



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Э. БАУМАНА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
ЦЕНТР ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
И МОДЕЛИРОВАНИЯ
«ЭКСПОНЕНТА»



ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ И ОТЛАДКИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

VI ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ

27—28 марта 2019 года



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»

Центр инженерных технологий и моделирования
«Экспонента»

ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ И ОТЛАДКИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

VI ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

27–28 марта 2019 г.

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ



Москва
ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н. Э. Баумана
2 0 1 9

УДК 681.518(04)
ББК 31.15
Т38

**Технологии разработки и отладки сложных технических систем :
Т38 VI Всероссийская научно-практическая конференция** : сборник материалов / Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Центр инженерных технологий и моделирования «Экспонента». Москва, 27–28 марта 2019 г. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — 242, [2] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-5412-9

В сборник включены доклады, представленные на VI Всероссийской научно-практической конференции «Технологии разработки и отладки сложных технических систем», которая состоялась в марте 2019 г. в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Тексты докладов размещены в Научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU.

УДК 681.518(04)
ББК 31.15

Сборник издается в авторской редакции

ISBN 978-5-7038-5412-9

© МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019
© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019

УДК 621.396.969

Моделирование антенного радиоэлектронного комплекса средствами MATLAB и Simulink

© О.А. Агапов
Д.А. Балакин
А.Б. Добродумов
Е.В. Керский
М.В. Юрков

stealth333@yandex.ru
bzzz86.balakin@yandex.ru
dobrodumovab@niidar.ru
kersky@mail.ru
yurkoff@gmail.com

ОАО «Научно-производственный комплекс “Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи”» (ОАО «НПК “НИИДАР”»), Москва, 127083, Россия

Основная задача моделирования любой сложной системы заключается в воспроизведении ее структуры со всеми особенностями и протекающих в ней физических процессов. Без сомнения, любая радиолокационная станция (РЛС) представляет собой такую сложную систему. Поэтому ее моделирование на ранней стадии разработки позволяет не только воспроизвести различные процессы и явления, но и сэкономить время и трудозатраты. Любая РЛС состоит из множества более простых систем. К такой простой системе можно отнести радиоэлектронный комплекс (РЭК). Такой комплекс представляет собой отдельную антенную секцию, которая состоит из антенно-фидерного устройства и аналогово-цифровых приемников. В статье излагаются основные принципы построения РЭК. Осуществляется моделирование его составных частей средствами MATLAB и Simulink. Представлены структура управления РЭК и основные результаты моделирования в режиме приема и излучения сигнала.

Ключевые слова: радиоэлектронный комплекс, аналоговый приемо-передающий блок, цифровой приемо-передающий блок

Введение. Радиолокационные системы обнаружения надежно вошли в нашу повседневную жизнь. Они применяются как в промышленности для диагностики циклических систем [1], так и в медицинской практике, где с их помощью удается выделить основные физиологические показатели человека [2]. Особое место системы обнаружения занимают в контроле космического пространства [3], где к ним предъявляются высокие требования по надежности, точности обнаружения, помехозащищенности. С их помощью осуществляются предупреждение глобальных угроз, каталогизация космических аппаратов, постоянный мониторинг за опасными околоземными космическими объектами. Наибольшее распространение получили системы обнаружения или РЛС с фазированной антенной решеткой (ФАР). Благодаря своим конструктивным особенностям РЛС с ФАР решают такие задачи, как наблюдение за искусственными спутниками Земли [4], изучение ионосферы Земли [5] и многие другие. В связи с этим моделирование РЛС в целом и ее составных частей является актуальной задачей.

Моделирование позволяет [6]:

– исследовать процессы практически любой сложности, протекающие в РЛС, с учетом большого количества факторов;

- контролировать все факторы и результаты эксперимента;
- многократно повторить результаты эксперимента;
- отлаживать новые цифровые алгоритмы обработки сигнала;
- выявлять различные трудности проектирования на ранней стадии разработки изделия.

Одним из самых распространенным средств моделирования является пакет Matrix Laboratory (MATLAB). Благодаря своему проработанному математическому аппарату, MATLAB хорошо подходит для моделирования не только отдельных составных узлов РЛС, но и изделия в целом. А сам программный язык MATLAB стал средством общения между научным сообществом по всему миру. Наибольший интерес, с точки зрения моделирования, вызывает утилита Simulink, которая является частью пакета MATLAB. Simulink позволяет осуществить моделирование изделия и его составных частей в наглядной форме. Это, в свою очередь, обеспечивает высокий уровень понимания общих принципов работы разрабатываемой РЛС.

Таким образом, в статье излагаются основные принципы построения антенного РЭК, осуществляется его моделирование средствами MATLAB и Simulink. Основными задачами, которые должна решить модель РЭК, являются следующие:

- дать общее понимание принципов работы изделия;
- определить параметры управления аппаратурой и программным обеспечением;
- отработать алгоритмы калибровки и фазировки передающего и приемного тракта по внешнему и внутреннему источнику;
- дать грубую оценку характеристик;
- сформировать исходные данные для разработки дальнейших моделей, а также их верификации.

Материалы и методы решения. На рис. 1 представлены основные функциональные схемы модели РЛС из одного антенного РЭК.

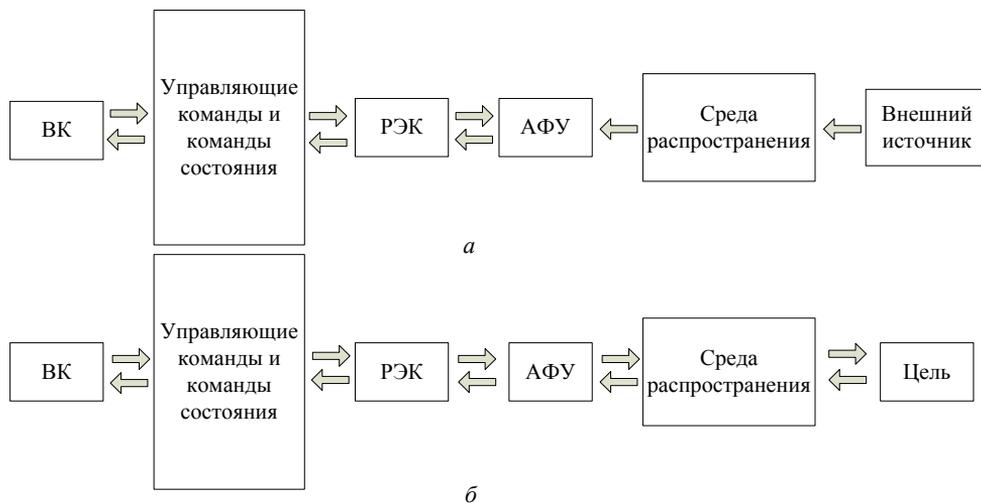


Рис. 1. Функциональная схема модели РЛС из одного антенного РЭК (ВК — вычислительный комплекс, АФУ — антенно-фидерное устройство):
а — в режиме калибровки; *б* — в режиме работы по цели

Модель, представленная на рис. 1, а, осуществляет калибровку и фазировку РЭК по внешнему сигналу. Такая модель полезна при выявлении фазовых ошибок в сигнале, а также при измерении задержек в сигнале, связанных с неидентичностью длин кабелей в РЛС. С ее помощью можно отлаживать различные цифровые алгоритмы как по измерению, так и по компенсации фазовых задержек.

Другая модель, представленная на рис. 1, б, имитирует обработку сигналов от различных целей: самолеты или спутники. Фактически, эта модель представляет собой штатную работу РЛС. С ее помощью можно задавать различные параметры целей и среды распространения. Это осуществляется с помощью библиотечных блоков Simulink: Targets и Free Space Channel. Модель также будет полезна при верификации алгоритмов обнаружения в условиях действия активных помех.

Обе модели работают в прямо-передающем режиме. Рассмотрим более подробно составные части моделей и как они моделируются средствами MATLAB и Simulink.

Первым блоком функциональной схемы в моделях является *вычислительный комплекс*. Вычислительный комплекс реализован средствами языка MATLAB в виде отдельных функций. Также для удобства управления ВК был разработан графический интерфейс пользователя, внешний вид которого представлен на рис. 2.

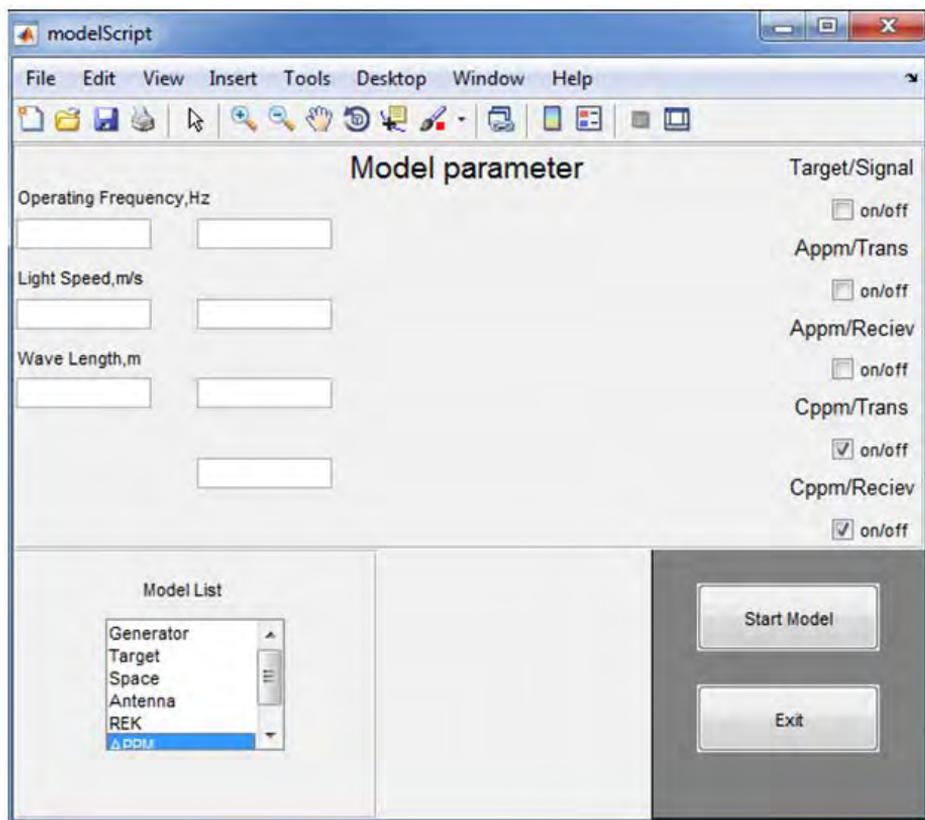


Рис. 2. Внешний вид приложения, имитирующего вычислительный комплекс

Выделим общие функции ВК для двух моделей:

- формирование зондирующего сигнала (ЗС);
- взаимодействие с РЭК с помощью команд управления и сообщений состояния;
- управление антенно-фидерным устройством, средой распространения;
- формирование синхросигналов;
- анализ отраженного сигнала;
- калибровка и фазировка;
- построение передающей и приемной диаграмм направленности антенны.

К частной функции ВК для модели на рис. 1, *а* относится управление внешним воздействием. Применительно к модели на рис. 1, *б*, частные функции ВК следующие:

- управление координатными и некоординатными параметрами цели;
- построение обнаружителя;
- определение координатных и некоординатных параметров цели.

Вычислительный комплекс можно разбить на две основные области: Model parameter и Model List. В области Model parameter задаются основные глобальные параметры модели, также представлены элементы управления. В области Model List определены основные параметры каждой из основных частей модели:

– Generator, формирует различные ЗС: гармонический сигнал, сигнал в виде одиночного импульса, сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), фазокоди- манипулированный (ФКМ) сигнал;

- Target, задает параметры цели;
- Space, задает параметры среды распространения;
- Antenna, задает параметры АФУ;
- REK, задает параметры РЭК;
- APPM, задает параметры аналогового приемо-передающего модуля (АППМ);
- CPPM, задает параметры цифрового приемо-передающего модуля (ЦППМ).

Симуляция модели РЭК осуществляется после нажатия кнопки Start Model с помощью функции sim(). Такой способ запуска модели имеет гибкую форму, так, пользователю не нужно разбираться в структуре самой модели, а достаточно занести конкретные значения в соответствующие поля графического приложения. И модель РЭК будет ими проинициализирована.

Следующим общим элементом для моделей (см. рис. 1) является РЭК. *Радио-электронный комплекс* является базовым элементом РЛС. Он состоит из аналоговой части и цифровой. Аналоговая часть включает в себя N аналоговых приемо-передающих блоков (АППБ), в каждом из которых содержится M АППМ. Цифровая часть состоит из P (ЦППБ), в каждом из которых также содержится K ЦППМ. Как можно увидеть, сам РЭК состоит из множества более простых элементов. Поэтому для моделирования РЭК нами было принято решение разработать их в виде библиотечных элементов с помощью утилиты Simulink (рис. 3).

Целесообразность разработки библиотечного элемента РЭК обусловлена тем, что в будущих проектах вместо одного РЭК будут использовать несколько десятков. Далее рассмотрим, что представляют собой АППМ и ЦППМ.

Структурная схема АППМ и ЦППМ представлена на рис. 4.

Основным элементом АППМ (рис. 4, *а*) является блок преобразования, который выполняет следующие функции: фильтрацию, аттенюацию, предварительное усиление, также в нем учитываются нелинейные элементы, шумовые эффекты.

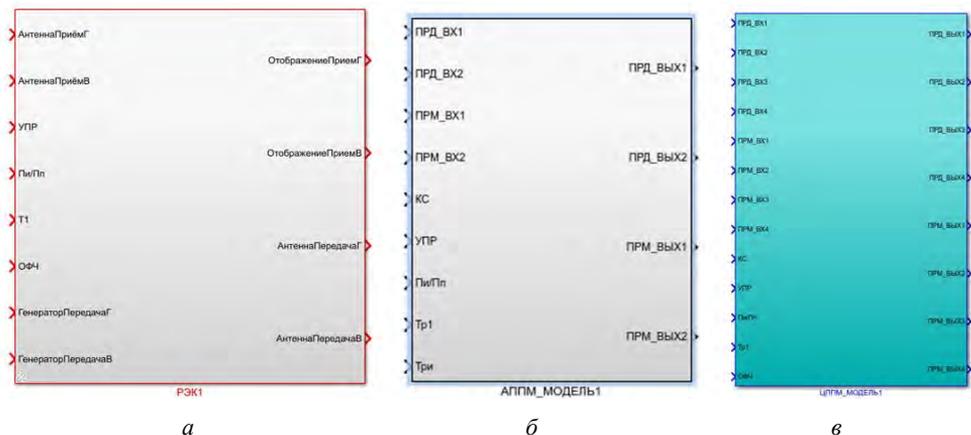


Рис. 3. Внешний вид библиотечных базовых блоков:
a — РЭК; *б* — АППМ; *в* — ЦППМ

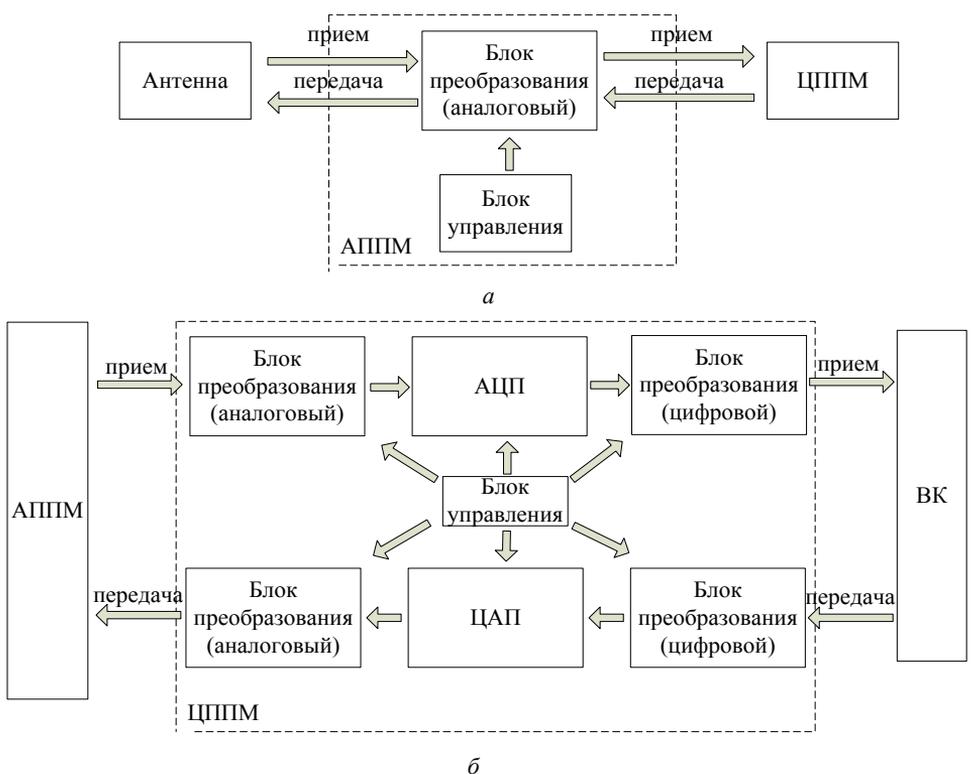


Рис. 4. Структурная схема модулей:
a — АППМ; *б* — ЦППМ

Наибольшую вычислительную нагрузку в модели АППМ несет учет нелинейных элементов, что, в свою очередь, сказывается на нелинейности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) модуля. Нелинейность амплитудной характеристики приемного тракта определяется следующим выражением [7]:

$$V_{\text{вых}} = \begin{cases} K_0 V_{\text{вх}}, & V_{\text{вх}} \leq V_{1\text{дБ вх}}; \\ a_1 V_{\text{вх}} + a_3 V_{\text{вх}}^2, & V_{1\text{дБ вх}} < V_{\text{вх}} \leq V_{\text{нас.вх}}; \\ V_{\text{нас.вых}}, & V_{\text{вх}} \geq V_{\text{нас.вх}}, \end{cases} \quad (1)$$

где $V_{\text{вых}}$ — напряжение на выходе; K_0 — коэффициент усиления; $V_{\text{вх}}$ — напряжение на входе; $a_1 = 10^{K_0/20}$; $a_3 = \frac{4}{3} \frac{a_1}{v\text{IP}_3}$; $v\text{IP}_3$ — точка пересечения по интермодуляционной помехе третьего порядка по входу; $V_{1\text{дБ вх}}$ — точка компрессии по уровню 1 дБ по входу; $V_{\text{нас.вх}}$ и $V_{\text{нас.вых}}$ — напряжение насыщения по входу и по выходу.

Первая часть выражения (1) при $V_{\text{вх}} \leq V_{1\text{дБ вх}}$ учитывает линейный участок, который описывается коэффициентом усиления и линейно зависит от входного напряжения. Вторая часть при $V_{1\text{дБ вх}} < V_{\text{вх}} \leq V_{\text{нас.вх}}$ учитывает нелинейный участок, АЧХ аппроксимируется полиномом третьего порядка при нулевом коэффициенте квадратичной составляющей (интермодуляционные искажения второго порядка не моделируются). Третья часть при $V_{\text{вх}} \geq V_{\text{нас.вх}}$ учитывает режим насыщения.

Нелинейность АЧХ передающего тракта моделируются с помощью заранее измеренных передаточных коэффициентов модуля АППМ. Эти коэффициенты заданы от максимальной входной мощности до ослабления в 20 дБ с шагом 1 дБ. В области этого участка передаточная характеристика интерполируется кубическими сплайнами, а вне этого участка считается линейной.

На рис. 4, б представлена структурная схема ЦППМ, как можно увидеть, он состоит из аналоговой и цифровой частей.

Аналоговая часть (блок преобразования (аналоговый)) состоит из:

- аттенюатора;
- преобразователя частоты (он состоит из смесителя и гетеродина);
- усилителя промежуточной частоты (УПЧ).

Цифровая часть (блок преобразования (цифровой)) состоит из:

- квадратурного смесителя (режим приема);
- модулятора (режим передачи);
- дециматора (режим приема);
- интерполятора (режим передачи).

Нелинейности в ЦППМ моделируются в соответствии с (1).

На рис. 5 представлена схема реализации АППМ и ЦППМ в Simulink в режиме приема-передачи, с двумя входами и двумя выходами. На один вход поступает сигнал в горизонтальной поляризации, на другой — в вертикальной. Модули выполнены в виде блоков MATLAB Function. Каждый блок маскирован с помощью редактора Mask Editor. Таким образом, на каждый блок поступает своя структура управления его внутренними параметрами.

