

# ОБОРОННЫЙ КОМПЛЕКС — научно-техническому прогрессу России



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



4'2023



## 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 науки и высшего образования 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](mailto:izdanie@ntckompas.ru)

# 4 (160) ОБОРОННЫЙ КОМПЛЕКС - научно-техническому прогрессу России

МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в 1984 г.

Москва 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Кайнова Т. Д., Жиленков А. А. Описание реализации на базе виртуального полигона образовательного решения для обучения программированию в робототехнике ..... 3

Филиппов М. А. Информационное поле полигонного комплекса безмишенного типа ..... 10

### МАШИНОСТРОЕНИЕ. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

Пантелеев К. Д., Рахмилевич Е. Г., Юрцев Е. С. Иерархическая структура и аспекты системного описания производственной системы ракетно-космической промышленности ..... 16

Жиленков А. А., Моисеев И. С., Серебряков М. Ю. Применение дифференциально-геометрического подхода для обеспечения физически корректного моделирования движения морских объектов на виртуальном полигоне ..... 31

Попов И. П. Конденсатор механической энергии ..... 37

### ИЗМЕРЕНИЯ. ИСПЫТАНИЯ. КОНТРОЛЬ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

Лавров А. В., Овчинников Е. В. Анализ производства тракторной техники в России за 2021—2022 годы ..... 41

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

Геворкян Г. К. Обзор применения двумерного быстрого преобразования Фурье в обработке инфракрасных сигналов ..... 46

Савин Д. А., Денисенко В. Д. Адаптивное формирование каналов наземной радиосвязи ..... 50

Сгибнев А. К., Денисенко В. Д. Обзор возможности применения нейронных сетей для решения задач обработки цифровых радиосигналов ..... 53

**Главный редактор**

**И. А. Шеремет**, акад. РАН, проф., заместитель директора по науке  
Российского центра научной информации

**Заместители главного редактора**

**Ю. А. Чаплыгин**, акад. 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**, акад. РАН, 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**, акад. РАН, д-р техн. наук, проф., генеральный директор ФГУП «ГосНИИАС»; **И. А. Каляев**, акад. РАН, 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»; **В. Е. Лукашук**, канд. техн. наук, директор ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»; **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. Обносков**, 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 004.946

DOI: 10.52190/1729-6552\_2023\_4\_3

EDN: SGOPXF

## **ОПИСАНИЕ РЕАЛИЗАЦИИ НА БАЗЕ ВИРТУАЛЬНОГО ПОЛИГОНА ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ПРОГРАММИРОВАНИЮ В РОБОТОТЕХНИКЕ**

Т. Д. Кайнова; А. А. Жиленков, канд. техн. наук

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»,  
г. Санкт-Петербург, Россия

*Произведен анализ существующих и применяемых на практике виртуальных полигонов. Дано определение виртуального полигона и виртуальной реальности, приведены основные сферы их применения. Описана разработка образовательного решения. Проведено исследование предметной области и методологии; произведена концептуальная разработка виртуального полигона для отработки и наглядности программирования и работы с алгоритмами в робототехнике.*

**Ключевые слова:** виртуальный полигон, unity, visual studio, сцена, скрипты, обучение.

За современными технологиями виртуальной реальности скрывается будущее. Еще пару лет назад человеку нельзя было даже помыслить о таких вещах, которые он способен делать теперь, имея в своем распоряжении виртуальный полигон.

Приводя пример, имея виртуальную модель какого-то труднодоступного музея, можно рассмотреть все его экспонаты, не делая и шага на улицу. Виртуальные полигоны позволяют обеспечить индивидуальное лечение пациента в медицине, погружая его в цифровую среду или могут предоставить возможность врачам обучаться на виртуальном примере. В науке же можно провести тот или иной эксперимент для начала в виртуальном мире, и только потом повторить его в реальности, уже зная предположительные результаты, что во много раз сокращает время на экспериментальные исследования, когда нехватка практических данных может оказаться критической.

Виртуальные полигоны разрешают одну из главных проблем в обучении, то что теоретическое обучение зачастую очень плохо связывается обучающимися с тем, как все должно выглядеть на практике в реальном мире. Виртуальная или в некоторых случаях дополненная реальность позволяет донести важные моменты на непосредственном примере [1—3].

Использование виртуальных полигонов выгодно еще и с экономической точки зрения. Отпадает необходимость оплаты выездов обучающихся в командировки или обеспечения особых условий для их практики [4].

### **Сферы применения виртуальных полигонов**

Виртуальный полигон — это трехмерная среда, имитирующая ту или иную обстановку, учитывающая все её условия и ограничения, а также позволяющая задать свои собственные, чтобы узнать, как объект себя поведет в связи с ними, т. е., это набор различных программных средств, позволяющих смоделировать сложные или даже критические ситуации, возникающие при работе с реальным объектом, начиная от движения в непростых условиях и заканчивая аварийными происшествиями (то чего хотелось бы избежать на практике и заранее предусмотреть).

Виртуальный полигон всегда создается при участии преподавателей или людей, вовлеченных в обучение и точно знающих, что требуется для его качественного осуществления с практической стороны. Процесс конструирования полигона идет именно от процесса работы внутри полигона и никак иначе.

Виртуальные полигоны плотно взаимодействуют с виртуальной реальностью, и очень часто являются продолжением друг друга. В общем, они представляют собой некоторую интерактивную среду, разработанную с использованием компьютерных программ, частично или полностью повторяющих реальность, где при необходимости можно добавить и опустить некоторые условности, от которых в настоящем мире никуда не деться.

**Кайнова Татьяна Денисовна**, ассистент кафедры "Киберфизические системы", инженер.

E-mail: tatiana.kainova@mail.ru

**Жиленков Антон Александрович**, доцент, декан факультета "Цифровые промышленные технологии".

E-mail: zhilenkovanton@gmail.com

Статья поступила в редакцию 25 сентября 2023 г.

© Кайнова Т. Д., Жиленков А. А., 2023



Для мира, созданного в виртуальной реальности, есть немало характеристик и условий, но одними из самых важных для его моделирования будут следующие.

- Современное и отвечающее последним требованиям оборудование, обеспечивающее работу без сбоев.
- Детализация и наглядность моделируемой среды, что позволяет пользователю в деталях изучить виртуальное пространство и сделать необходимые выводы.
- Интерактивность, что дает возможность предусмотреть результаты взаимодействия между собой объектов.

Также, в зависимости от технического обеспечения и глубины восприятия, виртуальные среды можно разделить на несколько типов [5].

1. *Среда с эффектом полного погружения*, т. е. полноценная виртуальная реальность, где все кажется настоящим в визуальном, осязательном, а иногда и обонятельном плане. Достигается это обычно выполнением трех условий: максимальной детализации виртуального полигона, куда погружается пользователь, самого технологичного программного обеспечения, обеспечивающего малое время отклика и обработку в режиме реального времени, и специального оборудования, подключаемого к той или иной платформе и загружающего виртуальную среду, которую уже, в свой очередь, можно исследовать.

2. *Виртуальная среда без погружения*. К ней относится рассматриваемый виртуальный полигон. Этот вид симулирует реальный мир с помощью хорошего звука и четкой картинки, а трансляция обычно происходит на большом и широкоформатном экране, но какого-то погружения с помощью специализированного оборудования не происходит, человек только наблюдает за происходящим, может исследовать окружение в режиме "игры". Чаще всего, подобное используют, когда необходимо продемонстрировать разработанный проект, к примеру, трехмерную модель известного здания, модели утраченных в реальности объектов и исторических мест, также подобное может быть применено в обучении, где нет необходимости в эффекте полного погружения, а достаточно наблюдательной части и полученных с ее помощью данных.

3. *Дополненная реальность*. Популярная в современном мире технология, предоставляющая возможность обучаемому добавить в настоящий мир объекты, существующие только в виртуальном пространстве, т. е., по факту у пользователя есть одновременно два источника информации, с которыми на определенном уровне он может взаимодействовать. Дополненная реальность лишь

частично является виртуальной, но при её проектировании и разработке используют те же возможности и инструменты, как и при работе с полностью виртуальным полигоном. Особенно, если для разработки дополненной реальности необходим надежный способ получения точного положения в пространстве и возможности вносить изменения в режиме реального времени в зависимости от происходящего вокруг.

Приведем несколько основных сфер и направлений, где уже активно применяют подобные технологии.

Маркетинг. Технологии виртуальной и дополненной реальности предоставляют великолепную возможность, позволяющую ознакомить потенциальных клиентов с продуктами и деятельностью компании, тем самым повысив к себе вотум доверия. Представление это может быть совершенно любым: некоторые показывают производственный процесс, другие — обычный день работника компании, третьи — более детально освещают свои товары, демонстрируя их выгодные стороны, и так далее. Очень важным в данной сфере является то, что любой выставленный контент без проблем адаптируется под заинтересованного клиента, а средства дополненной реальности дают возможность наладить еще более плотный контакт с клиентами на просторах сети Интернет и во всевозможных мобильных приложениях.

Следующая, похожая, но тем не менее немного другая сфера — продажи. Мало кто совершает покупки не глядя, если ситуация неэкстренная, и потенциальный покупатель предпочел бы максимально детально рассмотреть, а иногда и даже опробовать покупаемый товар. Виртуальные двойники, тщательно имитирующие реальный продукт, очень в этом помогают, предоставляя любому человеку способ рассмотреть во всех подробностях, теоретически примерить и порой даже потрогать, если речь идет о полноценной виртуальной реальности. Клиент на виртуальном полигоне может изучить весь ассортимент компании, при необходимости получить прямую консультацию и визуальное понимание, насколько полезен будет товар и как хорошо он будет смотреться в месте конечного использования [6].

Сфера обучения, к которой также относится образовательное решение, рассматриваемое в данной работе, благодаря виртуальной реальности и полигонам получает много возможностей, используемых в разработке курсов от самых простых до невероятно сложных, и что немаловажно позволяет следить за всем процессом обучения. Например, самое простое — можно учить сотрудников компании взаимодействовать с клиентами, моделируя разнообразные конфликтные и неконфликтные

ситуации; демонстрировать работу какого-то тяжелого оборудования, которое не так легко запустить на практике; отлаживать рабочие процессы и прочее. Виртуальные полигоны применяют и в более сложных областях: в медицине, где помогают будущим врачам отточить и проверить свои навыки; в пилотировании, где без необходимости вовлечения реального воздушного судна обучающийся пилот может получить практические знания и др. [7].

Сфера развлечений тоже развивается не по дням, а по часам. Всевозможные выставки и мероприятия уже не обходятся без виртуальных полигонов, предоставляющих удаленно доступ к своему наполнению, вовлекая конечного пользователя в разные интерактивности, со всех сторон демонстрирующие цель выставки или мероприятия. В играх виртуальная реальность еще более востребована, позволяя игроку не быть всего лишь сторонним наблюдателем, а полноценно окунуться в весь процесс, оказываясь непосредственным участником происходящего сюжета, тесно взаимодействуя с обстановкой и окружением.

Последней упомянем научную и медицинскую сферу, о которой уже говорилось ранее. Ученым, которые проводят множество опытов на всевозможных уровнях, виртуальные полигоны позволяют многократно ускорить исследования, исключая многочисленные и чаще всего безрезультатные эксперименты, сокращая вычисления и предоставляя возможность наглядно видеть предположительные результаты, прежде чем повторить все в реальности.

В медицине же, особенно хирургии, где на врача лежит большая ответственность, требующая многолетней подготовки и опыта, технологии виртуальности применяют не только в обучении, но и при реальных операциях, где врач, работая со специализированным оборудованием, имеет полный контроль над процессом, контролируя каждое мельчайшее движение робота.

С каждым годом образовательные учреждения все более заинтересованы в использовании виртуальных полигонов, а благодаря тому, что в одной сфере обычно используют приблизительно одни и те же учебные материалы, то такие полигоны становятся еще и универсальными, и применять их есть возможность в любом ВУЗе схожей направленности. К тому же, любой виртуальный полигон достаточно просто редактировать, включая новые сценарии при необходимости.

К примеру виртуальных полигонов, существующих и успешно применяющихся на практике, относится комплекс виртуального ситуационного

моделирования для студентов-криминалистов и студентов юридической сферы.

Другим примером является геологический полигон, представляющий собой открытый тренажер в виртуальной среде, в котором компактно уместились видеоролики, подробные панорамные фотографии с возможностью взаимодействия, трехмерные модели и различные способы ведения полевых записей.

В робототехнике один из ярких примеров это эмулятор *Isaac* для тренировки роботов, в котором средствами графических технологий создается виртуальный мир, предназначенный для обучения роботов. Или *Gazebo* — 3D-симулятор робототехники с открытым исходным кодом, отлично интегрирующийся с программной платформой *ROS* (*Robot Operating System*), разработанную в нем программу управления виртуальным роботом и *ROS* относительно несложно переносить на реального робота [7, 8].

### Проектирование и настройка виртуального полигона

Основная идея проектирования виртуального полигона для обучения программированию в робототехнике основана на базе аудитории морского технического университета, в котором имеется условное робототехническое устройство с манипулятором, имеющее возможность передвигаться в разных режимах, дублируя собой в виртуальной реальности ряд возможных машин наподобие *TurtleBot*. В первую очередь, обучение на данном полигоне ориентированно именно на алгоритмизацию и оптимальное построение программы [9].

Выполнен он с помощью среды *Unity*, предоставляющей базовую сцену, на которой можно реализовать совершенно любую задачу, в том числе и рассматриваемый в данной работе полигон, имитирующий аудиторию морского технического университета. Реализован он был с помощью готовых подходящих ассетов внутри сцены *Unity*. Таким образом, когда на виртуальном полигоне используется множество однотипных и маловажных с внешней точки зрения объектов, процесс проектирования полигона значительно упрощается путем исключения из него времени и трудозатрат на моделирование каждой детали.

В общем виде спроектированный виртуальный полигон представлен на рис. 1.

Рассмотрим его в общем виде. Для начала у нас есть шестнадцать рабочих мест студентов, а также место преподавателя. Имеется условная доска и непосредственно робототехническое устройство — тележка с манипулятором, которая и будет в дальнейшем программироваться пользователем.



Рис. 1. Готовый виртуальный полигон

Практически в любом сценарии невозможно избежать столкновений объектов внутри сцены, которые необходимо учитывать и обрабатывать, и иногда такие взаимодействия очень сложны и многоэтапны, зависят от многих факторов. Для решения этого вопроса обычно используют коллайдеры.

В общем смысле коллайдер — это компонент, представляющий собой грани объекта, где с ним может произойти столкновение, обычно они в точности повторяют форму объекта, однако бывают и исключения, когда зона столкновения должна быть больше непосредственно физической площади самого объекта, действующего внутри сцены.

В *Unity* присутствуют следующие типы коллайдеров.

- *Wheel Collider*. Коллайдер в виде колеса, позволяющий физически правдоподобно настроить движение и взаимодействие колесных объектов.

- *Box Collider*. Кубический коллайдер.

- *Capsule Collider*. Капсульный коллайдер.

- *Mesh Collider*. Коллайдер в виде сетки, который обычно применяется для статических частей сцены.

- *Sphere Collider*. Сферический коллайдер.

- *Compound Collider*. Комбинированный коллайдер, чаще всего применяемый для сложных устройств.

На рис. 2 представлена тележка с манипулятором, а также то, как выглядят коллайдеры присвоенные к её колесам, для обработки физики их поведения.

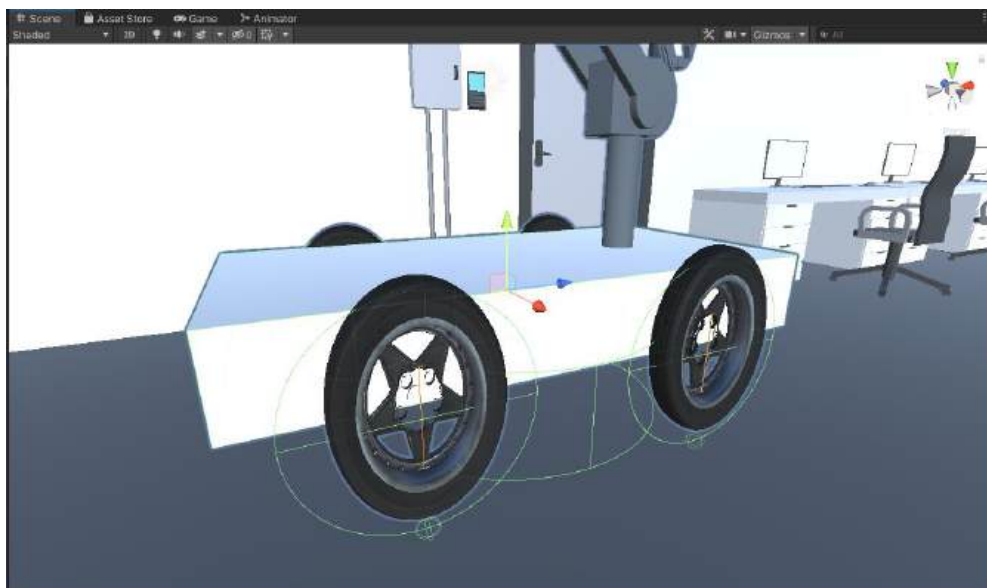


Рис. 2. Коллайдеры присвоенные тележке



Присвоенный объекту коллайдер любого типа может быть настроен, т. е. могут быть заданы скорость, масса и прочие параметры. Еще один элемент, необходимый для корректного поведения объекта, это *Rigidbody* — еще один компонент, отвечающий за физику в сцене. Сразу стоит отметить, что он необходим при работе с динамическими объектами, без него коллайдеры будут представляться для *Unity* как статические, а двигать объект с таким коллайдером трудозатратно, потому что из-за этого надо будет пересчитывать совершенно всю физику виртуального полигона, что ухудшит оптимизацию и повысит во много раз время выполнения [10, 11].

### Программная реализация образовательного решения

После того как виртуальный полигон был полностью спроектирован, была реализована логика поведения объектов внутри него и элементы управления робототехническим устройством внутри сцены. Для этого в двумерном пространстве была спроектирована еще одна сцена, которая отвечает за меню, где и будет в дальнейшем составлен пользователем алгоритм. На данной сцене должны присутствовать: кнопки для настройки программы, мини-карта, где будет отображен приблизительный маршрут, и выпадающий список, в котором можно будет определить режим работы разработанного проекта.

Логика поведения объектов внутри сцены состоит из множества скриптов, но в рамках данной статьи рассмотрен будет только один, в котором обрабатывается алгоритм, созданный пользователем, и приводится в движение робототехническое устройство на сцене.

Основная логика работы данного скрипта завязана на корутинах, даже функция *"Start"*, обраба-

тываемая при загрузке сцены, имеет тип *IEnumerator*, что указывает на корутину, это позволяет использовать задержки внутри нее, что бывает крайне полезно, когда необходимо точно управлять работой всех элементов, регулируя их запуск и остановку с высокой точностью.

На рис. 3 представлен фрагмент функции *"Start"*, отвечающий за выполнение пользовательской программы.

В данной функции изначально проверяют количество элементов в списке с сохраненной программой, после чего по нему запускают цикл вплоть до последней команды. Внутри цикла используется оператор множественного выбора *switch*, он проверяет, какая команда идет следующей и запускает соответствующую корутину с указанием на то, что прежде чем продолжать необходимо дождаться окончания предыдущей корутины. Если этого не сделать, нарушится последовательность, и корутины будут работать асинхронно, чего в случае образовательного решения, рассматриваемого авторами, необходимо избежать. После отработки корутины происходит задержка на одну десятую секунды, чтобы разграничить для наглядности между собой выполняющиеся команды [12].

Рассмотрим две корутины, первую для движения вперед и назад, и вторую — для поворота в пространстве.

На рис. 4 представлена корутина, в которой происходит перемещение вперед или назад в зависимости от посланных в нее на входе значений.

На вход посылается трехмерный вектор, отвечающий за точку назначения. Внутри же, до тех пор пока расстояние между исходной и конечной точкой больше одной десятой, происходит передвижение объекта вперед, после чего корутина заканчивается.

```
while (i < setProgram.program.Count)
{
    switch (setProgram.program[i])
    {
        case "go":
            yield return StartCoroutine(MoveForwardandBack(transform.localPosition + transform.forward * 2));
            yield return new WaitForSeconds(0.1f);
            break;
        case "back":
            yield return StartCoroutine(MoveForwardandBack(transform.localPosition - transform.forward * 2));
            yield return new WaitForSeconds(0.1f);
            break;
    }
}
```

Рис. 3. Обработка пользовательского алгоритма

```
IEnumerator MoveForwardandBack(Vector3 target)
{
    while (Vector3.Distance(transform.localPosition, target) > 0.1f)
    {
        float speed = 1 * Time.deltaTime;
        transform.localPosition = Vector3.Lerp(transform.localPosition, target, speed);

        yield return null;
    }
}
```

Рис. 4. Корутина "MoveForwardandBack"

На рис. 5 представлена корутина для поворота робототехнического устройства налево.

```
IEnumerator MoveLeft()
{
    float speedR = 50f;
    float angTarget = 90f;
    float angCurrent = 0f;
    while (true)
    {
        float step = speedR * Time.deltaTime;
        if (angCurrent + step > angTarget)
        {
            step = angTarget - angCurrent;
            transform.Rotate(Vector3.down, step);
            break;
        }
        angCurrent += step;
        transform.Rotate(Vector3.down, step);
        yield return null;
    }
}
```

Рис. 5. Корутина "MoveLeft"

Здесь исходно задают скорость, угол поворота и текущий угол (он всегда равен нулю), после чего запускают бесконечный цикл, до тех пор пока поворот не завершится, по чуть-чуть изменяя положение тележки в пространстве с помощью метода Rotate [13, 14].

## Заключение

Проведен анализ существующих в образовании решений, определено понятие виртуального полигона, разобраны его перспективы и основы проектирования для образовательных целей.

Приведена основная идея решения, представлен и разобран спроектированный виртуальный полигон, была описана программная составляющая, а именно скрипты, отвечающие за логику поведения объектов внутри сцены, приведены выдержки из функций с подробным пояснением алгоритма.

Рассмотрен виртуальный полигон, на котором имеется условное робототехническое устройство с манипулятором, способное передвигаться по виртуальной аудитории при ручном управлении или по заданной пользователем программе, предоставляя возможность обучения для обучающихся на наглядном примере поведения устройства в случае корректной и некорректной разработки алгоритма его движения.

---

*Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации программы "Приоритет 2030" (№ 075-15-2023-235 от 13.02.2023).*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев А. Л., Коротаев В. В., Сычева Е. А. Виртуальные и физические модели видеоинформационных систем в статистических экспериментах: учеб.-метод. пособие. — Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2018. — 87 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://e.lanbook.com/book/136437> (дата обращения: 02.07.2023).
2. Виртуальная реальность современного образования: идеи, результаты, оценки. Материалы конференции / под общ. ред. М. Е. Вайндорф-Сысоевой. — М.: МПГУ, 2019. — 101 с.
3. Виртуальная реальность современного образования: идеи, результаты, оценки. Материалы конференции / под общ. ред. М. Е. Вайндорф-Сысоевой. — М.: МПГУ, 2017. — 165 с.
4. Жиленьков А. А. Интеллектуальная система автономной навигации мобильного робота с распознаванием пути следования в хаотическом пространственном окружении // Системы управления и информационные технологии. 2019. № 4(78). С. 69—73. EDN QIOJTA.
5. Киселёв М. М. Робототехника в примерах и задачах. — М.: СОЛОН-Пресс, 2017. — 136 с.
6. Зинченко Ю. П. Психология виртуальной реальности: монография. — М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 2011. — 360 с.

7. **Жиленков А. А., Рачев Н. П.** Исследование современного состояния отечественных и зарубежных систем аэрогеоразведки // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2023. № 1(157). С. 17—21. DOI: 10.52190/1729-6552\_2023\_1\_17. EDN QVDBUT.
8. **Нужнов Е. В.** Мультимедиа технологии: учеб. пособие. Изд. 2, перераб. и доп. — Ростов-на-Дону: ЮФУ. Часть 2: Виртуальная реальность, создание мультимедиа продуктов, применение мультимедиа технологий в профессиональной деятельности. 2016. — 180 с.
9. **Смолин А. А., Жданов Д. Д., Потемин И. С. и др.** Системы виртуальной, дополненной и смешанной реальности: учеб. пособие. — Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2018. — 59 с.
10. **Джонатан Л.** Виртуальная реальность в Unity / пер. с англ. Р. Н. Рагимов. — М.: ДМК Пресс, 2016. — 316 с.
11. **Подвигалкин В. Я.** Робот в технологическом модуле: монография. Изд. 2, стер. — Санкт-Петербург: Лань, 2021. — 140 с.
12. **Жиленков А. А., Черный С. Г.** Применение технологий искусственного интеллекта в автоматизации контроля и управления в системах активных фазированных решеток для геоинформационного комплекса // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2020. № 2(146). С. 57—63.
13. **Popov A. V., Sayarkin K. S., Zhilenkov A. A.** Analysis of perspective models of artificial neural networks for control of robotic objects // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018, St. Petersburg and Moscow, 29 января — 01 2018 г. — St. Petersburg and Moscow: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. P. 958—961. DOI: 10.1109/ElConRus.2018.8317248. EDN MAULBZ.
14. **Евдокимов П. В.** C# на примерах: учеб. пособие. Изд. 2. — Санкт-Петербург: Наука и Техника, 2017. — 320 с.

## **DESCRIPTION OF THE IMPLEMENTATION BASED ON A VIRTUAL TRAINING GROUND OF AN EDUCATIONAL SOLUTION FOR TEACHING PROGRAMMING IN ROBOTICS**

*T. D. Kainova, A. A. Zhilenkov*

Saint-Petersburg State Marine Technical University, Saint-Petersburg, Russia

*This article analyzes the existing and practical virtual polygons, defines a virtual polygon and virtual reality, and provides the main areas of their application. The development of an educational solution is described. The main objectives of this article are: research of the subject area and methodology; conceptual development of a virtual polygon for testing and visualization of programming and working with algorithms in robotics.*

**Keywords:** virtual polygon, unity, visual studio, scene, scripts, training.

Bibliography — 14 references.

