чем в Рэ-фазе. Это вызвано тем, что при Рэ–Т переходе наблюдается увеличение спонтанной деформации δ , что приводит к возрастанию упругих напряжений, возникающих при переориентации доменов. В самой МО E_c резко возрастает, что вызвано скачком спонтанной деформации.

На всех исследованных лучах системы в МО наблюдается минимум добротности, так как при этом имеют место наибольшая подвижность доменных стенок и, следовательно, наибольшие механические потери. Максимумы K_p , d_{31} , $d_{33}^{\text{стат}}$ совпадают в большинстве случаев с максимумом $\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$. Скорость звука проходит через минимум в МО, так как она пропорциональна модулю упругости, который минимален в МО. Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ в большинстве случаев имеет максимум, приходящийся на границу с Т-фазой. Почти на всех лучах исследованной системы зависимость температуры Кюри T_K от состава имеет в МО точку перегиба и наблюдается рост ее при переходе от ромбоэдрической фазы в тетрагональную.

В табл. 1 приведены составы из каждого луча, принадлежащие МО, с высокими диэлектрическими и пьезоэлектрическими параметрами. Некоторые ТР из окрестности МО обладают малой величиной диэлектрической проницаемости ($\epsilon_{33}^T / \epsilon_0 = 409\text{—}506$) в сочетании с относительно высокими значениями ($K_p = 0,49\text{—}0,55$). Другие сочетают высокие значения механической добротности ($Q_m = 1206\text{—}1956$) с высокими значениями $K_p = 0,54\text{—}0,63$, что важно для практического использования.

Модифицированием ТР-системы стеклообразующими Ge-содержащими добавками удалось снизить $T_{\text{спек}}$, повысить плотность образцов полученных композиций и улучшить их электрофизические свойства. Это позволило выделить три группы материалов (табл. 2), сочетающих высокие значения диэлектрической проницаемости ($\epsilon_{33}^T / \epsilon_0 = 1560\text{—}2430$) и пьезоэлектрических характеристик ($K_p = 0,641\text{—}0,660$) с низкими потерями ($\text{tg}\delta = (0,22\text{—}0,34) \cdot 10^{-2}$) (I); низкие значения диэлектрической проницаемости ($\epsilon_{33}^T / \epsilon_0 = 415\text{—}523$) с относительно высоким коэффициентом электромеханической связи ($K_p = 0,486\text{—}0,552$) (II); высокую добротность ($Q_m = 1230\text{—}2190$) с относительно высоким коэффициентом электромеханической связи ($K_p = 0,71\text{—}0,641$) (III).

Таблица 1

Электрофизические параметры ТР, принадлежащих МО и ее окрестности, из всех изученных лучей

№ луча/ № состава	PbTiO ₃ , мол. %	Симметрия	$\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$	$\text{tg}\delta \cdot 10^2$	K_p	$ d_{31} $, пКл/Н	Q_m
1/4	44,5	Т	1580	1,03	0,565	134	600
2/13	44,0	Т	1380	0,84	0,543	116	1800
3/25	43,7	Т	1510	0,63	0,639	152	1210
4/34	43,2	Т	1750	0,26	0,588	148	1790
5/40	43,4	Т	2420	0,32	0,639	190	800
6/45	40,3	Рэ	1650	0,79	0,651	170	212
7/52	43,1	Т	2364	0,51	0,555	169	186
8/58	46,0	Т	1550	0,26	0,634	160	680
9/64	44,5	Т	1540	0,35	0,662	165	720
10/70	41,8	Т	1470	0,66	0,566	126	610
11/76	42,2	Т	1730	0,80	0,606	150	1350
12/82	39,8	Т	1100	0,87	0,553	104	1040
13/88	40,2	Т	1240	1,08	0,578	121	1040
14/95	42,9	Т	1780	0,29	0,606	158	580
15/107	43,3	Т	2200	0,24	0,643	189	680
16/119	45,0	Т	1860	0,22	0,645	175	1300
17/126	44,0	Т	1822	0,21	0,643	171	1262
18/132	46,2	Т	1620	0,32	0,582	138	972
19/139	46,6	Т	1426	0,14	0,510	108	770
20/147	44,4	Т	1618	0,33	0,642	149	736
21/155	45,3	Т	1545	0,39	0,547	120	914