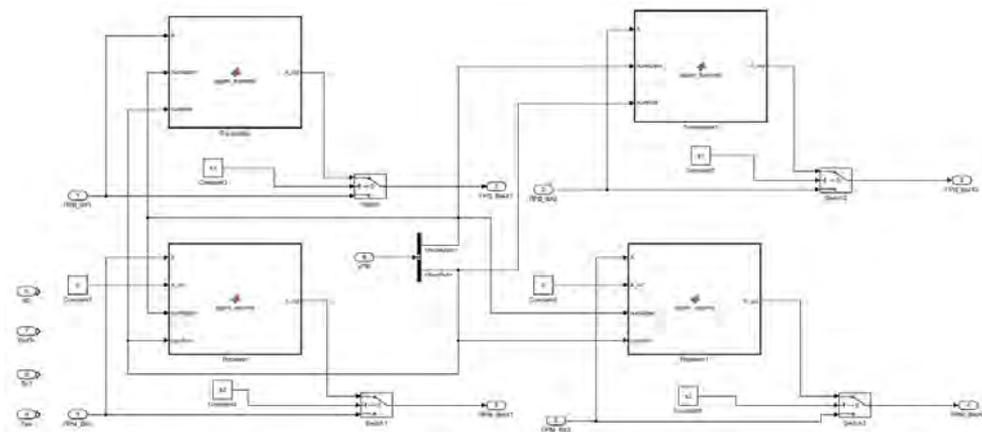


Рис. 5. Реализация АППМ и ЦППМ в Simulink

В заключение отметим, что в одном РЭК укладываются 64 АППМ и 32 ЦППМ, поэтому полностью модель РЭК отобразить в рамках статьи невозможно. Однако благодаря своим графическим возможностям Simulink позволяет в наглядной форме показать все связи и конструктивные взаимодействия между модулями. Также благодаря тому, что MATLAB имеет свой язык программирования, удалось реализовать структуру управления каждым АППМ и ЦППМ. Таким образом, появилась возможность адаптировать каждый модуль в отдельности, тем самым приближая модель к работе реального изделия.

Результаты. На рис. 6 и 7 представлены основные результаты работы моделей.

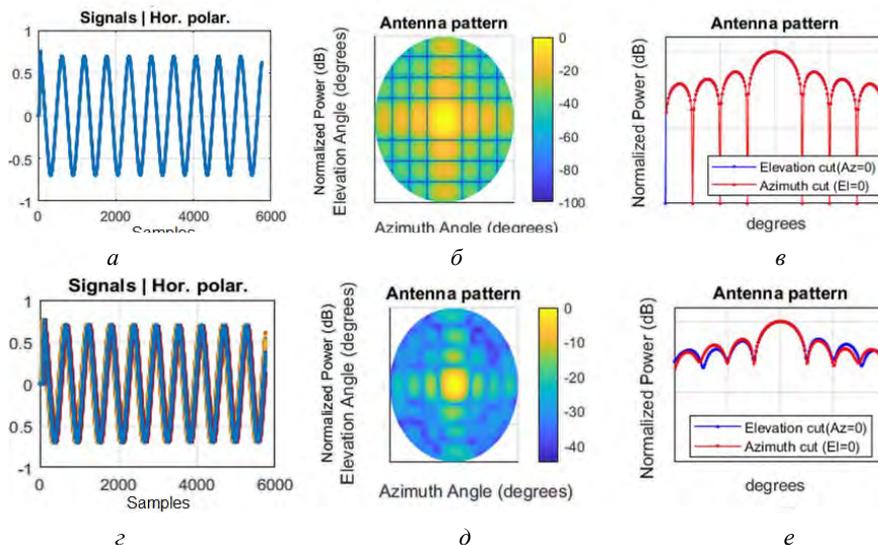
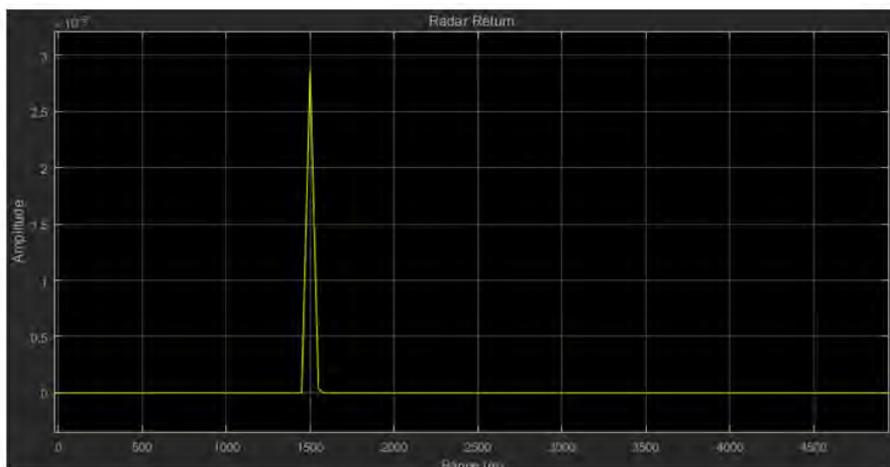


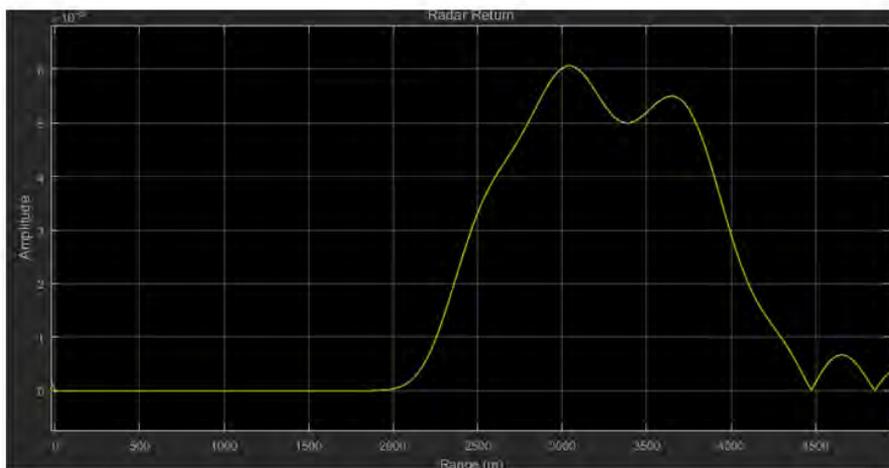
Рис. 6. Результаты работы модели по внешнему источнику:

a и *г* — зондирующий сигнал; *б* и *д* — диаграмма направленности;
в и *е* — диаграмма направленности в плоскостях: азимут и угол места

В соответствии со схемой на рис. 1, *а* была смоделирована задержка принятого сигнала. На рис. 6, *а* показан ЗС в виде гармонического сигнала, на рис. 6, *б* и *в* представлена передающая диаграмма направленности (ДН). Она была построена с помощью методов Phased Array System Toolbox. Как можно увидеть, никакой задержки сигнала нет, и ДН имеет симметричный вид. Далее внесем случайную задержку сигнала в пределах нескольких отсчетов. Это показано на рис. 6, *г*. Также на рис. 6, *д* и *е* видно, что ДН разваливается. Такая ситуации может имитировать разную длину в линии передачи сигнала или расфазировку сигнала, которая может возникнуть в результате рассинхронизации управляющего блока с АППМ и ЦППМ. В результате работы такой модели могут быть отлажены различные алгоритмы по расчету этих задержек и их компенсации.



а



б

Рис. 7. Результаты работы модели по цели:
а — сигнал без задержки; *б* — сигнал с задержкой

На рис. 7 смоделирован случай (рис. 1, б) работы по цели, где в блоке Target установлены основные параметры цели. На рис. 7, а виден корреляционный пик, который свидетельствует об обнаружении цели. На рис. 7, б представлена ситуация, когда сигналы приходят с некоторой случайной задержкой в линиях передачи. Видно, что в таком случае корреляционный пик сильно искажен и невозможно однозначно обнаружить одиночную цель. Отображение цели осуществляется с помощью библиотечного блока Simulink Target Range Scope. Цифровая обработка отраженного сигнала осуществляется на основе Matched Filter и Phase Shift Beamformer.

Заключение. Благодаря удобному интерфейсу проектирования утилиты Simulink были смоделированы один антенный РЭК и его составные части: АППМ и ЦППМ. Модель получилась наглядной и отражает конструктивные особенности проектируемого изделия. Управление моделью и отображение результатов ее работы осуществляются с помощью разработанного приложения на языке MATLAB. В связи с этим модель имеет гибкую структуру, что позволяет адаптировать каждый отдельный модуль под реальные характеристики разрабатываемого изделия. Были решены следующие задачи: дано общее понимание принципов работы изделия, определены параметры управления аппаратурой и программным обеспечением, отработан режим калибровки приемного и передающего тракта по внешнему калибровочному сигналу, отработан режим обнаружения цели.

Хочется отметить, что модель имеет незаконченный вид, и в дальнейшем она будет расширяться для выполнения других задач. Одним из приоритетных направлений является увеличение количества РЭК (увеличения размера антенны) и соединение их в единую структуру с целью моделирования всей РЛС.

Литература

- [1] Атаянц Б.А. *Прецизионные системы ближней частотной радиолокации промышленного применения* / Б.А. Атаянц, В.М. Давыдочкин, В.В. Езерский, В.С. Паршин, С.М. Смольский. Москва, Радиотехника, 2012, 467 с.
- [2] Чуркин С.С. Перспективы использования биорадара миллиметрового диапазона / С.С. Чуркин, В.А. Канаков, С.В. Копылова, А.А. Миронов, Л.Н. Анищенко, Д.А. Балакин. *Биомедицинская радиоэлектроника*, 2016, № 7, с. 64–72.
- [3] Груздов В.В. *Новые технологии дистанционного зондирования Земли из космоса* / В.В. Груздов, Ю.В. Колковский, А.В. Криштопов, А.И. Кудря. Москва, Техносфера, 2018, 482 с.
- [4] Чернов А.А. *Орбиты спутников дистанционного зондирования Земли. Лекции и упражнения* / А.А. Чернов, Г.М. Чернявский. Москва, Радио и связь, 2004, 200 с.
- [5] Дымович Н.Д. *Ионосфера и ее исследование* / Н.Д. Дымович. Москва, Энергия, 1964, 40 с.
- [6] Леонов А.И. Моделирование в радиолокации / А.И. Леонов, В.Н. Васенев, Ю.И. Гайдуков. Москва, Сов. радио, 1979, 264 с.
- [7] Cripps S.C. *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*. Artech House, Inc., 2009, 474 p.

Сведения об авторах:

Агапов Олег Александрович — канд. техн. наук, начальник лаборатории ОАО «Научно-производственный комплекс “Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи”» (ОАО «НПК “НИИДАР”»), Москва, Россия

Балакин Дмитрий Александрович — инженер 1-й категории ОАО «Научно-производственный комплекс “Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи”» (ОАО «НПК “НИИДАР”»), Москва, Россия

Добродумов Алексей Борисович — зам. главного конструктора ОАО «Научно-производственный комплекс “Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи”» (ОАО «НПК “НИИДАР”»), Москва, Россия

Керский Евгений Викторович — начальник лаборатории ОАО «Научно-производственный комплекс “Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи”» (ОАО «НПК “НИИДАР”»), Москва, Россия

Юрков Михаил Владимирович — начальник лаборатории ОАО «Научно-производственный комплекс “Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи”» (ОАО «НПК “НИИДАР”»), Москва, Россия

Simulation of the Antenna Electronic Complex Using MATLAB and Simulink

© | **O.A. Agapov**

D.A. Balakin

A.B. Dobrodumov

E.V. Kersky

M.V. Urkov

stealth333@yandex.ru

bzzz86.balakin@yandex.ru

dobrodumovab@niidar.ru

kersky@mail.ru

yrkoff@gmail.com

The Scientific and Research Institute for Long-Distance Radio Communications,
Moscow, 127083, Russia

The main task of modeling any complex system is to reproduce its structure with all the features and the physical processes taking place in it. Without a doubt, any radar station (radar) is such a complex system. Therefore, its modeling at an early stage of development allows not only to reproduce the various processes and phenomena occurring in it, but also to save time and effort. Any radar consists of many simpler systems. The radio-electronic complex (REC) can be referred to such a simple system. Such a complex is a separate antenna section, which consists of an antenna-feeder device and analog-digital receivers. The article outlines the basic principles of the REC. Simulation of its component parts is carried out using MATLAB and Simulink. The structure of the REC control and the main simulation results in the mode of reception and emission of the signal are presented.

Keywords: radio electronic complex, analog transceiver module, digital transceiver module

References

- [1] Atainc B.A. *Precezionnie sistemi blizhnei radiolocacii promishlennogo primeneniya* / B.A. Atainc, V.M. Davidockin, V.V. Ezerskii, V.S. Parshin, S.M. Smolskii. Moscow, Radiotekhnika, 2012, 467 p.
- [2] Churkin S.S. *Perspektivi ispolizovania bioradara millimetrovogo diapazona* / S.S. Churkin, V.A. Kanakova, S.V. Kopilov, A.A. Mironova, L.N. Anishenko, D.A. Balakin. *Biomeditsinsky radioelektronika*, 2016, No. 7, pp. 64–72.
- [3] Gruzdov V.V. *Novie technologii distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* / V.V. Gruzdov, Yu.V. Kolkovskii, A.V. Krishtopov, A.I. Kudria. Moscow, Technosfera, 2018, 482 p.
- [4] Chernov A.A. *Orbiti sputnikov distancionnogo zondirovaniya Zemli* / A.A. Chernov, G.M. Chernavskii. Moscow, Radio I Svaz, 2004, 200 p.
- [5] Dimovich N.D. *Ionosfera I eio issledovanie* / N.D. Dimovich. Moscow, Energiya, 1964. 40 p.
- [6] Leonov A.I. *Modelirovanie v radiolocacii* / A.I. Leonov, V.N. Vasenev Yu.I. Gaidukov. Moscow, Sov. radio, 1979, 264 c.

- [7] Cripps S.C. *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*. Artech House, Inc, 2009, 474 p.

Information about authors:

Agapov O.A. — PhD, head of laboratory, The Scientific and Research Institute for Long-Distance Radio Communications, Moscow, Russia

Balakin D.A. — engineer of 1st category, The Scientific and Research Institute for Long-Distance Radio Communications, Moscow, Russia

Dobrodumov A.B. — deputy chief constructor, The Scientific and Research Institute for Long-Distance Radio Communications, Moscow, Russia

Kersky E.V. — head of laboratory, The Scientific and Research Institute for Long-Distance Radio Communications, Moscow, Russia

Yurkov M.V. — head of laboratory, The Scientific and Research Institute for Long-Distance Radio Communications, Moscow, Russia

УДК 621.865.8:62-83

Опыт разработки прототипа двуногого шагающего робота с использованием среды MATLAB

© | И.Е. Азин
П.И. Розкаряка

ilya-azin14@yandex.ru
pavel_rozkar@mail.ru

Донецкий национальный технический университет, Донецк, Украина

Представлен опыт разработки прототипа двуногого шагающего робота (педипулятора), указаны особенности создания его имитационной модели и системы управления, построенной с использованием среды MATLAB на базе микроконтроллера семейства STM32F4. Приведенный подход позволяет создать в короткие сроки рабочий прототип шагающего робота из доступных материалов. Корпус робота реализован с применением технологии 3D-печати. Разработанная в среде MATLAB имитационная модель двуногого робота дает возможность синтезировать алгоритмы управления с последующей их отладкой на физическом объекте, учитывая действие гравитации и силы трения с поверхностью. Представленный прототип имеет десять степеней свободы, при этом имитационная модель позволяет производить расчет центра масс робота и фиксировать координаты любых точек механизма в динамике. Для представленного прототипа робота разработан алгоритм «умного» приседания, при котором система управления педипулятора автоматически определяет углы поворота сервомоторов при отработке управляющего воздействия. Разработанный робот может быть использован для изучения антропоморфных механизмов и систем управления ими. Выбранный подход применим для создания локомоционных роботов с любым количеством пар конечностей.

Ключевые слова: педипулятор, двуногий робот, шагающий робот, имитационная модель, MATLAB, Simulink, Simscape Multibody

Одним из важнейших направлений развития робототехники является разработка антропоморфных механизмов, способных свободно перемещаться в пространстве. Актуальность данного направления обусловлена тем, что антропоморфные роботы позволят в будущем заменить монотонный человеческий труд и облегчить выполнение работы во вредных или опасных условиях [1].

Целью данной работы является создание прототипа двуногого шагающего робота из доступных материалов и системы управления с минимальными временными затратами для изучения принципов управления антропоморфными механизмами.

Для достижения поставленной цели необходимо обеспечить решение следующих задач: анализ и разработка конструкции шагающего робота, создание его имитационной модели, сборка, разработка системы управления, определение законов управления, отладка их на физическом объекте.

Разработанный робот представляет собой педипулятор с десятью степенями свободы (рис. 1). Суммарная масса робота без учета крепежных элементов составляет 0,721 кг, высота — 0,358 м. В качестве приводных механизмов, выступающих в роли суставов робота и обеспечивающих движение, выбраны серводвигатели Tower Pro

MG995, управляемые с помощью ШИМ-сигнала. Для управления роботом выбран микроконтроллер STM32F417IG Discovery.

Рассматриваемый робот (рис. 2) сконструирован по наиболее распространенной кинематической структуре двуногих педипуляторов: две степени свободы в голеностопном, две — в бедренном суставе и по одной — в коленном [2]. Такая конструкция позволяет при наличии замкнутой по положению системы управления обеспечить устойчивость при появлении возмущающих воздействий вдоль любой из осей. Еще одной особенностью конструкции является одинаковая длина голени и бедра, что делает геометрию робота более простой, а движения более предсказуемыми. Наиболее тяжелыми элементами конструкции являются серводвигатели (10 шт.), масса каждого составляет 0,055 кг. Всего компонентов — 31 шт., детали взаимозаменяемые, выполнены из ABS-пластика с максимальным заполнением при печати на 3D-принтере.

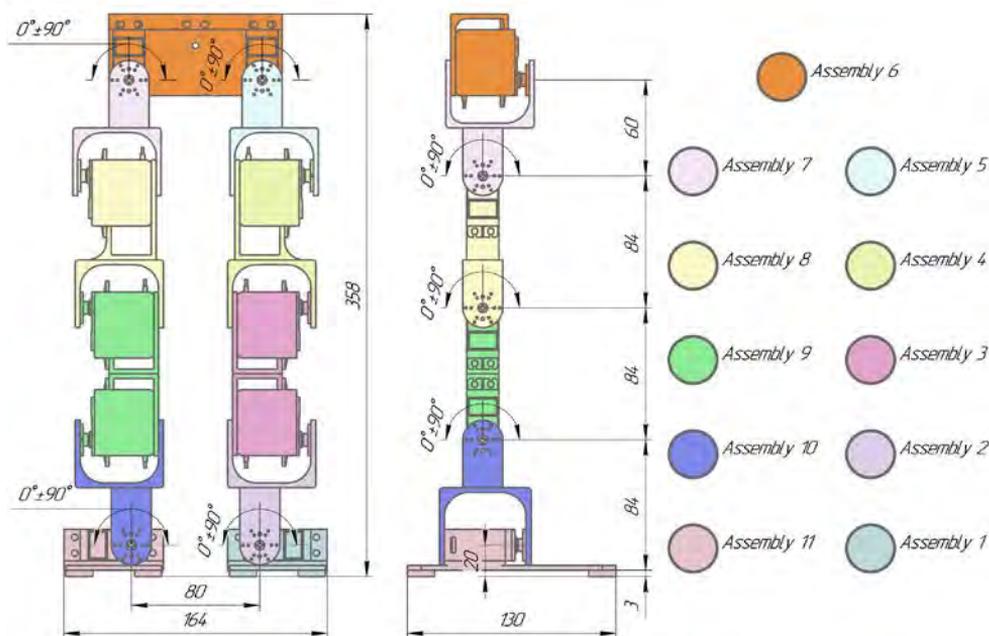


Рис. 1. Фронтальная и профильная проекции робота с пояснением возможных перемещений

Для построения системы управления педипулятором была создана его имитационная модель в среде MATLAB с использованием библиотек Simulink Simscape Multibody и Contact Forces [3]. При моделировании шагающих роботов важно обеспечить его взаимодействие с поверхностью при перемещении в пространстве. Для этого было осуществлена сборка модели в Simulink Simscape Multibody. Это можно сделать как вручную, импортируя детали формата STEP или STL, при этом задавая точки вращения, так и с помощью интегрирования со средой SolidWorks. Вариант использования стандартных инструментов MATLAB для создания геометрии деталей в данном случае не рассматривался, так как CAD модели использовались впоследствии для 3D-печати и создания графической документации. Следующим шагом

была установка необходимого количества контактных точек, в которых осуществляется взаимодействие с поверхностью и рассчитываются силы. Эта задача решена с помощью библиотеки Contact Forces.