*Received September 25, 2023*

## ИНФОРМАЦИОННОЕ ПОЛЕ ПОЛИГОННОГО КОМПЛЕКСА БЕЗМИШЕННОГО ТИПА

М. А. Филиппов, канд. техн. наук

Рязанское гвардейское высшее воздушно-десантное командное училище, г. Рязань, Россия

*Показана ограниченность сценарного подхода формирования структуры информационного поля полигонного комплекса. Предложен новый подход, основанный на синтезе структуры обратным логическим выводом. Представлена структура информационного поля полигонного комплекса безмишенного типа.*

**Ключевые слова:** информационное поле, полигонный комплекс, синтез структуры, информация, данные.

В настоящее время практически весь спектр современных стрелковых полигонных комплексов (СПК) базируется на информационных технологиях, что в значительной степени повышает качество обучения операторов систем вооружения (ОпСВ). Не смотря на повышение уровня технического совершенства СПК, существующий сценарный подход к формированию информационных полей СПК не позволяет создать условия, адекватные реальным боевым действиям. При этом, в настоящее время альтернативного инструментария для формирования информационных полей полигонных комплексов (ИППК) нет, что является проблемой, требующей научного решения.

### Сценарный подход к формированию информационного поля СПК

Основой сценарного подхода является моделирование наиболее характерных, в достаточной степени обобщенных (эталонных), боевых эпизодов, с которыми столкнется оператор системы вооружения в ходе огневого противостояния. Определяющими факторами для моделирования, помимо самого эпизода, являются представления об эталонных действиях в данных условиях, дидактические требования и возможности полигонного оборудования.

Модельный сценарий развития боевого эпизода посредством наличия (отсутствия) факта, типа удаления от огневой позиции и действия мишеней должен побуждать оператора системы вооружения к правильной оценке обстановки и выполнению требуемых (эталонных) действий. При таком под-

ходе, структура информационного поля является отображением структуры модельного сценария, что показано на рис. 1.

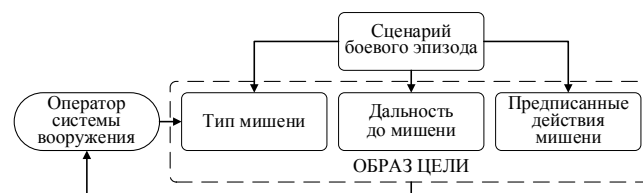


Рис. 1. Структура информационного поля полигонного комплекса при сценарном подходе

Такая структура ИППК имеет ряд недостатков:

- Ограниченность в моделировании всего многообразия условий боевой работы операторов систем вооружения в силу предопределенности и ограничений сценария.
- Примат сценария над образом цели, что подразумевает первоочередное соблюдение последовательности (преимущественно хронологической) действий цели и, как следствие, неполноту ее образа. Неполнота образа цели приводит к ограниченному объему (в сравнении с реальными условиями) транслируемой им информации, а следовательно, к ограничению возможности адекватной оценки сложившейся обстановки (или, чаще, к отказу от оценки). В конечном итоге, оператор системы вооружения не выполняет эталонных действий или делает это не осознано, в результате прямого воздействия руководителя занятия, что приводит к формированию ошибочных стереотипов действий.
- Недостаточная замкнутость структуры на внешнюю среду. Выражается это в ограниченном (фактически отсутствующем) влиянии оператора системы вооружения на реализацию модельного сценария.
- Построение структуры по принципу "возможного", отталкиваясь от имеющегося на снаб-

Филиппов Максим Александрович, докторант.

E-mail: air\_bt@mail.ru

Статья поступила в редакцию 14 сентября 2023 г.

© Филиппов М. А., 2023

жении полигонного оборудования, а также руководящих документов, которые, в свою очередь, также разрабатывали по данному принципу.

Данные недостатки не являются существенными при обучении операторов систем вооружения базовым элементам меткого выстрела, правилам и приемам стрельбы в различных условиях окружающей среды, а также при отработке отдельных элементов дуэльного огневого противоборства, однако с переходом СПК на безмишенную архитектуру, позволяющую снять множество технических ограничений в отображении (особенно в системе принятия решений и поведении) целей, они становятся критическими.

Примем, что основным элементом любого ИППК должен являться образ цели, как отображение реального противника, структурно сходное с ним, причем не только визуально (аудиально и т. д.), но и по всем значимым признакам. Это обосновано тем, что образ цели включает в себя всю полноту данных о противнике и, в конечном итоге, оказывает управляющие воздействия на оператора системы вооружения. Именно поэтому ИППК с наиболее полным образом цели будет обеспечивать необходимую степень адекватности условиям боя. Следовательно, подход к формированию информационного поля полигонного комплекса безмишенного типа должен базироваться на примате образа цели, а структура — строиться по принципу "необходимого".

### Декомпозиция информационного поля, формируемого в ходе боя

Введем следующие обозначения:

$X = \{x\}$  — множество данных, поступающих оператору системы вооружения в боевой обстановке;

$O = \{o\}$  — множество данных, поступающих оператору системы вооружения в процессе обучения на полигоне;

$\Phi = \{\phi\}$  — множество данных, транслируемых внешней средой (по отношению к полигонному комплексу);

$\Pi = \{\pi\}$  — множество данных, транслируемых полигонным комплексом оператору системы вооружения;

$D = \{d\}$  — множество базовых действий, доступных оператору системы вооружения. При этом любое действие будет считаться базовым, если оно не представимо в виде картежа  $\langle d_1, d_2, \dots, d_n \rangle$ , где  $d_i$  — базовое действие;

$F = \{f\}$  — множество отображений элементов множества  $X$  на элементы множества  $D$ .

Рассмотрим информационное поле  $X$ , доступное оператору системы вооружения в ходе боя.

Источниками  $X$  являются окружающая среда, противник, свои войска и сам оператор системы вооружения, что показано в выражении (1).

$$X \subseteq OC \cup PR \cup CB \cup OP, \quad (1)$$

где  $OC = \{oc\}$  — множество данных об окружающей среде;

$PR = \{pr\}$  — множество данных о противнике;

$CB = \{cb\}$  — множество данных о своих войсках;

$OP = \{op\}$  — множество данных, отражающих знание оператора о самом себе.

В соответствии с моделью принятия решения оператором системы вооружения при ведении огневого противоборства [1] из всего объема поступающих данных  $X$  оператор использует только конечное подмножество данных  $x_i \in 2^x$ , которое в совокупности с оценкой параметров прогнозирования результативности возможных базовых действий  $f \in F$  в конечном итоге и определяет его действие  $x_i \xrightarrow{f} d_i$ . С учетом выражения (1) данное утверждение можно записать в виде

$$\begin{aligned} & \left[ oc_i \in 2^{oc} \right] \circ \left[ pr_i \in 2^{pr} \right] \circ \left[ cb_i \in 2^{cb} \right] \circ \\ & \circ \left[ op_i \in 2^{op} \right] \xrightarrow{f} d_i, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\circ$  — знак композиции.

Учитывая, что для успешного обучения необходимо условие эквивалентности информационных полей  $X \leftrightarrow O$ , а также принимая  $\Phi = OC \cup CB \cup OP$ , можно утверждать, что поля будут эквивалентны при выполнении выражения

$$\Pi \leftrightarrow \left[ pr_i \in 2^{pr} \right]. \quad (3)$$

При этом, в виду отсутствия реальных целей в ходе обучения оператора системы вооружения, возникает условие

$$\{e\} \neq \left[ pr_i \in 2^{pr} \right] | e_1 \circ \dots \circ e_j = \pi_i, \quad (4)$$

где  $e$  — элемент информационного поля полигонного комплекса.

Вследствие этого структура информационного поля полигонного комплекса безмишенного типа должна включать в себя все элементы множества  $\{e\}$  и их связи, для которых следующее выражение является истинным:

$$e_1 \circ \dots \circ e_j \leftrightarrow \left[ pr_i \in 2^{pr} \right]. \quad (5)$$



### Синтез структуры информационного поля полигонного комплекса

Будем считать, что структура информационного поля полигонного комплекса безмишенного типа иерархична  $e = a_k^n$ , где  $a_k^n$  —  $k$ -й элемент  $n$ -го уровня  $a$ -го подмножества множества элементов  $\{e\}$ .

Для синтеза структуры информационного поля полигонного комплекса безмишенного типа воспользуемся процедурой обратного логического вывода [2], под которой в рамках данной статьи будем понимать итеративную процедуру применения правил (операторов) синтеза системы, истинность которых определена, к элементам синтезируемой структуры, начиная с известного целевого элемента до тех пор, пока структура не будет являться правильной.

При этом, определим, что правильная структура информационного поля — это структура, в которой не существует ни одного контура, не включающего заключительный элемент; заключительный элемент — это элемент, который является либо базой данных, либо полностью определяется данными из внешней среды, а целевой элемент — это элемент синтезируемой структуры, который является детерминантным по отношению к внешней среде полигонного комплекса.

Определим правила синтеза структуры информационного поля полигонного комплекса безмишенного типа, позволяющие сформировать правильную структуру.

1. Развертывание элемента  $a_k^n$  производится посредством применения к нему оператора  $R_1$ , выражение (6), определяющего такой элемент  $a_k^{n+1}$ , который будет детерминантным элементом по отношению к производному элементу  $a_k^n$ .

$$R_1 : a_k^n \leftarrow a_k^{n+1}. \quad (6)$$

2. Элемент  $a_k^i$  помещается на  $n$ -й уровень, если он является детерминантным элементом хотя бы для одного элемента уровня  $n - 1$  (7).

$$R_2 : \forall a_k^i, i = n | \exists a_k^{n-1} \leftarrow a_k^n. \quad (7)$$

3. Развертывание элемента  $a_k^n$  завершается, если результат применения оператора  $R_3$  (8), проверяющего является ли элемент заключительным — истина.

$$R_3 : (a_k^n \leftarrow \phi_i) \wedge \neg (a_k^n \leftarrow a_k^{n+1}). \quad (8)$$

4. Элемент  $a_k^{n+1}$  перемещается в новое множество  $\{\phi\} \subset \{e\}$  при условии, что он одновременно является детерминантным по отношению к каким-либо элементам существующих множеств  $\{a\} \subset \{e\}$  и  $\{\phi\} \subset \{e\}$  (9).

$$R_4 : a_k^{n+1} \Rightarrow \phi_i^{n+1} | (a_k^n \leftarrow a_k^{n+1}) \wedge (\phi_l^m \leftarrow a_k^{n+1}), \quad (9)$$

$$n \geq m, i = p + 1,$$

где  $p$  — наибольший порядковый номер элементов множества  $\{\phi\}$  на уровне  $n + 1$ .

5. Элемент  $a_k^n$  перемещается на уровне  $n$  множества  $\{a\}$  в положение с порядковым номером  $l$  при условии, что элемент  $a_l^n$  был перемещен на другой уровень множества  $\{a\}$  или в другое множество элементов (10).

$$R_5 : a_k^n \Rightarrow a_l^n | k > l, (a_l^n \Rightarrow a_m^{n+i}) \oplus (a_l^n \Rightarrow \phi_m^{n+j}). \quad (10)$$

6. Агрегация полученных множеств осуществляется посредством оператора  $R_6$ , проверяющего существует ли такой элемент  $a_j^{n+i}$ , который является производным элементом по отношению к каким-либо элементам  $a_k^n$  и  $\phi_m^{n+i}$ , а также является детерминантным элементом по отношению к элементам множества  $\{g\}$ , для которых элементы  $a_k^n$  и  $\phi_m^{n+i}$  — детерминантные (11).

$$R_6 : (a_j^{n+k} \leftarrow a_k^n) \wedge (a_j^{n+k} \leftarrow \phi_m^{n+i}) \wedge$$

$$\wedge (\forall g \leftarrow a_j^{n+k}) | a_k^n \rightarrow g, \phi_m^{n+i} \rightarrow g, g \in \{g\}. \quad (11)$$

7. Развертывание элементов, в соответствии с оператором  $R_7$  (12), осуществляется "в ширину", т. е. сначала поочередно развертываются все элементы  $n$ -го уровня, а затем элементы уровня  $n + 1$ -го и последующих уровней.

$$R_7 : e_t =$$

$$= q_k^n | q = \min q(e), n = \min n(e), k = \min k(q), \quad (12)$$

где  $e_t$  — развертываемый элемент на шаге развертывания  $t$ ;

$q$  — буква алфавита  $\langle q_1 = a, q_2 = \phi, q_3 = e, \dots, q_i = \xi \rangle$  подмножеств множества  $\{e\}$  с минимальным порядковым номером на шаге развертывания  $t$ .

8. Паре элементов  $e_i$  и  $a_k^n$  назначается один из двух возможных типов связи, причем при выполнении оператора  $R_8$  (13) назначается ИЛИ-связь, а при срабатывании оператора  $R_9$  (14) — И-связь.

$$R_8 : s_i(e_i, a_k^n)_{i=1,x} = \langle \vee \rangle \mid \forall (e_m, \dots, e_x)_{m,x \in i} \in 2^x, \begin{cases} e_m \vee \dots \vee e_x \rightarrow a_k^n = 1 \\ e_m \wedge \dots \wedge e_x \rightarrow a_k^n = 1 \end{cases}, a_k^n \leftarrow e_m, \dots, e_x, \quad (13)$$

$$R_9 : s_i(e_i, a_k^n)_{i=1,x} = \langle \wedge \rangle \mid \forall (e_m, \dots, e_x)_{m,x \in i} \in 2^x, \begin{cases} e_m \vee \dots \vee e_x \rightarrow a_k^n = 0 \\ e_m \wedge \dots \wedge e_x \rightarrow a_k^n = 1 \end{cases}, a_k^n \leftarrow e_m, \dots, e_x, \quad (14)$$

где  $s_i(e_i, a_k^n)$  — связь между детерминантным элементом  $e_i$  и производным  $a_k^n$ ;  
 $\langle \vee \rangle$  — ИЛИ-связь;  
 $\langle \wedge \rangle$  — И-связь.

Стоит отметить, что правило  $R_1$  определяет очередной элемент структуры;  $R_2, R_4, R_5$  обеспечивают непротиворечивое расположение элементов в иерархии структуры;  $R_3$  — замыкание структуры на внешнюю среду;  $R_6$  корректирует структуру, агрегируя элементы со схожими признаками, которые в результате применения предыдущих правил оказались в разных множествах; правило  $R_7$  устанавливает последовательность развертывания известных элементов структуры, а  $R_8$  и  $R_9$  определяют тип связи между элементами.

Учитывая, что правила являются истинными по определению, а формирование структуры начинается с целевого элемента и завершается заключительными элементами, замкнутыми на внешнюю среду, то применяемые операторы обеспечивают синтез правильной структуры информационного поля полигонного комплекса безмишенного типа, которая для текущего множества  $\{e\}$  однозначна.

### Информационное поле стрелкового полигонного комплекса безмишенного типа

Рассмотрим информационное поле стрелкового полигонного комплекса безмишенного типа,

сформированное посредством синтеза обратным логическим выводом по ранее установленным правилам.

Как было определено ранее, целевым элементом полигонного комплекса является образ цели. Оператор системы вооружения получает данные о противнике посредством восприятия визуальной и (или) аудиальной информации, а также сообщением от кого-либо. Учитывая, что сообщение оператор также получает либо письменно, либо изображением (видео) или посредством прямой или записанной речи, то очевидно, что оно будет воспринято как визуальное или аудиальное. Следовательно, в силу правила  $R_1$ , образ цели определяют два детерминантных элемента — визуальный образ цели  $e_1^1$  и аудиальный образ цели  $a_1^1$ , что показано на рис. 2 (здесь и далее для сокращения описания применение правил  $R_2$ — $R_7$  будет опущено, а кодировка элементов будет даваться уже после всех преобразований, т. е. в конечном виде). Чтобы оператор воспринял образ цели достаточно наличие не менее одного из двух указанных элементов, а следовательно, в силу правила  $R_8$  им назначается ИЛИ-связь.

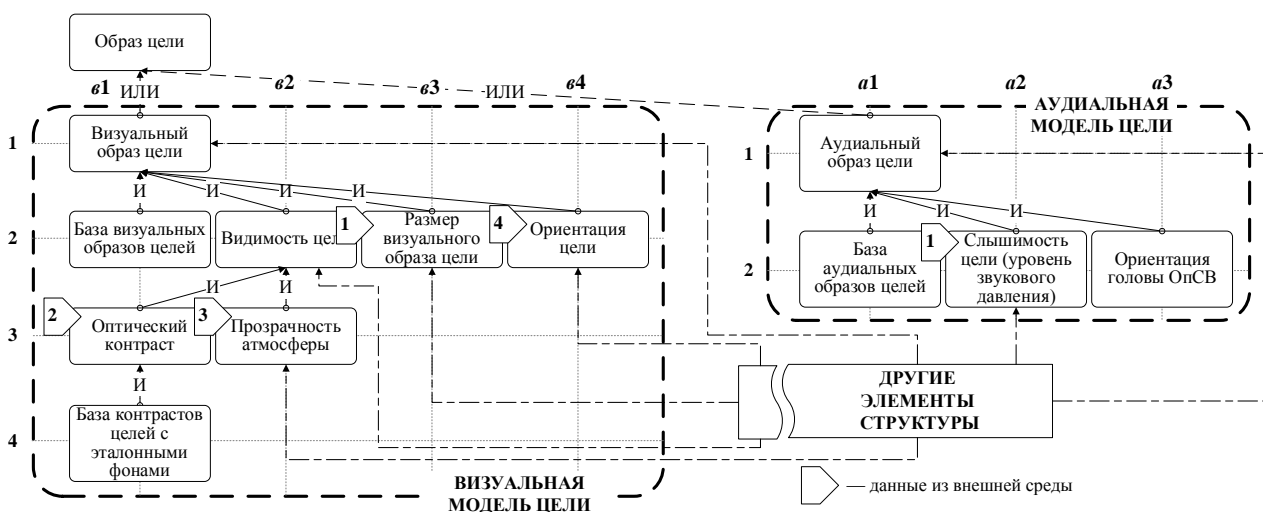


Рис. 2. Фрагмент структуры информационного поля стрелкового полигонного комплекса безмишенного типа, сформированной посредством синтеза обратным логическим выводом

1 — данные о позиции ОпСВ; 2 — данные об уровне освещенности участка стрельбы; 3 — данные о прозрачности атмосферы участка стрельбы; 4 — условия упражнения (ограничения)

Для формирования визуального образа цели (ВОЦ) необходимы: база данных визуальных образов целей  $\epsilon_1^2$ ; данные о видимости цели  $\epsilon_2^2$ ; данные об угловом размере визуального образа цели  $\epsilon_3^2$ ; данные об ее ориентации  $\epsilon_4^2$ . Так как для формирования ВОЦ необходимы одновременно все элементы, то им присваивается И-связь. База ВОЦ является заключительным элементом, поэтому далее не разворачивается.

Для отображения данных о видимости цели  $\epsilon_2^2$  необходимо иметь данные об оптическом контрасте цели на фоне местности  $\epsilon_1^3$  в направлении взгляда ОпСВ, что позволит учесть маскировочный эффект и обеспечить естественный вид; данные о прозрачности атмосферы  $\epsilon_2^3$ , а также массив данных о позе цели, ее положении, масках местности и рельефе участка стрельбы (элементы на рис. 2 не показаны). Таким образом, итеративно применяя правила  $R_1$ — $R_8$  к известным элементам структуры, начиная с целевого элемента, будет сформировано информационное поле полигонного комплекса безмишенного типа, укрупненная схема которого представлена на рис. 3.

Можно заметить, что, удалив из структуры некоторые элементы с ИЛИ-связью (аудиальную модель и модель противодействия ОпСВ), наложив ограничения на визуальную и поведенческую модель, а также отнеся позиционирование цели и местность к внешней среде, получим информационное поле современного (мишенного) полигонного комплекса. Данный факт свидетельствует об универсальности и непротиворечивости предложенного подхода.

### Заключение

Рассмотрен сценарный подход к формированию информационных полей полигонных комплексов. Показана его ограниченность и бесперспективность использования в полигонных системах, основанных на безмишенной архитектуре. Предложен новый подход к формированию информационных полей полигонных комплексов, основанный на синтезе структуры ИППК обратным логическим выводом множества детерминантных элементов (данных) по критерию тождественности их композиции характеристическим данным, недоступным оператору системы вооружения из внешней среды при его обучении.

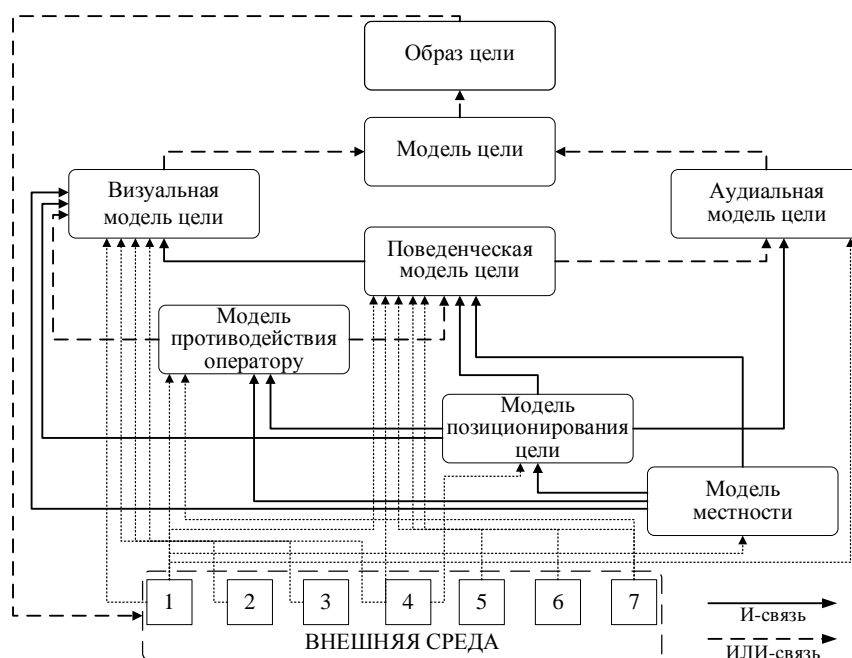


Рис. 3. Укрупненная структура информационного поля стрелкового полигонного комплекса безмишенного типа:

- 1 — данные о позиции ОпСВ; 2 — данные об уровне освещенности участка стрельбы;  
 3 — данные о прозрачности атмосферы участка стрельбы; 4 — условия упражнения (ограничения);  
 5 — данные о действиях ОпСВ и их результативности; 6 — данные о позе (текущей высоте) ОпСВ;  
 7 — данные об обученности цели

## ЛИТЕРАТУРА

1. Постановка задачи развития стрелковых полигонных комплексов. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2022. № 2. — 706 с.
2. ГОСТ 33707–2016. Информационные технологии. Словарь. — Введ. 01.09.2017. — Москва : Стандартинформ, 2016. — 201 с.

**INFORMATION FIELD OF A RANGE SHOOTING COMPLEX WITHOUT A TARGET TYPE**

*M. A. Filippov*

Ryazan the Guards Higher Airborne Command School, Ryazan, Russia

*The limitations of the scenario approach to the formation of the structure of the information field of a range shooting complex are shown. A new approach based on the synthesis of the structure by inverse logical inference is proposed. The structure of the information field of a range shooting complex without a target type is presented.*

**Keywords:** information field, range shooting complex, synthesis of a structure, information, data.

Bibliography — 2 references.

*Received September 14, 2023*

УДК 658.51

DOI: 10.52190/1729-6552\_2023\_4\_16

EDN: TOJUUE

## ИЕРАРХИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И АСПЕКТЫ СИСТЕМНОГО ОПИСАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

К. Д. Пантелеев, канд. техн. наук

АО «НПО «Техномаш» им. С. А. Афанасьева», Москва, Россия

Е. Г. Рахмилевич; Е. С. Юрцев, канд. техн. наук

МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия

Департамент промышленной политики и технологического развития Госкорпорации «Роскосмос», Москва, Россия

*Рассмотрены особенности интегрированного системного подхода, комплексно охватывающего все аспекты описания производственной системы ракетно-космической промышленности. Обоснована необходимость наличия объективного и полного информационного описания, отражающего место и взаимосвязи производственной системы в области производственной деятельности космической отрасли. Показаны этапы системно-структурного анализа, особенности морфологического и функционального аспектов информационного описания иерархической структуры производственной системы ракетно-космической промышленности России. Приведен пример информационного описания производственной системы ракетно-космической промышленности. Декомпозиция модели производственной системы отрасли показана на примере двухуровневой модели организационной декомпозиции отраслевой системы технологического развития производства в контуре стратегического программно-целевого планирования производственной деятельности.*

**Ключевые слова:** производственная система, ракетно-космическая техника, жизненный цикл, конструкторско-технологические решения, база знаний, база данных.

В условиях тенденций изменения и ужесточения международной конкуренции в космической деятельности, военных и экономических угроз проблемы формирования индустриальной модели ракетно-космической промышленности относятся к разряду слабоструктурированных [1, 2].

Разрешение указанных проблем требует проведения системных исследований, направленных на разработку научно обоснованной системы задач, комплексно охватывающей все аспекты информационно-аналитического обеспечения формирования производственной системы (ПС) ракетно-кос-

мической промышленности (РКП) и характеризующейся:

- полнотой состава типовых проектных задач, обеспечивающих формирование эффективных ПС;
- обоснованной глубиной детализации проектных задач;
- объективной информационной взаимосвязанностью и иерархической упорядоченностью проектных задач, которая в конечном итоге определяет порядок их выполнения в системе технологического обеспечения создания и производства изделий РКТ.

В связи с этим необходимо наличие объективного и полного информационного описания, отражающего место и взаимосвязи ПС в контуре информационного взаимодействия трех объектов предметной области (ПО) производственной деятельности, таких, как: система изделия (объект производства) —  $S_{\text{и}}$ , система технологического обеспечения создания и производства изделий —  $S_{\text{сдоб}}$  и ПС —  $S_{\text{пс}}$  (рис. 1). Для составления такого системного описания целесообразно проведение интегрированного системно-структурного анализа ПС [3].