Таблица 2

Электрофизические параметры модифицированных ТР, принадлежащих к разным группам материалов

Группа материалов	№ луча/ № состава	PbTiO ₃ , мол. %	Симметрия	$\frac{T}{\epsilon_{33}} / \epsilon_0$	$\text{tg}\delta \cdot 10^2$	K_p	$ d_{31} $, пКл/Н	Q_m
I	5/40	43,4	T	2430	0,31	0,641	192	790
	9/64	44,5	T	1560	0,34	0,660	164	710
	15/107	43,3	T	2210	0,23	0,641	188	690
	17/126	44,0	T	1840	0,22	0,642	172	1250
II	1/3	42,0	P9	472	0,73	0,494	63	1020
	8/56	41,0	P9	415	0,21	0,486	53	950
	9/63	42,0	P9	512	0,22	0,552	71	1330
	11/75	39,7	P9	523	0,31	0,517	69	1940
III	2/14	46,5	T	1180	0,51	0,571	89	2190
	3/25	43,7	T	1520	0,62	0,641	154	1230
	4/34	43,2	T	1765	0,28	0,589	149	1780
	11/76	42,2	T	1740	0,76	0,610	152	1360

Составы I группы могут найти применение в гидроакустике (например, в гидрофонах), а также в низкочастотных преобразователях (звукоснимателях, микрофонах), II — в ультразвуковых линиях задержки, III — в преобразователях с высокой удельной мощностью (в понижающих пьезотрансформаторах и пьезоэлектрических двигателях).

Из результатов исследования электрофизических параметров следует, что пятикомпонентная система дает возможность более широкого выбора материалов с различными свойствами, чем четырехкомпонентные. В одной системе есть материалы для различных применений. Кроме того, в пятикомпонентной системе вследствие расширения области оптимальных составов по сравнению с двух—четырехкомпонентными системами зависимость свойств материала от небольших изменений состава менее критична. Это указывает на перспективность дальнейших исследований подобных систем.

Выводы

Методом твердофазных реакций с последующим спеканием либо по обычной керамической технологии, либо методом горячего прессования получены ТР пятикомпонентной системы PbTiO₃—PbZrO₃—PbNb_{2/3}Zn_{1/3}O₃—PbNb_{2/3}Mn_{1/3}O₃—PbW_{1/2}Mg_{1/2}O₃ в МО и ее окрестности. Проведен комплекс экспериментальных исследований рентгеноструктурных и электрофизических параметров ТР системы. Подробно описан метод нахождения аппроксимирующей МО пятикомпонентной системы на основе известных МО четырехкомпонентных систем и выделены перспективные участки системы для исследования, включающие составы с экстремальными значениями параметров ТР.

На основе исследования ТР системы в МО и ее окрестности установлены связи диэлектриче-

ской проницаемости, реориентационной поляризации, температуры Кюри, коэрцитивного поля, механической добротности, пьезоэлектрических коэффициентов, диэлектрических потерь и скорости звука со спонтанной деформацией (однородным параметром деформации) и составом, что дает возможность целенаправленного поиска материалов с заданными свойствами.

Показано, что модифицированием ТР системы стеклообразующими Ge-содержащими добавками удастся снизить $T_{\text{спек}}$, повысить плотность образцов полученных композиций и улучшить их электрофизические свойства.

Получены составы с различными сочетаниями свойств, в частности с высокими значениями диэлектрической проницаемости ($\epsilon_{33}^T / \epsilon_0 = 1560—2430$), пьезоэлектрических характеристик ($K_p = 0,641—0,660$) и низкими диэлектрическими потерями ($\text{tg}\delta = (0,22—0,34) \cdot 10^{-2}$); с низкими значениями диэлектрической проницаемости ($\epsilon_{33}^T / \epsilon_0 = 415—523$) при относительно высоких значениях коэффициента электромеханической связи ($K_p = 0,486—0,552$); с высокой добротностью ($Q_m = 1230—2190$) и относительно высоким коэффициентом электромеханической связи ($K_p = 0,571—0,641$). Это делает их перспективными для использования в различных радиотехнических устройствах: гидрофонах, звукоснимателях, микрофонах, ультразвуковых линиях задержки, в преобразователях с высокой удельной мощностью (в понижающих пьезотрансформаторах, пьезоэлектрических двигателях и т. д.).