Далее для анализа поведения робота были определены точки конструкции робота, положение которых характеризует его положение в пространстве, и структура была дополнена соответствующими необходимыми элементами для записи данных. В данной работе такими точками являются центр масс и точки, расположенные на верхней плоскости таза. На рис. 3 приведена имитационная модель педипулятора с учетом действия сил гравитации и расчетом сил взаимодействия между ступнями робота и поверхностью.

В состав приведенной имитационной модели робота входят следующие элементы: детали конструкции робота (Assembly 1-11), подсистемы, которые обеспечивают движение суставов (P1R-P5R, P1L-P5L), подсистема, вычисляющая координаты центра масс робота (Sum of CM) и блоки конфигурации модели. В подсистемах ступней робота (Assembly 1, Assembly 11) устанавливаются контактные точки взаимодействия с поверхностью.

К блокам конфигурации относятся Solver Configuration, определяющий параметры решателя, World Frame, инициализирующий точку отсчета системы, и Mechanism Configuration, задающий параметры силы тяжести. Наличие этих блоков обязательно для любой модели Simscape Multibody [4].

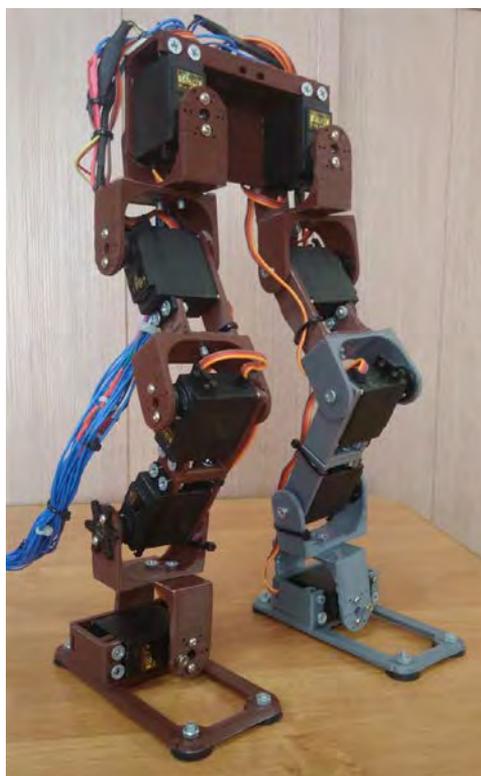


Рис. 2. Внешний вид собранного робота

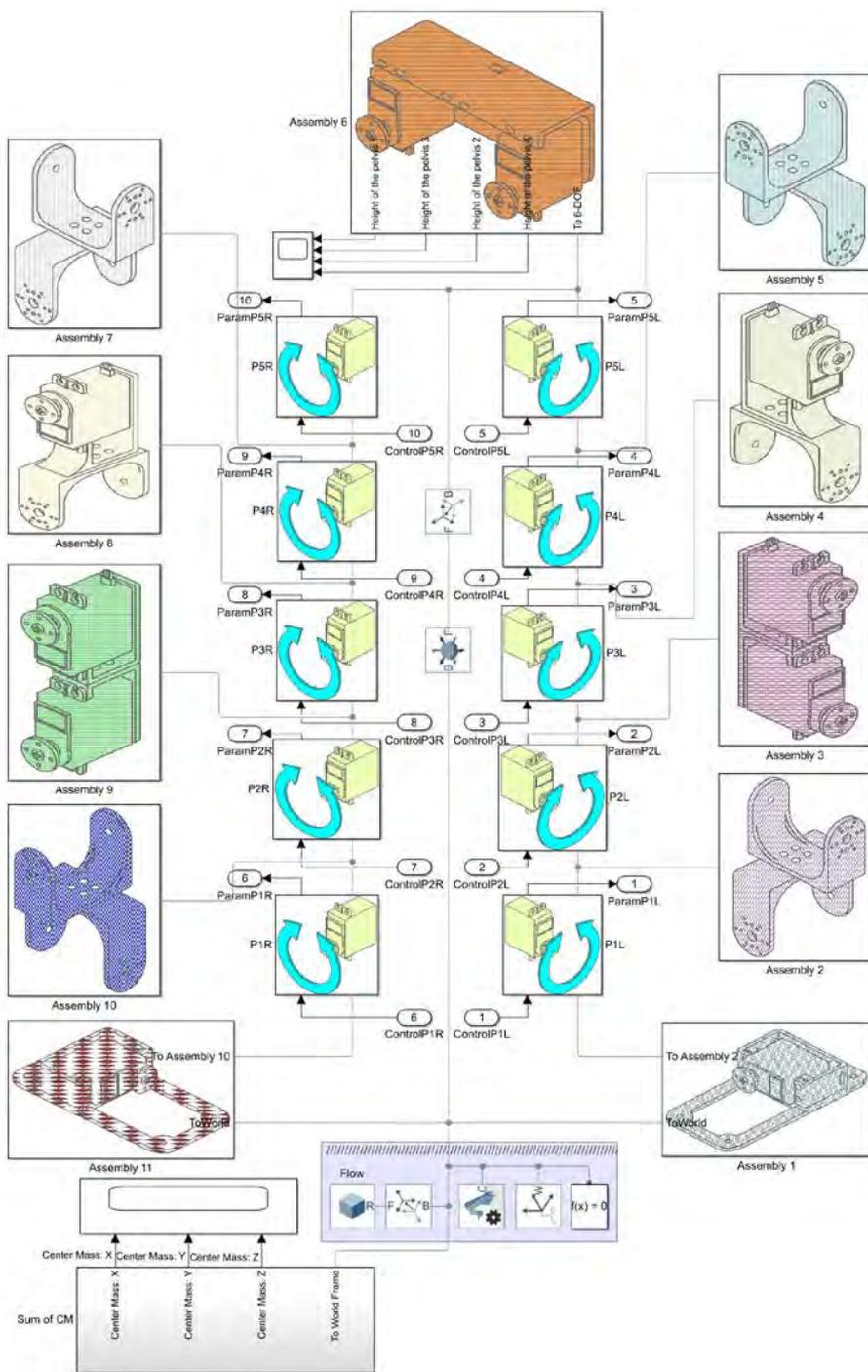


Рис. 3. Имитационная модель педулятора

Структура подсистемы, обеспечивающей движение суставов (например, PIR) представлена на рис. 4, *a*. Непосредственно движение реализуется благодаря последовательному соединению блоков Rigid Transform, предназначенных для переноса и вращения детали путем преобразования координат, и блока Revolute Joint, осуществляющего вращение детали относительно оси Z в глобальных координатах. Для учета инерционности исполнительного механизма (сервопривода) рассматриваемая подсистема дополнена задатчиком интенсивности, величина производной которого соответствует реальным параметрам сервопривода. Также в подсистеме предусмотрена возможность контроля динамических параметров: угла поворота (q), угловой скорости (w), углового ускорения (b) и момента (t).

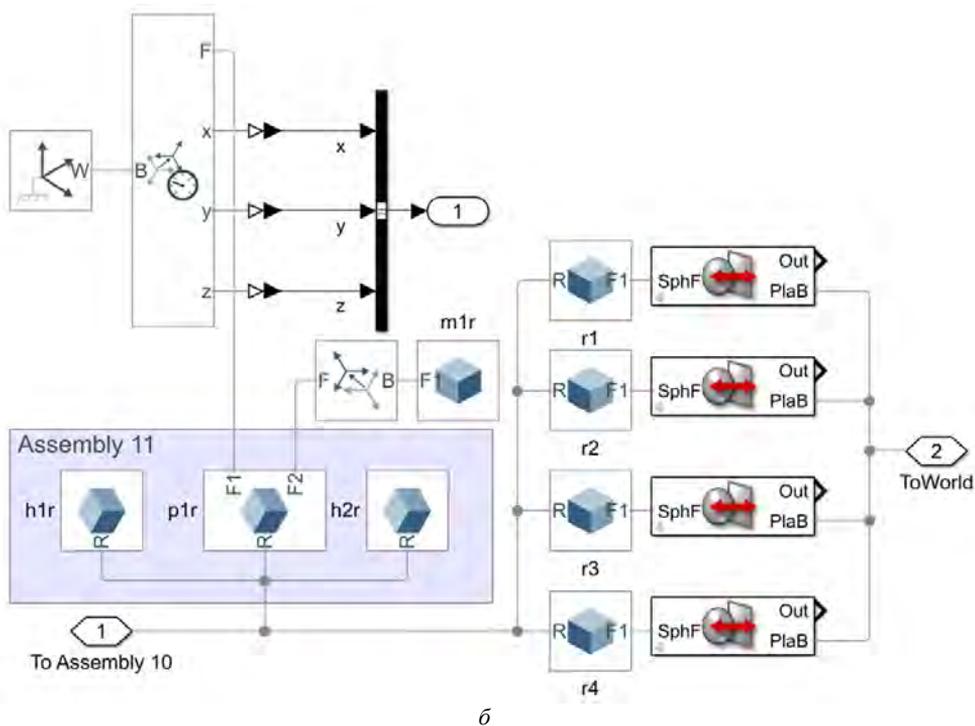
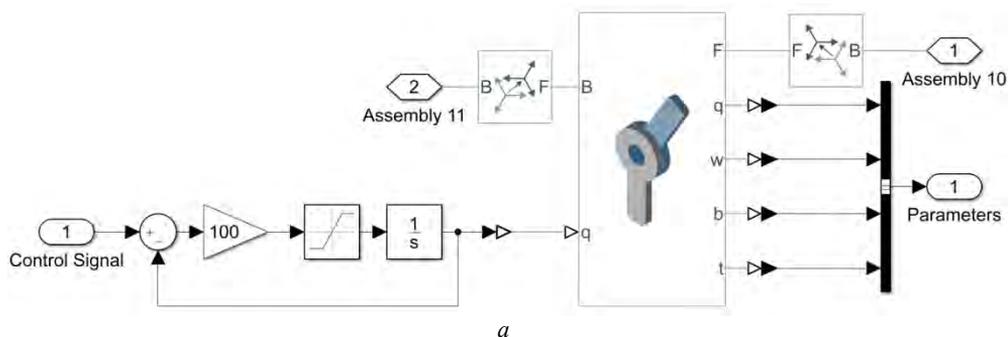


Рис. 4. Подсистема движения одного сустава (*a*) и подсистема ступни (*b*)

В подсистеме ступни (Assembly 1 и Assembly 11) (рис. 4, б) расположены детали голеностопной части робота. В ней настраиваются контактные точки (блоки Sphere to Plane Force). На каждой ступне расположены по четыре контактные точки, установленные на «шипах» (r1–r4), необходимых для увеличения сил трения при ходьбе. В блоке Sphere to Plane Force задаются следующие параметры: радиус контактной точки (Sphere Radius), длина и ширина контактной поверхности (Plane Length x , Plane Length y), ее глубина (Plane Depth to Reference Frame), жесткость контакта (Contact Stiffness), коэффициент демпфирования (Contact Damping). А также задаются коэффициент трения покоя (Coefficient of Static Friction), коэффициент трения скольжения (Coefficient of Kinetic Friction) и скорость трогания (Velocity Threshold). Данные параметры позволяют имитировать различные по своим характеристикам поверхности.

В подсистеме тазовой части робота (Assembly 6), представленной на рис. 5, для оценки положения в горизонтальной плоскости выводятся координаты крайних точек таза. Это помогает оценивать стабильность ходьбы. Также в подсистеме присутствует блок автоматической остановки симуляции при опускании таза ниже заданного уровня в глобальных координатах (остановка при падении).

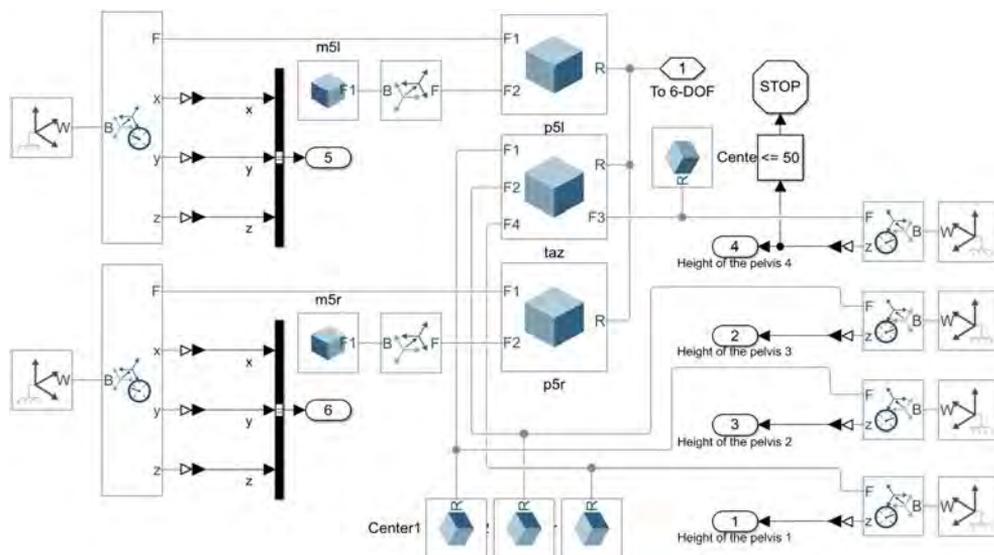


Рис. 5. Подсистема тазовой части робота (Assembly 6)

Во всех подсистемах, в состав которых входят детали серводвигателей, координаты их центра масс передаются в подсистему Sum of CM для вычисления центра масс всей конструкции робота. Центр масс робота вычисляется приближенно, и учитываются только сосредоточенные массы серводвигателей. Массами пластиковых деталей пренебрегаем. Подсистема Sum of CM суммирует координаты центров масс каждого привода.

Сервоприводы собранной конструкции робота управляются от микроконтроллера STM32F4, который с помощью пакета Waijung [5] позволяет легко реализовывать алгоритмы управления, предварительно проверенные в среде MATLAB. Подробно методика организации взаимодействия между системой управления и объектом

управления широко представлена в литературе, например в [6]. Такая процедура быстрого прототипирования позволяет сосредоточить внимание разработчика на алгоритмах управления, сокращая время перехода от этапа моделирования до этапа реализации на объекте.

Первая задача, которая была решена для рассматриваемого робота, была задача отработки алгоритма приседания. Рассмотрим эту задачу подробнее. При данном типе движения геометрию робота можно упростить до треугольника в профильной проекции, вершинами которого являются бедренный, коленный и голеностопные суставы (см. рис. 6). При подаче на бедренный и голеностопный сустав одинакового задания, а на коленный сустав этот же сигнал, умноженный на определенный коэффициент (зависящий от соотношения длин голени и бедра), получаем приседание, при котором таз во время движения остается параллелен земле и его положение изменяется лишь по высоте (рис 6, а). Задачу автоматического определения углов поворота серводвигателей при заданном расстоянии, на которое необходимо опуститься (рис 6, б), можно решить исходя из свойств треугольника. На рис. 6, б обозначены: H — расстояние между бедренным суставом на сгиб и голеностопным суставом на сгиб; ΔH — заданная высота опускания таза; b_1 — длина бедра; b_2 — длина голени; α , γ — углы сгиба.

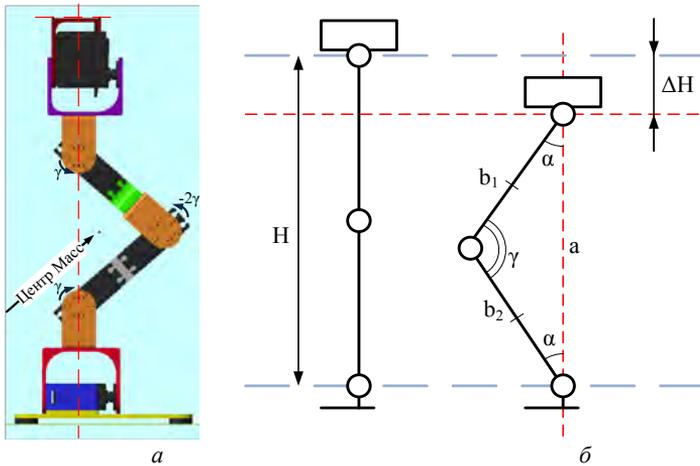


Рис. 6. Модель робота при приседании (а) и упрощенная проекция педипулятора (б)

Согласно рис. 6, б, можно записать

$$H = a + \Delta H. \quad (1)$$

В рассматриваемом случае длина бедра равна длине голени, а значит, треугольник можно считать равнобедренным:

$$b_1 = b_2 = b; \quad (2)$$

$$H = b_1 + b_2 = 2b. \quad (3)$$

Из свойства треугольника о сумме его углов:

$$\gamma = 180 - 2\alpha, \quad (4)$$

определим угла сгиба α , который обеспечит заданную высоту опускания таза ΔH .

Из теоремы косинусов и (1), (3) и (4) получаем следующее выражение:

$$(H - \Delta H)^2 = 2b^2 - 2b^2 \cos(180^\circ - 2\alpha), \quad (5)$$

решая которое относительно α , получаем

$$\alpha = \frac{180 - \arccos\left(1 - \frac{4b^2 - 4b\Delta H + \Delta H^2}{2b^2}\right)}{2}. \quad (6)$$

Выводы. На данном этапе исследований спроектирована и создана конструкция робота, собрана имитационная модель, позволяющая оценивать поведение робота при движении, создана система управления и отлажен алгоритм приседания с автоматическим определением углов поворота сервомоторов. Ведется работа по отладке алгоритмов ходьбы по горизонтальной плоскости. В дальнейшей планируются установка акселерометров и гироскопов на отдельных элементах конструкции для решения задач движения по наклонной плоскости, возможности сохранения равновесия при различных возмущающих воздействиях и создание туловища, на котором будут расположены микроконтроллер и прочие элементы системы.

Литература

- [1] Павловский В.Е. *О разработках шагающих машин* // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2013, № 101, 32 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-101> (дата обращения 10.03.2019).
- [2] Лапшин В.В. *Механика и управление движением шагающих машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012.
- [3] Мусалимов В.М., Заморюев Г.Б., Калапышина И.И., Перечесова А.Д., Нуждин К.А. *Моделирование мехатронных систем в среде MATLAB (Simulink / SimMechanics)*: учеб. пособие для вузов. Санкт-Петербург, НИУ ИТМО, 2013, 114 с.
- [4] Герман-Галкин С.Г. *MATLAB & SIMULINK. Проектирование мехатронных систем на ПК*: учеб. пособие. Санкт-Петербург, Корона-Век, 2008.
- [5] *Waijung Blockset*. URL: <http://waijung.aimagin.com> (accessed 10.03.2019).
- [6] Полющенков И.С. Разработка системы управления электропривода по методу модельно-ориентированного программирования. *Технологии разработки и отладки сложных технических систем*: V Всерос. науч.-техн. конф.: сб. матер. (2018 г., Москва), Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018, с. 113–123.

Сведения об авторах:

Азин Илья Евгеньевич — студент бакалавриата кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Донецкий национальный технический университет, Донецк, Донецкая Народная Республика

Розкаряка Павел Иванович — канд. тех. наук, доцент, зав. кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Донецкий национальный технический университет, Донецк, Донецкая Народная Республика

On the Biped Walking Robot Prototype Development Using MATLAB Environment

© I.E. Azin
P.I. Pozkariaka

ilya-azin14@yandex.ru
pavel_rozkar@mail.ru

Donetsk national technical University, Donetsk, Ukraine

The biped robot simulation model developed in Matlab environment enables designing the control algorithms and debugging them later using physical plant in terms of gravity and surface friction forces. The presented prototype has ten degrees of freedom, in addition to that the simulation model allows calculating robot center of mass position and interactive recording coordinates of any point on the mechanism. For the presented prototype a “smart” squatting algorithm was developed, which implies automatic calculation of servo-motor rotation angles by the control system while following the reference signal. The developed robot can be used to study anthropomorphic mechanisms and means to control them. The chosen approach is applicable to creation of locomotion robots with any number of limb pairs.