**Пантелеев Константин Дмитриевич**, ведущий научный сотрудник.

E-mail: k.panteleev@tmnpo.ru

**Рахмилевич Евгений Георгиевич**, ведущий инженер, заместитель директора.

E-mail: Rakhmylevich.EG@roscosmos.ru

**Юрцев Евгений Сергеевич**, ведущий инженер, начальник отдела промышленной политики.

E-mail: yurtsev.es@roscosmos.ru

Статья поступила в редакцию 26 сентября 2023 г.

© Пантелеев К. Д., Рахмилевич Е. Г., Юрцев Е. С., 2023



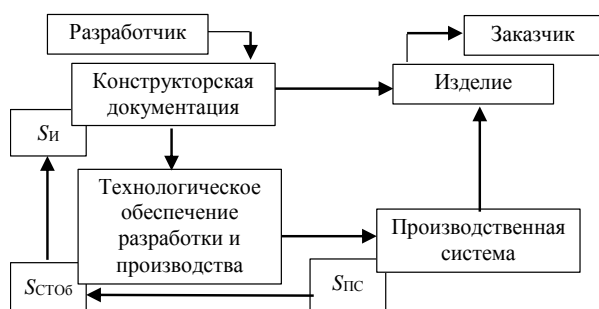


Рис. 1. Функционально-информационная взаимосвязь изделия (объекта производства), системы технологического обеспечения разработки и производства и производственной системы

### Этапы системно-структурного анализа производственной системы

ПС РКП относится к классу сложных организационно-технических систем, характеризующихся широким спектром возможных аспектов рассмотрения, многоуровневым характером структуры, большим разнообразием элементов и связей между ними [4, 5].

В соответствии с интегрированным системным подходом описание структуры ПС РКП должно быть проведено в трех направлениях: морфологическом, функциональном, информационном [3]:

$$S_{\text{ПС}} = \{S_{\text{ПС}}^{\text{М}}, S_{\text{ПС}}^{\text{Ф}}, S_{\text{ПС}}^{\text{И}}\}. \quad (1)$$

Необходимо отметить, что формирование исчерпывающего, полностью детализированного описания ПС РКП в практическом плане представляется невозможным. На практике главная проблема состоит в выявлении компромисса между простотой описания и необходимостью выявления и учета наиболее важных многочисленных аспектов функционирования ПС РКП.

Решение такой проблемы в рамках системного подхода возможно посредством выполнения трех этапов системно-структурного анализа: стратификации ПС, структурного анализа подсистем с формированием информационных описаний морфологической и функциональной моделей ПС, выявления и описания модели факторов внешнего окружения (см. рис. 2).



Рис. 2. Схема информационного описания  $S_{\text{ПС}}$

### Стратификация производственной системы РКП

На первом этапе проводится стратификация ПС, т. е. задается упорядоченная система иерархически соподчиненных структурных моделей, каждая из которых описывает ее с точки зрения соответствующих уровней абстрагирования [6, 7]. В целях достижения требуемой полноты описания ПС и выделения необходимого для исследователей состава смежных подсистем, всесторонне характеризующих объекты ПС на соответствующем иерархическом уровне рассмотрения, целесообразно использовать страт соподчинения и страт смежности:

$$S_{\text{ПС}} = \{I_{\text{СП}}, I_{\text{СМ}}\}, \quad (2)$$

где  $S_{\text{ПС}} = \{I_{\text{СП1}}, I_{\text{СП2}}, \dots, I_{\text{СПФ}}, \dots, I_{\text{СПn}}\}$  — множество страт соподчинения, составляющих иерархическое описание ПС;

$I_{\text{СМ}} = \bigcup_{\beta=1}^n I_{\text{СМ}\beta} = \bigcup_{\beta=1}^n \left( \bigcup_{\alpha=1}^m I_{\text{СМ}\beta\alpha} \right)$  — множество страт смежности, где  $I_{\text{СМ}\beta} = \{I_{\text{СМ}\beta 1}, I_{\text{СМ}\beta 2}, \dots, I_{\text{СМ}\beta\alpha}, \dots, I_{\text{СМ}\beta m}\}_{\beta}$  — множество страт смежности, в аспектах которых ПС рассматривают на  $\beta$ -м иерархическом уровне.

При стратификации описаний ПС РКП в соответствии с системным подходом необходимо учитывать особенности иерархической структуры объектов производства, т. е. изделий РКТ, как сложных технических систем (СТС) [8].

Конструктивная декомпозиция космических систем, принятая в отрасли, включает следующие уровни [9, 10]:

- большая техническая система;
- комплекс;
- изделия;
- отсек (блок, ступень, платформа и т. п.), составляющий часть изделия;
- система, входящая в блок;
- агрегат (двигатель, турбонасосный агрегат, руль, клапан, бак, трубопровод и т. п.), собираемый из нескольких ДСЕ;
- сборочная единица или узел (соединение деталей сваркой, пайкой, клепкой, склейкой, болтами и т. п.);
- деталь (болт, корпус, втулка и т. п.);
- конструкционный элемент (плоскость, отверстие, резьба, фаска и т. п.).

С учетом указанной специфики конструктивной декомпозиции космических систем как "объектов производства" иерархическая структура описаний ПС РКП, обеспечивающих их создание и производство, включает три страты соподчинения: интегри-

рованные ПС (ИПС), ПС предприятий (ПСП), первичные ПС (ППС).

ИПС обеспечивают создание и производство космических систем первых трех уровней декомпозиции, т. е. больших технических систем, комплексов и изделий за счет управления подчиненными ПСП. Соответственно, страта ИПС, декомпозируется на три уровня: ПС РКП, интегрированных производственных комплексов (ИПК), ПС интегрированных структур.

ПС РКП обеспечивает реализацию товарной программы создания и производства всей отраслевой номенклатуры космических систем (КС) и товары народного потребления (ТНП) первого уровня конструктивной декомпозиции, используя инструменты стратегического управления с горизонтом планирования 10 лет, такие, как [11—13]: Стратегия развития, Программа инновационного развития (ПИР), Программа цифровой трансформации (ПЦТ), Программа производства номенклатуры РКТ и ТНП.

ИПК обеспечивают реализацию программ создания и производства космических комплексов (КК) и ТНП. При этом применяется в качестве инструмента управления с горизонтом планирования 10 лет Программа создания и производства КК и ТНП.

В данной статье ИПК определяется как совокупность (комплекс) интегрированных структур, предприятий или производств, совместно работающих по кооперации разработки и производства определенных классов КК (КК "Ангара", МКС, РН СТК и пр.).

С учетом определения новой индустриальной модели Госкорпорации "Роскосмос", как организации всей производственной экосистемы Госкорпорации "Роскосмос", ИПК рассмотрим как научно-производственное ассоциативное объединение хозяйствующих субъектов различной формы собственности, цель которого — производство ракетно-космической техники, продукции гражданского и двойного назначения и предоставления космических услуг, включая деятельность дистанционного зондирования объектов и ключевых предприятий кооперации и поставщиков, и потребителей.

С учетом специфики научно-производственной сферы оборонно-промышленного комплекса ИНПК представляет новую форму эффективного использования государственной собственности, обеспечивающей посредством трансфера технологий двойного назначения производство наукоёмкой продукции для народного хозяйства [14—16].

В отличие от других интегрированных структур, взаимодействие в которых выстроено на иерархи-

ческих началах, ИПК обладает механизмом саморазвития, т. е. его организационно-экономическая устойчивость обеспечивается не только и не столько формальными контрактами, а сбалансированностью интересов сторон в совместной производственной деятельности, подпитываемой выигрышами от кооперативного и координированного поведения.

ПС ИС обеспечивает производство определенных классов изделий как составных частей (СЧ) КК. Используются инструменты управления (горизонт планирования 10 лет): Стратегия развития ИС, Программа инновационного развития (ПИР) ИС, Программа производства определенных составных частей (СЧ) КК (КА, СВ) и ТНП [17].

ПС предприятий обеспечивает Программы производства СЧ определенных изделий (КА, СВ) четвертого, пятого, шестого уровней конструктивной декомпозиции РКТ (отсеки, агрегаты, системы, агрегаты) [17, 18].

ПСП использует, как правило, инструменты управления с горизонтом планирования 3 года, такие как: Стратегия развития предприятия, Программа инновационного развития (ПИР), Программа производства определенных изделий (КА, СВ) и их СЧ (отсеки, агрегаты, системы, агрегаты) и ТНП.

ПСП имеют результатом своего функционирования создание СЧ изделий, создавая сборочные единицы, детали, комплектующие и т. д. за счет управления ППС. Страта ПСП включает описания ПС головных научно-исследовательских организаций (ГНИО) РКП, сборочных предприятий по линейке ракет-носителей (РН), пилотируемых комплексов, космических аппаратов (КА) и систем управления 1-го уровня кооперации (предприятия-изготовители составных частей (СЧ) изделий ракетно-космической техники (РКТ), отдельных узлов, агрегатов и управляющих систем), 2-го уровня кооперации (предприятия-изготовители деталей сборочных единиц, СЧ изделий, узлов и агрегатов), 3-го уровня кооперации (предприятия, поставляющие сырье, материалы, заготовки, комплектующие для производства радиотехнических и электронных блоков РКТ).

Первичные ПС (ППС) обеспечивают реализацию оперативных планов производства СЧ отсеков, агрегатов, систем, а также продукции вспомогательных производств (в первую очередь инструментального), таких, как ДСЕ и конструктивные элементы седьмого, восьмого и девятого уровней декомпозиции с горизонтом планирования 1 год.

Страта ППС включает описания ПС производств предприятий, цехов, участков и рабочих мест. По номенклатуре могут быть либо однород-

ные, либо разнородные виды продукции в рамках ППС. В этом случае предприятие делится на отдельные виды производств.

В данной работе определены пять уровней декомпозиции ППС: от первого уровня — производства в условиях многопредметного изготовления однородных и разнородных изделий, до пятого уровня, организационно выраженного в форме цеха, участка или рабочего места, обеспечивающего выполнение технологической операции.

ППС первого уровня декомпозиции (ППС1) — производства в условиях многопредметного изготовления однородных и разнородных изделий. В пределах предприятия ППС1 могут отличаться технологиями, персоналом по конструкции, технологиям и производству (К–Т–ПС).

ППС второго уровня декомпозиции (ППС2) — цехи, которые могут иметь либо предметную, технологическую, смешанную специализацию. Общее правило — специализация цехов свойственна для всех процессов.

ППС третьего уровня декомпозиции (ППС3) — участки (строго предметной, предметно-технологической, технологической специализации).

ППС четвертого уровня декомпозиции (ППС4) — для разнородных технологических операций, объединенных строго в одном помещении.

ППС пятого уровня декомпозиции (ППС5) — для технологических операций (организационно это может быть цех, участок, рабочее место).

Стратификация ПС РКП по критерию "объект производства" представлена на рис. 3.

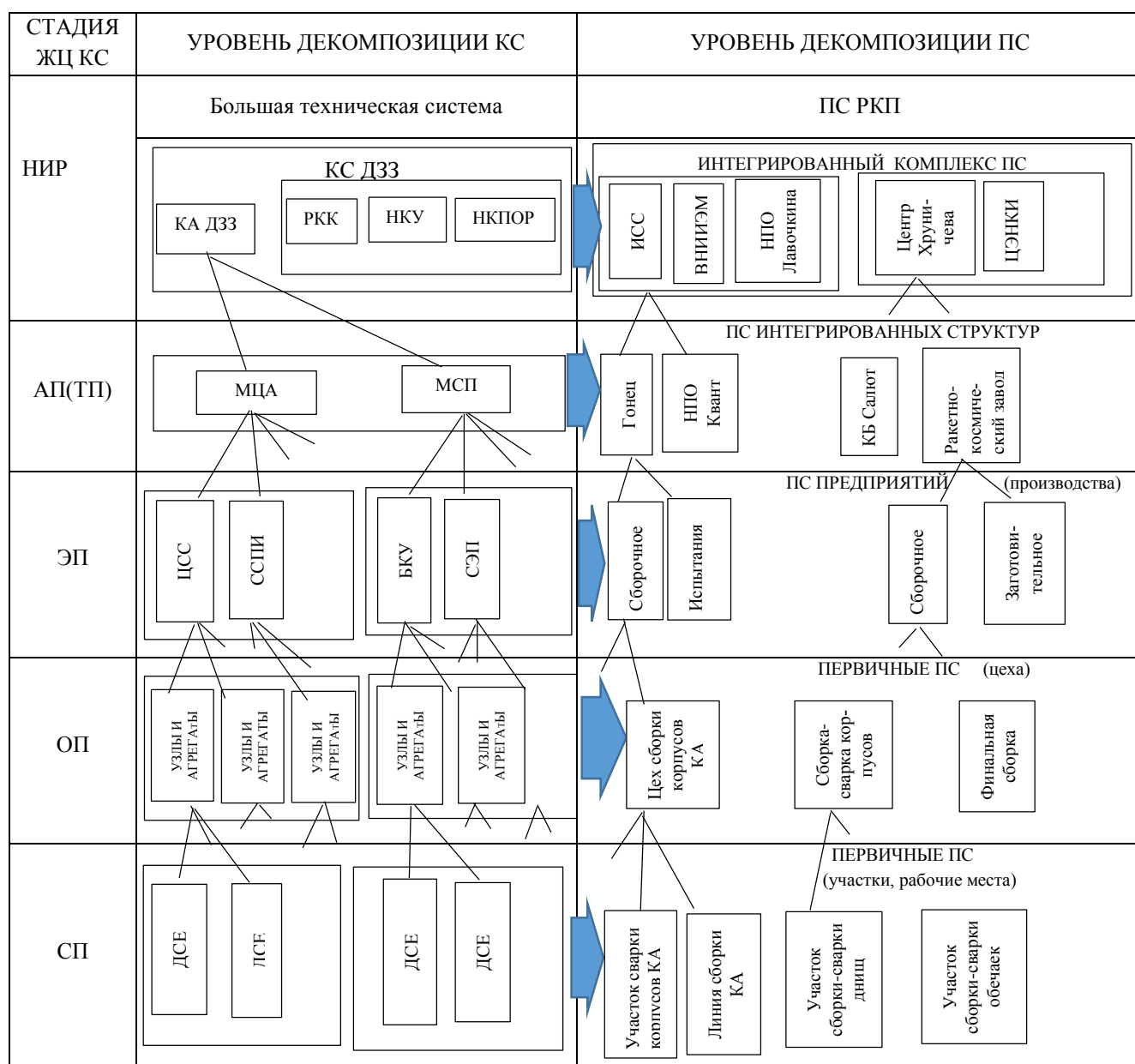


Рис. 3. Стратификация ПС РКП по критерию "объект производства"

При описании страт смежности ПС РКП в соответствии с системным подходом необходимо учитывать особенности основных аспектов и факторов окружения, определяющих построение и поведение элементов ПС соответствующего уровня, таких, как: отраслевые, административные, экологические, демографические, географические. В частности, при описании отраслевого аспекта окружения целесообразно конкретизировать следующие факторы:

- отдельные смежные элементы ПС того же уровня;
- номенклатура заказов, планируемых к выпуску;
- директивные объемно-плановые характеристики и технико-экономические показатели выпуска изделий, ДСЕ;
- объемы и ограничения по материальным ресурсам на капитальное строительство и техническое перевооружение;
- особенности кооперационных связей в контуре отрасли и вне его.

### Структурный анализ производственной системы РКП

На втором этапе осуществляют структурный анализ подсистем, выявленных в результате стратификации ПС РКП подсистем с формированием информационных описаний морфологической и функциональной моделей ПС —  $S_{ПС}^M$ ,  $S_{ПС}^F$ . При этом каждую из подсистем необходимо рассматривать как самостоятельный, организационно-обособленный объект ПС с присущими ему структурно-функциональными особенностями.

Исходя из необходимости обеспечения эффективности процесса формирования ПС РКП необходимо максимально полно охватить все возможные аспекты, всесторонне определяющие построение объектов ПС на соответствующем иерархическом уровне рассмотрения.

Основные аспекты рассмотрения ПС РКП на всех стратах соподчинения включают [3, 19, 20]:

- технологии изготовления, реализуемые в ПС;
- организационно-технологические формы реализации технологий, отражающие материальные и информационные потоки в ПС;
- технические средства оснащения основных (технологических) и вспомогательных производственных процессов, составляющие производственно-технологическую базу ПС;

- управление основными (технологическими) и вспомогательными производственными процессами, отражающими информационные потоки в ПС;

- организации служб обеспечения в ПС.

С точки зрения полноты описания ПС следует отметить еще два аспекта, такие, как: строительный комплекс ПС, структура энергетических потоков в ПС.

Указанные аспекты являющиеся вторичными по отношению к ранее перечисленным аспектам, характеризуются иной спецификой решаемых задач, не оказывают решающего влияния на формирование эффективных ПС и, соответственно, исключены из дальнейшего рассмотрения.

С учетом изложенного, объектами информационного описания при морфологическом анализе ПС являются: процессная (перерабатывающая) система (пассивная система, объект управления), включающая технологическую систему, организационно-технологическую систему, производственно-технологическую систему, систему организации служб обеспечения и производственного обслуживающего персонала; система управления (активная система, субъект и исполнители управления).

Структурно-логическая схема морфологического описания ПС представлена на рис. 4.

Технологическая система  $T_{ПС}$  характеризует технологические методы и технологические процессы изготовления номенклатуры СЧ КС. Иерархическая структура описания  $T_{ПС}$  имеет шесть уровней: технологический метод, технологический способ, технологический процесс, технологическая цепочка, технологическая операция, элементарный технологический переход. Иерархическая структура описания  $T_{ПС}$  представлена на рис. 5.

Организационно-технологическая система  $OT_{ПС}$  отражает, где и когда в ПС разрабатывают и изготавливаются соответствующие объекты производства (рис. 6).

Особенность  $OT_{ПС}$  состоит в том, что ее элементами являются организационно-структурные элементы ПС, а связи устанавливаются технологической системой  $T_{ПС}$ .

Производственно-техническая система  $PT_{ПС}$  характеризует структурный состав технических средств (технологического оборудования и СРТО), обеспечивающих функционирование технологических процессов. Иерархическая структура системы имеет тот же состав уровней, что и  $OT_{ПС}$ .



Рис. 4. Структурно-логическая схема морфологического описания ПС:

П — продукция, услуги, выполненные обязательства; ИД — исходящая информация, документация (решения), воздействующие на внешнюю среду

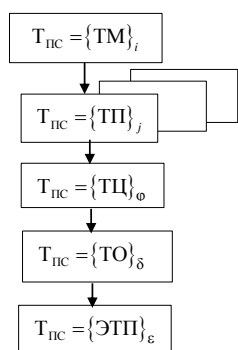


Рис. 5. Иерархическая структура описания  $T_{\text{Пс}}$

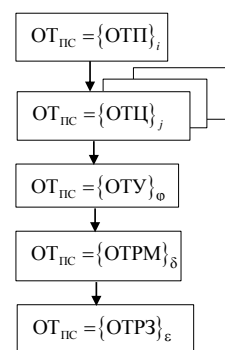


Рис. 6. Иерархическая структура описания  $OT_{\text{Пс}}$



Особенность системы в том, что её элементами являются оборудование и СрТО, а связи между ними определяются  $OT_{ПС}$ . Поэтому систему  $ПТ_{ПС}$  можно рассматривать как дальнейшую детализацию  $OT_{ПС}$ , ориентированную на более подробную детализацию ПС до оборудования и СрТО (рис. 7).

По функциональному назначению  $У_{ПС}$  декомпозируется на [4, 8, 9, 19]:

- *Координирующий, высший уровень* включает  $У_{ПС}^{ОЭЦ}$  — субъект управления (координирующая (активная) система), реализующую организационно-экономическое целевое управление систем  $ПТ_{ПС}$ ,  $T_{ПС}$ ,  $OT_{ПС}$ . На предприятиях РКП данный

функционал реализован в форме подсистемы общего линейного управления. Это центральная стержневая часть системы управления РКП, обеспечивающая непосредственное управление производственной деятельностью на основе современных управленческих принципов посредством интеграции, организации и координации работы целевых и функциональных подсистем на каждом уровне управления. В данной подсистеме осуществляется деятельность линейных руководителей отрасли всех уровней, которые принимают итоговые решения по отношению к подчиненным должностным лицам и подразделениям и несут ответственность за принимаемые решения.

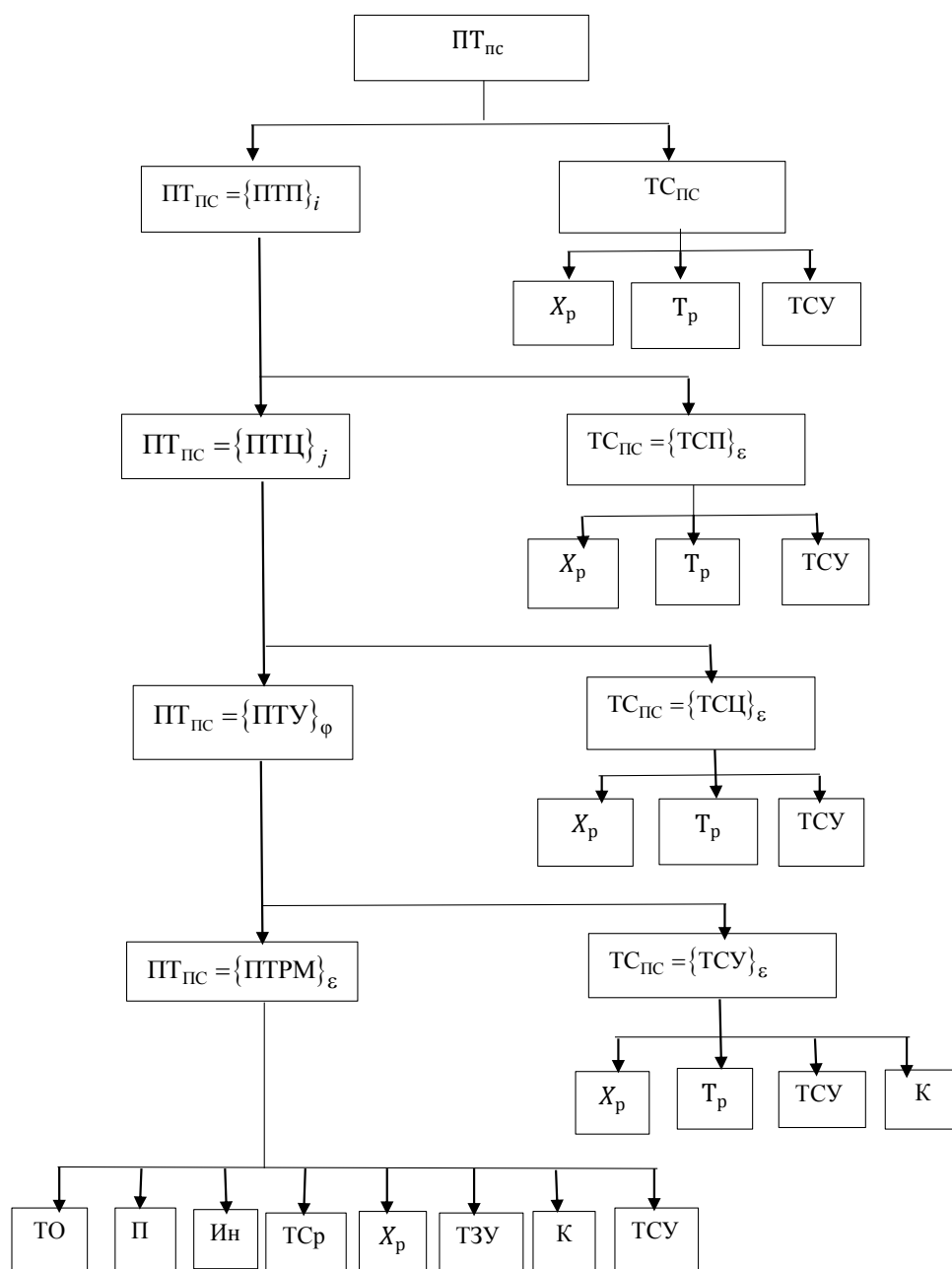


Рис. 7. Иерархическая структура описания  $ПТ_{ПС}$

Иерархия системы управления  $У_{ПС}$  рассматривается в двух аспектах: по функциональному назначению; по структуре (иерархии) объекта управления.

- *Исполнительные уровни:*

- исполнительный средний уровень включает  $У_{ПС}^{ОТ}$  — исполнительную (активную) систему, реализующую организационно-техническое управление систем  $Т_{ПС}$ ,  $ОТ_{ПС}$ .

В отрасли данный функционал обеспечивается целевыми подсистемами, осуществляющими управление по достижению основных целей деятельности организации, которые обеспечивают выполнение миссии и генеральной цели организации. В них реализуются задачи по интеграции, организации и координации выполнения специальных целевых функций, в т. ч. управление технологическим развитием производства и совершенствованием управления, управление выполнением товарной программы, управление качеством, регулирование затрат и управление ресурсным обеспечением, управление имуществом и правами на интеллектуальную собственность, управление социальным развитием коллектива, управление охраной окружающей среды);

- исполнительный низший уровень включает  $У_{ПС}^{ТС}$  — исполнительную (активная) систему, реализующую управление техническими средствами, входящими в состав  $ПТ_{ПС}$ , в форме комплексных функциональных подсистем, осуществляющих специализированную управленческую деятельность, которая функционально обособилась в результате кооперации и разделения труда для достижения основных целей организации.

Функциональная подсистема характеризуется специализацией управленческой деятельности, целями управления, составом специальных функций, составом задач управления по каждой специальной функции и их распределения между должностными лицами вышестоящего звена или подразделением — руководство производством (организация основного, вспомогательного и обслуживающего производства, оперативное управление производством, технологическими процессами), техническое руководство (организация работ по стандартизации, технической и технологической подготовке, метрологическому обеспечению производства, испытаниям и контролю качества продукции), экономическое руководство (перспективное планирование, технико-экономическое и социальное планирование организации труда и заработной

платы, учет и отчетность, экономический анализ), руководство внешнеэкономической деятельностью, материально-техническим снабжением, капитальным строительством, руководство кадрами и повышением квалификации трудового коллектива).