Полученные результаты целесообразно использовать при разработке радиотехнических устройств различного назначения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание в области научной деятельности, Южный федеральный университет, 2020 г.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Яффе Б., Кук У., Яффе Г. Пьезоэлектрическая керамика. — М.: Мир, 1974. — 288 с.
2. Andryushina I. N., Reznichenko L. A., Shilkina L. A., Andryushin K. P., Dudkina S. I. The PZT system ($\text{PbTi}_x\text{Zr}_{1-x}\text{O}_3$, $0 \leq x \leq 1.0$): The real phase diagram of solid solutions (Room temperature) (Part 2) // *Ceramics International*. 2013. V. 39. № 2. P. 1285—1292.
3. Andryushina I. N., Reznichenko L. A., Shilkina L. A., Andryushin K. P., Yurasov Yu. I., Dudkina S. I. The PZT system ($\text{PbTi}_x\text{Zr}_{1-x}\text{O}_3$, $0 \leq x \leq 1.0$): The dependences of electrophysical properties of solid solutions on the electric field strength and component concentration (Part 5) // *Ceramics International*. 2013. V. 39. № 7. P. 7635—7640.
4. Andryushin K. P., Andryushina I. N., Shilkina L. A., Nagaenko A. V., Dudkina S. I., Pavelko A. A., Verbenko I. A., Reznichenko L. A. Features of the structure and macro response in hard ferro piezoceramics based on the PZT system // *Ceramics International*. 2018. V. 44. № 15. P. 18303—18310.
5. Prasatkhetragarn A., Yimnirun R. Phase formation, electrical properties and morphotropic phase boundary of $0.95\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3-0.05\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ ceramics // *Ceramics International*. 2013. V. 39. P. S91—S95.
6. Talanov M. V., Shilkina L. A., Verbenko I. A., Reznichenko L. A. Impact of Ba^{2+} on Structure and Piezoelectric Properties of PMN—PZN—PNN—PT Ceramics Near the Morphotropic Phase Boundary // *J. Am. Ceram. Soc.* 2015. V. 98. № 3. P. 838—847.
7. Pavelko A., Shilkina L., Reznichenko L. Phase states and electrophysical properties of multicomponent perovskite solid solutions on the base of PMN—PT and PZT systems // *J. Adv. Dielectr.* 2020. V. 10. P. 2060011.
8. Данцигер А. Я., Разумовская О. Н., Резниченко Л. А., Сахненко В. П., Клевцов А. Н., Дудкина С. И., Шилкина Л. А., Дергунова Н. В., Рыбняц А. Н. Многокомпонентные системы сегнетоэлектрических сложных оксидов: физика, кристаллохимия, технология. Аспекты дизайна пьезоэлектрических материалов. — Ростов-на-Дону: МП "Книга", 2001. Т. 1. — 408 с.
9. Фесенко Е. Г., Данцигер А. Я., Разумовская О. Н. Новые пьезокерамические материалы. — Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского университета, 1983. — 156 с.
10. Фесенко Е. Г. Семейство перовскита и сегнетоэлектричество. — М.: Атомиздат, 1972. — 248 с.
11. ОСТ 11 0444-87 Материалы пьезокерамические. Технические условия. Введ. 01.01.1988. — 140 с.
12. Окадзаки К. Технология керамических диэлектриков. — М.: Энергия, 1976. — 336 с.

FEATURES OF THE PRODUCTION TECHNOLOGY OF MULTICOMPONENT PIEZOFUNCTIONAL MEDIA FOR RADIO ENGINEERING APPLICATIONS

S. I. Dudkina, L. A. Shilkina, K. P. Andryushin, I. N. Andryushina, I. A. Verbenko, L. A. Reznichenko

Research Institute of Physics Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

In this work, we studied solid solutions (SS) of the five-component system $\text{PbTiO}_3-\text{PbZrO}_3-\text{PbNb}_{2/3}\text{Zn}_{1/3}\text{O}_3-\text{PbNb}_{2/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_3-\text{PbW}_{1/2}\text{Mg}_{1/2}\text{O}_3$ using the method of finding the approximating morphotropic region (MO) based on the known MO four-components of system, and selection of perspective areas, including compositions with extreme values of parameters. The concentrations regions in which SSs are located combining high or low dielectric permittivity and high piezoelectric characteristics with low losses or with high quality factor for applications in radio engineering devices (microphones, ultrasonic delay lines, etc.) are determined. It is shown that by modifying the SS of the studied system with glass-forming additives, it is possible to improve their manufacturability and piezo activity indicators.