Keywords: *Pedipulator, biped robot, walking robot, simulation model, MATLAB, Simulink, Simscape Multibody*

References

- [1] Pavlovskiy V.E. *O razrabotkah shagayuschih mashin [On the development of walking machines]* // Preprinty IPM im M.V.Keldysha, 2013, no. 101, 32 p. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-101> (inquiry date 10.03.2019).
- [2] Lapshin V.V. *Mekhanika i upravlenie dvizheniem shagayuschih mashin [Mechanics and motion control of walking machines]*. Moscow, Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Baumana, 2012.
- [3] Musalimov V.M., Zamoruev G.B., Kalapyshina I.I., Perechesova A.D., Nuzhdin K.A. *Modelirovanie mekhatronnyh sistem v srede MATLAB (Simulink/SimMechanics): ucheb. posobie dlya vuzov [Simulation of mechatronics systems in MATLAB (Simulink/SimMechanics) environment]*. Saint-Petersburg, NIU ITMO, 2013, 114 p.
- [4] German-Galkin S.G. *MATLAB & SIMULINK. Proektirovanie mekhatronnyh sistem na PK: ucheb. posobie [MATLAB & SIMULINK. Design of mechatronics systems on PC]*. Saint-Petersburg, Korona-Vek, 2008.
- [5] *WaijungBlockset*. URL: <http://waijung.aimagin.com> (accessed 10.03.2019).
- [6] Polyushhenkov I.S. *Razrabotka sistemy upravleniya elektroprivoda po metodu model'no orientirovannogo programmirovaniya [Development of electric drive control system using model-oriented programming approach]* / *Tekhnologii razrabotki i otladki slozhnyh tekhnicheskikh sistem: V Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya: sbornik materialov / 2018 g.* Moscow: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Baumana, p. 113–123.

Information about authors:

Azin I.E. — student of Electric Drive and Automation Department, Donetsk National Technical University

Rozkariaka P.I. — PhD, associate professor, head of the Electric Drive and Automation Department, Donetsk National Technical University

УДК 629.78.015.087:523.3

Пилотный проект применения пакета MATLAB для разработки программного обеспечения, управляющего работой стендового оборудования для экспериментальной наземной отработки модулей космических аппаратов

© | А.В. Артемьев
А.И. Быков

arav@laspace.ru
bykovartem1994@yandex.ru

Филиал АО «НПО Лавочкина», Калуга, Россия

За последние десятилетия существенно возросла степень сложности и автоматизации систем управления для различных электромеханических, пневматических и гидравлических устройств в аэрокосмической промышленности. В частности, это сопровождается увеличением объема используемого программного кода на выпускаемых изделиях. В связи с этим возникает необходимость разработки гибких, удобных и надежных встраиваемых приложений. При этом должны выполняться отраслевые стандарты и соблюдаться строгие требования сертифицирующих и принимающих органов. Разработчики обязаны учитывать стоимость проекта и его ключевые аспекты. Это сложная задача, требующая применения эффективных технологий производства. В данной статье рассматривается разработка программного обеспечения, управляющего работой стендового оборудования для экспериментальной наземной отработки модулей космических аппаратов, с помощью пакета MATLAB. Приведен типовый вариант электромеханической системы для управления стендовым оборудованием, которая включает в себя персональный компьютер, контроллер C884 и привод M.061 PD. Разработан алгоритм работы программного обеспечения в виде блок-схемы. В пакете Simulink созданы пользовательские блоки, которые взаимодействуют с .dll библиотекой контроллера C884. Произведена формализация классической блок-схемы программы в виде модели Simulink. Разработан пользовательский интерфейс для взаимодействия оператора с моделью Simulink. Реализовано взаимодействие между пользовательским интерфейсом и моделью Simulink по протоколу UDP. Сгенерированы тестовые управляющие сигналы в автоматическом режиме с использованием инструмента Simulink Design Verifier. Проведена верификация разработанной модели с использованием инструмента Simulink Test. Сгенерирован независимый Си код и исполняемый .exe файл, который можно запускать на компьютерах без использования пакета MATLAB.

Ключевые слова: автоматическая генерация Си кода, стендовое оборудование, наземная отработка модулей космических аппаратов, автоматизированная верификация, автоматическая генерация исполняемого файла

Введение. Акционерное общество «НПО Лавочкина» — ведущее предприятие ракетно-космической промышленности, проводящее работы по проектированию, изготовлению, испытанию и комплексной отработке ключевых автоматических космических аппаратов (КА) для фундаментальных научных исследований. Автоматические КА состоит из комплекса научной аппаратуры и служебных систем

(системы электроснабжения, системы ориентации и т. д.) [1]. Наземные испытания служебных систем ведутся на базе специального стендового оборудования в АО «НПО Лавочкина». Филиалу АО «НПО Лавочкина» поручена разработка данного стендового оборудования, которое чаще всего является сложным электромеханическим изделием, включающим в себя приводы, системы датчиков и управляющие системы.

При традиционном подходе к проектированию стендового оборудования на разных этапах им занимаются инженеры различных направлений. Согласно техническому заданию инженеры-конструкторы разрабатывают механическую часть стенда, параллельно инженеры схемотехники разрабатывают электронную систему на базе контроллеров, которая позволяет управлять работой механической конструкции. После чего инженеры-программисты производят адаптацию алгоритмов управления с учетом ограничений реальной схемотехники системы управления и разрабатывают программный код, реализующий эти алгоритмы. Затем, когда стенд изготовлен и программы разработаны и откомпилированы, начинается самый длительный и дорогостоящий процесс — отладки и верификации программно-технических средств. Этот процесс, проходящий при участии всех специалистов, направлен на исправление ошибок, возникающих на всех стадиях проектирования, в том числе и ошибок, связанных с влиянием человеческого фактора при формировании технических требований на разработку программного обеспечения, а также при разработке программного кода. Ошибки, связанные с человеческим фактором, — это основная масса ошибок, исправление которых занимает больше половины времени, затрачиваемого на процесс создания встроенной системы управления. Для повышения эффективности разработки программного обеспечения, которое управляет работой сложных электромеханических систем, в АО «НПО Лавочкина» планируется внедрение программных пакетов, позволяющих проводить генерацию кода в автоматическом режиме [2].

Одним из таких пакетов является MATLAB. Оценка эффективности использования пакета MATLAB при разработке программного обеспечения и получения программного кода в автоматическом режиме проводили путем пилотного проекта.

Целью данной работы является оценка эффективности использования пакета MATLAB при разработке программного обеспечения и получения программного кода в автоматическом режиме.

В рамках пилотного проекта необходимо было решить следующие задачи:

1) оценить возможности MATLAB при разработке специального программного обеспечения (СПО):

- возможность автоматической генерации эффективного, безопасного, читаемого и трассируемого с требованиями исходного Си кода без привязки к типу операционной системы и целевой платформы, на основе модели в пакете Simulink;

- скорость и простоту формализации имеющихся графических блок-схем в виде модели в среде Simulink, инженерами без навыков программирования;

- возможность быстрого импорта стороннего (ранее разработанного) кода на языке Си и библиотек, поставляемых с оборудованием, в разрабатываемое ПО, в среде MATLAB;

- возможность повторного использования в качестве библиотечных формализованных блок-схем или их частей в новых проектах;

- возможность интеграции предлагаемой технологии в существующие на предприятии процессы, а также возможность их последующей оптимизации;

– возможность масштабирования применения предлагаемой технологии в рамках проектов предприятия, с целью автоматизации, упрощения и повышения качества разрабатываемого ПО управляющей логики ответственных систем;

2) оценить возможность отладки алгоритмов управления на уровне модели, без интеграции ПО на целевую платформу:

– возможность проведения функционального тестирования и анализа полноты покрытия тестами всей модели, ее отдельных компонентов и генерируемого исходного кода, с помощью инструментов из пакета MATLAB;

3) оценить возможность быстрой разработки графического интерфейса в пакете App Designer для отладки и валидации управляющей логики, исполняемой на инструментальной ЭВМ и при подключении к выбранной целевой платформе:

– полноту библиотеки имеющихся графических элементов для быстрого создания человеко-машинных интерфейсов инженерами без навыков программирования;

– возможность быстрого изменения параметров графических элементов;

– возможность создания и повторного использования собственных графических элементов, если необходимо, инженерами без навыков программирования.

В качестве задачи, позволяющей в полной мере оценить определенные выше требования, была выбрана схема управления прецизионным приводом, представленная на рис. 1. При этом возможна полная реконфигурация данной схемы с заменой, исключением или дополнением элементов, без влияния на алгоритмы управления и без необходимости ручного кодирования. Это позволяет, используя оборудование, которое не применяется в действующих проектах предприятия, но в то же время является аналогичным, провести полный объем работ для оценки возможности внедрения ПО MATLAB на АО «НПО Лавочкина».

В контексте применения ПО MATLAB данная схема позволяет оценить возможности и полноту алгоритмов управления прецизионным приводом M.061 PD. Управление данным приводом производится с помощью контроллера C884 от компании Physik Instrumente (PI) GmbH & Co.



Рис. 1. Структурная схема управления приводом

Разработка модели в пакете Simulink на основе формализованной блок-схемы управляющей логики. Основные функции, требующие формализации в виде модели Simulink, из которой в дальнейшем должны быть автоматически получены Си код и исполняемое приложение, представлены в виде классической блок-схемы на рис. 2.

Блок-схема управляющей логики была взята за основу в качестве исходных данных как требования верхнего уровня и формализована в виде модели Simulink.

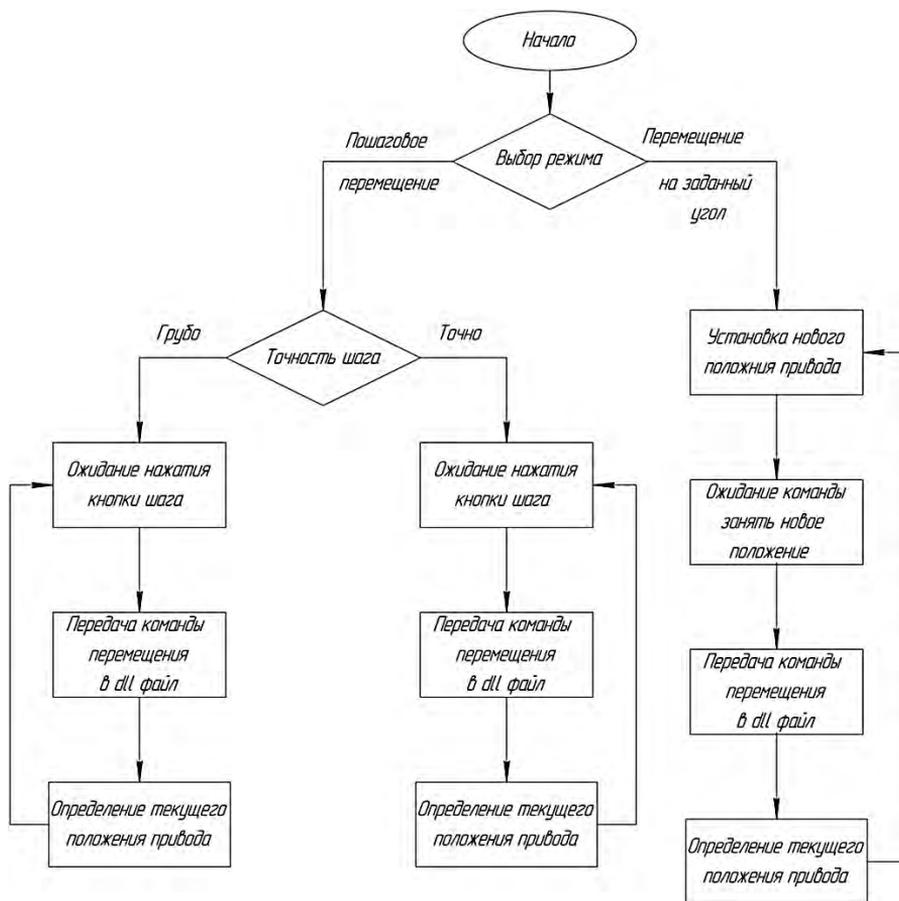


Рис. 2. Блок-схема работы управляющего ПО привода

Формализованная модель представляет собой комбинацию формализованных операторов Simulink. Данные операторы являются неотъемлемой частью инструмента и предназначены для наполнения модели логическими конструкциями, которые затем будут автоматически сконвертированы в исходный код на языке Си. Эти операторы позволяют работать с математическими операциями, операциями сравнения, логическими операциями, массивами и структурами данных.

Кроме того, у пользователя есть возможность создавать собственные «пользовательские» операторы на основе базовых операторов, которые могут многократно быть использованы в модели и использоваться в других проектах как библиотечные.

При возникновении необходимости использования в модели ранее написанного Си кода, пользователь может использовать C/C++ Code Block.

При разработке программного обеспечения, взаимодействующего с внешними устройствами, возникает необходимость подключения специальных .dll библиотек. Данную операцию можно осуществить, используя инструмент Legacy Code в пакете MATLAB. Данный инструмент позволяет создать пользовательский блок, который будет взаимодействовать с .dll библиотекой.

Кроме того, формализация блок-схемы позволяет определить все входные и выходные переменные и типы передаваемых данных.

Помимо возможности использовать несколько различных типов операторов у пользователя есть возможность комбинировать описанные выше виды операторов с механизмом конечных автоматов, представленных инструментом Stateflow.

В процессе формализации блок-схемы была разработана модель в пакете Simulink, представленная на рис. 3.

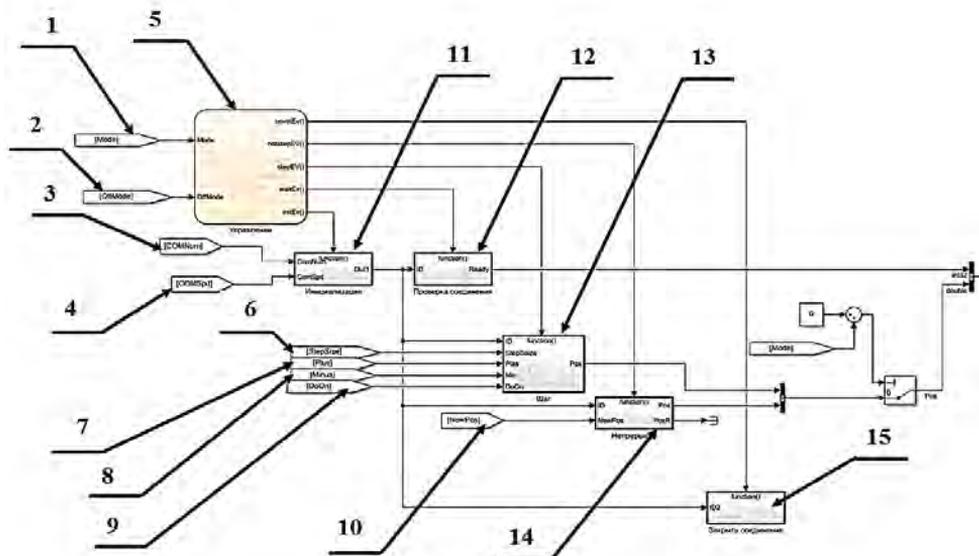


Рис. 3. Simulink-модель управления приводом:

1 — сигнал выбора режима работы; 2 — сигнал окончания работы; 3 — номер com-порта; 4 — скорость обмена данными; 5 — управляющий конечный автомат; 6 — размер шага поворота; 7 — шаговый поворот против часовой стрелки; 8 — шаговый поворот по часовой стрелки; 9 — сигнал подтверждения выполнения операции; 10 — значение нового положения привода; 11 — блок инициализации; 12 — блок проверки соединения с контроллером; 13 — блок пошагового поворота привода; 14 — блок поворота привода на заданный угол; 15 — блок завершения работы программы

В процессе формализации блок-схемы были выявлены и исправлены следующие недостатки:

- неполнота предлагаемой блок-схемы, не учитывающей этап инициализации целевой платформы;
- выход из режима управления приводом по требованию пользователя;
- выход из режима управления в случае ошибки связи с целевым устройством или его неисправности и выдача соответствующего сигнала.

В формализованной модели Simulink для управления взаимодействием между блоками использовались конечные автоматы, переходы между состояниями которых соответствуют условиям переходов блок-схемы, с добавлением состояний инициализации, выхода в случае возникновения ошибки и выхода по требованию пользователя.

Разработка пользовательского интерфейса. Для разработки пользовательского интерфейса использовался инструмент разработки графических приложений App Designer.

Интерфейс App Designer включает в себя поле для разработки графического интерфейса, а также поле, которое содержит код на языке MATLAB. В данном поле можно сформировать функции или обратную связь при взаимодействии с элементами интерфейса. С помощью данных функций проводится обмен данными с моделью Simulink.

Обмен данными с пользовательским интерфейсом происходит по протоколу UDP. Для этого в пакете Simulink используются блоки UDP Receive и UDP Send. Сразу же после приема данных по протоколу UDP данные надо сначала распаковать, а перед передачей надо сформировать пакет данных. Для этого используется специальный скрипт на языке MATLAB.

С помощью готовых графических элементов инструмента App Designer удалось разработать удобный, интуитивно понятный интерфейс (рис. 4), который позволяет отслеживать состояние соединения с приводом, задавать положение привода в ручном и автоматическом режимах, а также отслеживать текущее положение привода.



Рис. 4. Пользовательский интерфейс

Верификация разработанной модели. Одним из важнейших этапов разработки ПО является необходимость ее верификации. При классическом подходе к разработке ПО данный этап является наиболее ресурсоемким по отношению к времени, финансам и компетенциям инженеров, что чаще всего приводит к пропуску в разработанном ПО недокументированной функциональности и/или ошибок.

Другими словами, если бы написание сгенерированного кода проводилось вручную, то проведение тестирования и верификации кода значительно сложнее, нежели проведение верификационных активностей на уровне модели.

Для верификации модели в пакете MATLAB существует инструмент Simulink Test. Данный инструмент хорошо подходит, когда нужно провести серию автоматических тестов (и иметь возможность повторить их в любое время).

Первым этапом верификации является создание тестовой обвязки над основной моделью или какой-либо подсистемы модели. Тестовые сигналы можно формировать

самостоятельно или с помощью инструмента Simulink Design Verifier в автоматическом режиме. После чего происходит запуск инструмента Simulink Test. Результатами работы данного инструмента являются информация о покрытии модели тестами и отчет, сгенерированный в автоматическом режиме.

Если требуется осуществлять «тестирование исследованием», т. е. делать что-то в графическом интерфейсе приложения MATLAB и также видеть покрытие, то в настройках модели необходимо поставить галочку в разделе Coverage.

При проведении пилотного проекта для модели, созданной в пакете Simulink, были сгенерированы тесты в автоматическом режиме. После чего была создана тестовая обвязка для модели. Данная тестовая обвязка представляет собой набор тестовых сигналов, зависящих от времени. На данные тестовые сигналы также можно наложить ограничения. Результат генерации тестов в автоматическом режиме представлен на рис. 5.

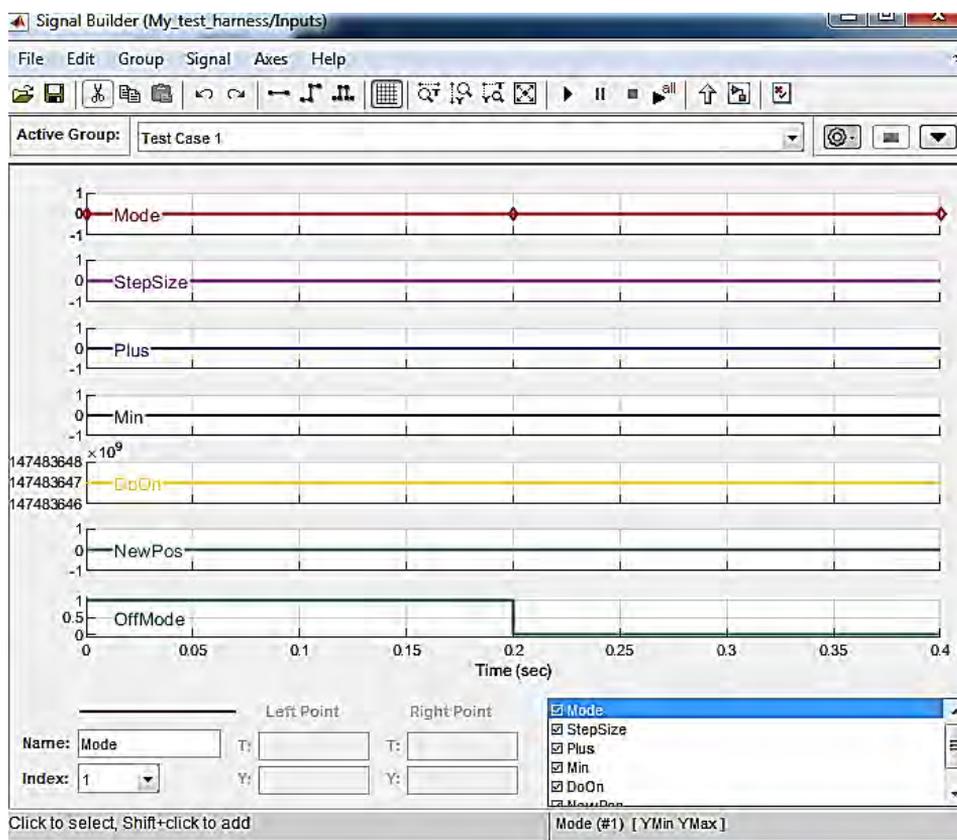


Рис. 5. Тестовые сигналы

Далее с помощью инструмент Simulink Test, используя сгенерированные тесты, запускаем процесс тестирования. Результат тестирования представлен на рис. 6. Также после проведения тестирования генерируется подробный отчет в автоматическом режиме.