$У_{ПС}^{ОБ}$  — обеспечивающие подсистемы, реализующие управление оснащением техническими средствами, оргтехникой и предметами делопроизводства, организация и ведение нормативно-методического обеспечения, информационное обеспечение управления, правовое обеспечение производственной деятельности).

Иерархия  $У_{ПС}^{ОЭЦ}$  по уровням организации управления ПС:

- $У_{ПСкоорд}^{ОЭЦ}$  — высший организационно-целевой координационный уровень, представленный высшими органами управления (наблюдательный совет, совет директоров), обеспечивающих реализацию миссии, операционной стратегии, стратегии развития, товарной программы, достижение генеральной цели.

- $У_{ПСисп}^{ОЭЦ}$  — высший организационно-целевой исполнительный уровень, представленный высшими исполнительными органами управления (Правление, заместители генерального директора (ЗГД)), обеспечивающими выполнение генерального план-графика, достижение целей программ (проектов).

- $У_{ПСкк}^{ОЭЦ}$  — средний координационно-контрольный исполнительный уровень, представленный исполнительными органами управления (Исполнительные директора, Департаменты, управления, руководства производств, цехов), обеспечивающими мониторинг реализуемости и контроль за выполнением годовых планов, достижение целей мероприятий.

- $У_{ПСто}^{ОЭЦ}$  — низший технико-операционный исполнительный уровень, представленный исполнителями оперативного управления (начальники отделов, мастера производственных участков), реализующих выполнение оперативных планов, достижение целей работ.

Функциональная декомпозиция системы управления  $У_{ПС}$  показана в табл. 1, 2 и на рис. 8.

По структуре (иерархии) организационная декомпозиция системы управления  $У_{ПС}$  РКП включает шесть уровней: ИПС, ПСП, производство, цех, участок, рабочее место.

Таблица 1

Декомпозиция системы управления  $Y_{PC}$  по функциональному назначению

Уровень системы	Наименование	Организационная форма	Функциональное назначение	Составляющие функции
Высший $Y_{OEC}^{PC}$	Подсистема общего линейного управления	Линейные руководители организации всех уровней, которые принимают итоговые решения	Обеспечение выполнения миссии и генеральной цели организации Непосредственное управление производственной деятельностью РКП	Организация стратегического планирования производственной деятельности
Средний $Y_{OT}^{PC}$	Целевые подсистемы	Профильные Департаменты, управления, ГНИО, службы производств, цехов	Управление по достижению основных целей производственной деятельности организации	Формирование производственной структуры Обеспечение качества продукции Организация информационного обеспечения управления Управление выполнением плана производства и поставок продукции
Низший $Y_{TC}^{PC}, Y_{OB}^{PC}$	Комплексные функциональные подсистемы, обеспечивающие подсистемы	Профильные Департаменты, управления, ГНИО, службы производств, цехов, отделы, производственные участки	Управление по решению функционально обособленных специализированных задач	Организация производства Организация функционирования средств производства Организация движения предметов производства Обеспечение создания, производства и эксплуатации продукции Организация труда персонала

Таблица 2

Декомпозиция системы организационно-экономического целевого управления  $Y_{OEC}^{PC}$

Уровень системы	Наименование	Организационная форма	Функциональное назначение	Составляющие функции
Высший	Высший организационно-целевой координационный уровень $Y_{OEC}^{PC\text{коорд}}$	Наблюдательный совет	Обеспечение выполнения миссии, генеральной цели операционной стратегии, стратегии развития, товарной программы	Организация стратегического планирования производственной деятельности
	Высший организационно-целевой исполнительный уровень $Y_{OEC}^{PC\text{исп}}$	Правление, ЗГД	Непосредственное управление производственной деятельностью РКП	Организация управления для обеспечения выполнения Генерального план-графика, целей программ (проектов)
Средний	Координационно-контрольный исполнительный $Y_{OEC}^{PC\text{кк}}$	Исполнительные директора, директора департаментов, управлений, руководители производств, цехов	Обеспечение выполнения Годовых планов, целей мероприятий	Организация управления для обеспечения выполнения Годовых планов, целей мероприятий
Низший	Технико-операционный исполнительный $Y_{OEC}^{PC\text{то}}$	Начальники отделов, мастера производственных участков	Обеспечение выполнения оперативных планов, целей работ	Организация управления для обеспечения выполнения оперативных планов, целей работ

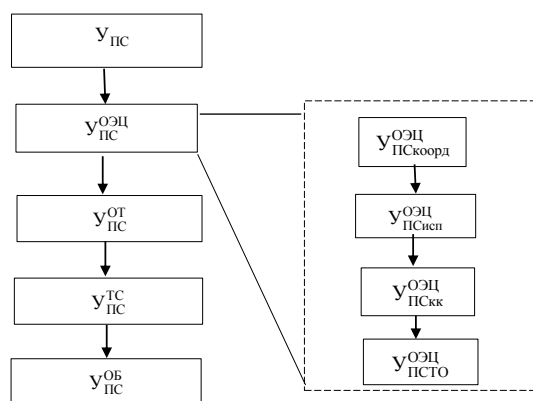


Рис. 8. Структура функциональной декомпозиции системы управления  $Y_{PC}$  РКП

Структура организационной декомпозиции  $Y_{PC}$  РКП представлена на рис. 9.

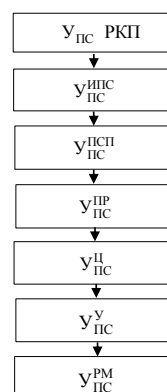


Рис. 9. Структура организационной декомпозиции системы управления  $Y_{PC}$  РКП

С учетом изложенного, обобщенное описание морфологической структуры ПС РКП  $S_{\text{ПС}}^M$  рассматривают как описание  $\gamma$ -го аспекта рассмотрения ПС  $\psi$ -го уровня декомпозиции  $S_{\psi}^{\Phi}$ :

$$S_{\psi}^{\Phi} = (V^{\psi}, R^{\psi}) \quad (3)$$

где  $V^{\psi} = \bigcup_1^m v_i$  — множество объектов, составляющих ПС  $\psi$ -го уровня;

$R^{\psi} = \bigcup_1^m r_i$  — множество связей между объектами

ПС  $\psi$ -го уровня.

Структура множества  $V^{\psi}$  включает три подмножества объектов ПС:

$$V^{\psi} = \{V_1^{\psi}, V_2^{\psi}, V_3^{\psi}\}, \quad (4)$$

где  $V_1^{\psi} = \{Y_{\text{ПС}}\} = \{Y_{\text{ПС}}^{\text{ОЭЦ}}, Y_{\text{ПС}}^{\text{ОТ}}, Y_{\text{ПС}}^{\text{ТС}}\}$ ,

$Y_{\text{ПС}}^{\text{ОЭЦ}}$  — подсистема общего линейного управления;

$Y_{\text{ПС}}^{\text{ОТ}}, Y_{\text{ПС}}^{\text{ТС}}$  — целевые, комплексные функциональные подсистемы;

$V_2^{\psi} = \{Y_{\text{ПС}}^{\text{ОБ}}\}$  — обеспечивающие подсистемы;

$V_3^{\psi} = \{T_{\text{ПС}}, OT_{\text{ПС}}, ПТ_{\text{ПС}}\}$  — технологическая, организационно-технологическая, производственно-техническая системы, система организации служб обеспечения и производственного обслуживающего персонала.

Разработку информационного описания функциональной структуры ПС РКП осуществляют в целях более полного раскрытия структурных свойств и характеристик, анализа принципов построения и функционирования составных частей ПС.

Для обеспечения эффективности процесса формирования ПС РКП целесообразно разработать единые принципы описания процессов функционирования ПС на уровне обобщенной функциональной модели.

Структура функциональной модели ПС РКП иерархична и должна быть описана на тех же уровнях, что и системы  $T_{\text{ПС}}, OT_{\text{ПС}}, ПТ_{\text{ПС}}, Y_{\text{ПС}}$ , т. е. модель должна быть сформирована:

- на уровне ИПС, когда модель отображает функциональное взаимодействие интегрированных комплексов ПС, интегрированных структур ПС, ПС предприятий;

- на уровне ПСП, когда модель отображает функциональное взаимодействие производств;

- на уровне ППС, когда модель отображает функциональное взаимодействие цехов, участков и рабочих мест соответственно.

Информационное описание функциональной структуры ПС РКП  $S_{\text{ИПС}}^{\Phi}$  включает описание материальных и информационных потоков вида:

$$S_{\text{ИПС}}^{\Phi} = \{M_{\text{ИПС}}^{\text{МП}}, M_{\text{ИПС}}^{\text{ИП}}\}, \quad (5)$$

где  $S_{\text{ИПС}}^{\Phi}$  — функциональная подсистема  $\psi$ -го уровня ПС РКП;

$M_{\text{ИПС}}^{\text{МП}} = \bigcup_1^{\alpha} F_{\xi}$  — модель материальных и энергетических потоков в ПС в виде системы внутрипроизводственных и внешних кооперационных связей поставок космических систем, космических комплексов, изделий, комплектующих ДСЕ, материально-технических ресурсов, оборудования и СрТО, электро-, газо-, водоснабжения, отведения отходов производства.

$F_{\xi} = \{F_1, F_2, \dots, F_i, \dots, F_9\}$  — функциональная подсистема  $\xi$ -го материального потока, где  $F_i = \{q, f, p\}$  — описание  $i$ -го функционального блока;

$q = \langle q_1, q_2, \dots, q_{\beta} \rangle$  — вектор характеристик материального объекта;

$f = \langle f_1, f_2, \dots, f_s \rangle$  — вектор характеристик реализуемой функции;

$p = \langle p_1, p_2, \dots, p_t \rangle$  — вектор характеристик цели и объекта реализуемой функции.

$M_{\psi}^{\text{ИП}} = \{U_{\psi}^T, U_{\psi}^{\text{ОТ}}, U_{\psi}^{\text{ОЭЦ}}\}$  — модель информационных потоков на  $\psi$ -ом уровне ПС, включающая потоки решений:  $U_{\psi}^T$  — управления технологиями, реализуемые комплексными функциональными, обеспечивающими подсистемами);  $U_{\psi}^{\text{ОТ}}$  — организационно-технологического управления, реализуемые целевыми подсистемами;  $U_{\psi}^{\text{ОЭЦ}}$  — организационно-экономического целевого управления, реализуемые подсистемой общего линейного управления.

$U_{\psi}^T = \{q_{\psi}^T, q_{\psi}^{\text{ОТ}}, q_{\psi}^{\text{ОЭЦ}}\}$  — вектор характеристик управляющих воздействий;

$U_{\psi}^{\text{ОТ}} = \{f_{\psi}^T, f_{\psi}^{\text{ОТ}}, f_{\psi}^{\text{ОЭЦ}}\}$  — вектор характеристик реализуемых функций;

$U_{\psi}^{\text{ОЭЦ}} = \{p_{\psi}^T, p_{\psi}^{\text{ОТ}}, p_{\psi}^{\text{ОЭЦ}}\}$  — вектор характеристик целей и объектов.

где  $(q_{\psi}^T, q_{\psi}^{\text{ОТ}}, q_{\psi}^{\text{ОЭЦ}})$  — вектора характеристик управляющих воздействий;

$(f_{\psi}^T, f_{\psi}^{\text{ОТ}}, f_{\psi}^{\text{ОЭЦ}})$  — вектора характеристик реализуемых функций;

$(p_{\psi}^T, p_{\psi}^{\text{ОТ}}, p_{\psi}^{\text{ОЭЦ}})$  — вектора характеристик целей и объектов.

зуемой функции управления;  $(p_y^T, p_y^{OT}, p_y^{OEC})$  — вектора характеристик Субъектов/Исполнителей управления.

Эти виды информационных потоков рассматриваются как множества информационных каналов  $U_{ki}$  с соответствующими характеристиками:

$$(\forall U_y \in M_{\psi}^{ИП}), U_y \supseteq U_{ki} = \{K, U, I\}, \quad (6)$$

где  $U_{ki}$  — описание  $j$ -го информационного канала;  $K = \langle K_1, K_2, \dots, K_m \rangle$  — характеристики процессов контроля и регулирования;

$U = \langle U_1, U_2, \dots, U_l \rangle$  — характеристики процессов управления;

$I = \langle I_1, I_2, \dots, I_n \rangle$  — характеристики процессов информационного обеспечения.

### Информационное описание внешнего окружения производственной системы

Третьим этапом системно-структурного анализа является выявление и описание факторов внешнего окружения, таких, как: ресурсы на входе, внешние задающие воздействия, условия и факторы окружающей среды, влияющие на ПС; информация о внешней среде, включающей объекты ПС верхних иерархических уровней или смежные объекты ПС того же уровня, организационно-экономическую надсистему, определяющую построение и функционирование объекта ПС соответствующего уровня.

Обобщенное описание морфологического внешнего окружения ПС  $\Omega_{ПС}^M$  рассматривают как описание множества  $j = 1 \dots n$  внешних воздействий на  $i$ -й объект подсистемы  $\psi$ -го уровня ПС  $\Omega_{\psi}^i$ :

$$\Omega_{\psi}^i = \bigcup_1^n \Omega_{\psi j}^i. \quad (7)$$

### Пример информационного описания производственной системы РКП

Декомпозиция модели ПС РКП показана на примере двухуровневой модели организационной декомпозиции отраслевой системы технологического развития РКП в контуре стратегического программно-целевого планирования (СПЦП)  $S_{СПЦП}$ .

• Морфологическая модель системы технологического развития РКП:

$$S_{СПЦП}^M = (S_{СТС}, S_{СТОБ}, S_{КООРД}), \quad (8)$$

где  $S_{СТС} = (S_A, S_{НИР}, S_{ТП}, S_{ЭП}, S_{РДОИ}, S_{РДСП})$  — проект развития технологий для создания СТС (объект управления, процессная система);  $S_{СТОБ} = (S_{ПОТР}, S_{ТОПР}, S_{ОТР}, S_{ТПП}, S_{ТППБ})$  — система технологического обеспечения создания и производства изделий РКТ (СТОБ) (исполнительная целевая система управления, активная система);  $S_{ПОТР}, S_{ТОПР}, S_{ОТР}, S_{ТПП}, S_{ТППБ}$  — подсистемы СТОБ, соответственно: ПОТР — прогнозирования и оценки технологической реализуемости; ТОПР — технологического обеспечения проектирования; ОТР — отработки технологических решений; ТПП — технологической подготовки производства; ТППБ — технологического перевооружения производственной базы;  $S_{КООРД}$  — департамент стратегического планирования ГК "Роскосмос" (Субъект управления, координирующая (активная) система).

• Функциональная модель системы технологического развития РКП имеет вид

$$S_{СПЦП}^F = \{M_{СПЦП}^{МП}, M_{СПЦП}^{ИП}\},$$

где  $M_{СПЦП}^{МП} = \{F_{ЭП}, F_{РДОИ}, F_{РДСП}\}$  — модель материальных потоков (см. табл. 3);

$M_{СПЦП}^{ИП} = \{U_y^T, U_y^{OT}, U_y^{OEC}\}$  — модель информационных потоков (см. табл. 4).

Таблица 3

Модель материальных потоков системы технологического развития РКП

Функциональная подсистема материального потока	$q$ характеристики материального объекта	$f$ характеристики реализуемой функции управления	$p$ характеристики цели и объекта реализуемой функции
$F_{ЭП}$	Опытные образцы ДСЕ по результатам ОТР	Прием—передача	Предприятие-изготовитель ОИ
$F_{РДОИ}$	Опытный образец изделия по результатам КПЭО	Прием—передача	Предприятие-изготовитель ОИ Предприятие-изготовитель СИ
$F_{РДСП}$	Серийный образец изделия по результатам	Приемо—сдаточные испытания	Заказчик



Модель информационных потоков системы технологического развития РКП

Статус решения	$q_y$ характеристики объектов управляющих воздействий	$f_y$ характеристики реализуемой функции управления	$p_y$ характеристики Субъектов/Исполнителей управления
$U_y^T$	$q_y^T$	$f_y^T$	$p_y^T$
$U_A^T$	Предприятие-разработчик	Прогноз тенденций развития Прогноз технологической реализуемости	ГНИО по технологии и материаловедению
$U_{НИР}^T$	Предприятие-разработчик	Прогноз технологической реализуемости Перечень КТП по базовым КТР Проект основных направлений технического перевооружения	
$U_{ТП}^T$	Предприятие-разработчик Предприятие-изготовитель ОИ Предприятие-изготовитель СИ	Оценка технологической реализуемости Описания конструкторско-технологических решений по результатам НИОКР План-график и смета мероприятий ТПП План-график и смета технического перевооружения	
$U_{ЭП}^T$	Предприятие-разработчик Предприятие-изготовитель ОИ Предприятие-изготовитель СИ	Заключение о ТКИ Описания конструкторско-технологических решений по результатам НИОКР Перечень особо ответственных (критичных) технологических процессов	
$U_{РДОИ}^T$	Предприятие-изготовитель ОИ Предприятие-изготовитель СИ	Заключение о технологической готовности производства Описания конструкторско-технологических решений по результатам НИОКР	
$U_{РДСП}^T$	Предприятие-изготовитель СИ	Заключение о технологической готовности производства	
$U_y^{OT}$	$q_y^{OT}$	$f_y^{OT}$	$p_y^{OT}$
$U_A^{OT}$	ГНИО по технологии и Материаловедению Предприятие-разработчик	Мониторинг, оценка реализуемости, контроль выполнения Генерального план-графика, целевых показателей программ (проектов)	Профильные Департаменты, управления Госкорпорации
$U_{НИР}^{OT}$	ГНИО по технологии и Материаловедению Предприятие-разработчик		
$U_{ТП}^{OT}$	ГНИО по технологии и Материаловедению Предприятие-разработчик Предприятие-изготовитель ОИ		
$U_{ЭП}^{OT}$	ГНИО по технологии и Материаловедению Предприятие-разработчик Предприятие-изготовитель ОИ		
$U_{РДОИ}^{OT}$	ГНИО по технологии Предприятие-разработчик Предприятие-изготовитель ОИ Предприятие-изготовитель СИ		
$U_{РДСП}^{OT}$	ГНИО по технологии Предприятие-изготовитель СИ		
$U_y^{OЭЦ}$	$q_y^{OT}$	$f_y^{OT}$	$p_y^{OT}$
$U_A^{OЭЦ}$	Профильные Департаменты, управления Госкорпорации ГНИО по технологии Предприятие-разработчик	Согласование Генерального план-графика, целей программ (проектов)	ЗГД Госкорпорации
$U_{НИР}^{OЭЦ}$			
$U_{ТП}^{OЭЦ}$			
$U_{ЭП}^{OЭЦ}$			
$U_{РДОИ}^{OЭЦ}$			
$U_{РДСП}^{OЭЦ}$			

Структурно-логическая схема организационной декомпозиции отраслевой системы технологического развития РКП представлена на рис. 10.

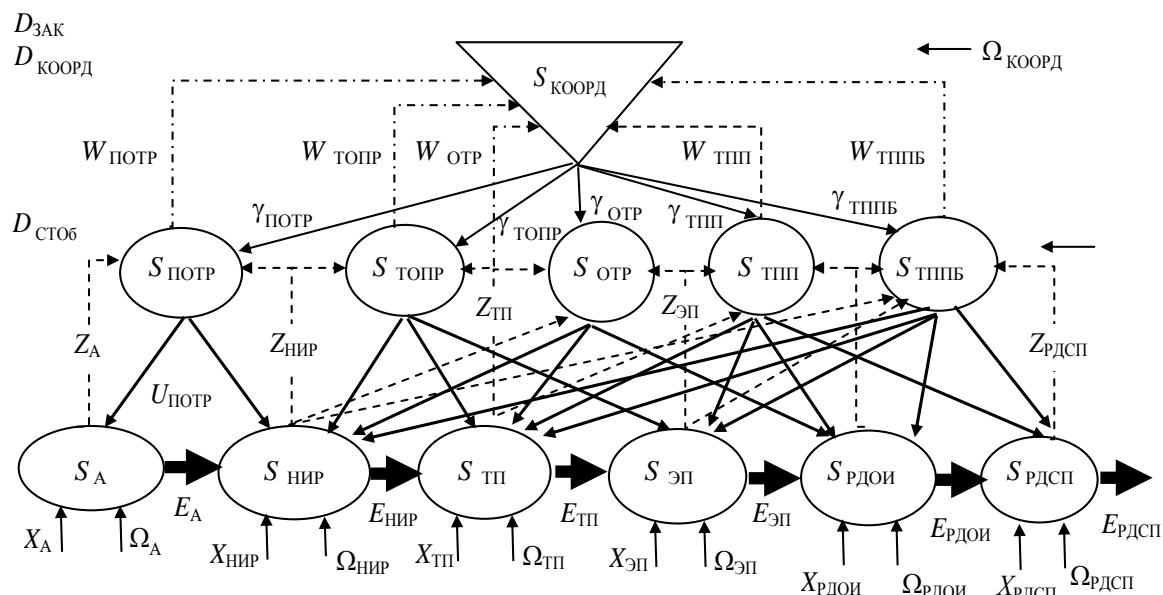


Рис. 10. Модель организационной декомпозиции СТОб в контуре СПЦП изделий РКТ

Структура каналов информационных потоков в ПС  $\{U_{УК}^T, U_{УК}^{OT}, U_{УК}^{OЭЦ}\}$  представлена в табл. 5.

Таблица 5

Структура каналов информационных потоков в ПС РКП

Статус информационного потока	Характеристика каналов контроля и регулирования	Характеристика каналов процессов управления	Характеристика каналов информационного обеспечения
$U_{УК}^T$		Е-система итоговых решений проектных задач управления технологиями в ЖЦИ РКТ ( $E_A, E_{НИР}, E_{ТП}, E_{АП}, E_{РДОП}, E_{РДСП}$ )	Х система ресурсного обеспечения проектных задач ЖЦИ РКТ ( $X_A, X_{НИР}, X_{ТП}, X_{ЭП}, X_{РДОП}, X_{РДСП}$ )  Ω система неопределенностей-воздействий окружающей среды подсистем развития технологий для создания СТС ( $\Omega_A, \Omega_{НИР}, \Omega_{ТП}, \Omega_{ЭП}, \Omega_{РДОП}, \Omega_{РДСП}$ )
$U_{УК}^{OT}$	Z-система отчетов (сигналов обратной связи) мониторинга технологической обеспеченности проектных задач ЖЦИ РКТ ( $Z_A, Z_{НИР}, Z_{ТП}, Z_{АП}, Z_{РДОП}, Z_{РДСП}$ )	U-система решений исполнительных подсистем управления технологиями в ЖЦИ РКТ ( $U_A, U_{НИР}, U_{ТП}, U_{АП}, U_{РДОП}, U_{РДСП}$ )	D система проектных задач подсистем СТОб ( $D_{ПОТР}, D_{НТОПР}, D_{ОТР}, D_{ТПП}, D_{ТППБ}$ )  Ω-система неопределенностей-воздействий окружающей среды подсистем СТОб ( $\Omega_{ПОТР}, \Omega_{ТОПР}, \Omega_{ОТР}, \Omega_{ТПП}, \Omega_{ТППБ}$ )
$U_{УК}^{OЭЦ}$	W-система отчетов (сигналов обратной связи) Субъекту управления технологиями от исполнительных подсистем в ЖЦИ РКТ ( $W_{ПОТР}, W_{НТОПР}, W_{ОТР}, W_{ТПП}, W_{ТППБ}$ )	Г-система координирующих решений (сигналов) проектных задач Субъекта управления технологиями в ЖЦИ РКТ ( $\gamma_0, \gamma_{НИР}, \gamma_{ТП}, \gamma_{ЭП}, \gamma_{РДОП}, \gamma_{РДСП}$ )	$D_{КООРД}$ $D_{ЗАК}$ $\Omega_{КООРД}$

Взаимосвязь Субъекта управления, исполнительной системы и разрабатываемой  $j$ -й программы (проекта, мероприятия), как объекта управления, описывается отображениями:

- Процесс организационно-экономического целевого управления — формирование (идентификация, уточнение, корректировка) цели и параметров программы (проекта, мероприятия):

$$F_{\text{коорд}j}: D \times D_{\text{коорд}} \times \Omega_{\text{коорд}} \Rightarrow \Gamma_{\text{коорд}j}.$$

- Процесс целевого управления формированием (синтезом) вариантов программы (проекта, мероприятия):  $F_{\text{стоби}}: \Gamma_i \times Z_i \times \Omega_{\text{стоби}} \times D_{\text{стоби}} \Rightarrow U_{\text{стоби}}.$

- Процесс функционального реализацией программы (проекта, мероприятия):

- процесс синтеза вариантов программы (проекта, мероприятия) и выбора наиболее рационального:  $F_{\text{стс}j}: X \times U_{\text{стоби}} \times \Omega_{\text{стс}} \Rightarrow E_{\text{стс}j};$

- процесс выявления КТП, мониторинга технологической обеспеченности и реализуемости программы (проекта, мероприятия):  $F_i: X \times U_{\text{стоби}} \times E_{\text{стс}j} \Rightarrow Z_i;$

- процесс согласования с Субъектом управления вариантов программы (проекта, мероприятия):  $F_j: \Gamma_i \times U_{\text{стоби}} \times Z_i \times D_{\text{стс}j} \Rightarrow W_j.$

## Выводы

С учетом изложенного, исходя из необходимости решения поставленной проблемы формирова-

ния новой индустриальной модели РКП и представленных результатов интегрированного системно-структурного анализа ПС целесообразно:

- провести исследование и анализ нормативной базы и массивов знаний мероприятий информационно-аналитического обеспечения управления ПС РКП, в т. ч. мониторинга обеспеченности промышленными технологиями производства космических средств, паспортизации и технологического аудита;

- оценить существующие концепции, методы, сдерживающие факторы, показатели и уровень цифровизации ИАС управления технологическим развитием РКП и определить пути повышения их эффективности;

- исследовать и провести систематизацию информационных описаний определяющих конструкторско-технологических и производственно-технологических решений при создании новых КС;

- теоретически обобщить и систематизировать отраслевой комплекс проектно-технологических задач создания КС с улучшенными тактико-техническими характеристиками и повышения эффективности управления ПС РКП;

- разработать принципы, методологические основы и модельно-программную технологию создания и внедрения ИАС управления ПС РКП;

- исследовать особенности поэтапного создания ИАС управления ПС РКП, разработать дорожную карту с обоснованием объемов и ресурсного обеспечения реализации ее этапов;

- разработать отраслевую методику по практическому внедрению ИАС управления ПС РКП.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Власов Ю. В.** Современное состояние и перспективы развития производственной системы Государственной корпорации по космической деятельности "Роскосмос" // Вестник "НПО "Техномаш". 2020. № 1. С. 6—15.
2. **Минько Э. В., Минько А. Э.** Теория организации производственных систем. — М.: ЗАО "Издательство "Экономика", 2007. — 493 с.
3. **Киселев Г. А., Гуленков В. Ю.** Гибкие производственные системы в машиностроении. — М.: Издательство стандартов, 1987. — 286 с.
4. **Мишин В. М.** Исследование систем управления: учеб. для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности "Менеджмент организации". Изд. 2, стер. — М.: ЮНИТИ, 2012. — 527 с.
5. **Мыльник В. В., Титаренко Б. П., Волочиенко В. А.** Исследование систем управления: учеб. пособие для вузов. — Изд. 4. — М.: Академический проект: Трикта, 2006. — 352 с.
6. **Месарович К., Такахара М., Мако Н.** Теория многоуровневых иерархических систем. — М.: Мир, 1972. — 360 с.
7. **Пантелеев К. Д.** Фасетно-иерархический подход и обобщенная модель предметной области формирования производственных систем // Вестник машиностроения. 2008. № 7. С. 75—78.
8. **Соломонов Ю. С., Шахтарин Ф. К.** Большие системы: гарантийный надзор и эффективность. — М.: Машиностроение, 2003. — 368 с.
9. **Исаченко В. А., Полтавец Г. А.** Системный подход к проблеме формирования и применения КТР / Труды XIX чтений, посвященных разработке научного наследия и развития идей К. Э. Циолковского. — М.: ИИЕТ АН СССР, 1985. С. 24—28.
10. **Касаев К. С., Полтавец Г. А., Булавкин В. В. и др.** Новые наукоемкие технологии в технике: Энциклопедия. Т. 10. Системный подход к сложным техническим объектам / под ред. К. С. Касаева. — М.: АО "НИИ "Энцитех", 1997. — 454 с.