Keywords: solid solutions, multicomponent systems, morphotropic region, electrophysical parameters, fields of application.

Bibliography — 12 references.

Received May 6, 2020

Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России: Межотр. науч.-техн. журнал / Федеральное государственное унитарное предприятие «НТЦ оборонного комплекса «Компас», 2020. Вып. 3. С. 1—60.

Редактор *О. А. Константинова*

Компьютерная верстка: *Н. В. Ильина, К. В. Трыкина*

Подписано в печать 28.09.2020. Формат 60х84 1/8.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 7,0. Уч.-изд. л. 7,2.

Тираж 250 экз. Заказ 1957.

Свободная цена.

Адрес редакции: 125424, Москва,

Волоколамское ш., 77. ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».

Отпечатано в ООО «РАПИТОГРАФ».

117342, Москва, ул. Бутлерова, д. 17Б.

Индекс 79379.

Правила для авторов по оформлению рукописей статей, предлагаемых к публикации в журналах

Направляя рукопись статьи в редакцию журнала, авторы передают редколлегии и издателю журнала безвозмездное неисключительное право опубликовать ее на русском языке в качестве статьи в печатной и электронной версиях журнала в сети Интернет. При этом за авторами сохраняются их интеллектуальные права на рукопись статьи (в том числе "авторское право"). В связи с этим и с учетом Четвертой части (Раздел VII) Гражданского кодекса РФ авторами должно быть представлено в редакцию письмо в следующей форме:

Лицензионный договор о передаче права на публикацию (издательский лицензионный договор)

Мы, нижеподписавшиеся, авторы рукописи,
предоставляем редколлегии журнала и издателю ФГУП «НТЦ оборонного комплекса
«Компас»

.....
(название журнала)

безвозмездную простую (неисключительную) лицензию на публикацию рукописи статьи как в печатной, так и в электронной версиях журнала.

Мы подтверждаем, что данная публикация не нарушает интеллектуальных прав других лиц или организаций.

Подписи авторов: (ф.и.о., ученая степень, дата)

Статья должна быть подписана всеми авторами. В случае нескольких авторов указывается фамилия автора, ответственного за переписку с редакцией. Рукопись статьи направляется на адрес редакции журнала: 125424, Москва, Волоколамское ш., д. 77, ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас», Редакция журнала.

Дополнительная информация может быть получена в редакции при обращении по телефону: 8 (495) 491-43-17 или по E-mail: izdanie@ntckompas.ru.

Каждая статья рецензируется в соответствии с решением редколлегии журнала. Рецензенты выбираются из числа ученых и специалистов, компетентных в вопросах, рассматриваемых в статье, и имеющих собственные публикации в данном направлении. Решение о порядке публикации статьи принимается редколлгией с учетом мнения рецензентов. В случае разногласий среди членов редколлегии окончательное решение принимает главный редактор. При полном отклонении рукописи статьи от публикации редакция журнала направляет авторам мотивированный отказ. По этому факту редакция не вступает в полемику с авторами.

Комплектование статьи (обзора)

Статья должна быть представлена в редакцию в следующем комплекте:

- сопроводительное письмо, подписанное руководством организации;
- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати и распространения в

Российской Федерации и других государствах. При отсутствии в организации экспертной комиссии вместо экспертного заключения может быть представлено соответствующее заявление на имя главного редактора журнала от имени руководства организации, где работают авторы. В экспертном заключении или заявлении в обязательном порядке должна быть отражена возможность открытой публикации и передачи публикуемых материалов за границу.

- лицензионный договор по приведенному образцу;
- рукопись статьи — объем статьи (без рисунков) не должен превышать 10 страниц формата А4 при 1,5 межстрочных интервалах, а объем статьи обзорного характера — 20 страниц. Рекомендуемая гарнитура — New Times Roman. Размер шрифта — 12;
- Материал статьи представляется в редакцию в печатном виде (на бумажном носителе) и в электронном варианте на CD/DVD-диске с текстом в формате Word.