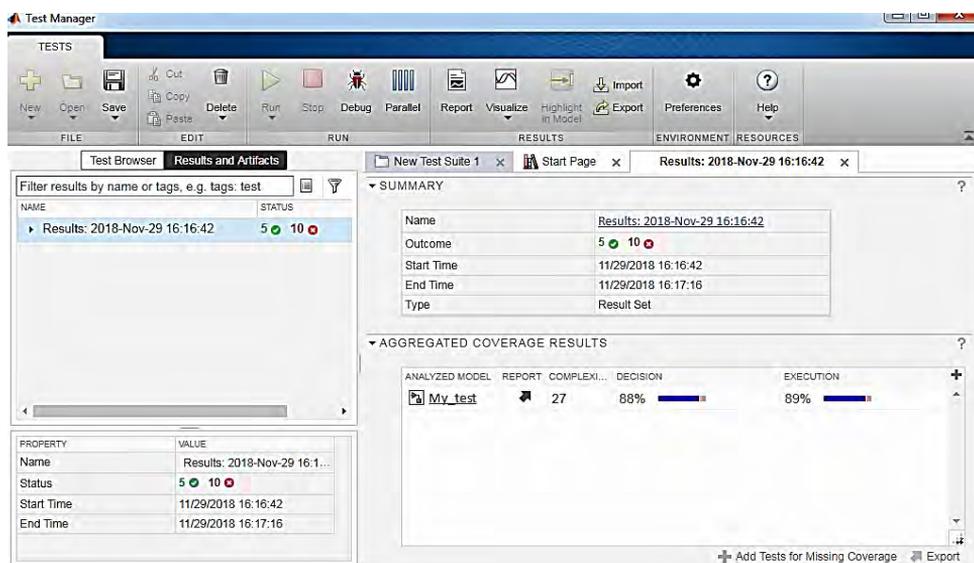


Рис. 6. Результат тестирования модели

Генерация C кода из модели. Для генерации Си кода из модели Simulink используется инструмент Embedded Coder. Для последующей компиляции и сборки кода используется компилятор Visual C. В результате получается исполняемый файл с расширением .exe. Этот файл не зависит от Simulink и может быть запущен на системе, где не установлен MATLAB/Simulink.

Исполняемый файл из графического интерфейса App Designer генерируется с помощью инструмента MATLAB Compiler. Этот исполняемый файл также не зависит от MATLAB/Simulink, но для запуска требует установки вспомогательной бесплатной библиотеки MATLAB Compiler Runtime. Исполняемый файл с расширением .exe, полученный из модели Simulink, запускает исполняемый файл пользовательского интерфейса.

Выводы. В рамках пилотного проекта были выполнены следующие этапы:

- 1) разработка модели управляющей логики для привода;
- 2) отладка разработанного ПО на инструментальной ЭВМ с подключением к целевой платформе;
- 3) валидация и верификация алгоритмов управления;
- 4) сбор и анализ тестового покрытия модели и структурного покрытия исходного кода;
- 5) автоматизированная генерация отчетной документации по моделям.

В результате проделанных работ были пройдены все этапы разработки и верификации ПО управления прецизионным приводом, от анализа требований до интеграции с целевой платформой.

На реализацию и отладку моделей были затрачены:

- модель управляющей логики в Simulink — 3 дня;
- интеграция стороннего кода и отладка взаимодействия с контроллером и приводом — 1 день;
- разработка графического интерфейса — 1 день;

- проведение функционального тестирования и анализа покрытия — 1 день;
- генерация Си кода, исполняемой спецификации и генерация отчетной документации — 1 день.

Всего потрачено времени на реализацию отладки ПО — 7 дней.

Достоинствами данной среды разработки являются:

- высокая скорость разработки управляющих алгоритмов и логики работы программного обеспечения по сравнению с ручным кодированием;
- генерация Си кода с помощью квалифицированного процесса генерации кода (соответствует Российскому стандарту ГОСТ Р 51904–2002 и КТ-178) позволяет ускорить процесс формирования программной документации для сдачи заказчику;
- возможность разработки сложного программного обеспечения начинающим специалистом, знакомым с основами языка СИ;
- широкий спектр готовых программных решений, в том числе и для генерации Си кода на отечественные контроллеры, которые используются для наземной отработки модулей космических аппаратов;
- возможность моделирования электромеханических систем, что позволяет проводить испытания, используя виртуальные образцы подсистем в проектах для наземной отработки КА;
- возможность создания пользовательского интерфейса с использованием большого количества стандартных элементов;
- проведение тестирования и оптимизации программного кода;
- автоматизированная система формирования отчетов;
- сокращение сроков получения готового продукта;
- сокращение стоимости проекта.

К недостаткам применения автоматизированной кодогенерации можно отнести увеличение (на 15...20 %) длины программного кода и времени его исполнения. Но в условиях наземных испытаний нет жестких ограничений, связанных с объемом программного кода и скоростью его исполнения.

Литература

- [1] Хартов В.В., Мартынов М.Б., Бабышкин В.Е., Москатиньев И.В., Митькин А.С. Новая высокоэллиптическая гидрометеорологическая космическая система «АРКТИКА-М». *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*, 2014, № 3, с. 104–108.
- [2] Понятский В.М., Кушников Д.В., Федорищева В.Г. Автоматизированная технология генерации программы в среде MATLAB для реализации алгоритмов управления рулевого привода. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2011, № 2.
- [3] Долинский М.С. Обзор современных подходов и средств к программистской разработке аппаратного обеспечения алгоритмически сложных цифровых систем. *Компоненты и технологии*, 2004, № 36.

Сведения об авторах:

Артемов Артем Валентинович — главный конструктор филиала АО «НПО Лавочкина» в г. Калуга, Калуга, Россия

Быков Артем Иванович — инженер-конструктор-схемотехник филиала АО «НПО Лавочкина» в г. Калуга, Калуга, Россия

Test Project of Using the MATLAB Package for Developing Software that Manages the Work of Bench Equipment for Experimental Ground Testing of Spacecraft Modules

© | A.V. Artemiev
A.I. Bykov

arav@laspace.ru
bykovartem1994@yandex.ru

Affiliate of Lavochkin Association, Kaluga, Russia

Over the past decades, the degree of complexity and automation of control systems for various electromechanical, pneumatic and hydraulic devices in the aerospace industry has significantly increased. In particular, this is accompanied by an increase in the amount of used program code on the manufactured products. In this regard, there is a need to develop flexible, convenient and reliable embedded applications. At the same time, industry standards should be met and the strict requirements of certifying and receiving authorities should be observed. Developers must take into account the cost of the project and its key aspects. This is a complex task requiring the use of efficient production technologies. This article discusses the development of software that manages the work of bench equipment for experimental ground testing of spacecraft modules using the MATLAB package. A typical version of the electromechanical system for control of bench equipment, which includes a personal computer, a C884 controller and an M.061 PD drive, is presented. The algorithm of software operation in the form of a flowchart has been developed. In the Simulink package, user blocks are created that interact with the .88 library of the C884 controller. The formalization of the classical flowchart of the program in the form of a Simulink model has been made. A user interface has been developed for the operator to interact with the Simulink model. The interaction between the user interface and the Simulink model via the UDP protocol is implemented. Test control signals are generated automatically using the Simulink Design Verifier tool. Verification of the developed model using the Simulink Test tool. An independent C code and an executable .exe file are generated that can be run on computers without using the MATLAB package.

Keywords: automatic generation of C code, bench equipment, ground testing of spacecraft modules, automated verification, automatic generation of the executable file

References

- [1] Kharov V.V., Martinov M.B., Babyshkin V.E., Moskatinev I.V., Mitkin A.S. Novaya visokoal'ipticheskaya gidrometeorologicheskaya kosmicheskaya sistema "Arktika-M". *Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina*, 2014, no. 3, pp. 104–108.
- [2] Ponyatskiy V.M., Kushnikov D.V., Fedorishcheva V.G. Avtomatizirovannaya tekhnologiya generatsii programmy v srede MATLAB dlya realizatsii algoritmov upravleniya rulevogo privoda. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskkiye nauki*, 2011, no. 2.
- [3] Dolinskiy M.S. Obzor sovremennykh podkhodov i sredstv k programmistskoy razra-botke apparatnogo obespecheniya algoritmicheskii slozhnykh tsifrovyykh system. *Komponenty i Tekhnologii*, 2004, no. 36.

Information about authors:

Artemiev A.V. — chief designer, Affiliate of Lavochkin Association, Kaluga, Russia

Bykov A.I. — circuit design engineer, Affiliate of Lavochkin Association, Kaluga, Russia

УДК 519.876.5

Имитационная модель управления протезом кисти руки с учетом обработки двух каналов входных данных

© | Р.Г. Асадуллаев
Е.С. Щетинина

rgasadullaev@gmail.com
1198621@bsu.edu.ru

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Белгород, Россия

Статья посвящена разработке имитационной модели управления бионическим протезом кисти руки в среде Simulink на базе stateflow. Модель применяется при проектировании интерфейсов «мозг — компьютер» для предварительной оценки работоспособности системы распознавания паттернов движений. Источником сигналов для модели выступает не инвазивный интерфейс «мозг — компьютер», позволяющий регистрировать гемодинамическую активность мозга. В процессе анализа полученных данных, возможно распознавание паттернов воображаемых движений. Разработанная модель позволяет имитировать процессы сжатия и разжатия как кисти руки в целом, так и пальцев по отдельности. Отличительной особенностью модели является обработка входных сигналов двух типов, позволяющих в совокупности фиксировать факт совершения целевого движения и проводить классификацию его паттерна. В среде Simulink разработаны средства имитации сигналов с интерфейса «мозг — компьютер» и средства визуального анализа работы модели. Логика работы модели реализована в среде stateflow.

Ключевые слова: имитационная модель, конечный автомат, бионический протез, интерфейс «мозг — компьютер», Simulink, stateflow

Введение. В настоящее время для реабилитации травм и послеоперационных последствий нарушения опорно-двигательной системы человека активно используются бионические протезы конечностей. Для их успешного внедрения и усовершенствования встает необходимость общего моделирования работы опорно-двигательного аппарата. В этом помогают информационные системы, разрабатываемые человеком, и наука «биомехатроника», совместившая в себе направления научного знания о нервных клетках человека и робототехнике. Задачей данного направления науки является создание бионических протезов, управление которыми будет совершаться с помощью мысли человека [1]. Данная область знания является актуальной уже несколько десятилетий, а ее достижения — роботизированные системы — уже используются в современной медицине, такие как хирургическая система Da Vinci [2].

Таким образом, актуальность данной работы заключается в расширении имеющихся знаний и возможностей моделирования работы опорно-двигательного аппарата человека, а также возможности применения полученной модели на практике при проектировании активных бионических протезов.

Материалы и методы решения задач, принятые допущения. Целью данной работы является разработка имитационной модели кисти рук, позволяющей анализировать логику обработки сигналов системой классификации паттернов целевых дви-

жений. Под целевым движением подразумевается обученный классификатором паттерн совершаемого действия.

Для разработки модели была выбрана интерактивная среда имитационного моделирования Simulink, встроенная в среду разработки MATLAB. Данная модель может быть использована в дальнейшем для проектирования интерфейсов «мозг — компьютер», включающая разработку программного обеспечения микроконтроллеров и датчиков активных бионических протезов.

В работе представлена модель, имитирующая работу кистей рук, в которой учтены и предусмотрены возможные состояния и переходы в работе пяти пальцев рук. Модель состоит из двух параллельно взаимодействующих блоков, имитирующих работу правой и левой руки. При проектировании был предусмотрен вариант использования модели лишь с одной кистью руки. Для этого необходимо удалить из описанной модели один из параллельно работающих блоков, при этом логика работы кисти не изменится.

Результаты. Для людей с различными повреждениями опорно-двигательного аппарата разрабатывается система управления протезами с помощью сигналов мозговой активности, которые могут считываться разнообразными медицинскими приборами. Данные системы дают возможность увеличения скорости приема и передачи управляющих команд бионических протезов [3].

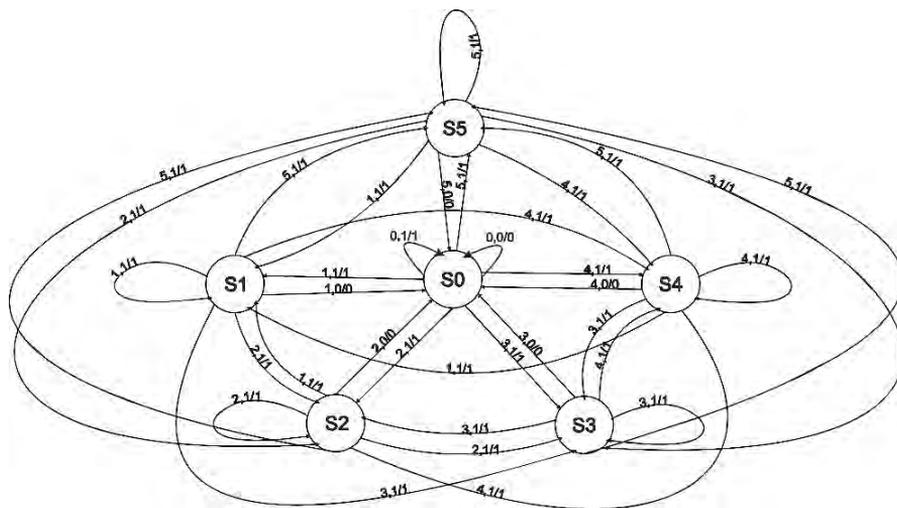


Рис. 1. Модель обработки сигналов кистью руки

Разработана модель работы кисти руки в виде конечного автомата (рис. 1). Модель описывается следующими множествами:

– множество состояний $S = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_0\}$, где состояние S_0 является начальным состоянием и обозначает действия всех пяти пальцев человека, а состояния S_1 – S_5 обозначают работу каждого пальца руки в частности;

– входной алфавит $X = X_1 \times X_2$, где $X_1 = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ состоит из элементов, указывающих на тип пальца (0 — все пальцы кисти, 1 — большой, 2 — указательный, 3 — средний, 4 — безымянный, 5 — мизинец) и $X_2 = \{0, 1\}$ соответствует действию сжатие/разжатие;

– выходной алфавит $Y = \{0, 1\}$, состоящий из элементов 1 — совершение сжатия и 0 — разжатие пальца;

– функция переходов f_p описывается в табл. 1. Данная функция описывает логику перехода между состояниями автомата в зависимости от текущего состояния и входного значения X_1 ;

– функция выходов f_v описывается в табл. 2. Формируемое выходное значение их множества Y зависит от состояния и обрабатываемого значения из входного алфавита X_2 .

Таблица 1

Функция переходов f_p

X_1/S	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
0	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0	S_0
1	S_1	S_1	S_1	S_1	S_1	S_1
2	S_2	S_2	S_2	S_2	S_2	S_2
3	S_3	S_3	S_3	S_3	S_3	S_3
4	S_4	S_4	S_4	S_4	S_4	S_4
5	S_5	S_5	S_5	S_5	S_5	S_5

Таблица 2

Функция выходов f_v

X_2/S	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1

Входными сигналами для модели выступают данные с fNIRS-томографа, отражающие мозговую активность. На данный момент принято классифицировать паттерны мозговой активности по трем основным группам [4]. Их формирование происходит после фильтрации данных и удаления шумов, артефактов и кардиоритмов испытуемого.

Предполагая, что данные шумы могут иметь различный разброс частот, можно сделать вывод, что после проведения фильтрации полученные данные могут отличаться от реальных, так как фильтрация проводится без учета индивидуальных особенностей человека. Это может привести к сбоям и ошибкам в работе модели. Предполагается предварительная фильтрация данных методом скользящего среднего с вариативным окном. Вариативное окно позволит учитывать индивидуальные аспекты поведения сигнала. При этом работа интерфейса мозг-компьютер подразумевает обработку сигнала в режиме, приближенном к реальному масштабу времени. Фильтр скользящего среднего будет формировать текущее значение, полностью основываясь на ретроспективных данных.

Выявив после проведения фильтрации необходимые для исследования части входных данных, необходимо произвести их обработку, подразумевающую нормирование и разбиение данных на группы паттернов. В связи с тем что на данном этапе система классификации паттернов движений находится в разработке, с целью проверки работоспособности спроектированной модели реальные входные сигналы заменены двумя каналами входных данных: функциями присвоения псевдослучайных

чисел, а также генератором прямоугольных импульсов (рис. 2). Созданный импульсный генератор имитирует факт совершения движения, тогда как генераторы чисел указывают, какое именно действие должно совершиться.

Всего для работы модели необходимы три генератора псевдослучайных чисел. Каждая используемая переменная передается в блок обработки поступающих сигналов и на их основе совершается псевдосжатие или псевдоразжатие пальцев рук или руки в целом.

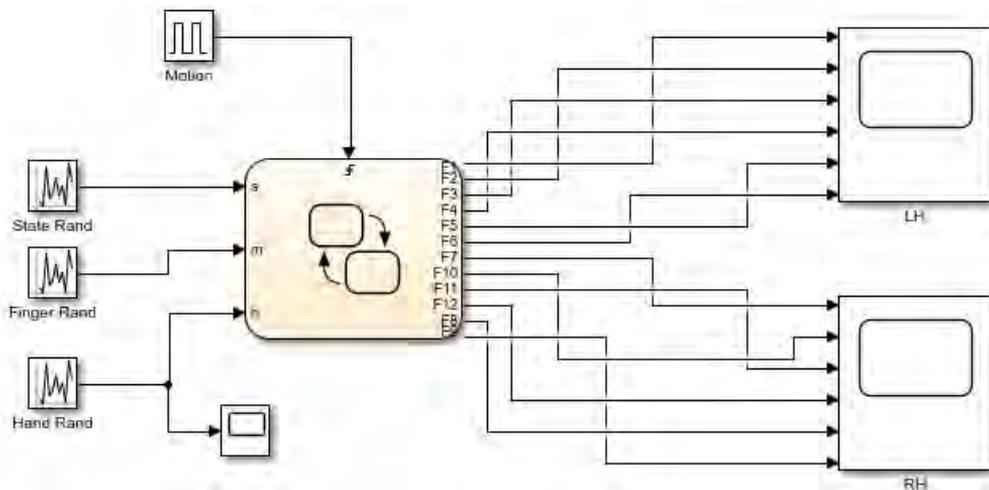


Рис. 2. Имитационная модель работы кистей рук человека

Для каждого генератора чисел задаются свои максимальное и минимальное значение. Для переменной h , обозначающей руку устанавливается интервал $[-1; 1]$, для переменной m , обозначающей палец каждой руки, — $[0; 6]$, для переменной s , обозначающей степень сжатия, — $[-1; 1]$.

Сигналы h , m , s подаются в блоке stateflow (рис. 3), в котором описывается логика движений двух кистей рук на основании модели в форме конечного автомата (см. рис. 1). При поступающей переменной h со значением в интервале $[-1; 0]$ начинается работа левой кисти руки протеза, в ином случае дается команда о начале работы блока правой кисти руки.

После перехода в один из параллельных блоков правой и левой кисти руки анализ переменной m определяет переход из начального состояния к какому-либо пальцу либо к состоянию, в котором предусмотрено сжатие или разжатие всех пяти пальцев. Для этого используются интервалы $[0; 1]$, $[1; 2]$, $[2; 3]$, $[3; 4]$, $[4; 5]$ для каждого пальца соответственно, а также интервал $[5; 6]$ для всех пяти пальцев.

В зависимости от выбранного состояния осуществляются вычисление конечного значения состояния и присвоение его выходной переменной. Для этого используется переменная s . В начальном состоянии Begin создается внутренняя переменная для каждого из функциональных состояний, которое в дальнейшем будет изменяться в зависимости от значения входной переменной s . Так, значение -1 означает, что палец находится в полностью разогнутом состоянии, а значение 1 дает знать исследователю, что палец полностью согнут.