11. О государственной корпорации по космической деятельности "Роскосмос": Федеральный закон от 13.07.2015 № 215-ФЗ: принят Государственной думой 01.07.2015; одобрен Советом Федерации 08.07.2008 (с изм. и доп., вступ. в силу с 13.07.2015) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank> (дата обращения: 08.03.2023).
12. **Бендиков М. А.** Стратегическое планирование развития наукоемких технологий и производств (на примере космического машиностроения). — М.: Academia, 2000. — 304 с.
13. **Бодин Н. Б., Бурмистрова Л. М.** Экономическая модель эффективного управления космической отраслью // Менеджмент и бизнес-администрирование. 2016. № 1. С. 176—195.
14. **Лобова С. В., Теплова И. Г.** Особенности вертикальной и горизонтальной интеграции в оборонно-промышленном комплексе (на примере федерального научно-производственного центра "Алтай") // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2013. № 23(212). С. 22—28.
15. **Теплова И. Г.** Интегрированный научно-производственный комплекс "Алтай" — базис развития оборонного направления наукограда Бийск // Известия Алтайского государственного университета. 2011. № 2/1. С. 331—336.
16. **Теплова И. Г.** Интегрированный научно-производственный комплекс как форма взаимодействия хозяйствующих субъектов // Экономический анализ: теория и практика. 2013. № 15. С. 25—29.
17. **Рябенко А. В.** Организационно-экономический механизм функционирования интегрированных структур ракетно-космической промышленности: дис. канд. техн. наук: 08.00.05.: защищена в 02.02.2015; утв. 15.10.2015. — СПб., 2014. — 157 с.
18. **Колобов А. А., Ермаков А. Ю., Омельченко И. Н.** Формирование системы стратегического интегрированного управления промышленным предприятием // Известия ВУЗов. Машиностроение. 1994. № 4-6. С. 137—144.
19. **Полтавец Г. А.** Применение методов системного анализа при проектировании изделий больших технических систем с учётом производственно-технологических аспектов // X Всесоюзное совещание по проблемам управления (Алма-Ата, сентябрь-октябрь 1986 г.): Тезисы докладов, книга II. — М., 1986.
20. **Гренбэк Г. В., Басарева В. Г.** Анализ и формирование организационной структуры промышленного предприятия. — Новосибирск: Наука, 1983. — 182 с.

## **HIERARCHICAL STRUCTURE AND ASPECTS OF THE SYSTEM DESCRIPTION OF THE PRODUCTION SYSTEM OF THE ROCKET AND SPACE INDUSTRY**

*K. D. Panteleev*

JSC "NPO "Tekhnomash" named after S. A. Afanasyev", Moscow, Russia

*E. G. Rakhmievich; E. S. Yurtsev*

MIREA — Russian Technological University, Moscow, Russia

Department of Industrial Policy and Technological Development of the Roskosmos State Corporation, Moscow, Russia

*The features of an integrated systems approach, comprehensively covering all aspects of the description of the production system of the rocket and space industry, are considered. The necessity of having an objective and complete information description, reflecting the place and interconnections of the production system in the outline of object descriptions of the subject area of production activity of the space industry, is substantiated. The stages of system-structural analysis, features of the morphological and functional aspects of the information description of the hierarchical structure of the production system of the Russian rocket and space industry are shown. An example of an information description of the production system of the rocket and space industry is given. The de-composition of the model of the industry's production system is shown using the example of a two-level model of the organizational de-composition of the industry system of technological development of production in the context of strategic program-target planning of production activities.*

**Keywords:** production system, rocket and space technology, life cycle, design and technological solutions, knowledge base, database.

Bibliography — 20 references.

*Received September 26, 2023*

УДК 004.942

DOI: 10.52190/1729-6552\_2023\_4\_31

EDN: TYRDUF

## **ПРИМЕНЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ПОДХОДА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИ КОРРЕКТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ВИРТУАЛЬНОМ ПОЛИГОНЕ**

А. А. Жиленков, канд. техн. наук; И. С. Моисеев; М. Ю. Серебряков

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»,

г. Санкт-Петербург, Россия

*Представлены два различных подхода к описанию движения объектов, погруженных в воду. Рассмотрены классический подход, основанный на механике Ньютона-Эйлера и дифференциально-геометрический подход. В качестве примера описано движение необитаемого подводного аппарата.*

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, дифференциально-геометрический подход, движение под водой, автономный необитаемый подводный аппарат, динамическая модель.

С развитием технологий и стремительным развитием интеллектуальных роботов проблема сбора данных в океанической среде все чаще решается с помощью автономных аппаратов [1—3]. Они могут оставаться под водой значительно дольше, имеют доступ к зонам повышенного риска и при меньших общих затратах собирают на порядок больше данных, чем аппараты, управляемые непосредственно человеком. В настоящее время проведен большой объем научных исследований по созданию автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), которые выполняют широкий спектр задач гораздо лучше, чем водолазы или малогабаритные подводные аппараты, управляемые людьми. Диапазон таких задач может варьироваться от дальнего сбора океанических образцов до трехмерной топографической съемки ранее не исследованных районов или, например, глубоководных пещер. Кроме того, данные аппараты могут погружаться на большие глубины и находиться там в течение длительного времени без риска для здоровья человека.

АНПА имеют множество целей и могут иметь различные формы и размеры, соответствующие

данным целям [4]. Многие современные исследовательские АНПА имеют торпедообразную форму. Причина такой формы заключается в том, что она уменьшает число степеней свободы и тем самым делает аппарат более доступным с точки зрения управления. Кроме того, такая форма уменьшает сопротивление и повышает эффективность аппарата. Однако недостатком данной конструкции является недостаточная маневренность. Тем не менее, для дальних исследований и навигации АНПА не требуется большой маневренности. Однако по мере того, как АНПА внедряют во все более широкие области науки, и им приходится решать все более сложные задачи, возникает необходимость анализа других форм, например, сферы или эллипса. Использование таких форм позволяет получить более маневренный аппарат, но требует гораздо большего понимания управления и гидродинамики.

По мере внедрения АНПА в различные сферы деятельности возрастает потребность в более глубоком понимании динамики данных аппаратов [5, 6]. Как и для любой другой машины, для выполнения даже простых на первый взгляд задач необходимо точное управление АНПА. Управление подводным аппаратом начинается с основ гидродинамики и включает в себя алгоритм автономности, с помощью которого подводный аппарат принимает решения.

Простое твердое тело, погруженное в воду, относится к классу элементарных механических систем управления, лагранжиан которых равен разности кинетической и потенциальной энергий. В различной литературе имеется множество примеров моделирования механики таких систем [7, 8]. В данной работе рассмотрим наиболее актуальную разработку с использованием дифференциально-геометрического подхода.

**Жиленков Антон Александрович**, доцент, декан факультета "Цифровые промышленные технологии".

E-mail: zhilenkovanton@gmail.com

**Моисеев Илья Сергеевич**, ассистент кафедры "Киберфизические системы".

E-mail: ilmoiseev@inbox.ru

**Серебряков Михаил Юрьевич**, ассистент кафедры "Киберфизические системы".

E-mail: dop3fun@gmail.com

Статья поступила в редакцию 25 сентября 2023 г.

© Жиленков А. А., Моисеев И. С., Серебряков М. Ю., 2023

### Степени свободы, системы координат и обозначения

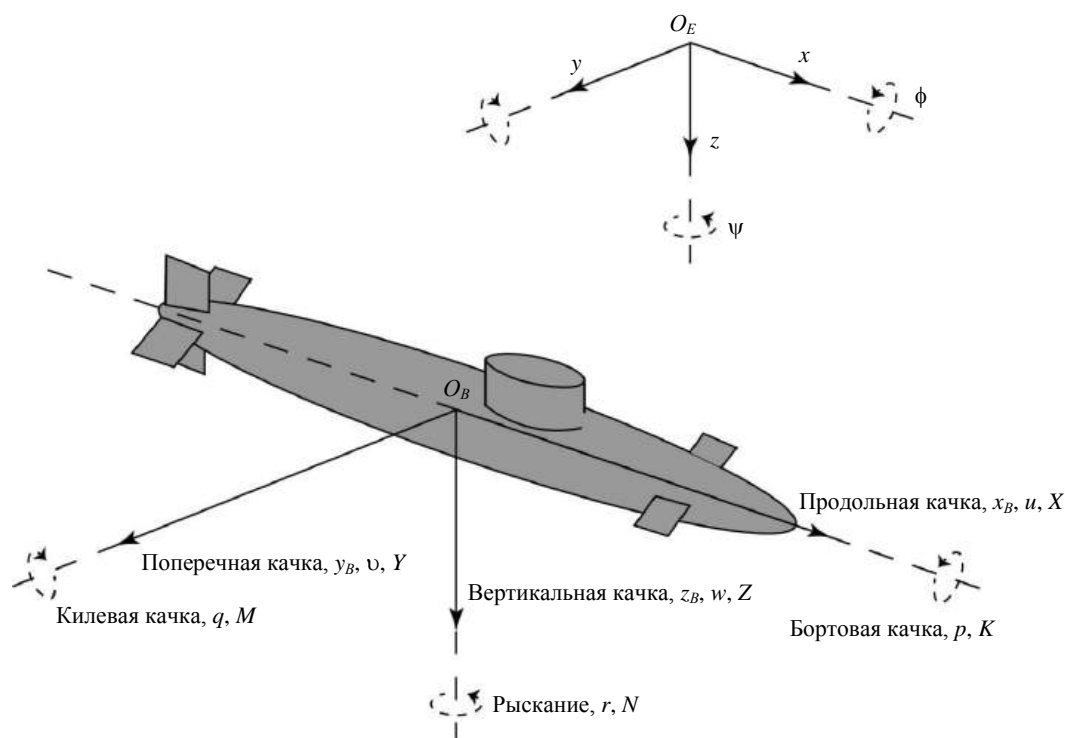
Степени свободы — это набор независимых движений и вращений, описывающих положение и ориентацию исследуемого объекта. АНПА перемещаются по шести степеням свободы. В горизонтальной плоскости они имеют две степени свободы, а именно: продольную качку (движение вдоль) и поперечную качку (движение в сторону). Рыскание (вращение вокруг вертикальной оси) описывает курс транспортного средства. Остальные три степени свободы — это бортовая качка (вращение вокруг продольной оси), килевая качка (вращение вокруг поперечной оси) и вертикальная качка (вертикальное движение). Все степени свободы показаны на рисунке.

Для моделирования АНПА вводится две системы отсчета: система отсчета, фиксированная на Земле, которую можно рассматривать как инерци-

альную, поскольку ее движением можно пренебречь, и система отсчета, фиксированная на теле. В системе отсчета, фиксированной на Земле, ось  $x$  направлена на север, ось  $y$  — на восток, а ось  $z$  — на центр Земли. В системе отсчета, фиксированной на теле, ось  $x$  направлена вперед, ось  $y$  — вправо от аппарата, а ось  $z$  — вертикально вниз. Обе системы отсчета показаны на рисунке. Начальные точки отсчета системы отсчета "Земля" и системы отсчета "тело" определим, как  $O_E$  и  $O_B$  соответственно.

Используя указанные две системы отсчета, можно определить ориентацию аппарата относительно Земли, а также скорость и ускорение относительно как координат Земли, так и координат подводного аппарата, что полезно для навигации АНПА.

Стандартные обозначения для необходимых переменных при исследовании движения АНПА приведены в [9] и имеют вид, представленный в таблице.



Системы отсчета, фиксированные на Земле и на теле, с обозначением всех степеней свободы

Условные обозначения SNAME для исследования подводных аппаратов

Степень свободы	Силы и моменты	Линейные и угловые скорости	Положения и углы Эйлера
Продольная качка	$X$	$u$	$x$
Поперечная качка	$Y$	$v$	$y$
Вертикальная качка	$Z$	$w$	$z$
Бортовая качка	$K$	$p$	$\phi$
Килевая качка	$M$	$q$	$\theta$
Рыскание	$N$	$r$	$\psi$

Для того, чтобы обеспечить компактный способ представления величин и провести соответствующий анализ АНПА, составим наборы переменных. Вектор от начала системы отсчета, фиксированной на Земле, до начала системы отсчета, фиксированной на теле, представлен в виде  $p = (x, y, z)$ . Движение твердого тела с шестью степенями свободы можно определить с помощью следующего набора  $\eta = (x, y, z, \phi, \theta, \psi)^T = (p, \phi, \theta, \psi)^T = (p, \eta_2)^T$ , где  $\eta_2 = (\phi, \theta, \psi)$ , тогда  $\eta$  определяет ориентацию и положение относительно системы отсчета, фиксированной на Земле. В системе отсчета, фиксированной на теле,  $v = (u, v, w)^T$  — линейная скорость,  $\Omega = (p, q, r)^T$  — угловая скорость.

### Углы Эйлера

Существуют два основных способа определения угловой ориентации тела относительно системы отсчета, фиксированной на Земле, а именно: с помощью углов Эйлера или кватернионов. В данной работе за основу взяты углы Эйлера, но учитывается тот факт, что для полного исключения сингулярностей может потребоваться два представления.

Углы Эйлера связывают две системы отсчета в терминах ориентации, т. е. ориентации системы отсчета, фиксированной на теле, по отношению к системе отсчета, фиксированной на Земле. Чтобы определить ориентацию одной системы отсчета относительно другой, ее можно последовательно подвергнуть трем вращениям, используя для описания ориентации тела относительно Земли соотношение Эйлера  $z$ - $y$ - $x$ . Система отсчета, фиксированная на теле, сначала поворачивается вокруг оси  $z$ , затем вокруг оси  $y$  и затем вокруг оси  $x$ , что соответствует углам рысканья, бортовой качки и килевой качки соответственно. В данных обозначениях угловая ориентация системы отсчета, фиксированной на теле, относительно системы отсчета, фиксированной на Земле, будет выражаться через матрицу поворота. Матрица поворота задается следующим образом

$$R^{BE}(\phi, \theta, \psi) = R_z(\psi)R_y(\theta)R_x(\phi). \quad (1)$$

Тогда, руководствуясь тем, что обе системы отсчета, сформулированные ранее, имеют одинаковую ориентацию (обе правосторонние), можно получить общую матрицу вращения для поворота вокруг всех трех осей путем матричного умножения  $R_z(\psi)R_y(\theta)R_x(\phi)$ . Пусть  $s \cdot = \sin(\cdot)$  и  $c \cdot = \cos(\cdot)$ , тогда общая матрица вращения имеет вид

$$R^{BE} = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\theta + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\theta + c\psi c\theta s\phi \\ s\psi c\theta & c\psi c\theta + s\psi s\theta s\phi & -c\psi s\theta + s\psi c\theta s\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Если определить матрицу вращения  $R_2^{BE}$  так, что  $\dot{\eta}_2 = R_2^{BE} \Omega$ , то кинематические уравнения движения твердого тела, движущегося в шести степенях свободы, можно представить в виде

$$\dot{\eta} = \begin{bmatrix} R^{BE} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & R_2^{BE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \Omega \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $0_{3 \times 3}$  — нулевая матрица  $3 \times 3$ .

### Динамика автономного подводного необитаемого аппарата в формулировке Ньютона—Эйлера

Опишем один из основных подходов к получению уравнений движения твердого тела, движущегося в шести степенях свободы, а именно формулировку Ньютона—Эйлера. Данный подход основан на втором законе Ньютона:

$$F_{net} = ma \quad \text{и} \quad F_{net} = I_B \alpha, \quad (4)$$

где чистые силы ( $F_{net}$ ), действующие на тело, связаны с поступательным ускорением ( $a$ ) и массой ( $m$ ), а моменты ( $F_{net}$ ) — с угловым ускорением ( $\alpha$ ) и инерцией тела ( $I_B$ ). Позднее уравнение (4) было сформулировано Эйлером в контексте сохранения линейного и углового моментов. Данные уравнения Ньютона—Эйлера можно считать отправной точкой для реализации подхода к выводу динамических уравнений движения.

Пусть  $v = (v, \Omega)^T$ . Тогда динамическая модель

$$M \dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau, \quad (5)$$

получается из уравнения Ньютона—Эйлера для твердого тела в жидкости [10]. Здесь,  $M = M_{RB} + M_A$  — матрица массы и инерции для твердого тела и присоединенной массы соответственно;  $C(v) = C_{RB}(v) + C_A(v)$  — матрица Кориолиса и центробежная матрица для твердого тела и присоединенной массы соответственно;  $D(v) = D_q(v) + D_l(v)$  — квадратичная и линейная матрицы сопротивления соответственно;  $g(\eta)$  — матрица гравитации и плавучести;  $\tau$  — вектор силы/момента на входе в рулевое устройство. Влияние окружающей среды, например подводных течений, в уравнении (5) не учитывается.



Гидродинамические силы и моменты, возникающие на АНПА, можно разделить на две категории: присоединенная масса и гидродинамическое демпфирование. Присоединенную массу можно рассматривать как некоторый объем воды, связанный с аппаратом, из-за которого масса аппарата кажется больше.

### Динамика и кинематика автономных подводных аппаратов в геометрической постановке

#### Мотивация

Одна из важнейших причин, по которой дифференциальная геометрия является эффективным инструментом для изучения механики, заключается в том, что механические системы естественным образом развиваются на конфигурационном пространстве, которое, в свою очередь, является многообразием. Другими словами, все множества конфигураций механической системы имеют биективное отображение в множество, имеющее структуру дифференцируемого многообразия, которое называется конфигурационным пространством и обычно обозначается  $Q$ . Более подробно данная идея рассматривается в [11].

Уравнение (5) принято рассматривать как общее уравнение движения аппарата с шестью степенями свободы, но на самом деле оно является координатным представлением еще более общего набора уравнений, живущих на дифференцируемом многообразии. Возможность выбора параметризации (т. е. координат) для таких общих уравнений в некоторых случаях выгодна, а также дает возможность работать локально и временно считать, что мы работаем с обычным исчислением в евклидовом пространстве, но это также может быть достаточно ограничивающим, в зависимости от конфигурационного многообразия рассматриваемой системы. Кроме того, при выражении координат может быть потеряна внутренняя структура многообразия и глобальные свойства механической системы, поскольку координаты действительны только для части конфигурационного пространства. Например, невозможна глобальная параметризация (т. е. не существует единого набора координат), которая могла бы полностью определить  $S^1 = \{(x, y) \in M \mid x^2 + y^2 = 1\}$ , окружность в  $\mathbb{R}^2$ . Благодаря многообразиям можно формулировать рассматриваемые задачи независимо от координат и, таким образом, рассматривать их реальную геометрическую структуру.

Рассмотрим уравнения движения в терминах дифференциальной геометрии. Основная цель —

получить координатно-инвариантную систему уравнений для описания движения твердого тела, перемещающегося в шести степенях свободы. Мотивацией такого вывода является использование присущих механической системе геометрических свойств и симметрий для решения задачи точного моделирования движения.

#### Кинематика

Воспользуемся ранее введенными обозначениями и запишем кинематические уравнения для твердого тела в виде:

$$\dot{p} = R^{BE} v, \quad (6)$$

$$\dot{R}^{BE} = R^{BE} \hat{\Omega}, \quad (7)$$

где оператор  $\hat{\cdot}: \mathbb{R}^3 \rightarrow so(3)$  определяется через  $\hat{y}z = y \times z$ . Пространство  $so(3)$  представляет собой алгебру Ли, связанную с группой Ли  $SO(3)$ , и является пространством кососимметричных матриц (т. е.  $so(3) = \{R^{BE} \in \mathbb{R}^{3 \times 3} \mid (R^{BE})^T = -R^{BE}\}$ ).

#### Динамика

Центральным фактом для понимания аффинного дифференциально-геометрического подхода к механике является то, что кинетическая энергия системы задает риманову метрику на конфигурационном пространстве.

С классической точки зрения метрика кинетической энергии представляет собой симметричную положительно определенную матрицу — функцию конфигурации. Однако в случае геометрического подхода метрика кинетической энергии является гладким представлением скалярного произведения для каждого касательного пространства конфигурационного пространства. В дифференциальной геометрии такое представление называется римановой метрикой. И соответственно, если это представление выводится из кинетической энергии механической системы, то соответствующая риманова метрика называется метрикой кинетической энергии.

Рассмотрим динамику, выразив эквивалентное представление уравнения (5). Для этого выразим поступательную ( $T_{\text{trans}}(t)$ ) и вращательную ( $T_{\text{rot}}(t)$ ) части кинетической энергии тела

$$T_{\text{trans}}(t) = \frac{1}{2} m \|\dot{p}(t)\|_{\mathbb{R}^3}^2, \quad (8)$$

$$T_{\text{rot}}(t) = \frac{1}{2} \mathbb{G}_{\mathbb{R}^3} (I_b(\Omega(t), \Omega(t))), \quad (9)$$

где  $\mathbb{G}_{\mathbb{R}^3}$  — стандартное скалярное произведение на  $\mathbb{R}^3$ . Пусть теперь  $\gamma: \mathbb{R}^+ \rightarrow Q$  — дифференцируемая кривая в точке  $q_0 \in Q$ . Используя прямое кинематическое отображение  $\Pi: Q \rightarrow SE(3)$ , получим дифференцируемую кривую  $\gamma_1 = \Pi \circ \gamma: \mathbb{R}^+ \rightarrow SE(3)$  в точке  $(R_0^{BE}, p_0) \triangleq \Pi(q_0)$ . Если присвоить касательному вектору  $v_0 = [\dot{\gamma}]_{q_0} \in T_{q_0}Q$  неотрицательное число  $KE(v_0)$ , то можно определить кинетическую энергию твердого тела в нулевой момент времени вдоль кривой  $\gamma_1$ . Повторяя данный процесс для каждого касательного вектора в  $TQ$ , получим функцию  $KE: TQ \rightarrow \mathbb{R}$ , определяющую кинетическую энергию. Существует  $C^\infty$  — положительно полубесконечное  $(0,2)$ -тензорное поле  $\mathbb{G}$ , такое, что  $KE(v_q) = \frac{1}{2} \mathbb{G}(v_q, v_q)$ , что аналогично определению кинетической энергии в  $Q = SE(3)$ . Данное  $\mathbb{G}$  является скалярным произведением, которое будет использовано авторами в уравнениях.

Таким образом, кинетическая энергия твердого тела во взаимосвязанной механической системе представляется положительным полубесконечным  $(0,2)$ -тензорным полем на конфигурационном многообразии  $Q$ . Данный объект называется метрикой кинетической энергии для системы. Аналогично можно построить кинетическую энергию жидкости в виде другого тензорного поля вида  $(0,2)$ . Сумма данного тензорного поля и  $\mathbb{G}$  определяет кинетическую энергию погруженного в жидкость твердого тела.

В итоге метрика кинетической энергии для погруженного твердого тела является единственной римановой метрикой на  $Q = SE(3)$ , которая имеет вид

$$\mathbb{G} = \begin{pmatrix} M & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix}, \quad (10)$$

где  $M = m\mathbb{I}_3 + M_A$  и  $I = I_B + I_A$ ,  $\mathbb{I}_3$  — единичная матрица  $3 \times 3$ ,  $I_A$  — момент инерции присоединенной массы.