Оформление статьи:

- статья начинается с указания УДК;
- название статьи набирается строчными буквами (кроме начальной прописной) полужирным шрифтом, размер шрифта 14, для остального текста используется простой шрифт размером 12, причем рекомендуемая гарнитура шрифта — Times New Roman;

- после названия — список авторов, инициалы авторов предшествуют их фамилиям;
- с отступлением в 2 строки представляется аннотация статьи;
- далее приводится список ключевых слов для данной статьи (не более десяти);
- страницы текста нумеруются без пропусков и добавлений литературных обозначений (типа 1а, 2б и т. п.), причем в сквозную нумерацию должны быть включены все элементы статьи;
- внизу первой страницы текста помещается отдельный абзац (с полужирным шрифтом), содержащий контактную информацию об авторе (или авторах) в следующем виде: фамилия, имя, отчество, должность, ученая степень, почтовый адрес предприятия, телефон, E-mail;
- основной текст статьи должен начинаться с четкой постановкой цели и задач работы, сопровождаемой аргументами в пользу ее выполнения на фоне существующего состояния затронутой в статье проблемы. Дальнейший текст статьи также должен иметь смысловые рубрикаторы (разделы и подразделы) без их нумерации. Заканчиваться статья должна отдельным разделом «Заключение» с перечислением основных результатов, следующих из них выводов и, по возможности, предложений по развитию исследований и использованию их результатов.
- после основного текста — список использованных источников "Литература" (не менее 5 источников); Список использованной литературы должен соответствовать всем ссылкам на внешние источники в тексте статьи. Ссылки оформляются в квадратных скобках, например, [1—6], [7, 8]. Внутренние ссылки, т. е. ссылки на формулы, рисунки и таблицы статьи оформляются с использованием круглых скобок, например, формула (1), уравнение (4), (рис. 3), (табл. 2). Любые ссылки в подписях к рисункам и в самих рисунках не рекомендуются;
- далее размещается подробная англоязычная информация о статье: название статьи, фамилия и инициалы авторов (английская транслитерация), предприятие, аннотация, ключевые слова (Keywords).

Оформление рисунков:

- рисунки и графики вставляются непосредственно в нужном месте в статье и в желаемом масштабе.
- рядом с осями графиков указываются отображаемые физические величины только в символьной (буквенной) форме, а через запятую — размерность величины по-русски (прямым шрифтом). Различные кривые на графиках рекомендуется нумеровать, даже если они характеризуются отдельным цветом или типом линии. Графики представляются только на

белом фоне. Вспомогательные сетки на площади графика не допускаются;

- подписи под соответствующими рисунками (полужирный курсивный) представляются в нужных местах текста. Каждая подпись должна быть по возможности лаконичной, но емкой по содержанию.

Оформление формул:

- простые формулы вводить в текст в формате используемого текстового редактора, более сложные формулы — с использованием редактора формул MathType;
- стандартные математические обозначения (например, \max , \log , \sin , \exp и т. д.) должны быть набраны прямо. То же относится к цифрам и числам;
- для символьного обозначения не векторных физических (технических) величин использовать только латинский и греческий алфавиты, при этом в тексте для греческих букв использовать прямой шрифт, для латинских букв — наклонный шрифт (курсив);
- векторы и матрицы обозначать полужирным прямым шрифтом;
- для нижних и верхних индексов применять арабские цифры, латинские или греческие буквы. Если индекс представляет собой сокращенную форму русского слова — характеристики, то допустимо использовать в его обозначении русские буквы (прямой шрифт), например $U_{\text{вх}}$, $I_{\text{вых}}$, $v_{\text{гр}}$ и т. п.
- размерность физических величин обозначается всегда только по-русски прямым шрифтом.

Оформление таблицы:

- содержание таблицы не должно дублировать данные, приводимые на графиках или в тексте;
- графы должны иметь название без сокращения отдельных слов.

Рисунки, формулы и таблицы должны иметь свою отдельную сквозную нумерацию. Если на конкретную формулу нет дополнительных (возвратных) ссылок в тексте или она в единственном числе, то нумерация ее не нужна. Единственные таблица и/или рисунок также не нумеруются.

При публикации в журнале каждая статья (в контактной информации) сопровождается сноской со знаком охраны авторского права ©, поставленным перед фамилией автора (фамилиями авторов) и годом издания.

Авторы (или автор) каждой статьи после выхода журнала в свет имеют право на получение от редакции электронной версии статьи в PDF-формате (редактор Adobe Acrobat).