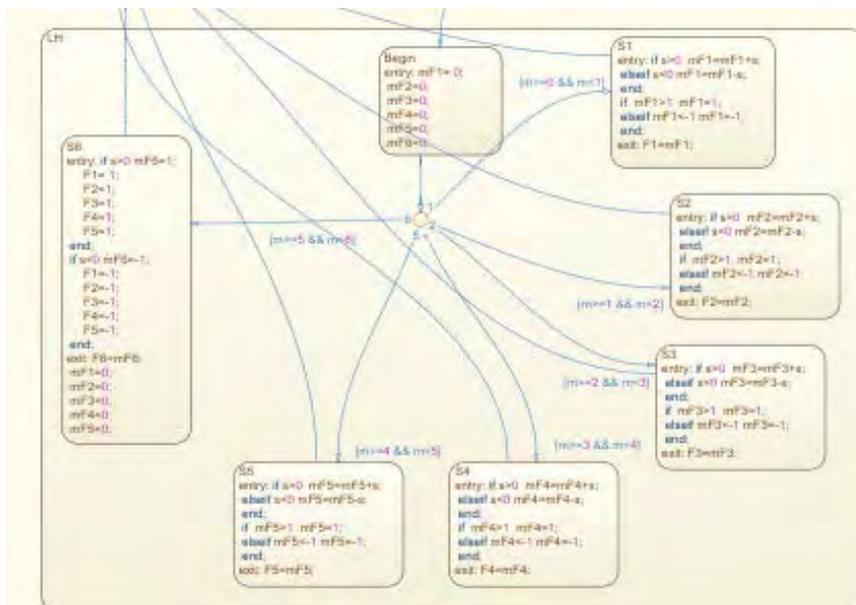


Рис. 3. Модель работы кистей рук человека

Когда на вход поступает переменная $s > 0$, в выбранном состоянии происходит операция увеличения значения выходной переменной на значение переменной s при условии, что переменная, содержащая текущее значение состояния, не больше значения 1. При $s < 0$ происходит уменьшение текущего значения на значение переменной s при условии, что оно не меньше -1 . При этом в функциональном состоянии отдельно каждого пальца прописано условие, что значение выходной переменной не может быть менее -1 и более 1. После присвоения значения выходной переменной ее изменения для каждого пальца отображаются в графике (рис. 4).

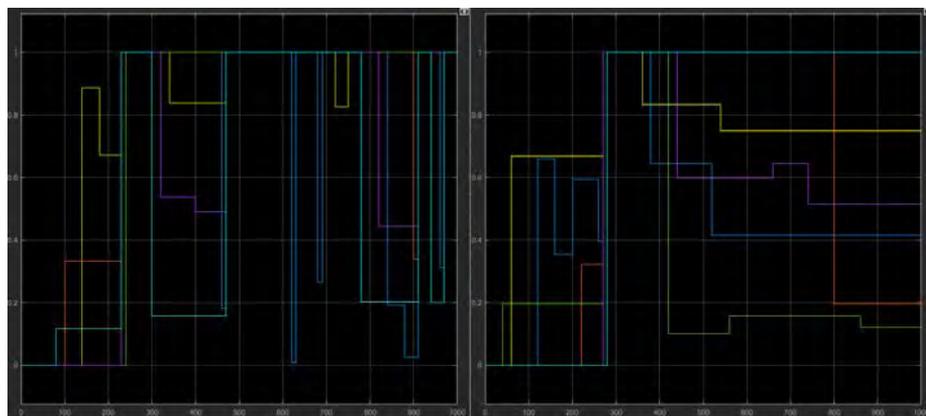


Рис. 4. Выходные значения моделирования при параллельных выполнениях сжатия и разжатия пальцев кистей рук человека

Заключение. В данной статье была разработана имитационная модель управления бионическим протезом кисти руки в среде разработки Simulink. Отличительной особенностью модели является обработка входных сигналов двух типов: факт регистрации целевого движения и классификации его паттерна. Разработанная модель создана для имитации процесса сжатия или разжатия кисти или пальцев рук. Логика работы модели реализована в среде stateflow. Данная модель позволяет имитировать работу протеза и оценивать корректность распознавания паттернов движений интерфейсом мозг-компьютер.

Литература

- [1] Солодимова Г.А., Спиркин А.Н. Информационно-измерительная система бионического протеза нижней конечности / Г.А. Солодимова, А.Н. Спиркин. *Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль*, 2018, 9 с.
- [2] Киямов Р.В., Хмелев Е.А., Юнусов И.Ф. Автоматизированная информационная система управления роботизированной конечностью / Р.В. Киямов, Е.А. Хмелев, И.Ф. Юнусов. *Проблемы современной науки и образования*, 2016, 3 с.
- [3] Боргуль А.С., Зименко К.А., Маргун А.А., Кремлев А.С. Многофункциональный активный протез руки / А.С. Боргуль, К.А. Зименко, А.А. Маргун, А.С. Кремлев. *Известия вузов. Приборостроение*, 2013, № 4, 4 с.
- [4] Руннова А.Е., Мусатов В.Ю., Куланин Р.А., Пчелинцева С.В., Ефремова Т.Ю., Грубов В.В., Лопатин Д.В. *Классификация паттернов двигательной активности на ЭЭГ-данных* / А.Е. Руннова, В.Ю. Мусатов, Р.А. Куланин, С.В. Пчелинцева, Т.Ю., Ефремова, В.В. Грубов, Д.В. Лопатин. *Вестник Тамбовского университета. Естественные и технические науки*, 2017, 6 с.

Сведения об авторах:

Асадуллаев Рустам Геннадьевич — канд. техн. наук, доцент НИУ «БелГУ», Белгород, Россия
Щетинина Екатерина Сергеевна — студент НИУ «БелГУ», Белгород, Россия

Simulation Model of Prosthetic Wrist Control, Taking into Account the Processing of Two Channels of Input Data

© | R.G. Asadullaev
E.S. Shchetinina

rgasadullaev@gmail.com
1198621@bsu.edu.ru

Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia

The article is devoted to the development of a simulation model for managing a bionic prosthetic hand in the simulink environment based on stateflow. The model is used in the design of computer — brain interfaces for a preliminary assessment of the performance of the movement patterns. The signal source for the model is a non-invasive brain-computer interface, which allows to record the hemodynamic activity of the brain. The developed model allows simulating the processes of compression and decompression of hands and the fingers separately. A distinctive feature of the model is the processing of input signals of two types, allowing in the aggregate to record the fact of the target movement and to classify its pattern. In the simulink environment, tools for simulating signals from the brain com-

puter interface and visual analysis tools for the model work have been developed. The logic of the model is implemented in the stateflow environment.

Keywords: simulation model, finite automaton, bionic prosthesis, brain-computer interface, simulink, stateflow

References

- [1] Solodimova G.A., Spirkin A.N. Information-measuring system of the bionic prosthesis of the lower limb / G.A. Solodimova, A.N. Spirkin. *Measurement. Monitoring Control*, 2018, 9 p.
- [2] Kiyamov R.V., Khmelev E.A., Yunusov I.F. Automated information management system of a robotic limb / R.V. Kiyamov, E.A. Khmelev, I.F. Yunusov. *Problems of modern science and education*, 2016, 3 p.
- [3] Borgul A.S., Zimenko K.A., Margun A.A., Kremlev A.S. Multifunctional active prosthetic arm / A.S. Borgul, K.A. Zimenko, A.A. Morgun, A.S. Kremlin. *Universities. Instrument Making*, 2013, no. 4, 4 p.
- [4] Runnova A.E., Musatov V.Yu., Kulanin R.A., Pchelintseva S.V., Efremova T.Yu., Grubov V.V., Lopatin D.V. Classification of patterns of motor activity on EEG-data / A.E. Runnova, V.Yu. Musatov, R.A. Kulanin, S.V. Pchelintsev, T.Yu., Efremova, V.V. Grubov, D.V. Lopatin. *Bulletin of the Tambov University. Natural and Technical Sciences*, 2017, 6 p.

Information about authors:

Asadullaev R.G. — PhD in Engineering, Professor, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

Shetinina E.S. — student Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

УДК 004: 621. 396(045)

Использование графической среды Simulink для создания имитационной модели спутникового канала связи

©	И.Р. Атыева ¹	atyeva1995@mail.ru
	А.А. Зыкин ¹	soyp2013@yandex.ru
	В.В. Хворенков ¹	hvv@istu.ru
	А.Н. Копысов ¹	kan_kan@istu.ru
	И.С. Батулин ²	baturin965@mail.ru

¹ Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, Ижевск, 426069, Россия

² АО «Сарапульский радиозавод», Сарапул, 427960, Россия

Разработана компьютерная модель спутникового канала связи с учетом влияния доплеровского сдвига по частоте и стороннего спутника связи. Компьютерная модель построена в графической среде имитационного моделирования Simulink, которая входит в программный пакет MATLAB. В статье рассматривается имитационная модель спутникового канала связи с использованием сигнала MSK (Minimum Shift Keying). В ходе работы изучены и применены алгоритмы цифровой обработки сигналов при разработке компьютерной модели спутникового канала связи. По заданным параметрам принимаемого сигнала определены основные параметры цифрового демодулятора сигнала MSK, такие как частота повторения бита, частота дискретизации, минимальная разрядность аналого-цифрового преобразователя (АЦП), количество уровней квантования, частота среза цифрового фильтра-дифференциатора. В результате компьютерного моделирования спутникового канала связи было исследовано влияние отстройки по частоте сигнала MSK и уровня мешающего сигнала (стороннего спутника) на помехоустойчивость модема. По результатам моделирования получены графики зависимости вероятности ошибки приема бита от уровня мешающего сигнала и вероятности ошибки от отстройки по частоте. Разработанная компьютерная модель существенно расширяет круг задач, связанных с оперативной оценкой параметров электромагнитной совместимости (ЭМС) и радиоподавления в группировках подвижных РЭС.

Ключевые слова: имитационное моделирование, спутниковый радиоканал, MSK — Minimum Shift Keying, помехоустойчивость, MATLAB, Simulink

Введение. Активное использование спутниковых каналов для радиосвязи, радионавигации, телеуправления, дистанционного зондирования земли и решения других задач привело к тому, что помеховая обстановка существенно усложнилась. Кроме того, существенную роль играет так называемый космический мусор. Поэтому актуально на стадии проектирования устройств и систем космической связи исследование параметров проектируемых объектов при воздействии различных мешающих факторов как естественного, так и искусственного происхождения. В современных условиях такие исследования целесообразно проводить путем компьютерного моделирования. Различные аспекты компьютерного моделирова-

ния широко освещены в литературе [1–3]. С этой целью была разработана модель спутникового канала связи, которая учитывает стороннее влияние на передачу сигнала, а также учитываются влияния отстройки по частоте, уровень передаваемого сигнала и фазовый сдвиг сигнала. При этом стороннее воздействие на спутниковый канал связи имитируется с помощью блоков, входящих в пакет Simulink.

Методика моделирования спутникового канала. Предлагаемая модель ориентирована на каналы связи, которые используются в низкоорбитальных спутниковых системах типа отечественной системы «Гонец». В этих системах одним из основных видов модуляции является частотная модуляция минимального фазового сдвига MSK (Minimum Shift Keying). Этот сигнал является типичным для сигналов класса частотной модуляции с непрерывной фазой [4].

Для разработки компьютерной модели использована графическая среда имитационного моделирования Simulink, которая входит в программный пакет MATLAB. Это обусловлено тем, что Simulink является графической средой имитационного моделирования, позволяющей с помощью блок-диаграмм в виде направленных графов строить динамические модели, включая дискретные, непрерывные и гибридные, нелинейные и разрывные системы [5].

Для моделирования спутникового канала связи были определены следующие параметры: техническая скорость 19 200 бит/с; входной сигнал — квадратурный. Нестабильность частоты 10^{-6} от частоты сигнала. Вид модуляции — MSK. Диапазон изменения входного сигнала 60 дБ. Минимальное отношение сигнал/шум 10 дБ. Максимальная амплитуда входного сигнала 1 В. Тип сигнала — спутниковый, с удалением 1500 км. Частота работы 240 МГц.

В разрабатываемой имитационной модели спутникового канала связи учитывается влияние стороннего спутника и естественных помех.

Описание компьютерной модели. Передатчики стороннего и полезного спутника описываются следующими блоками: Random Integer Generator — генератор случайных чисел, создает случайный поток данных [6]. MSK Modulator Baseband — блок для формирования сигнала с модуляцией MSK (полезный сигнал). Rectangular QAM Modulator Baseband — блок для формирования сигнала с модуляцией QAM-16 (мешающий сигнал). Блок Zero-Order Hold выполняет дискретизацию входного сигнала по времени. Блок dB Gain задает уровень сигнала в дБ · В.

Блок-схема представлена на рис. 1.

Блоки, имитирующие канал передачи:

Doppler and Phase Error — блок расстройки фазы/частоты, моделирует доплеровские искажения фазы и частоты сигнала;

Satellite Receiver System Temp — добавляет белый гауссовский шум, соответствующий эффективной системной температуре получателя;

I/Q Imbalance — вводит нестабильность постоянного смещения из-за неустойчивости амплитуды или фазы к сигналу [7];

Downlink Path — рассчитывает по заданным параметрам (высота орбиты, рабочая частота) потери сигнала в свободном пространстве;

Sum — суммирует входные сигналы.

Phase Noise — вносит фазовый шум;

Блок dB Gain2 задает уровень сигнала в дБ · В (децибелов на 1 В).

Блок-схема представлена на рис. 2.

Для описания модели цифрового демодулятора сигнала MSK используются следующие модули:

Doppler and Phase Error — блок моделирования доплеровских искажений фазы и частоты сигнала;

Complex to Real Image — блок вычисления действительной и мнимой части комплексного числа;

Quantizer — блок обеспечения квантования входного сигнала с одинаковым шагом по уровню;

Digital Filter Design — отдельная модифицированная библиотека для создания цифровых фильтров с заданными характеристиками;

Pulse Generator — блок формирования прямоугольных импульсов;

Compare To Constant — сравнение с константой;

Data Type Conversion — блок преобразования сигнала логического типа к числовому;

Error Rate Calculation — используется для сравнения передаваемых и принимаемых данных, расчета числа символьных ошибок. При необходимости данный блок может быть настроен для автоматической остановки процесса моделирования при достижении заданного числа ошибок передачи информации;

Display — отображает значение сигнала в виде числа.

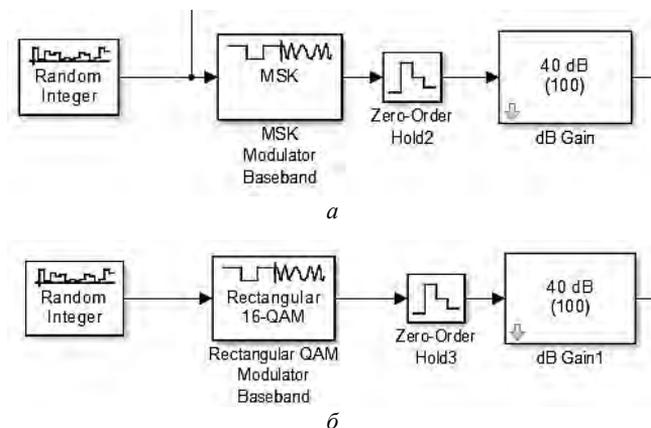


Рис. 1. Блок-схема формирования сигнала MSK (а — полезный сигнал) и сигнала QAM-16 (б — сторонний сигнал)

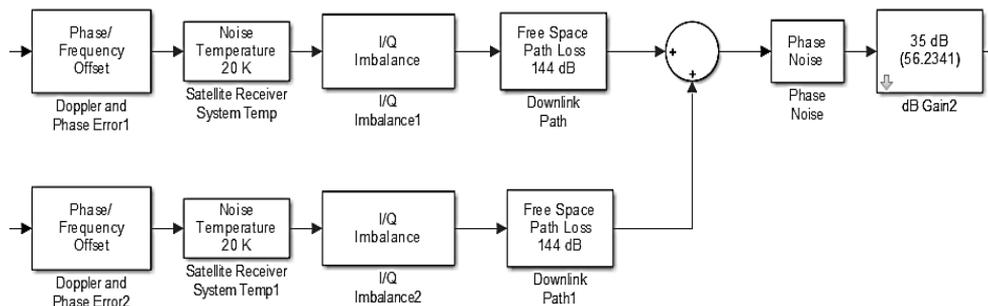


Рис. 2. Блок-схема спутникового канала связи

На рис. 3 представлена модель цифрового демодулятора сигнала MSK.

Оценка влияния доплеровского сдвига частоты на помехоустойчивость демодуляции MSK сигнала была проведена следующим образом. Процесс моделирования начинается с нажатия кнопки Run. Сигнал с блока Random Integer Generator поступает на блок MSK Modulator Baseband, который осуществляет модуляцию сигнала с выхода блока Random Integer Generator. С помощью блока Zero-Order Hold осуществляется дискретизация сигнала MSK. Блок фиксирует значение входного сигнала в начале интервала дискретизации и поддерживает на выходе это значение до окончания интервала дискретизации [8]. С выхода блока Zero-Order Hold дискретизированный сигнал MSK поступает на вход блока dB Gain. Потом сигнал поступает на блок Doppler and Phase Error. Данный блок моделирует доплеровские искажения фазы и частоты сигнала. Далее сигнал поступает на вход блока Satellite Receiver System Temp.

Пример задания исходных данных для моделирования приведен на рис. 4.

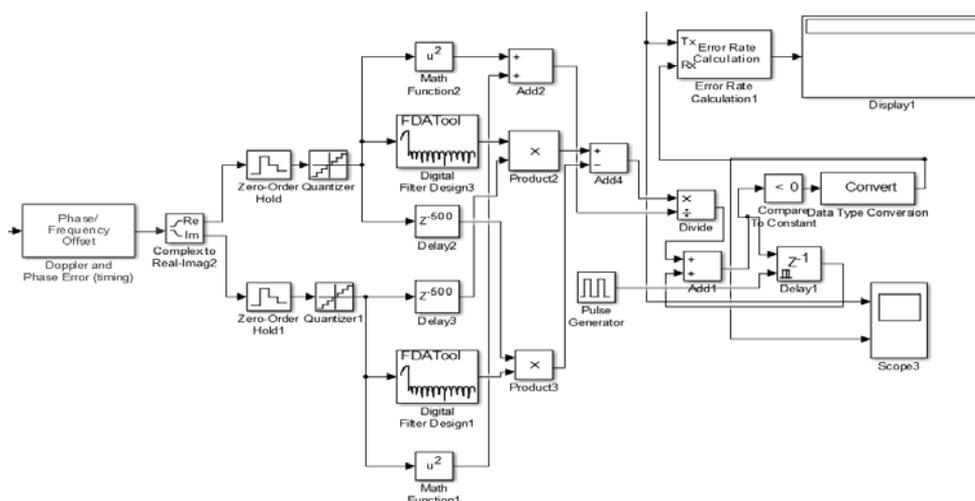


Рис. 3. Блок-схема цифрового демодулятора сигнала MSK

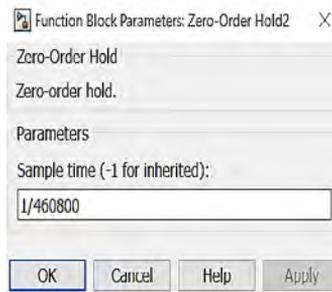
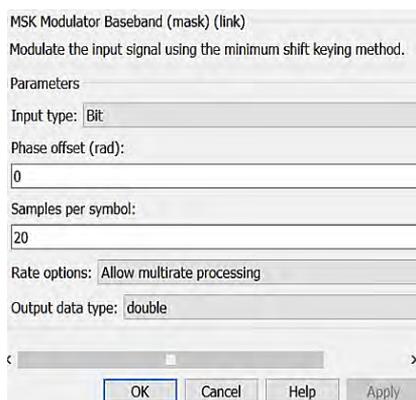


Рис. 4. Пример заданных параметров блока MSK Modulator Baseband и Zero-Order Hold

Блок Satellite Receiver System Temp добавляет белый гауссов шум, соответствующий эффективной системной температуре получателя. Для этого необходимо установить параметры модуля Specification method (спецификация метода) путем выбора пункта Noise temperature (шумовая температура) и установлением значения 20 К.

Выход блока Satellite Receiver System Temp — сигнал подключен к входу блока I/Q Imbalance. Блок I/Q Imbalance вводит нестабильность постоянного смещения из-за неустойчивости амплитуды или фазы к сигналу. Далее сигнал поступает на вход блока Downlink Path. В данном блоке учитываются по заданным параметрам (высота орбиты, рабочая частота) потери сигнала в свободном пространстве. Потом сигнал поступает на вход блока PhaseNoise.