Как и для любой римановой метрики, с  $\mathbb{G}$  ассоциируется связь Леви—Чивиты: единственная аффинная связь, которая одновременно симметрична и совместима с метрикой. Связь Леви—Чивиты дает соответствующее понятие ускорения для кривой

в конфигурационном пространстве, гарантируя, что ускорение фактически является касательным векторным полем вдоль кривой  $\gamma$ . Более подробно связь Леви—Чивиты рассмотрена в [12]. Данная связь учитывает также кориолисову и центробежную силы, действующие на систему. В явном виде, если  $\gamma(t) = (p(t), R^{BE}(t))$  — кривая в  $SE(3)$ , а  $\gamma'(t) = (v(t), \Omega(t))$  — ее псевдоскорость, заданная уравнениями (6) и (7), то ускорения задаются как

$$\nabla_{\gamma'} \gamma' = \begin{pmatrix} \dot{v} + M^{-1}(\Omega \times Mv) \\ \dot{\Omega} + I^{-1}(\Omega \times J\Omega + v \times Mv) \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где  $\nabla$  обозначает связь Леви—Чивиты, а  $\nabla_{\gamma'} \gamma'$  — ковариантная производная по отношению к самой себе. Символ  $\nabla_{\gamma'} \gamma'$  означает геометрическое ускорение относительно  $\nabla$ , а уравнение (11) — второй закон Ньютона, выраженный геометрически в виде  $a = \sum_i F_i / m$ . В отсутствие внешних сил уравнение (11) принимает вид  $\nabla_{\gamma'} \gamma' = 0$ , что является геодезией для аффинной связи  $\nabla$ . Геометрическое ускорение является правильным способом рассмотрения ускорения в общем смысле, поскольку изменение координат не оказывает на него никакого влияния.

## Заключение

В данной статье были рассмотрены два подхода к созданию численных моделей движения морских объектов — подход, основанный на формулировке Ньютона—Эйлера, и дифференциально-геометрический подход. Основная разница между данными подходами заключается в том, что модели, разработанные с помощью дифференциально-геометрического подхода, в отличие от моделей, разработанных с помощью формулировки Ньютона—Эйлера, сохраняют полную энергию системы, т. е. являются физически корректными, а также сохраняют геометрическую структуру уравнений движений. Подобные физически корректные модели могут использоваться в различных инженерных проектах и научных исследованиях, где требуется быстрое и точное моделирование движения механических систем.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации программы "Приоритет 2030" (№ 075-15-2023-235 от 13.02.2023).*

# ЛИТЕРАТУРА

1. Голядкина С. С., Кудрявцев И. А., Харченко Ю. А. АНПА для арктического шельфа // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2021. № 2(110). С. 94—97.
2. Кириянов А. В., Смирнов К. А., Бабкин Д. С., Хан Р. Е. Решение задачи поиска объектов АНПА // Морская радиоэлектроника. 2020. № 4(74). С. 36—39.
3. Бобков В. А., Морозов М. А., Шупикова А. А., Инзарцев А. В. Распознавание подводного трубопровода по стереоснимкам с борта АНПА в задачах инспекции подводных объектов // Подводные исследования и робототехника. 2021. № 3(37). С. 36—45.
4. Лебедева М. П., Лебедев А. О., Агеева Н. С., Буцанец А. А. Форма корпуса необитаемого подводного аппарата как классификационный признак // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. 2022. № 4. С. 7—18.
5. Киселев Л. В., Костенко В. В., Медведев А. В. Особенности динамической модели пространственного движения гибридного необитаемого подводного аппарата // Подводные исследования и робототехника. 2021. № 1(35). С. 18—30.
6. Wu Q., Yang X., Wu Y. et al. A novel underwater bipedal walking soft robot bio-inspired by the coconut octopus // Bioinspiration & Biomimetics. 2021. V. 16. № 4. P. 046007. DOI: 10.1088/1748-3190/abf6b9. EDN DASXYQ.
7. Козелков А. С., Куркин А. А., Пелиновский Е. Н. Моделирование падения тела в воду в различных условиях на основе численного решения уравнений Навье-Стокса полностью неявным методом // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. 2015. № 3(110). С. 51—69.
8. Козелков А. С., Ефремов В. Р., Куркин А. А. и др. Моделирование движения тел в вязкой несжимаемой жидкости // Сибирский журнал вычислительной математики. 2019. Т. 22. № 3. С. 261—280.
9. SNAME. Nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid, Technical and Research Bulletin № 1—5. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1950.
10. Fossen T. I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. — John Wiley & Sons, 2021. P. 736.
11. Bullo F., Lewis A. D. Geometric Control of Mechanical Systems: Modeling, Analysis, and Design for Simple Mechanical Systems. — Springer, 2004. P. 751.
12. Alattas K. A., Mostafae J., Mobayen S. et al. Nonsingular terminal sliding mode control based on adaptive barrier function for nth-order perturbed nonlinear systems // Mathematics. 2022. V. 10. № 1. DOI: 10.3390/math10010043. EDN SBQTQV.

## APPLICATION OF A DIFFERENTIAL GEOMETRIC APPROACH TO PROVIDE PHYSICALLY CORRECT MODELING OF THE MOVEMENT OF MARINE OBJECTS ON A VIRTUAL TEST SITE

A. A. Zhilenkov, I. S. Moiseev, M. Yu. Serebryakov

Saint-Petersburg State Marine Technical University, Saint-Petersburg, Russia

*The article presents two different approaches to describing the motion of objects immersed in water. First, the classical approach based on Newton-Euler mechanics is considered, and then, as an alternative, the differential-geometric approach is considered. As an example, the motion of an unmanned underwater vehicle is described.*

**Keywords:** computer modeling; differential-geometric approach; underwater motion; autonomous unmanned underwater vehicle; dynamic model.

Bibliography — 12 references.

Received September 25, 2023

УДК 629.1.04  
DOI: 10.52190/1729-6552\_2023\_4\_37  
EDN: XDKYHC

## КОНДЕНСАТОР МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

И. П. Попов

Курганский государственный университет, г. Курган, Россия

*Рассмотрен накопитель механической энергии, выполненный в виде электрической машины постоянного тока или вентильной, на валу которой закреплен супермаховик. Разработана математическая модель устройства. Показано, что для электрической цепи рассматриваемый аккумулятор механической энергии неотличим от электрического конденсатора.*

**Ключевые слова:** тягач, нагрузка, буксировка, прицеп, аккумулятор, энергия, электрическая машина.

Кратковременные пиковые нагрузки машин и механизмов порождают необходимость в аккумуляровании механической энергии для ее последующего импульсного использования. Это вполне актуально, например, для тягачей на стартовом этапе буксировки тяжелых прицепов [1—3]. Применение аккумулятора механической энергии позволит уменьшить мощность двигателя тягача.

$B$  — значение магнитной индукции;  
 $2l$  — рабочая длина витка якорной обмотки;  
 $w$  — число витков якорной обмотки;  
 $D$  — диаметр якоря;  
 $R$  — активное сопротивление электрической цепи;  
 $U$  — напряжение источника питания [4—7].

Для компактности вводится обозначение

$$BlwD = Y. \quad (1)$$

### Теоретическое обоснование

Аккумулятор механической энергии может быть выполнен в виде электрической машины постоянного тока или вентильной, на валу которой закреплен супермаховик.

При подключении машины к источнику питания возникает нестационарный процесс, описываемый следующими выражениями.

$$\begin{cases} J \frac{d^2\varphi}{dt^2} + k \frac{d\varphi}{dt} = B2lw \frac{D}{2} i \\ B2lw \frac{D}{2} \frac{d\varphi}{dt} + Ri = U \end{cases},$$

где  $J$  — момент инерции супермаховика в совокупности с собственным моментом инерции электрической машины;

$\varphi$  — угловое положение ротора;

$k$  — коэффициент вязкого трения;

Очевидные начальные условия

$$\varphi(0) = \varphi_0, \quad \frac{d\varphi}{dt}(0) = \omega_0. \quad (2)$$

Из второго выражения системы уравнений вытекает

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi}{dt} &= -\frac{R}{Y} i + \frac{U}{Y}, \\ \frac{d^2\varphi}{dt^2} &= -\frac{R}{Y} \frac{di}{dt}. \end{aligned} \quad (3)$$

При подстановке в первое выражение системы уравнений получается

$$\begin{aligned} -\frac{JR}{Y} \frac{di}{dt} - \frac{kR}{Y} i + \frac{kU}{Y} &= Yi, \\ \frac{di}{dt} + \left( \frac{Y^2}{JR} + \frac{k}{J} \right) i &= \frac{k}{J} \frac{U}{R}. \end{aligned}$$

Для компактности введем обозначения

$$\frac{Y^2}{JR} + \frac{k}{J} = A, \quad \frac{k}{J} \frac{U}{R} = B.$$

**Попов Игорь Павлович**, старший преподаватель кафедры "Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты".  
E-mail: ip.popov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 7 ноября 2023 г.

© Попов И. П., 2023

В соответствии с этим

$$\frac{di}{dt} + Ai = B. \quad (4)$$

Общее решение этого уравнения имеет вид

$$i_1 = C_1 e^{-At}.$$

Частное решение

$$i_2 = C_2.$$

Из этого в сочетании с (4) следует

$$0 + AC_2 = B,$$

$$C_2 = \frac{B}{A}.$$

Ток в цепи имеет вид

$$i = i_1 + i_2 = C_1 e^{-At} + \frac{B}{A}. \quad (5)$$

Имея в виду (2) и (3),

$$i(0) = \frac{U}{R} - \frac{Y\omega_0}{R}.$$

Из этого в сочетании с (5) следует

$$C_1 = \frac{U}{R} - \frac{Y\omega_0}{R} - \frac{B}{A},$$

$$i = \left( \frac{U}{R} - \frac{Y\omega_0}{R} - \frac{B}{A} \right) e^{-At} + \frac{B}{A}.$$

$$i = \left( \frac{U - Y\omega_0}{R} - \frac{U}{Y^2/k + R} \right) e^{-t/\tau} + \frac{U}{Y^2/k + R} = \left( \frac{U - E_0}{R} - \frac{U}{R_k + R} \right) e^{-t/\tau} + \frac{U}{R_k + R}. \quad (6)$$

Здесь  $E_0 = Y\omega_0$ .

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{R} \frac{1}{J/Y^2} + \frac{1}{J/k} = \frac{1}{R} \frac{1}{J/Y^2} + \frac{1}{(J/Y^2)(Y^2/k)} = \frac{1}{RC_J} + \frac{1}{R_k C_J} = \frac{1}{\tau_e} + \frac{1}{\tau_m}. \quad (7)$$

если  $k = 0$ ,  $R_k = \infty$ , то

$$i = \frac{U - E_0}{R} e^{-t/\tau}, \quad (8)$$

$$\tau = \frac{RJ}{Y^2} = RC_J. \quad (9)$$

Выражения (8), (9) повторяют соотношения для зарядки электрического конденсатора.

Если соединить между собой концы якорной обмотки, то

$$i = \frac{-E_0}{R} e^{-t/\tau}.$$

Это выражение повторяет соотношение для разрядки электрического конденсатора.

### Обсуждение

Из формул (6)—(9) следует, что для электрической цепи рассматриваемый аккумулятор механической энергии неотличим от электрического конденсатора [8—10].

Из этого следует, что в данном случае можно вести речь об искусственной электрической емкости, которая равна

$$C_J = \frac{J}{Y^2}.$$

Кроме того, возникает искусственное электрическое сопротивление (которое не связано с удельным сопротивлением, длиной и площадью сечения проводников)

$$R_k = \frac{Y^2}{k}.$$

Аккумулятор механической энергии накапливает энергию

$$W = \frac{C_J U^2}{2} = \frac{JU^2}{2Y^2} = \frac{J\omega^2}{2}.$$

Эквивалентная электрическая схема аккумулятора механической энергии представлена на рис. 1.

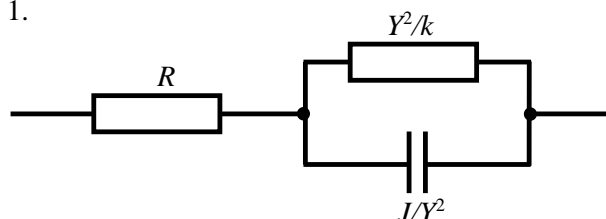


Рис. 1 Электрическая схема аккумулятора механической энергии

На рис. 2 показан график тока зарядки/разрядки искусственной электрической емкости.

В связи с изложенным, очевидно, что аккумулятор механической энергии можно трактовать, как искусственный электрический конденсатор, который запасает не энергию электрического поля, а кинетическую энергию вращения супермаховика.

## Заключение

Существуют конструкции супермаховиков, способных запастись существенную кинетическую энергию. Изучена возможность установки их на легковом транспорте. Массивные тягачи имеют бесспорное преимущество, поскольку увеличение веса для них не только не проблематично, но в некоторых случаях желательно.

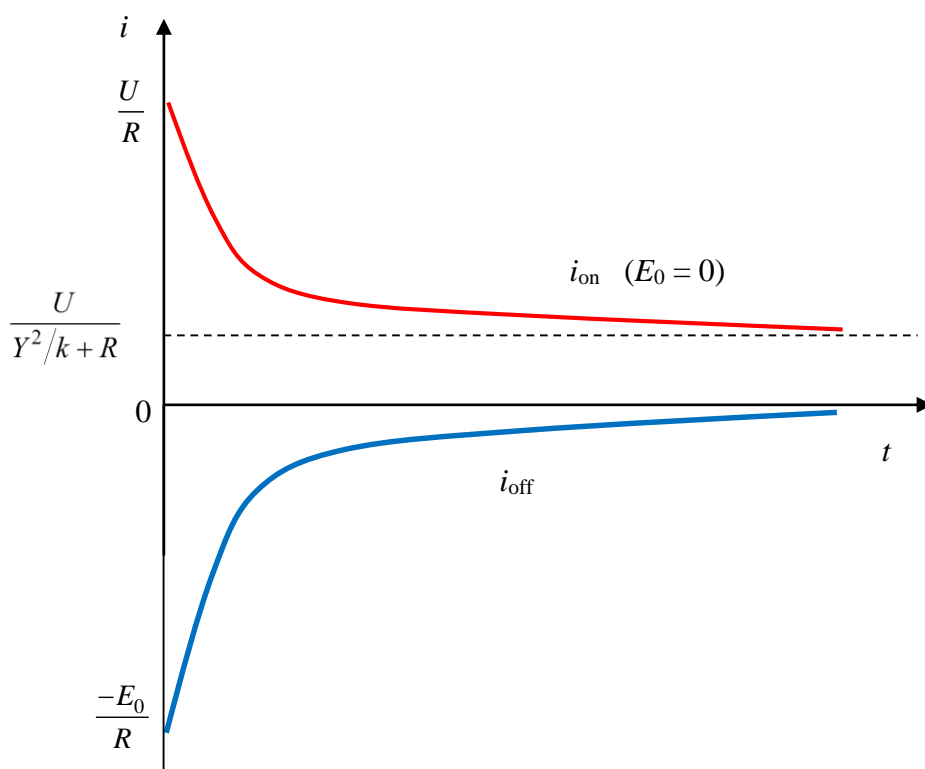


Рис. 2. Характер тока при зарядке и разрядке искусственной электрической емкости

## ЛИТЕРАТУРА

1. Попов И. П. Автопоезд с упругодеформируемыми тягово-сцепными устройствами // Автомобильная промышленность. 2023. № 4. С. 18—22.
2. Попов И. П. Тягово-сцепные устройства многозвенного транспортного средства // Известия МГТУ МАМИ. 2023. Т. 17, № 1. С. 35-42. DOI: 10.17816/2074-0530-321254.
3. Попов И. П. Модель трогания тяжёлого состава // Мир транспорта. 2021. Т. 19, № 2 (93). С. 19–24. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-2-3>.
4. Попов И. П. Электромагнитный маховик для ориентирования орбитальных объектов // Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России. 2019. № 2. С. 15–17.
5. Попов И. П. Безмассовый маховик // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2022. № 6. С. 273–275. DOI: 10.36652/0202-3350-2022-23-6-273-275.
6. Павлов В. Д. Маховик с электромагнитным моментом инерции // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2022. № 9 (306). С. 53-55. DOI: 10.14489/hb.2022.09.pp.053-055.
7. Попов И. П. Электромагнитное устройство для ориентирования космических аппаратов // Космические аппараты и технологии. 2022. Т. 6. № 2 (40). С. 119-122. DOI: 10.26732/j.st.2022.2.06.
8. Попов И. П. Электромеханические или искусственные масса и упругость // Вестник Псковского государственного университета. Технические науки. 2016. Вып. 4. С. 89–94.
9. Попов И. П., Сарапулов Ф. Н., Сарапулов С. Ф. Емкостно-емкостная колебательная система // Вестник Курганского государственного университета. Технические науки. Вып. 9. 2014. № 2(33). С. 21–23.
10. Попов И. П. Инертно-емкостная колебательная система // Зауральский научный вестник. 2013. № 2(4). С. 65—66.

## **MATERIALMECHANICAL ENERGY CAPACITOR**

*I. P. Popov*

Kurgan State University, Kurgan, Russia

*We consider a mechanical energy storage device made in the form of a direct current or valve electric machine, on the shaft of which a superflywheel is attached. A mathematical model of the device has been developed. It is shown that for an electrical circuit the mechanical energy accumulator under consideration is indistinguishable from an electrical capacitor.*

*Keywords:* tractor, load, towing, trailer, battery, energy, electric machine.

Bibliography — 10 references.

*Received November 7, 2023*



УДК 631.171.001.5  
DOI: 10.52190/1729-6552\_2023\_4\_41  
EDN: LVWLNC

## **АНАЛИЗ ПРОИЗВОДСТВА ТРАКТОРНОЙ ТЕХНИКИ В РОССИИ ЗА 2021–2022 ГОДЫ**

*А. В. Лавров*, канд. техн. наук; *Е. В. Овчинников*  
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия

*Представлена динамика объема производства тракторной техники в России за 2021–2022 гг. Проведен анализ изменения структуры производства по предприятиям-изготовителям, по тяговым классам и мощностным диапазонам. Анализ показал, что существует низкий объем производства тракторов, в том числе гусеничных, имеющих двойное назначение, которые могут быть использованы, как в дорожном строительстве, в сельском хозяйстве, так и в оборонном комплексе.*

**Ключевые слова:** трактор, тяговый класс, мощность двигателя, мониторинг производства тракторов, предприятие-изготовитель.

Машиностроение — это важнейшая стратегическая часть экономики, состояние которой влияет на производственную независимость любой страны. В частности, тракторостроение является основополагающим звеном во всей отрасли промышленного и сельскохозяйственного производства [1, 2].

В феврале 2022 г. произошли события, последствием которых стали антироссийские санкции, затронувшие все сферы экономики, в том числе и производство колесных и гусеничных тракторов. Особенно это отразилось на отрасли сельского хозяйства.

Конъюнктура производства промышленных и сельскохозяйственных тракторов существенно поменялась, европейские и американские предприятия-изготовители сократили или полностью прекратили свое производство на территории России, а предприятия-изготовители, использующие зарубежные комплектующие из стран Европы, Северной Америки и Японии, сократили свое производство в связи с трудностями поставок в Россию деталей, узлов и агрегатов для производства и ремонта автотракторной техники.

Производство тракторов в России существенно влияет на формирование как количественно-возрастной структуры тракторного парка, так и машинно-тракторного парка в целом [3, 4].

---

**Лавров Александр Владимирович**, заведующий лабораторией.

E-mail: vimlavrov@mail.ru

**Овчинников Евгений Валентинович**, научный сотрудник.

E-mail: evo-xpro-info@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 27 ноября 2023 г.

© Лавров А. В., Овчинников Е. В., 2023

Цель исследования — мониторинг производства промышленных и сельскохозяйственных тракторов в России для выявления тенденций его развития в условиях антироссийских санкций.

### **Материалы и методы**

Исследование производства тракторов основано на обзоре продукции предприятий-изготовителей, выпускающих промышленные и сельскохозяйственные тракторы, полного производственного цикла и сборки из тракторокомплектов [5, 6].

Исследуемыми показателями рынка являлись:

- марка трактора;
- модель трактора;
- мощность;
- тяговый класс.

### **Результаты исследований**

Обработка данных о производстве промышленных и сельскохозяйственных тракторов в России, позволила провести анализ изменения структуры производства по предприятиям-изготовителям, по тяговым классам и мощностным диапазонам.

Основными параметрами сельскохозяйственных тракторов с точки зрения применения их при реализации сельскохозяйственных технологий являются тяговый класс и мощность двигателя, передаваемая на вал отбора мощности [7].

Анализ структуры производства тракторов по тяговым классам представлен на рис. 1, 2.

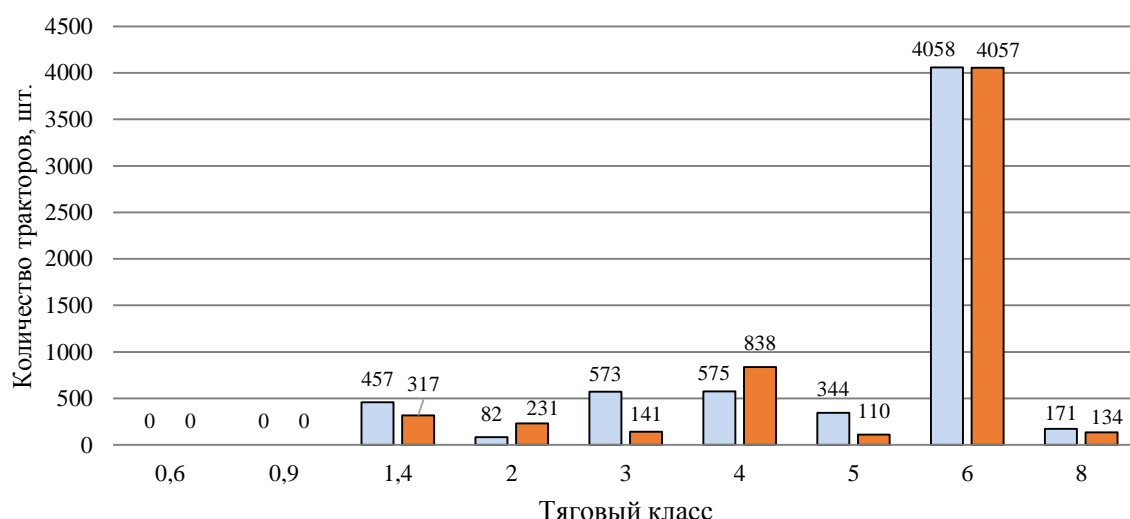


Рис. 1. Структура сельскохозяйственных колесных тракторов по тяговым классам, произведенных в России за 2021—2022 гг.

■ — 2021 г.; ■ — 2022 г.

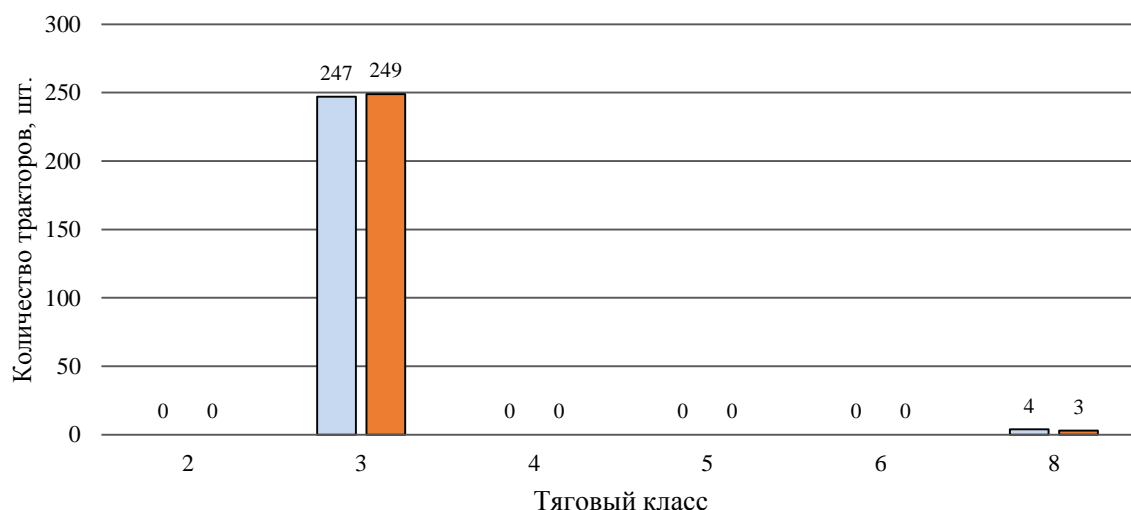


Рис. 2. Структура сельскохозяйственных гусеничных тракторов по тяговым классам, произведенных в России за 2021—2022 гг.

■ — 2021 г.; ■ — 2022 г.

Общий объем производства сельскохозяйственных колесных тракторов в России за 2021—2022 гг. сократился с 6260 до 5828 тракторов (на 7 %). Тракторы тяговых классов 0,6—0,9 в России не производят. Производство тракторов остальных тяговых классов, кроме тягового класса 6, сохраняется на низком уровне.

Общий объем производства сельскохозяйственных гусеничных тракторов в России составил 251 шт. в 2021 г. и 252 шт. в 2022 г., представлен моделями тракторов тягового класса 3. Гусеничные тракторы тяговых классов 2, 4, 5, 6 и 8 в России не производят.

Анализ мощностной структуры тракторов, произведенных на территории России, показывает

абсолютное преимущество в мощностных диапазонах 50—100 л. с.; 250—300 л. с. и 350—400 л. с., при этом динамика производства за 2021—2022 гг. в мощностных диапазонах составила:

- 50...100 л. с. сокращение производства с 704 до 666 тракторов (на 5 %);
- 250...300 л. с. увеличение производства с 646 до 873 тракторов (на 35 %);
- 350...400 л. с. сокращение производства с 2153 до 1498 тракторов (на 30 %);
- 400—450 л. с. увеличение производства с 1939 до 2614 тракторов (на 35 %).

Анализ структуры производства тракторов по мощностным диапазонам представлен на рис. 3.

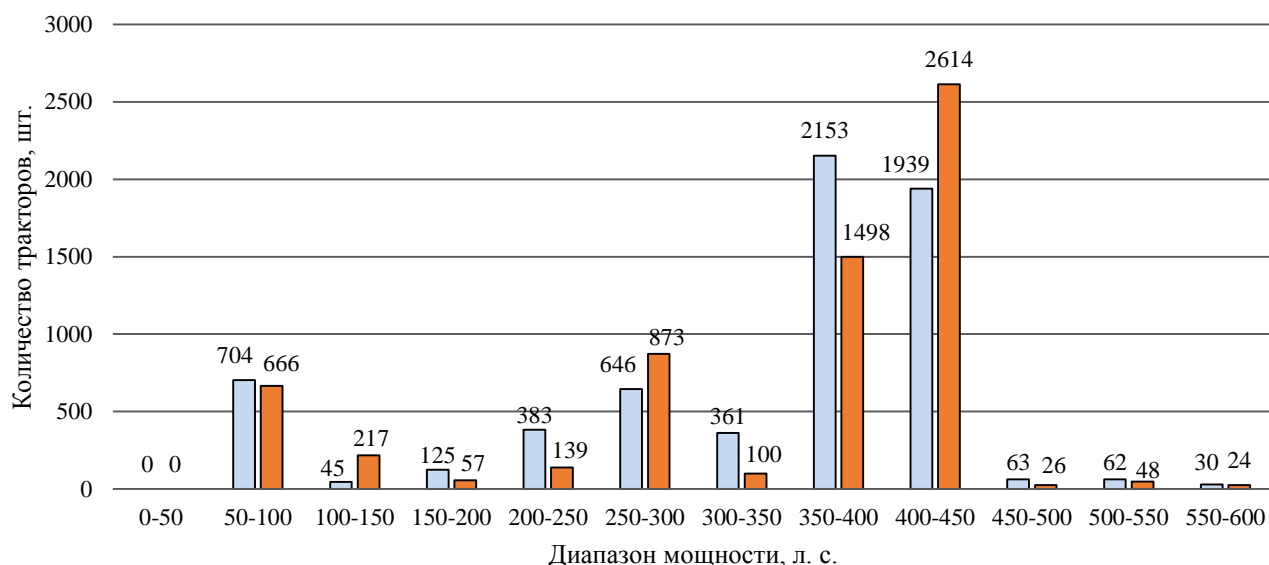


Рис. 3. Мощностная структура сельскохозяйственных тракторов, произведенных в России за 2021—2022 гг.

Структура объема производства сельскохозяйственных тракторов по предприятиям-изготовителям в России за 2021—2022 гг. представлена на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что зарубежные предприятия-изготовители, выпускающие тракторы (сборка из тракторокомплектов), сократили свое производство, а некоторые полностью прекратили производство в связи с намерением ухода с российского рынка. Предприятие-изготовитель ООО "СИЭНЭЙЧ-КАМАЗ-ИНДУСТРИЯ" за период с

2021—2022 гг. сократило производство с 362 до 164 тракторов (на 55 %), ООО "НПО "МЕХИНСТРУМЕНТ" с 238 до 50 тракторов (на 79 %), ООО "КЛААС" с 183 до 129 тракторов (на 30 %), ООО "ДЖОН ДИР РУСЬ" прекратил производство. В целом производство сельскохозяйственных тракторов в России за 2021—2022 гг. сократилось с 8538 до 8284 (на 3 %).

Структура объема производства промышленных тракторов по предприятиям-изготовителям в России за 2021—2022 гг. представлена на рис. 5.

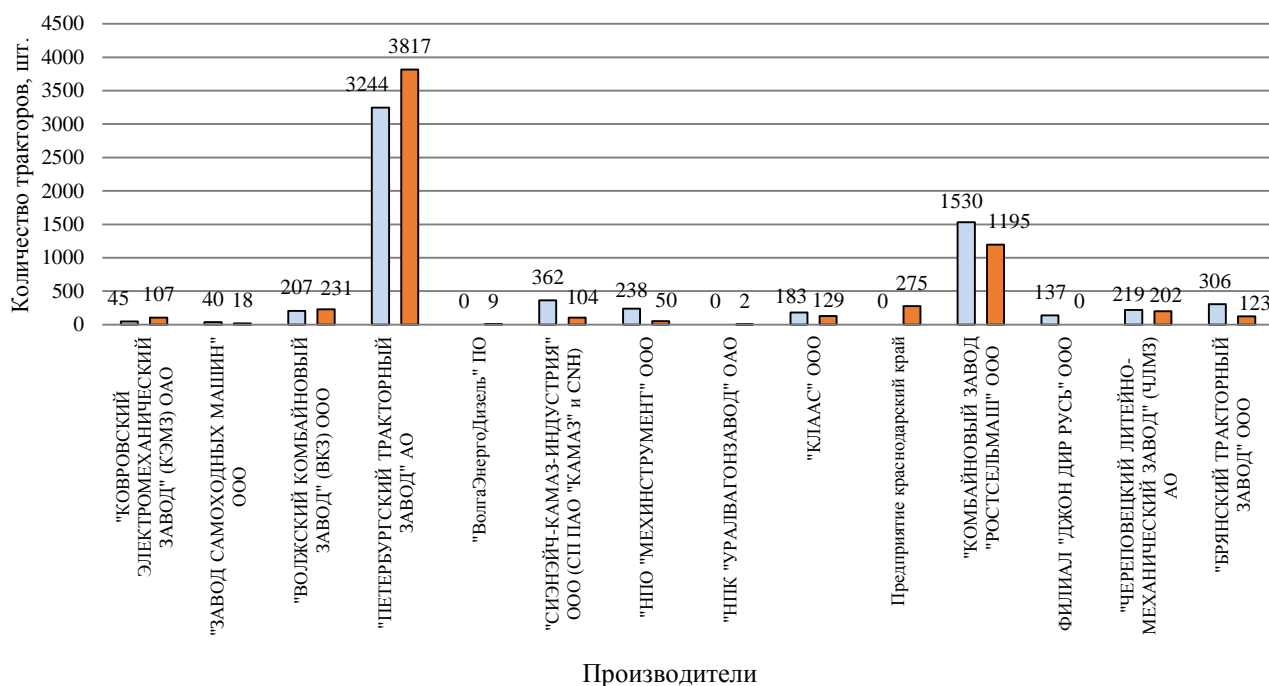


Рис. 4. Объем производства сельскохозяйственных тракторов по предприятиям-изготовителям в России за 2021—2022 гг.

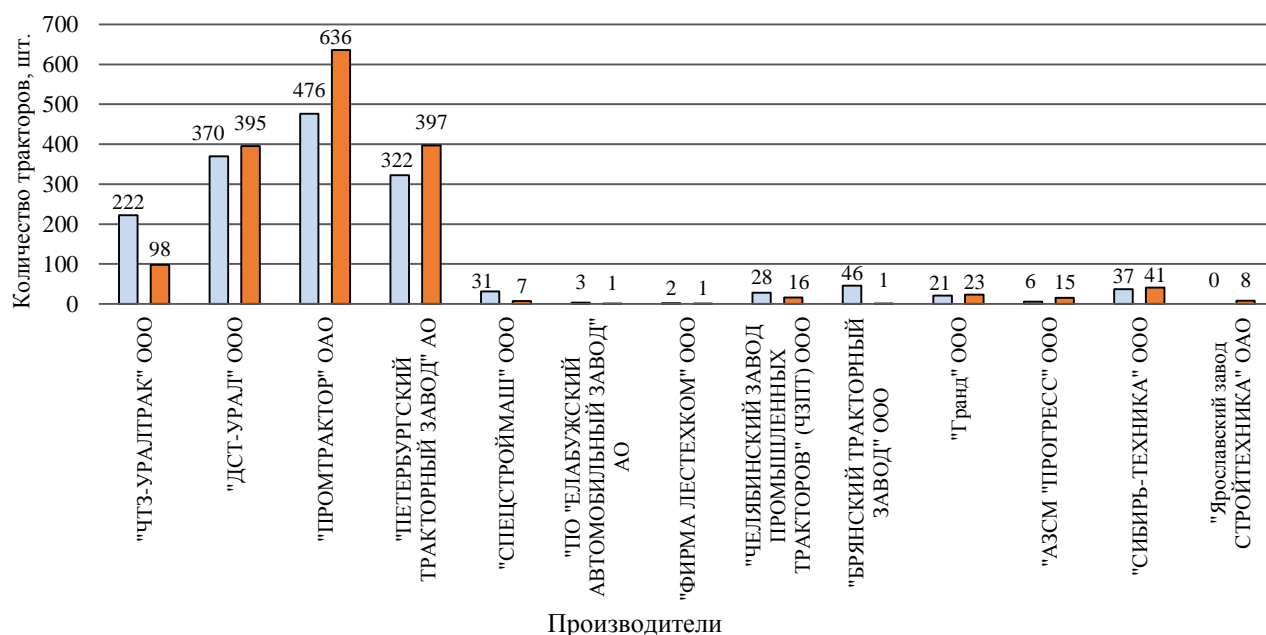


Рис. 5. Объем производства промышленных тракторов по предприятиям-изготовителям в России за 2021—2022 гг.

■ — 2021 г.; ■ — 2022 г.

Из рис. 5 видно, что предприятия-изготовители за 2021—2022 гг. увеличили свое производство, кроме ООО "ЧТЗ-УРАЛТРАК" (производство сократилось с 222 до 98 тракторов). В целом производство промышленных тракторов в России за 2021—2022 гг. увеличилось с 1564 до 1639 тракторов (на 5 %).

Это связано с тем, что все предприятия-изготовители являются российскими и при производстве используют российские комплектующие или комплектующие из дружественных стран.

### Заключение

Введенные антироссийские санкции существенно повлияли на производство зарубежных моделей сельскохозяйственных тракторов (сборка

из тракторокомплектов) на территории России, их производство за 2021—2022 гг. сократилось с 920 до 238 тракторов (на 74 %).

В целом объем производства тракторов на территории России за рассматриваемый период не изменился и остается на низком уровне, недостаточном для полноценного восполнения тракторного парка страны.

Объем производства промышленных тракторов за 2021—2022 гг. увеличился с 1564 до 1639 тракторов (на 5 %), что говорит о развитии данной отрасли и независимости от зарубежных стран, которые ввели антироссийские санкции.

Особую проблему представляет производство сельскохозяйственных гусеничных тракторов всех тяговых классов, их производство практически полностью прекратилось.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Измайлов А. Ю., Кряжков В. М., Антышев Н. М. и др. Концепция модернизации сельскохозяйственных тракторов и тракторного парка России на период до 2020 года. — М.: Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства, 2012. — 56 с.
2. Смирнов М. А., Лавров А. В., Шевцов В. Г. О необходимости восстановления механизированного сельскохозяйственного производства в России // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2018. Т. 14, № 1(358). С. 48—61.
3. Шевцов В. Г., Лавров А. В. «База данных «Количественно-возрастной состав парка свободных тракторов сельскохозяйственных организаций Российской Федерации по годам (за период с 1990 по 2009 год)» // Ресурсосберегающие технологии и техническое обеспечение производства зерна: сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. — М.: ВИМ, 2010. С. 392—396.
4. Шевцов В. Г., Лавров А. В. Влияние тракторного парка на показатели технической оснащенности и ресурсные характеристики механизированного сельхозпроизводства // Тракторы и сельхозмашины. 2014. № 12. С. 38—40.

5. Производство автомобильной, тракторной и сельскохозяйственной техники и компонентов к ней производителями России и других стран СНГ / Аналитический обзор // ОАО «АСМ-Холдинг». 2022. № 12.
6. Производство автомобильной, тракторной и сельскохозяйственной техники и компонентов к ней производителями России и других стран СНГ / Аналитический обзор // ОАО «АСМ-Холдинг». 2021. № 12.
7. Шевцов В. Г., Лавров А. В., Русанов А. В., Казакова В. А. Современному тракторостроению - перспективные стандарты // Стандарты и качество. 2020. № 9. С. 44—49.

## **ANALYSIS OF TRACTOR EQUIPMENT PRODUCTION IN RUSSIA FOR 2021-2022**

*A. V. Lavrov, E. V. Ovchinnikov*

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

*This article presents the dynamics of the production volume of tractor equipment in Russia for 2021—2022. An analysis of changes in the structure of production by manufacturing enterprises, by traction classes and power ranges was carried out. The analysis shows that there is a low volume of production of tractors, including tracked ones, which have dual purposes, which can be used both in road construction, in agriculture, and in the defense complex.*

**Keywords:** tractor, traction class, engine power, monitoring of tractor production, manufacturer.

Bibliography — 7 references.

*Received November 27, 2023*

УДК 621.396

DOI: 10.52190/1729-6552\_2023\_4\_46

EDN: ONIAZB

## ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ ДВУМЕРНОГО БЫСТРОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ В ОБРАБОТКЕ ИНФРАОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Г. К. Геворкян

МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия

*Проведен анализ двумерного быстрого преобразования Фурье (ДБПФ) и рассмотрен его вклад в область цифровой обработки инфракрасных сигналов. Освещены математические основы и алгоритмические подходы, лежащие в основе ДБПФ, а также представлены практические аспекты его применения для улучшения процессов анализа и интерпретации данных. Приведены примеры успешного использования ДБПФ в различных сферах, включая медицинскую визуализацию и дистанционное зондирование. Результаты работы подчеркивают значительные преимущества ДБПФ в улучшении точности и эффективности обработки инфракрасных сигналов. Представлены перспективы для дальнейших исследований и развития данной технологии в области цифровой обработки сигналов. Результаты анализа могут быть полезны для специалистов, занимающихся разработкой и оптимизацией систем обработки данных.*

**Ключевые слова:** цифровая обработка сигналов, инфракрасные сигналы, преобразование Фурье, двумерное БПФ.

Цифровая обработка сигналов, которая находит применение во многих сферах науки и техники, является фундаментальной областью исследований и разработок. Одним из ключевых методов в этой области является двумерное быстрое преобразование Фурье (БПФ), которое позволяет эффективно анализировать частотные характеристики сигналов и изображений. Этот метод особенно актуален для обработки инфракрасных сигналов, так как обеспечивает возможность выделения и анализа составляющих различных частот в условиях ограниченной видимости или при работе с тепловыми картами [1].

Обработка инфракрасных сигналов с использованием БПФ находит широкое применение в различных областях, таких как ночное видение, медицинская визуализация, а также в задачах дистанционного зондирования и мониторинга окружающей среды. Эффективность этого метода делает его незаменимым инструментом для специалистов, работающих с инфракрасными системами.

Несмотря на значительные успехи в области цифровой обработки сигналов, существуют опре-

деленные проблемы, связанные с применением БПФ, такие, как вычислительная сложность и необходимость обработки данных в реальном времени. Тем не менее, постоянное развитие вычислительных технологий и алгоритмов открывает новые перспективы для улучшения и оптимизации методов обработки инфракрасных сигналов.

Цель работы — изучение и анализ существующих подходов к цифровой обработке инфракрасных сигналов с акцентом на двумерное БПФ, а также на рассмотрение текущих проблем и возможных направлений будущих исследований в этой области. Важность и актуальность темы обусловлены не только научным интересом, но и практической значимостью для развития современных технологий.

### Принципы и методы БПФ в инфракрасной оптике

Теоретические основы цифровой обработки инфракрасных сигналов с использованием двумерного быстрого преобразования Фурье (БПФ) охватывают широкий спектр математических и физических концепций, необходимых для понимания и применения этого метода в практических задачах. БПФ является ключевым инструментом в анализе частотных характеристик сигналов, что позволяет переводить данные из временного или пространственного представления в частотное.

---

Геворкян Георгий Камсоевич, аспирант.

E-mail: gevorgiangosha@mail.ru

Статья поступила в редакцию 6 декабря 2023 г.

© Геворкян Г. К., 2023

Это особенно важно при работе с инфракрасными сигналами, где необходимо выделить и проанализировать составляющие различных частот.

Двумерное БПФ расширяет концепцию одномерного БПФ на двумерные данные, такие, как изображения, и используется для анализа и обработки инфракрасных изображений, полученных с помощью инфракрасных датчиков. Математически двумерное БПФ изображения  $(f(x, y))$  размером  $(M \times N)$  может быть представлено следующим образом:

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \cdot \sum_{y=0}^{N-1} \cdot f(x, y) \cdot e^{-i2\pi\left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N}\right)},$$

где  $(F(u, v))$  — комплексные амплитуды;

$(f(x, y))$  — исходная функция;

$(M)$  и  $(N)$  — количество точек по каждому измерению.

БПФ используется для ускорения вычислений в цифровой обработке сигналов благодаря своей способности эффективно работать с большими объемами данных. В инфракрасных системах БПФ позволяет быстро и точно анализировать изображения, выделяя их частотные компоненты для дальнейшей обработки [2].

Преобразование Фурье играет важную роль во многих областях, включая обработку сигналов, акустику, электромагнетизм и квантовую физику. В контексте цифровой обработки сигналов БПФ обеспечивает эффективный способ вычисления дискретного преобразования Фурье (ДПФ), что делает его незаменимым инструментом для анализа и обработки больших объемов данных.

Важность теоретических основ БПФ не может быть переоценена, так как они обеспечивают фундамент для разработки новых технологий и методов в области цифровой обработки инфракрасных сигналов. Понимание этих принципов позволяет специалистам создавать более точные и эффективные системы для широкого спектра приложений.

### Применение БПФ в обработке сигналов

БПФ является мощным инструментом для анализа частотных характеристик данных, позволяя преобразовывать сигналы из пространственного представления в частотное. Это преобразование особенно ценно при работе с инфракрасными изображениями, где необходимо выявить скрытые частотные компоненты для дальнейшего анализа или обработки.

Существует несколько алгоритмов БПФ, каждый из которых оптимизирован для различных условий и требований. Например, алгоритм Кули-Тьюки является одним из наиболее распространенных и эффективных подходов, который разбивает дискретное преобразование Фурье (ДПФ) на меньшие подзадачи, тем самым уменьшая общее количество необходимых вычислений. Другие алгоритмы, такие, как алгоритмы простого числа и разделяй-и-властвуй, также используются для оптимизации вычислений в зависимости от размера и свойств обрабатываемых данных [3].

Одной из ключевых задач в обработке сигналов является фильтрация, где БПФ применяют для разделения полезного сигнала от шума. Это особенно важно в инфракрасных системах, где качество изображения может быть ухудшено из-за внешних условий, таких, как погода или освещение. БПФ позволяет улучшить качество изображений, выделяя и усиливая важные частотные компоненты, в то время как нежелательные частоты могут быть подавлены.

Кроме того, БПФ играет важную роль в анализе текстур и узоров на инфракрасных изображениях, что может быть использовано для классификации и интерпретации данных. Например, в медицинской визуализации БПФ может помочь выявить аномалии на тепловых картах тела, что способствует ранней диагностике заболеваний.

В целом методы и алгоритмы БПФ обеспечивают основу для широкого спектра приложений в области цифровой обработки инфракрасных сигналов — от улучшения качества изображений до анализа сложных данных. Постоянное развитие этих методов открывает новые возможности для совершенствования технологий и улучшения результатов обработки данных.

### БПФ в инфракрасных приложениях

Практическое применение двумерного БПФ в цифровой обработке инфракрасных сигналов охватывает широкий спектр приложений, где необходима высокая точность и эффективность обработки данных. БПФ позволяет преобразовывать инфракрасные изображения и сигналы из пространственного представления в частотное, что является критически важным для анализа и интерпретации данных в различных областях [2].

Одним из ключевых примеров применения БПФ является улучшение качества изображений в системах ночного видения. БПФ способствует выделению важных частотных компонентов изображений, что позволяет улучшить видимость объектов в условиях низкой освещенности. В медицинской визуализации БПФ используют для анализа тепло-

вых карт тела, помогая в обнаружении воспалительных процессов или опухолей. В дистанционном зондировании Земли БПФ применяют для обработки данных, полученных с инфракрасных спутниковых сенсоров, что способствует мониторингу состояния растительности, водных ресурсов и изменений климата.

БПФ также важен при разработке и улучшении алгоритмов компрессии изображений, позволяя сжимать инфракрасные изображения без значительной потери качества. Это особенно ценно для хранения и передачи больших объемов данных. Кроме того, БПФ используют для улучшения характеристик инфракрасных датчиков, что ведет к созданию более чувствительных и точных систем.

Практическое применение БПФ в обработке инфракрасных сигналов демонстрирует его универсальность и важность для современных технологий. Этот метод обеспечивает мощный инструмент для анализа и обработки данных, что способствует прогрессу во многих научных и технологических областях.

### Будущее цифровой обработки инфракрасных сигналов

Несмотря на множество преимуществ использования БПФ, существуют определенные проблемы, которые ограничивают его применение и эффективность. Одной из основных проблем является вычислительная сложность, особенно при обработке больших объемов данных, что требует значительных вычислительных ресурсов, что может затруднить реализацию в реальном времени.

Точность преобразования также может стать проблемой, поскольку ошибки округления и шум могут влиять на результаты БПФ. Это особенно актуально при работе с низкокачественными сигналами, где необходимо максимально точно выделить полезную информацию. Кроме того, требования к быстродействию алгоритмов БПФ для обработки сигналов в реальном времени остаются высокими, что представляет собой дополнительный вызов для разработчиков.

В то же время перспективы развития БПФ весьма обнадеживают. Использование квантовых

вычислений может предложить новые возможности для ускорения БПФ и улучшения точности обработки данных. Разработка новых алгоритмов, способных сократить время обработки без потери качества, также является перспективным направлением исследований. Интеграция с методами искусственного интеллекта и машинного обучения может привести к автоматизации и оптимизации процессов обработки сигналов, что откроет новые горизонты в области цифровой обработки инфракрасных сигналов.

Таким образом, несмотря на существующие проблемы, будущее БПФ выглядит многообещающим, и ожидается, что продолжающийся прогресс в области вычислительной техники и алгоритмов приведет к новым открытиям и улучшению методов обработки данных.

### Заключение

Рассмотрены ключевые аспекты цифровой обработки инфракрасных сигналов с использованием метода двумерного БПФ. От теоретических основ до практического применения БПФ демонстрирует свою значимость и эффективность в различных областях, включая ночное видение, медицинскую диагностику и дистанционное зондирование Земли. Несмотря на существующие проблемы, такие как вычислительная сложность и требования к реализации в реальном времени, перспективы развития технологии обещают новые возможности для улучшения и оптимизации процессов обработки данных.

Принимая во внимание постоянный прогресс в области вычислительной техники и алгоритмов, можно считать будущее цифровой обработки инфракрасных сигналов многообещающим. Интеграция с квантовыми вычислениями и искусственным интеллектом может привести к созданию новых методов, которые сделают обработку данных более быстрой, точной и доступной.

Двумерное БПФ остается важным инструментом в арсенале специалистов по обработке сигналов, и его роль будет только усиливаться по мере развития технологий и углубления научных исследований.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Лайонс Р.** Цифровая обработка сигналов / Под ред. Бритова А. А. Изд. 2. — ООО "Бином-Пресс", 2006. — 655 с.
2. **Leven A., Kaneda N., Corteselli S.** Real-Time Implementation of Digital Signal Processing for Coherent Optical Digital Communication Systems // IEEE journal of selected topics in quantum electronics. 2010. V. 16. № 5.
3. **Neto Anet L., Maes J., Larsson-Edefors P., Nakagawa J., Onohara K., Trowbridge S.** "Considerations on the Use of Digital Signal Processing in Future Optical Access Networks" // IEEE Journal of Lightwave Technology. 2019.



## **A REVIEW OF THE APPLICATION OF TWO-DIMENSIONAL FAST FOURIER TRANSFORM IN THE PROCESSING OF INFRASPECTRAL SIGNALS**

*G. K. Gevorkyan*

MIREA — Russian Technological University, Moscow, Russia

*The study is devoted to the analysis of the two-dimensional fast Fourier transform (DBFT) and its contribution to the field of digital processing of infra-optical signals. The article highlights the mathematical foundations and algorithmic approaches underlying the DBFP and discusses practical aspects of its application to improve data analysis and interpretation. Examples of successful applications of DBPF in various fields, including medical imaging and remote sensing, are presented. The results of the article emphasize the significant advantages of DBPF in improving the accuracy and efficiency of infra-optical signal processing. The conclusion formulates prospects for further research and development of this technology in the field of digital signal processing. The article can be useful for specialists involved in the development and optimization of data processing systems.*

**Keywords:** digital signal processing, infraspectral signals, Fourier transform, two-dimensional FFT.

**Bibliography** — 3 references.

*Received December 6, 2023*

УДК 621.396

DOI: 10.52190/1729-6552\_2023\_4\_50

EDN: TAMZFG

## АДАПТИВНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ КАНАЛОВ НАЗЕМНОЙ РАДИОСВЯЗИ

Д. А. Савин; В. Д. Денисенко, канд. техн. наук

МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия

*Рассматривается формирование каналов связи с помощью антенно-фидерного устройства и алгоритма минимизации среднеквадратичной ошибки (МСКО). Представлены методы построения алгоритма МСКО. Показана возможность улучшения радиосвязи с пространственным разделением каналов. Подробно описан принцип действия алгоритма МСКО.*

**Ключевые слова:** каналы связи, антенно-фидерные устройства, МСКО, разделение каналов, антенна, алгоритм.

Адаптивное формирование каналов наземной радиосвязи — это метод улучшения качества и эффективности радиосвязи, основанный на использовании антенных решеток с возможностью изменения диаграммы направленности в зависимости от условий распространения сигнала и помеховой обстановки. Данный метод позволяет увеличить дальность и пропускную способность радиосвязи, подавить помехи, а также повысить стойкость и защищенность передачи информации [1].

Для формирования каналов связи необходимо иметь антенно-фидерные устройства, которые состоят из нескольких антенных элементов и соответствующих фидерных линий, а также устройств цифровой обработки сигналов, которые выполняют функции адаптивного управления антенно-фидерным устройством. Антенно-фидерные устройства и цифровая обработка сигналов образуют адаптивную антенную решетку, которая является основным элементом. Адаптивная антенная решетка может быть реализована как в приемном, так и в передающем тракте радиосвязи, либо в обоих одновременно.