Определение основных параметров цифрового демодулятора MSK-сигнала. Сигнал поступает на вход блока dB Gain2, где происходит усиление принимаемого сигнала. Значение усиления составляет 35 дБ · В. Усиленный сигнал поступает на вход блока Dopplerand Phase Error (timing). Блок предназначен для учета сдвига передаваемого по радиозфиру сигнала по частоте (синхронизация приемника с передатчиком) [9, 10]. Далее сигнал поступает на блок Complex to Real-Imag (выделяет реальную и комплексную части сигнала). В данном блоке выбираем тип сигнала (Real — действительная часть; Image — мнимая часть). При этом усиленный сигнал сначала поступает на блок дискретизации (Zero-Order Hold), где производится его дальнейшая дискретизация. Сигнал после дискретизации квантуется в блоке Quantizer. Блоки Zero-Order Hold и Quantizer имитируют работу аналого-цифрового преобразователя (АЦП) [11].

Одним из основных устройств, входящих в цифровой демодулятор MSK сигнала, является АЦП. Разрядность АЦП составляет 12 бит. Тогда количество уровней квантования будет равно $2^{12} = 4096$. Полученное значение уровней квантования указывается в блоке Quantizer в строке Quantizationinterval:1/4096.

После АЦП сигнал подвергается выделению фазы и огибающей. В качестве дифференцирующего звена использовался фильтр-дифференциатор. Цифровой фильтр-дифференциатор должен иметь необходимый наклон АЧХ в рабочей полосе частот. Для нашего примера максимальная частота (частота среза фильтра) определяется как $F_{\text{среза}} \geq \alpha F_{\text{мод}} = 1,2 \cdot 19\,200 = 23\,040$ Гц. С выхода интегратора сигнал идет на логическую схему сравнения с 0, получаем битовую последовательность (информационная посылка).

Влияние отстройки по частоте на помехоустойчивость модема. В результате исследования проведена оценка вероятности битовой ошибки в зависимости от отстройки по частоте. При этом влияние стороннего источника (источник помех с модуляцией QAM-16) не учитывалось. В блоке dB Gain задается значение уровня сигнала, передаваемого с помощью спутника, равного 40 дБ · В, что соответствует 200 Вт.

В табл. 1 приведены результаты исследования вероятности битовой ошибки от отстройки по частоте.

На рис. 5 представлен график зависимости вероятности битовой ошибки от отстройки по частоте.

По результатам исследования зависимости вероятности битовой ошибки от отстройки по частоте видим, что при увеличении значения отстройки по частоте вероятность битовой ошибки возрастает. Например, при значении отстройки по частоте 2,5 кГц вероятность битовой ошибки составляет $3,574 \cdot 10^{-2}$, при частоте 4 кГц вероятность битовой ошибки составляет $1,331 \cdot 10^{-1}$.

Таблица 1

Результаты исследования битовой ошибки от отстройки по частоте

Отстройка по частоте, кГц	2	2,5	3	3,5	4	4,5
BER	0	$3,574 \cdot 10^{-2}$	$5,099 \cdot 10^{-2}$	$9,239 \cdot 10^{-2}$	$1,331 \cdot 10^{-1}$	$1,712 \cdot 10^{-1}$
Отстройка по частоте, кГц	5	5,5	6	6,5	7	7,5
BER	$2,124 \cdot 10^{-1}$	$2,395 \cdot 10^{-1}$	$2,502 \cdot 10^{-1}$	$2,983 \cdot 10^{-1}$	$3,425 \cdot 10^{-1}$	$3,745 \cdot 10^{-1}$



Рис. 5. График возрастания вероятности битовой ошибки от увеличения отстройки по частоте

Оценка воздействия уровня сигнала мешающего спутника на достоверность принятой информации. При моделировании сделано предположение, что в полосе исследуемого канала связи имеется источник помех с модуляцией QAM-16. Пусть это сигнал стороннего мешающего спутника. Уровень сигнала MSK составляет 40 дБ · В (задаются в блоке dB Gain) в процессе моделирования не изменяется. При исследовании вероятности ошибки приема бита от уровня сигнала мешающего спутника изменяли уровень мешающего сигнала блока dB Gain1. В нем задается уровень сигнала в дБВ в диапазоне 10...55 дБ · В с шагом 5 дБ · В.

В табл. 2 приведены результаты исследования вероятности ошибки приема бита от уровня сигнала мешающего спутника.

На рис. 6 представлен график зависимости вероятности ошибки приема бита от уровня сигнала мешающего спутника.

При исследовании зависимости вероятности ошибки приема бита от уровня сигнала мешающего спутника видим, что с увеличением уровня мешающего сигнала вероятность битовой ошибки возрастает. При значении уровня сигнала QAM-16 15 дБ · В вероятность битовой ошибки составляет $3,125 \cdot 10^{-4}$, при 30 дБ · В — $5,161 \cdot 10^{-2}$.

Таблица 2

Результаты исследования вероятности ошибки приема бита от уровня сигнала мешающего спутника

Уровень сигнала QAM-16, дБ · В	10	15	20	25	30
BER	0	$3,125 \cdot 10^{-4}$	$1,406 \cdot 10^{-3}$	$2,917 \cdot 10^{-3}$	$5,161 \cdot 10^{-2}$
Уровень сигнала QAM-16, дБ · В	35	40	45	50	55
BER	$1,299 \cdot 10^{-1}$	$3,019 \cdot 10^{-1}$	$4,199 \cdot 10^{-1}$	$4,811 \cdot 10^{-1}$	$4,95 \cdot 10^{-1}$



Рис. 6. График возрастания вероятности ошибки приема бита от увеличения уровня сигнала, передаваемого с помощью стороннего спутника

Вывод. В ходе работы была разработана модель спутникового канала связи, которая учитывает стороннее влияние на передачу сигнала, а также учитываются влияния отстройки по частоте, уровень передаваемого сигнала и фазовый сдвиг сигнала.

При моделировании спутникового канала связи были учтены влияния отстройки по частоте и зависимость битовой ошибки от уровня мешающего сигнала спутника.

В результате компьютерного моделирования спутникового канала связи получены следующие результаты. По результатам исследования зависимости вероятности битовой ошибки от отстройки по частоте видим, что при увеличении значения отстройки по частоте вероятность битовой ошибки возрастает. Например, при значении отстройки по частоте 2,5 кГц вероятность битовой ошибки составляет $3,574 \cdot 10^{-2}$, при частоте 4 кГц вероятность битовой ошибки составляет $1,331 \cdot 10^{-1}$. При исследовании зависимости вероятности ошибки приема бита от уровня сигнала мешающего спутника видим, что с увеличением уровня мешающего сигнала вероятность битовой ошибки возрастает. При исследовании зависимости вероятности ошибки приема бита от уровня сигнала мешающего спутника видим, что с увеличением уровня мешающего сигнала вероятность битовой ошибки возрастает. При значении уровня сигнала

QAM-16 15 дБ · В вероятность битовой ошибки составляет $3,125 \cdot 10^{-4}$, при 30 дБ · В — $5,161 \cdot 10^{-2}$. По полученным значениям построены графики зависимости вероятности битовой ошибки от отстройки по частоте, а также график зависимости вероятности ошибки приема бита от уровня сигнала мешающего спутника. Полученные результаты компьютерного моделирования не противоречат современному пониманию сути исследуемых вопросов, это говорит о том, что разработанная модель спутникового канала связи является корректной.

Разработанная компьютерная модель существенно расширяет круг задач, связанных с оперативной оценкой параметров электромагнитной совместимости (ЭМС) и радиоподавления в группировках подвижных РЭС. Включение в состав моделируемой группировки реальных РЭС позволит осуществлять прогнозирование критических ситуаций и принимать упреждающие меры для их предотвращения. Таким образом, компьютерная модель спутникового канала связи с учетом влияния стороннего спутника, разработанная в графической среде имитационного моделирования Simulink, который входит в программный пакет MATLAB, позволяет оперативно решать сложные задачи ЭМС и радиоподавления. При этом учитываются:

- современные модели трактов формирования и обработки сигналов;
- частотные характеристики приемников и передающих трактов;
- мощности передатчиков, чувствительности приемников;
- характеристики затухания радиотрасс;
- траектории и скорости движения РЭС.

Исследование выполнено в рамках проекта №11.04.01/18КАН.

Литература

- [1] Баскаков С.И. *Радиотехнические цепи и сигналы*. Москва, Высшая школа, 2008, 408 с.
- [2] Громаков Ю.А. *Стандарты и системы подвижной радиосвязи*. Москва, Эко-Трендз, 1997, 53 с.
- [3] Галкин В.А. *Мобильные системы радиосвязи: учеб. пособие*. Москва, МИЭТ, 2003, 124 с.
- [4] Коробова А.Д. Моделирование электромагнитной обстановки в группировках РЭС в трехмерной области. *Теория и техника радиосвязи*, 2008, вып. 3, с. 71–78.
- [5] Коробова А.Д., Хромых Е.А. Моделирование ЭМО-группировок подвижных РЭС с учетом трактов формирования и обработки сигналов. *Теория и техника радиосвязи*, 2008, вып. 3, с. 64–65.
- [6] Xiong Fuqin. *Digital Modulation Techniques*. Second Edition. ARTECH HOUSE, INC. Canton Street Norwood. 2006. 207 p. 7. Simulink. URL: <https://matlab.ru/products/Simulink> (дата обращения: 27.12.2018).
- [8] Бояринов М.А., Зыкин А.А. Методика моделирования радиолинии, использующей сигналы с ППРЧ в условиях воздействия преднамеренных помех. *Сб. матер. XIII Международ. науч.-техн. конф. «Приборостроение в XXI веке — 2017. Интеграция науки, образования и производства»*. Ижевск, Изд-во ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, 2018, с. 525–532.
- [9] Система численно-математического моделирования MATLAB. Math — блоки математических операций. URL: <http://bourabai.ru/cm/simulink096.htm> (дата обращения: 28.12.2018).
- [10] Библиотека MATLAB 6.1 Simulink. 2019. URL: <https://vunivere.ru/work74489> (дата обращения: 03.01.2019).
- [11] Cariolaro G.L., Trouca G.P. Spectra of Block Coded Digital Signals. *IEEE Trans. Commun*, 1974, vol. 22, no. 10, pp. 1555–1564.
- [12] Gudz S.M., Shurenok V.A., Rodionov A.V. Zhitomir Military S.P. Mathematical model of satellite communication systems' radiomonitoring means distribution. *Korolyov Institute of State Telecommunication University*, 2013. no. 4, pp. 119–123.

- [13] Хворенков В. В. Батурин И. С. Савельев А. В. Автоматизированное рабочее место главного конструктора радиоэлектронных средств на основе теории многоагентных систем. *Вестник ИжГТУ*, 2017, т. 20, № 4, с. 77–78.

Сведения об авторах:

Атыева Инна Романовна — магистрант ФГБОУ ВО «ИжГТУ им. М.Т. Калашникова», Ижевск, Россия

Зыкин Алексей Александрович — магистрант ФГБОУ ВО «ИжГТУ им. М.Т. Калашникова», Ижевск, Россия, SPIN-code: 7683-8657

Хворенков Владимир Викторович — д-р техн. наук, профессор, профессор ФГБОУ ВО «ИжГТУ им. М.Т. Калашникова», Ижевск, Россия, SPIN-code: 4487-1244, Scopus Author ID: 57190177214

Копысов Андрей Николаевич — канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «ИжГТУ им. М.Т. Калашникова», Ижевск, Россия, SPIN-code: 1318-2960, Scopus Author ID: 56512137700

Батурин Иван Сергеевич — заместитель главного конструктора по НИОКР ОАО «Сарапульский радиозвод», Сарапул, Россия

Recovery the Simulink Graphical Environment to Create a Simulation Model of a Satellite Communication Channel

© I.R. Atyeva¹

A.A.Zykin¹

V.V. Khvorenkov¹

A.N. Kopysov¹

I.S. Baturin²

atyeva1995@mail.ru

soyp2013@yandex.ru

hvv@istu.ru

kan_kan@istu.ru

baturin965@mail.ru

¹ Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov, Izhevsk, 426069, Russia

² Sarapul Radio Factory, Sarapul, 427960, Russia

The article developed a computer model of a satellite communication channel, taking into account the influence of the Doppler frequency shift and a third-party communication satellite. The computer model was developed in the Simulink graphical simulation environment, which is included in the MATLAB software package. The article discusses a simulation model of a satellite communication channel using the MSK (Minimum Shift Keying) signal. In the course of the work, digital signal processing algorithms were studied and applied when developing a computer model of a satellite communication channel. The specified parameters of the received signal are determined by the basic parameters of the digital demodulator of the MSK signal, such as: repetition frequency, sampling frequency, minimum analog-digital converter bit depth, number of quantization levels, cutoff frequency of the digital — differentiator. As a result of computer simulation of a satellite communication channel, the effect of the frequency offset of the MSK signal and the level of an interfering signal (third-party satellite) on the modem interference immunity was studied, in the absence of the influence of a third-party communication satellite. According to the simulation results, graphs of the probability of a bit reception error on the level of an interfering signal and the probability of error on frequency offset are obtained. The developed computer model significantly expands the range of tasks related to the operational evaluation of the

parameters of electromagnetic compatibility (EMC) and radio suppression in the groups of mobile radio-electronic systems.

Keywords: simulation modeling, satellite radio channel, MSK — Minimum Shift Keying, jamming, MATLAB, Simulink

This investigations was funded to the research project No. 11.04.01/18KAH.

References

- [1] Baskakov S.I. *Radiotekhnicheskie tsep i isignaly* [Radio circuits and signals]. Moscow, Vysshayashkola Publ., 2008, 408 p. (in Russ.).
- [2] Gromakov Yu.A. *Standarty i sistemy podvizhnoi radiosvyazi* [Standards and mobile radio systems]. Moscow, Eko-Trendz Publ., 1997, 53 p. (in Russ.).
- [3] Galkin V.A. *Mobil'nye sistemy radiosvyazi* [Mobile radio systems]. Moscow, MIET, 2003, 124 p. (in Russ.).
- [4] Korobova A.D. [Modeling of the electromagnetic environment in the RES constellations in the three-dimensional region]. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi*, 2008, no. 3, pp. 71–78 (in Russ.).
- [5] Korobova A.D., Khromykh E.A. [Simulating the electromagnetic environment for radio-electronic means groups taking into consideration waveform shaping and processing paths]. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi*, 2008, no. 3, pp. 64–65 (in Russ.).
- [6] Xiong Fuqin. *Digital Modulation Techniques*. Second Edition. ARTECH HOUSE, INC. Canton Street Norwood. 2006. 207 p.
- [7] Simulink. URL: <https://matlab.ru/products/Simulink> (дата обращения: 27.12.2018).
- [8] Boyarshinov M.A., Zykin A.A. [Modeling of the Operation of Radio Countermeasures Devices and Their Impact on the Information Transfer Process]. *Sb. materialov XIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. "Priborostroenie v XXI veke — 2017. Integratsiya nauki, obrazovaniya i proizvodstva"* [Proc. XIII International scientific and technical conf. "Instrument making in the XXI century — 2017. Integration of science, education and production"]. Izhevsk, IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova Publ., 2018, pp. 525-532 (in Russ.).
- [9] *MATLAB system of numerical and mathematical modeling. Math — blocks of mathematical operations*. 2001. Available at: <http://bourabai.ru/cm/simulink096.htm> (accessed 28.12.2018).
- [10] Library MATLAB 6.1 Simulink. 2019. Available at: <https://vunivere.ru/work74489> (accessed 03.01.2019).
- [11] Cariolaro G.L., Trouca G.P. Spectra of Block Coded Digital Signals. *IEEE Trans. Commun.*, 1974, vol. 22, no. 10, pp. 1555–1564.
- [12] Gudzh S.M., Shurenok V.A., Rodionov A.V., Zhitomir Military S.P. Mathematical model of satellite communication systems' radiomonitoring means distribution. *Korolyov Institute of State Telecommunication University*, 2013, no. 4, pp. 119–123.
- [13] Khvorenkov V.V., Baturin I.S., Saveliev A.V. [Engineering Workstation for the Chief Designer of Radio Electronic Means Based on the Theory of Multi-Agent Systems]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2017, T. 20, no. 4, pp. 77–81 (in Russ.).

Information about authors:

Atyeva I.R. — Master's Degree Student, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

Zykin A.A. — Master's Degree Student, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia, SPIN-code: 7683-8657

Khvorenkov V.V. — DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia, SPIN-code: 4487-1244, Scopus Author ID: 57190177214

Kopysov A.N. — PhD, assistant professor Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia, SPIN-code: 1318-2960, Scopus Author ID: 56512137700

Baturin I.S. — Deputy chief designer of R&D, JSC “:SRZ”, Sarapul, Russia

УДК

Использование MATLAB для валидации и верификации встраиваемого программного обеспечения

© Н.В. Богославский¹
В.М. Понятский²
В.Г. Федорищева²
П.В. Рословец¹

tech@exponenta.ru
granat@home.tula.net
granat@home.tula.net
tech@exponenta.ru

¹Центр инженерных технологий и моделирования «Экспонента», Москва, 115088, Россия

²Тульский государственный университет, Тула, 3000012, Россия

Рассмотрена технология проверки разрабатываемой системы управления на ранней стадии проектирования с использованием инструментов MathWorks. Технология поддерживает реализацию подхода «от модели к программе» и включает процедуры создания связи модели с документом требований; проверку модели на соответствие стандартам моделирования; функциональное тестирование модели; анализ на покрытие модели тестами; проверку на ошибки проектирования; доказательство свойств модели и автоматическую генерацию тестов для 100%-ого покрытия модели.

Ключевые слова: верификация, валидация, трассируемость, функциональное тестирование, анализ на покрытие

По мере удешевления процессорных ресурсов и памяти встраиваемое программное обеспечение (ПО), применяемое повсеместно, значительно усложняется. Поэтому аспекты, связанные с разработкой систем повышенной надежности, начинают играть все более важную роль. Одно из решений заключается в повышении эффективности разработок путем использования программных инструментов для проектирования, генерации и отладки кода.

Продукты MathWorks обеспечивают единую среду для разработки встраиваемого ПО, начиная от формирования требований и заканчивая созданием объектного кода и файлов прошивки микроконтроллера. Причем на всех этапах жизненного цикла проводятся тестирование и верификация проектируемого ПО: требования (спецификация), модель (выполняемая спецификация), код, объектный код (рис. 1).

Верификация и валидация модели направлены на выявление ошибок в разрабатываемом ПО на ранних этапах проектирования. Устранение ошибок на этом этапе менее затратно, чем на этапе реализации разработанного ПО на аппаратной платформе. Валидация дает ответ на вопрос, правильно ли мы сделали модель, т. е. соответствует ли созданная модель предъявляемым к ней требованиям. Верификация дает ответ на вопрос, сделали ли мы правильную модель, т. е. выполняет ли модель свои функции.

В продуктах MathWorks реализована поддержка двух стандартных подходов для верификации встраиваемого ПО: верификация от модели к программе и обнаружение ошибок при выполнении в исходном коде.

При подходе «от модели к программе» полностью верифицированная модель встраиваемой программы используется в качестве эталона для сравнения ее поведе-

ния с работой написанного вручную или автоматически сгенерированного из модели программного обеспечения. При использовании второго подхода с помощью продуктов MathWorks к написанному вручную или автоматически сгенерированному коду применяются формальные методы для проверки на наличие ошибок выполнения. Эти процедуры верификации особенно важны для встраиваемых систем с высокой степенью интеграции.

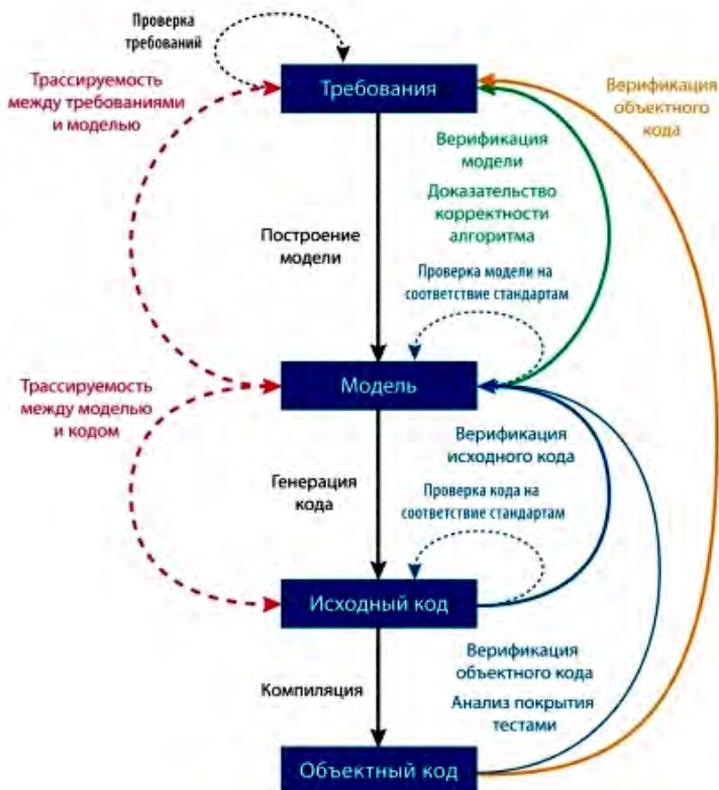


Рис. 1. Рабочий процесс разработки ПО с помощью инструментов MathWorks

Рассмотрим первый подход к верификации на примере разработки встраиваемого ПО блока управления следящим приводом оптико-электронной системы.