### Антенно-фидерные устройства

Антенно-фидерные устройства — это устройства, которые обеспечивают связь между антенной и радиопередатчиком или радиоприемником. Они состоят из антенны, фидера и вспомогательных

элементов, таких, как соединители, вентили, фазовращатели и т. д. Эти устройства выполняют две основные функции: передачу энергии от передатчика к антенне и ее излучение в пространство, а также улавливание энергии, распространяющейся в пространстве в виде радиоволн, и ее передачу на вход приемника [2]. На рис. 1 приведена схема организации фидерной линии в антенно-фидерном устройстве.

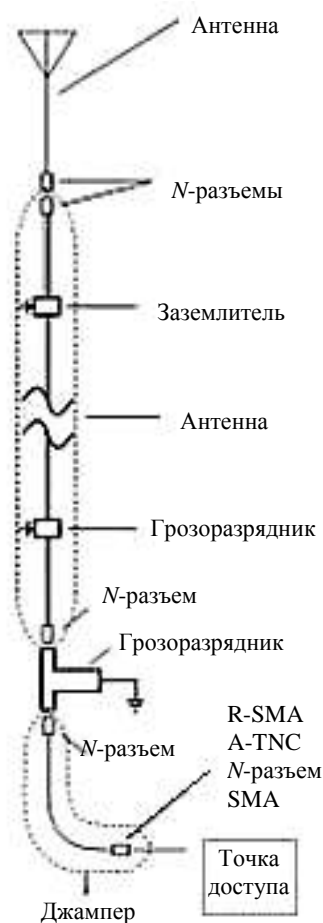


Рис. 1. Схема организации фидерной линии

Савин Денис Анатольевич, аспирант.

E-mail: d.a.savin@mirea-rpt.ru

Денисенко Виталий Дмитриевич, доцент кафедры радиоволновых процессов и технологий.

E-mail: denisenko@mirea.ru

Статья поступила в редакцию 5 декабря 2023 г.

© Савин Д. А., Денисенко В. Д., 2023



странственным направлениям. Это повышает спектральную эффективность и уменьшает взаимные помехи между каналами. Метод может быть реализован с помощью антенных решеток, которые формируют узкие лучи в разных направлениях, или с помощью множественного ввода—вывода, который использует несколько антенн на передатчике и приемнике для создания виртуальных каналов.

Один из примеров данного метода — это система метеорной радиосвязи с кодовым разделением каналов, которая использует отражение сигналов от метеорных следов в ионосфере для передачи информации на большие расстояния. Эта система имеет ряд преимуществ, таких как низкая стоимость, высокая помехозащищенность и скрытность, но также и недостатки, такие, как низкая пропускная способность и нестабильность канала. Для повышения эффективности этой системы предлагаем использовать сигналы с прямым расшире-

нием спектра с улучшенными корреляционными свойствами, оптимальный прием и цифровую фильтрацию сигналов с большой базой, режекцию узкополосных помех в спектре сигнала, а также адаптацию скорости передачи. Эти методы реализуют с помощью программно-определяемой радиосистемы, которая позволяет программно изменять параметры сигналов и протоколов их передачи [5].

### Заключение

Рассмотрены варианты построения каналов связи с использованием антенно-фидерного устройства и алгоритма МСКО. Описаны методы построения алгоритмов минимизации среднеквадратичной ошибки и пространственного разделения каналов.

Предложенные методы позволяют улучшить качество и эффективность каналов радиосвязи.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Егоров В. В., Тимофеев А. Е.** Обратный канал в адаптивных коротковолновых радиосистемах передачи информации // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2013. Вып. 6. С. 3—8.
2. **Носов Н. А.** Аналитическое проектирование антенных систем горизонтальной поляризации в местах затенения горизонтальными конструкциями с использованием импедансных структур // Радиотехника. 2008. № 3. С. 92—95.
3. **Красильников А. Д.** Построение активных передающих антенн и активных фазированных антенных решеток ВЧ-диапазона // Антенны. 2007. № 10(125). С. 32—35.
4. **Сергеев А. П., Тарасов Д. А.** Введение в нейросетевое моделирование: учеб. пособие / Под общ. ред. Сергеева А. П. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. — 128 с.
5. **Ипатов В. П.** Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. принципы и приложения. — М.: Техносфера, 2007. — 487 с.

## ADAPTIVE FORMATION OF TERRESTRIAL RADIO COMMUNICATION CHANNELS

*D. A. Savin, V. D. Denisenko*

MIREA — Russian Technological University, Moscow, Russia

*The article discusses the formation of communication channels using an antenna-feeder device and the AMRE algorithm. The methods of constructing an algorithm for minimizing the RMS error and improving radio communication with spatial channel separation are presented. The principle of operation of the AMRE algorithm is described in detail.*

**Keywords:** communication channels, antenna-feeder devices, AMRE, channel separation, antenna, algorithm.

Bibliography — 5 references.

*Received December 5, 2023*

УДК 621.396

DOI: 10.52190/1729-6552\_2023\_4\_53

EDN: ZNXDOE

## ОБЗОР ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОБРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ РАДИОСИГНАЛОВ

А. К. Сгибнев; В. Д. Денисенко, канд. техн. наук

МИРЭА — Российский технологический университет, Москва, Россия

*Описаны типы цифровых сигналов, типы нейронных сетей. Показаны преимущества использования нейронных сетей для решения задач цифровой обработки радиосигналов, в частности аутентификации и фильтрации, архитектуры и структуры нейронных сетей глубокого обучения для решения задачи фильтрации.*

**Ключевые слова:** цифровые радиосигналы, нейронные сети, нейросетевое распознавание, нейросетевая фильтрация, архитектуры нейронных сетей.

Фильтрация является одной из основных задач в цифровой обработке радиосигналов. Для качественной фильтрации необходимо определение базовых характеристик, часть из которых определяется типом сигнала.

Прогрессивным подходом для решения этих задач является применение нейросетей.

Цель данной работы показать преимущества применения нейронных сетей для обработки радиосигналов.

### Цифровые радиосигналы

Цифровые радиосигналы стали стандартом в современной радиосвязи благодаря их многочисленным преимуществам перед аналоговыми сигналами. Ключевые преимущества цифровых радиосигналов:

- качество передачи — обеспечивают более стабильную передачу данных;
- большая пропускная способность — могут нести больше информации за счет использования современных методов кодирования и сжатия данных;
- устойчивость к помехам — цифровые сигналы лучше справляются с шумами и помехами, что позволяет поддерживать высокое качество связи даже в сложных условиях;
- легкость интеграции — цифровые системы легко интегрируются с другими цифровыми

устройствами и сетями, что упрощает создание единой коммуникационной инфраструктуры;

- множественный доступ — цифровые технологии, такие как TDMA, FDMA и CDMA, позволяют множеству пользователей одновременно использовать один и тот же частотный ресурс без взаимных помех;
- безопасность — цифровые сигналы легче шифровать, что обеспечивает более высокий уровень безопасности передаваемой информации;
- эффективность энергопотребления — цифровые устройства часто потребляют меньше энергии, что важно для мобильных устройств и долговременной работы.

Эти преимущества делают цифровые радиосигналы идеальным выбором для современных систем радиосвязи, обеспечивая надежную, безопасную и высококачественную передачу данных. Достижению этих критериев способствуют цифровые типы модуляций, такие как FSK, PSK, ASK и др. (см. рис. 1)

Частотная манипуляция (Frequency-Shift Keying — FSK) в простейшем случае характеризуется наличием двух частот, соответствующих уровням исходного двоичного модулирующего сигнала. С увеличением числа модулирующих частот происходит переход к  $M$ -й частотной манипуляции. Общее аналитическое уравнение имеет вид

$$s_i(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_i), \quad 0 < t < T.$$

Фазовая манипуляция (Phase-Shift Keying — PSK) — вид модуляции, обеспечивающий высокую скорость передачи символов, представляет собой отрезки элементарных сигналов, отличающихся только значением фазы:

$$s_i(t) = A_i \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad 0 < t < T.$$

---

Сгибнев Андрей Кириллович, аспирант.

E-mail: zgiba12345@mail.ru

Денисенко Виталий Дмитриевич, доцент кафедры радиоволновых процессов и технологий.

E-mail: denisenko@mirea.ru

Статья поступила в редакцию 5 декабря 2023 г.

© Сгибнев А. К., Денисенко В. Д., 2023

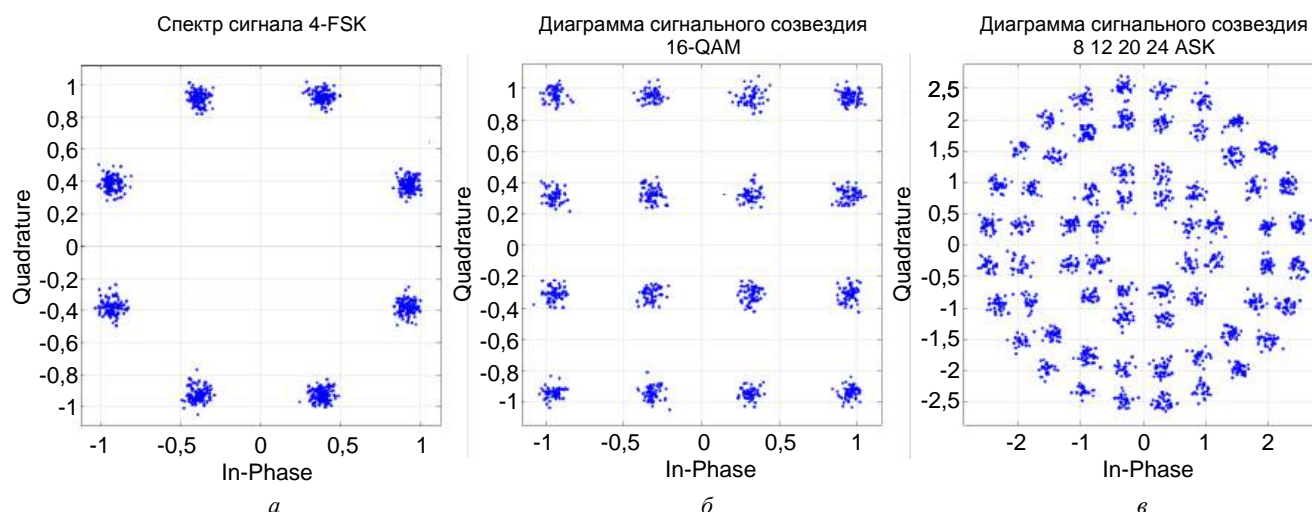


Рис. 1. Графики сигнальных созвездий цифровых радиосигналов:  
а — 4-FSK; б — 16-QAM; в — 8 12 20 24 ASK

Амплитудная манипуляция (Amplitude-Shift Keying — ASK) — в случае АМн, характеризуется включением и выключением несущей модуляции, выходное колебание имеет вид последовательности радиоимпульсов. В общем случае описывается уравнением [1]:

$$s_i(t) = A_i \cos(\omega_0 t + \varphi_0), 0 < t < T.$$

### Виды нейронных сетей

Нейронные сети бывают различных видов, каждая из которых представляет собой разные архитектуры строения — со своими особенностями.

- Нейронные сети прямого действия — это базовый тип, где данные последовательно передаются от входного слоя к выходному. Они хорошо подходят для простых задач классификации и регрессии.

- Персептрон — это однослойная нейронная сеть, которая может решать только простые задачи, где данные линейно разделимы. Она состоит из входного слоя и одного выходного нейрона.

- Многослойный персептрон (MLP) — это расширение персептрона с одним или несколькими скрытыми слоями, что позволяет ему решать более сложные задачи, не ограничиваясь линейной разделимостью.

- Рекуррентные нейронные сети (RNN) — предназначены для обработки последовательных данных, таких, как текст или временные ряды. RNN могут использовать информацию из предыдущих шагов, что делает их подходящими для задач, где контекст важен.

- Долговременная кратковременная память (LSTM) — это специализированный тип RNN, который лучше справляется с долговременными зависимостями благодаря использованию ячеек памяти и ворот, которые контролируют поток информации.

- Нейронная сеть с радиальной базисной функцией (RBF) — использует радиальные базисные функции в скрытом слое для обработки входных данных. RBF-сети хорошо подходят для задач интерполяции и классификации.

- Сверточные нейронные сети (CNN) — разработаны для обработки данных, имеющих сеточную структуру, например изображений. CNN-сети используют сверточные слои для выявления важных признаков в данных, и часто используются в компьютерном зрении.

- Автоэнкодеры — это нейронные сети, которые учатся кодировать входные данные в компактное представление и затем декодировать его обратно. Они полезны для сжатия данных, и уменьшения шума.

- Модели "Последовательность к последовательности" (Seq2Seq) — эти модели состоят из двух частей: кодера, который преобразует входную последовательность в вектор, и декодера, который генерирует выходную последовательность. Эти модели часто используют в машинном переводе и автоматическом реферировании.

- Модульные нейронные сети (MNN) — эти сети состоят из нескольких независимых модулей, каждый из которых решает определенную подзадачу. Модульность позволяет легко масштабировать и улучшать систему.

Эти типы нейронных сетей представляют собой различные подходы к решению задач в области машинного обучения, каждый со своими уникальными характеристиками и применениями. Они являются ключевыми инструментами в разработке искусственного интеллекта и анализе данных [2].

### Нейросетевое распознавание радиосигналов

Определение характеристик сигнала для его адекватной обработки представляет собой ключевую задачу, поскольку различные сигналы требуют применения соответствующих методов обработки. К примеру, для синусоидального сигнала, обладающего стабильной частотой и амплитудой, эффективно использовать фильтрацию с помощью среднего значения, в то время как для сигналов с резкими изменениями, таких, как прямоугольный или треугольный, предпочтительнее медианный фильтр. Важно также учитывать особенности присутствующего в сигнале шума, который может исказить полезный сигнал.

Использование нейросетей для распознавания радиосигналов предоставляет ряд преимуществ перед другими методами, такими, как анализ формы сигнального созвездия или распределения разности мгновенных фаз. Вот некоторые из этих преимуществ:

- высокая точность и скорость — нейросети могут обучаться на обширных наборах данных и адаптироваться к изменениям окружающей среды, что позволяет им достигать высокой точности и скорости в распознавании типов модуляции радиосигналов;
- низкая чувствительность к помехам — благодаря способности к самоорганизации и самообучению, нейросети могут эффективно функционировать даже при низком отношении сигнал/шум и высоком уровне интерференции;
- поддержка широкого спектра модуляций — нейросети способны распознавать разнообразные виды модуляций, включая FSK, PSK, PAM и QAM, а также обнаруживать и классифицировать новые, ранее неизвестные виды модуляций;
- простота внедрения — нейросети не требуют сложных математических расчетов или точной синхронизации по несущей частоте, что упрощает их аппаратную реализацию.

Применение интеллектуальных подходов к анализу данных в задачах идентификации типов модуляции радиосигналов заключается в выявлении ключевых признаков для распознавания и создания базы знаний (логических правил, деревьев решений, нейросетей) на основе этих признаков. Многослойный персептрон, как вид искусственных нейронных сетей (ИНС), демонстрирует высокую эффективность в создании разделяющих границ в многомерном пространстве. Согласно выводам из теоремы Колмогорова—Арнольда—Хехт—Нильсена, любую функцию многих переменных можно аппроксимировать с помощью двухслойной ИНС с фиксированным числом связей.

Методы нейросетевого распознавания модуляций различаются по используемым признакам и параметрам ИНС (количество слоев, тип активационной функции и т. д.). В зависимости от выбранных признаков обученная ИНС способна идентифицировать определенные типы модуляций. Исследователю предстоит оптимизировать структуру ИНС для наиболее точного распознавания выбранных типов цифровой модуляции. Создание нейросетевого устройства для идентификации модуляций включает в себя несколько этапов.

Нейросетевое распознавание модуляций с использованием статистических признаков, включая кумулянты, проходит через серию шагов. На первом этапе анализируют информативные признаки для выбранных модуляций. Далее оценивают ограничения, связанные с условиями распространения сигнала и характеристиками оборудования. После этого проверяют применимость выбранных признаков с учетом ограничений. Затем формируют ИНС с определенными параметрами, включая количество входов и выходов, параметры нейронов и обучения. После обучения ИНС возможна корректировка ее параметров. Анализ результатов показывает, что обученный персептрон обеспечивает высокую вероятность правильного распознавания различных модуляций при определенном уровне сигнал/шум. Например, для FSK-2 вероятность составляет около 0,99; для PAM — около 0,98; для PSK-2 — около 0,99; для PSK-4 — около 0,7; для PSK-8 — около 0,98; для QAM-16 — около 0,86 при ОСШ 20 дБ. Ниже ожидаемой вероятности распознавания для PSK-4 может быть объяснена перекрытием распределения признаков между PSK-4 и PSK-8. Если не считать смещение PSK-4 с PSK-8 ошибкой, вероятность правильного распознавания PSK-4 увеличивается примерно до 0,83 [3] (рис. 2).

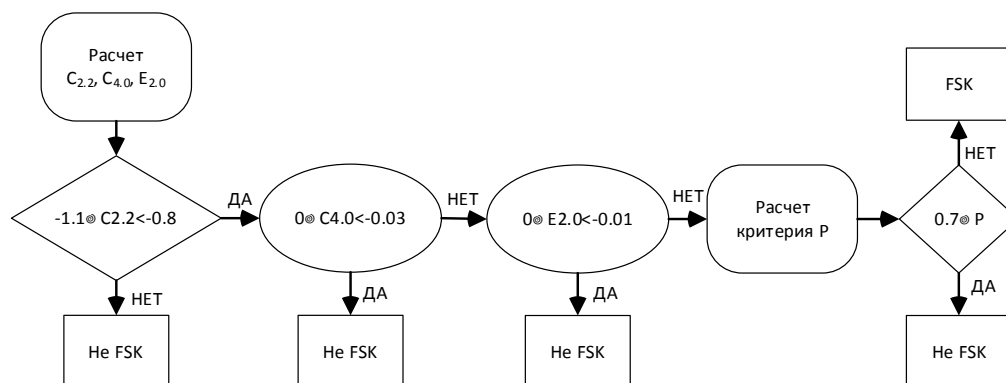


Рис. 2. Алгоритм различения FSK-сигналов

### Архитектуры нейронных сетей для фильтрации радиосигналов

Существуют разные методы глубокого обучения для фильтрации с использованием разных нейросетей. Фильтрация касается оценки состояния в системах, которые не полностью наблюдаемы. Традиционные подходы основаны на оценках методом наименьших квадратов с гауссовыми распределениями. Подход к фильтрации радиосигналов с использованием глубокого обучения нейронных сетей является более адаптивным.

Типичные нейронные сети для приложений глубокого обучения включают плотные нейронные сети (DNN), сверточные нейронные сети (CNN) и рекуррентные нейронные сети (RNN).

Используют сети DNN с 5 скрытыми слоями (каждый с 5 нейронами) с функцией активации сигмовидной функции для всех скрытых слоев и простой активацией для выходного слоя. На рис. 3 показана структура такой DNN.

CNN — это другая архитектура нейронной сети, и она позволяет моделировать как временные, так и пространственные корреляции в многомерных сигналах. CNN использует операцию свертки для захвата локальных объектов с помощью нескольких фильтров ядра. CNN широко применяются в классификации изображений, распознавании образов и компьютерном зрении. На рис. 4 показана структура CNN.

На рис. 5 показана структура RNN [4]

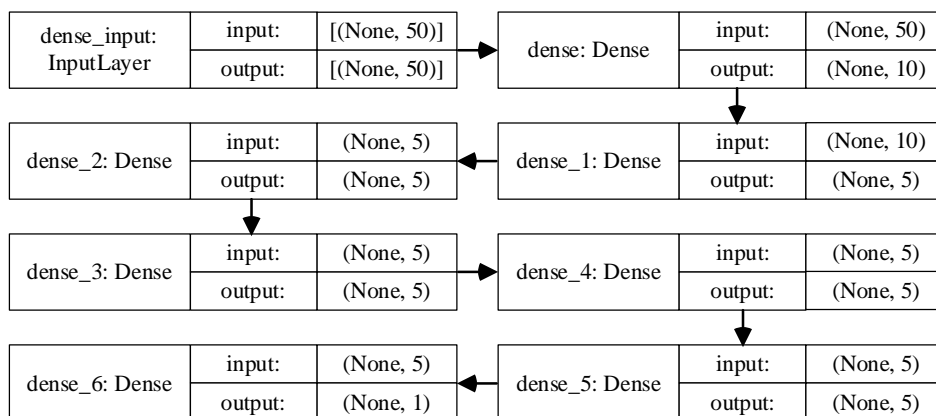


Рис. 3. Структура DNN

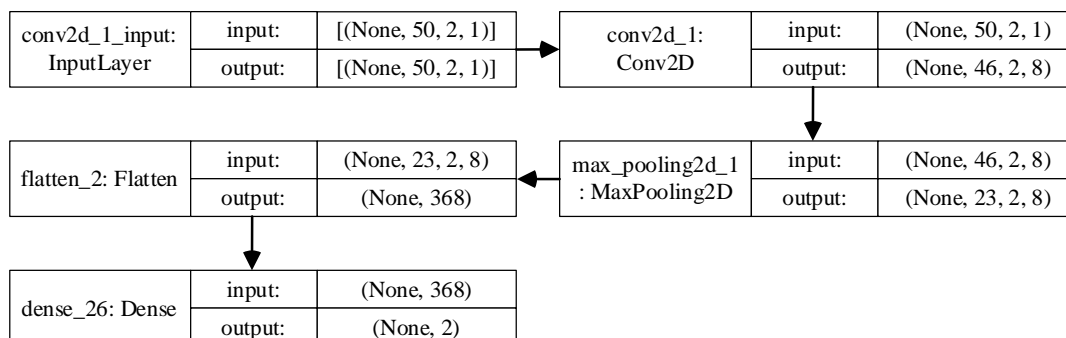


Рис. 4. Архитектура CNN



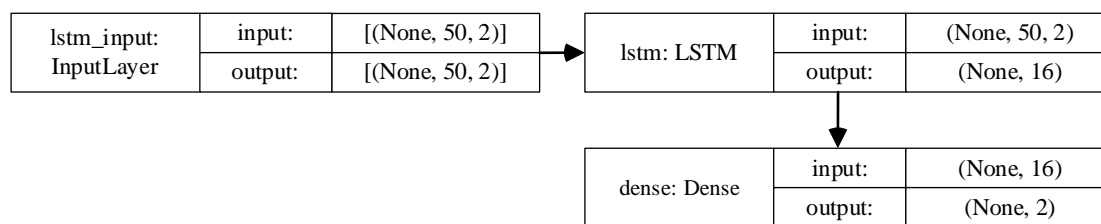


Рис. 5. Архитектура RNN

RNN — это другая архитектура нейронной сети, в которой соединения между узлами образуют ориентированный граф вдоль временной последовательности. CNN — это NN с прямой передачей, который использует фильтры и объединяющие слои, тогда как RNN передает результаты обратно в сеть. RNN часто используют при распознавании речи. Популярной архитектурой RNN является долговременная память (LSTM). Она может обрабатывать не только отдельные точки данных, но и целые последовательности данных. Устанавливая логические элементы в вычислительной ячейке, сеть LSTM собирает

эффективную информацию с помощью временных рядов.

### Заключение

В данной работе была представлена информация о цифровых радиосигналах. Описаны типы нейронных сетей, пример алгоритма нейросетевого распознавания радиосигналов, а также архитектуры нейронных сетей глубокого обучения, применимые для фильтрации цифровых радиосигналов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Рембовский А. М., Ашихмин А. В., Козьмин В. А. Р37 Радиомониторинг: задачи, методы, средства; под ред.: А. М. Рембовского. 3-е изд., перераб. и доп. — М: Горячая линия — Телеком, 2012. — 640 с.
2. 10 Types of Neural Networks, Explained. URL: <https://www.hackerrank.com/blog/types-of-neural-networks-explained/> — HackerRank Blog (дата обращения: 10.11.2023).
3. Аджемов С. С., Кленов Н. В., Терешонок М. В., Чиров Д. С. Методы распознавания видов цифровой модуляции сигналов в когнитивных радиосистемах // РАДИОФИЗИКА, ЭЛЕКТРОНИКА, АКУСТИКА, ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия. 2015. № 6. С. 19—27.
4. Bin Xie, Qing Zhang. Deep Filtering with DNN, CNN and RNN. — 5 с.

## AN OVERVIEW OF THE POSSIBILITY OF USING NEURAL NETWORKS TO SOLVE DIGITAL RADIO SIGNAL PROCESSING PROBLEMS

A. K. Sgibnev, V. D. Denisenko

MIREA — Russian Technological University, Moscow, Russia

*The article describes the types of digital signals, types of neural networks, the advantages of using neural networks to solve problems of digital processing of radio signals, in particular authentication and filtering, the architecture and structure of deep learning neural networks to solve the problem of filtering.*

**Keywords:** digital radio signals, neural networks, neural network recognition, neural network filtering, neural network architectures.

Bibliography — 4 references.

Received December 5, 2023

Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России: Межотр. науч.-техн. журнал / Федеральное государственное унитарное предприятие «НТЦ оборонного комплекса «Компас», 2023. Вып. 4. С. 1—60.

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

Подписано в печать 04.12.2023.

Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 7,0. Уч.-изд. л. 7,2.

Тираж 250 экз. Заказ 2028.

Свободная цена.

Адрес редакции: 125424, Москва, Волоколамское ш., 77.

ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».

<http://ntckompas.ru>

Отпечатано: 101000, Москва,

Лубянский проезд, д. 15, стр. 4, помещ. IX, ком. 15, 16

ООО «Спиди-Принт.ру»

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 выбирают 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 вме-

сто 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 с текстом в формате Word на электронную почту.

### 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;

- далее представляется аннотация статьи (10—15 строк с раскрытием цели работы и её основных результатов);

- далее приводится список ключевых слов для данной статьи (не более десяти);

- страницы текста нумеруются без пропусков и добавлений литерных 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 таблиц:**

- 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).