Технология валидации и верификации модели с помощью инструментов MathWorks включает следующие процедуры:

- создание элементов модели и связей с требованиями (трассируемость);
- проверка на соответствие стандартам моделирования;
- функциональное тестирование модели;
- анализ на покрытие модели тестами;
- проверка на ошибки проектирования;
- доказательство свойств модели;
- автоматическая генерация тестов.

Создание связи элементов модели с требованиями. Simulink Verification and Validation — это пакет расширения Simulink для проведения полного комплекса тестирований и проверок систем с учетом технических требований. Требования к модели формируются на основе технического задания к разрабатываемой системе и не должны быть противоречивыми.

Для управления требованиями в Simulink Verification and Validation есть инструмент Simulink Requirements. Этот инструмент способен импортировать требования из Word, Excel или устанавливать связь с системами электронного документооборота. Simulink Requirements позволяет связать требования с блоками модели Simulink, всей моделью или кодом, сгенерированным из модели.

После установки связи элементов модели с требованиями (рис. 2), можно проанализировать требования на трассируемость, то есть отслеживаемость в модели. Это возможно благодаря навигации из документа требований в модель и обратно (рис. 3).

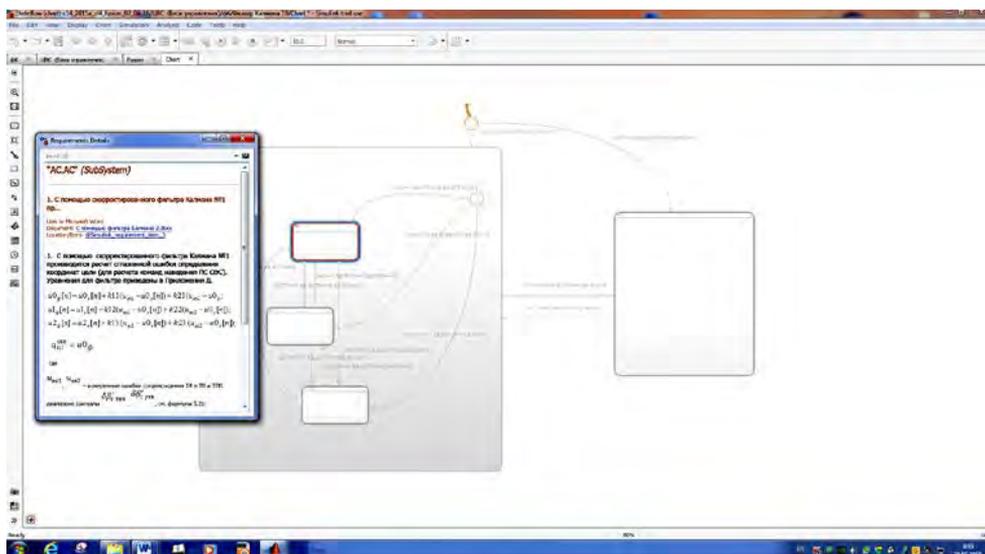


Рис. 2. Детализация связи блока модели с документом требований

Трассируемость требований гарантирует их выполнение, а значит, и выполнение заявленных функций системы. Трассируемость требований к элементам модели гарантирует трассируемость к коду, сгенерированному из модели, а также к тестам, разработанным на основе требований.

Проверка на соответствие стандартам моделирования. Для повышения качества модели необходимо провести проверку на соответствие стандартам моделирования, например на стандарт MathWorks Automotive Advisory Board (MAAB). MAAB является компанией, которая разрабатывает рекомендации по использованию и усовершенствованию средств управления, моделирования и генерации кода MathWorks, включая Simulink, Stateflow и Embedded Coder.

Инструкции стандарта МААВ важны для успеха проекта и работы в команде — и внутренней, и при сотрудничестве с партнерами или субподрядчиками. Соблюдение инструкций стандарта МААВ является ключевой предпосылкой к достижению:

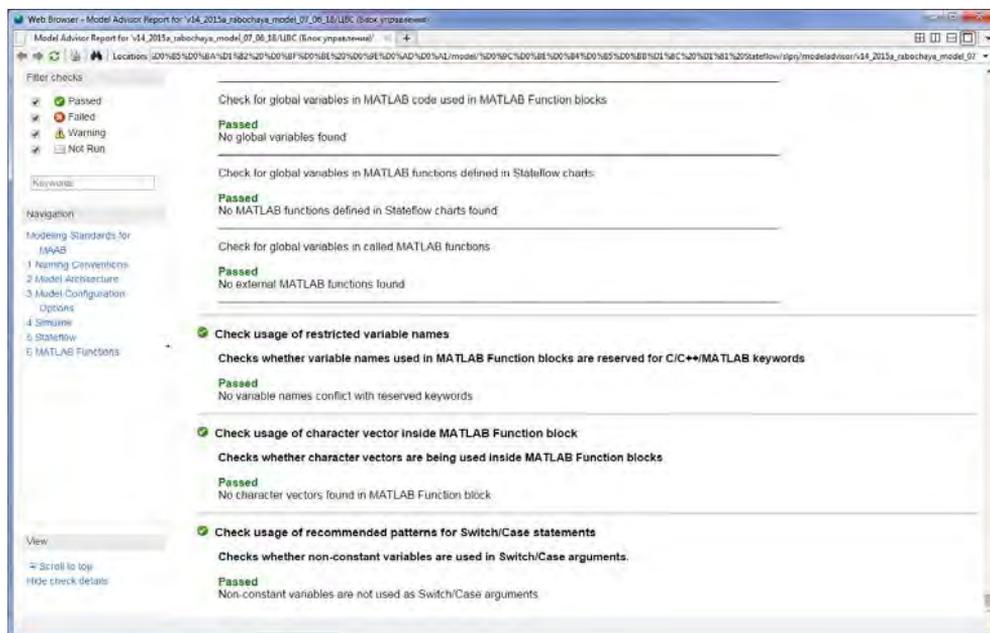


Рис. 4. Фрагмент отчета о проверке на стандарт моделирования МААВ блока управления модели ОЭС

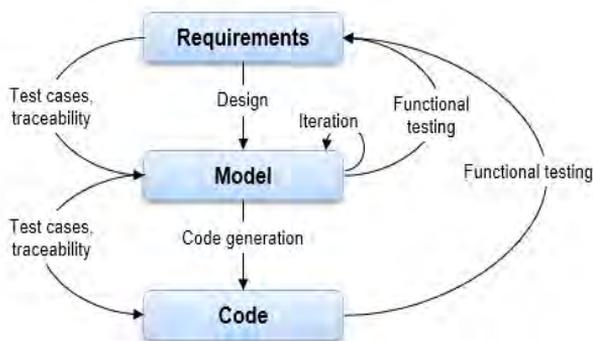


Рис. 5. Функциональное тестирование на этапах создания ПО

Тестовый сценарий состоит из входов модели, ожидаемых результатов выполнения модели и критериев оценки.

Для проведения функционального тестирования используется инструмент Simulink Test. Simulink Test содержит инструменты для разработки тестов, управления тестами и выполнения тестов. Simulink Test включает блок Test sequence, который позволяет создавать сложные тестовые последовательности и оценки выполнения тестов, а также менеджера по тесту Test Manager, который позволяет управлять выполнением тестов. В Test Manager есть несколько типов шаблонов тестового сценария.

Один из примеров выполнения функционального тестирования: тест Baseline. При выполнении этого теста выходные сигналы модели сравниваются с исходным набором сигналов (сравнение текущего результата моделирования с записанным результатом моделирования при номинальных значениях параметров модели). Сравнение текущего результата моделирования и baseline допускается в абсолютных или относительных допусках. Допуски задаются в разделе критериев тестового сценария. Применительно к модели ОЭС тест baseline можно использовать для оценки влияния разброса параметров модели на выходные характеристики.

На рис. 6 и 7 приведены результаты выполнения функционального теста baseline для оценки влияния разброса параметра NKU.

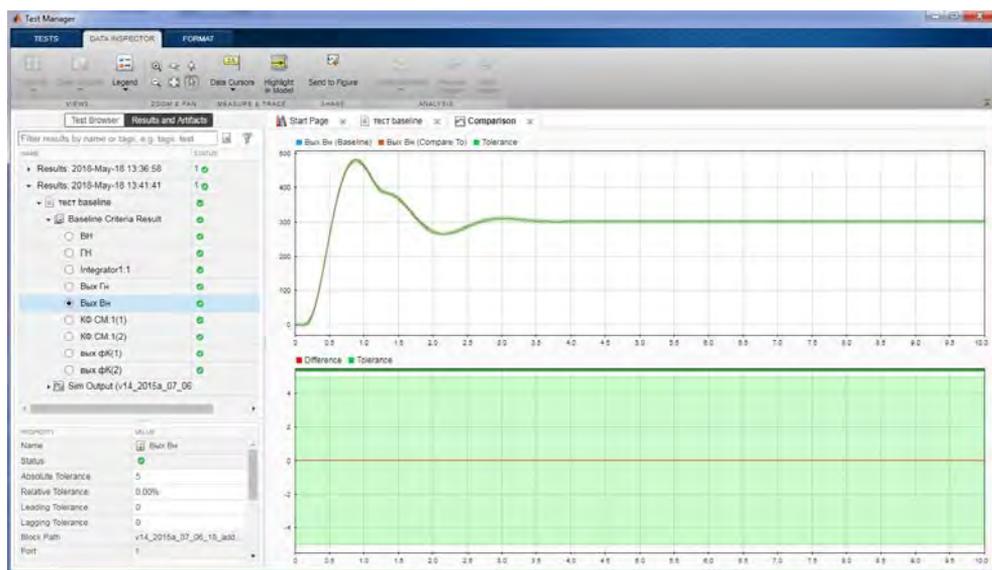


Рис. 6. Результаты выполнения функционального теста для канала ВН с номинальным значением константы NKU

Анализ покрытия модели тестами. Инструмент Simulink Coverage выполняет анализ покрытия модели и кода тестами и измеряет полноту тестирования в моделях и сгенерированном коде. Он применяет метрики, такие как выполнение (execution), решение (decision), состояние (condition), модифицированное покрытие состояния/решения (MCDC) и реляционное пограничное покрытие для оценки эффективности имитационного тестирования в моделях, программном обеспечении в режимах «программа в контуре» (SIL-тестирование) и «процессор в контуре» (PIL-тестирование). Можно использовать данные о покрытии для поиска пробелов в тестировании, отсутствующих требований или непредвиденных функциональных возможностей.

Simulink Coverage осуществляет сбор покрытия тестами при запуске симуляции модели, а также в режимах SIL и PIL.

Полнота покрытия тестами — важный параметр, показывающий, что компонент модели выполняет возложенные на него функции и полностью протестирован. Покрытые на 100 % элементы модели подкрашиваются в модели зеленым цветом (рис. 8).

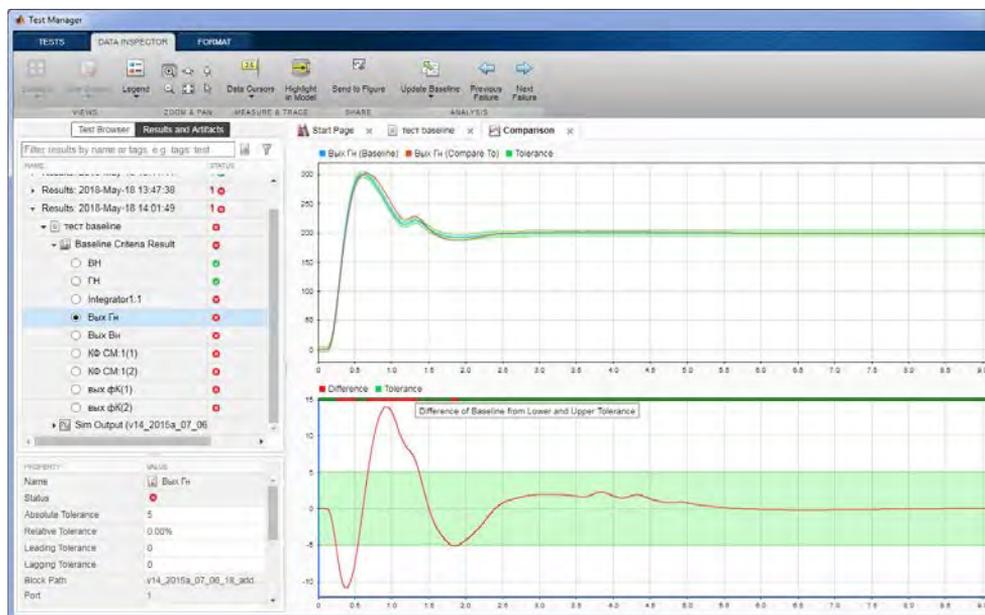


Рис. 7. Результаты выполнения функционального теста для канала ВН с максимальным отклонением константы NKU от номинального значения

Если анализ покрытия элементов модели тестами показал, что покрытие модели неполное, используется режим Generate Test инструмента Simulink Design Verifier для генерации тестов для 100%-ого покрытия.

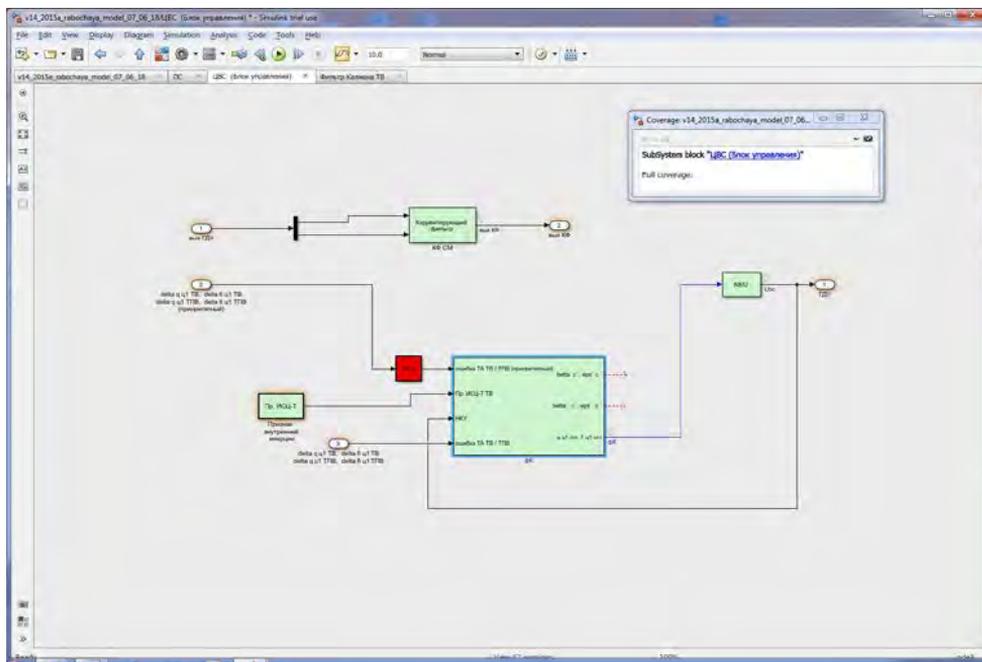
Проверка на ошибки проектирования. Simulink Design Verifier, используя методы формальной верификации, служит для нахождения ошибок проектирования, не требуя интенсивного тестирования или запуска симуляции модели. В отличие от традиционного тестирования, которое позволяет поместить систему в ограниченное число состояний, формальная верификация в идеальном случае охватывает все пространство состояний системы (модели). В действительности формальная верификация охватывает значительную область пространства состояний системы.

Ошибки проектирования:

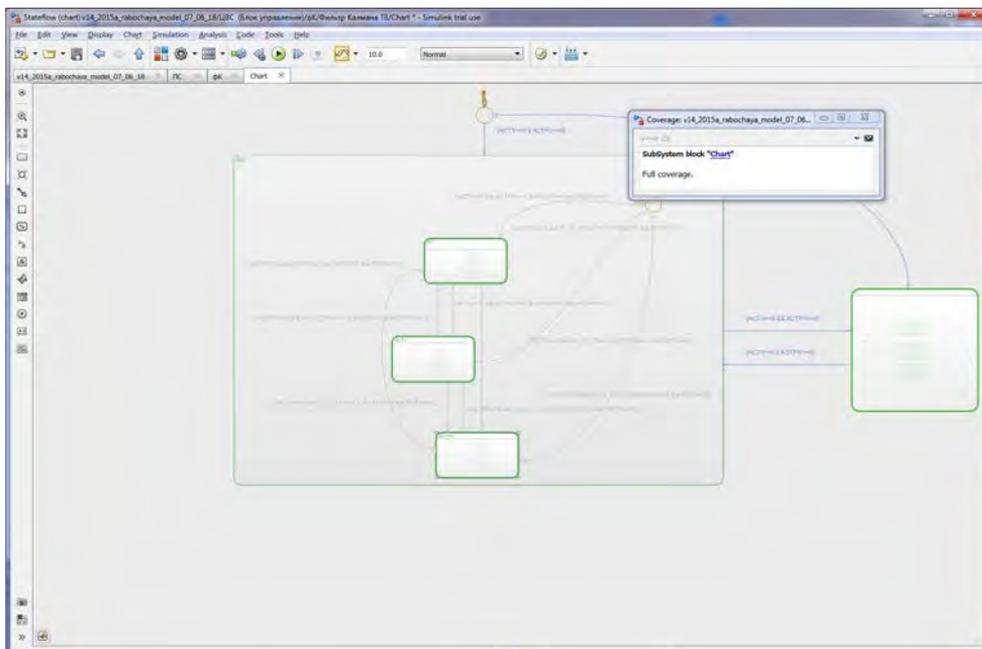
- мертвая логика;
- ошибки переполнения;
- деление на нуль;
- нарушение ограничений и требований к системе.

Simulink Design Verifier подсвечивает блоки, в которых доказано отсутствие ошибок, и блоки, в которых выявлены ошибки выполнения. Для блоков с ошибками генерируется тестовый вектор, который позволяет воспроизвести ошибку во время симуляции.

На рис. 9 показаны результаты проверки блока управления модели ОЭС на наличие мертвой логики: в диаграмме Stateflow обнаружен переход, в отношении которого доказана неактивность во время моделирования.



a



б

Рис. 8. Анализ на покрытие тестами блока управления модели ОЭС:
a — блоки модели верхнего уровня; *б* — блоки диаграммы Stateflow

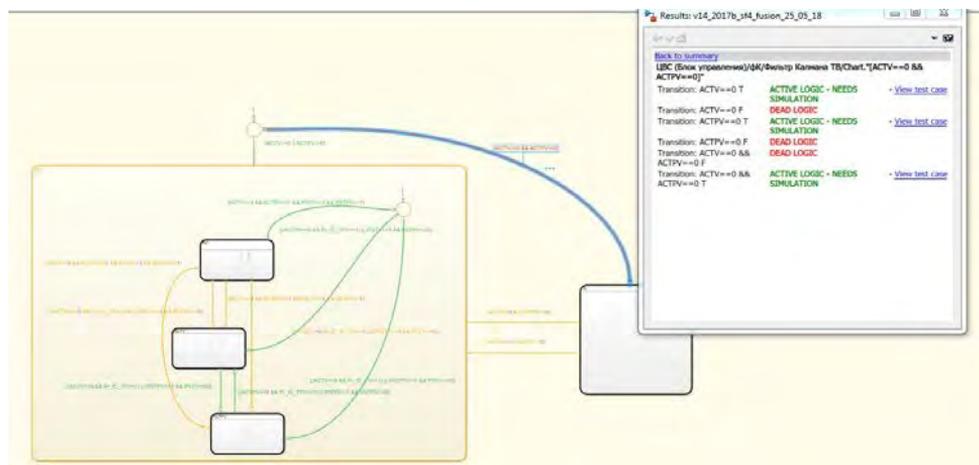


Рис. 9. Переход с мертвой логикой в блоке управления модели ОЭС

На рис. 10 показана модель обвязки, сгенерированная из модели ОЭС. Модель обвязки представляет собой источник входных сигналов и подсистему, в которой находится модель ОЭС. Тестовые векторы в блоке Signal Builder при моделировании подтверждают наличие неактивного перехода в диаграмме Stateflow.

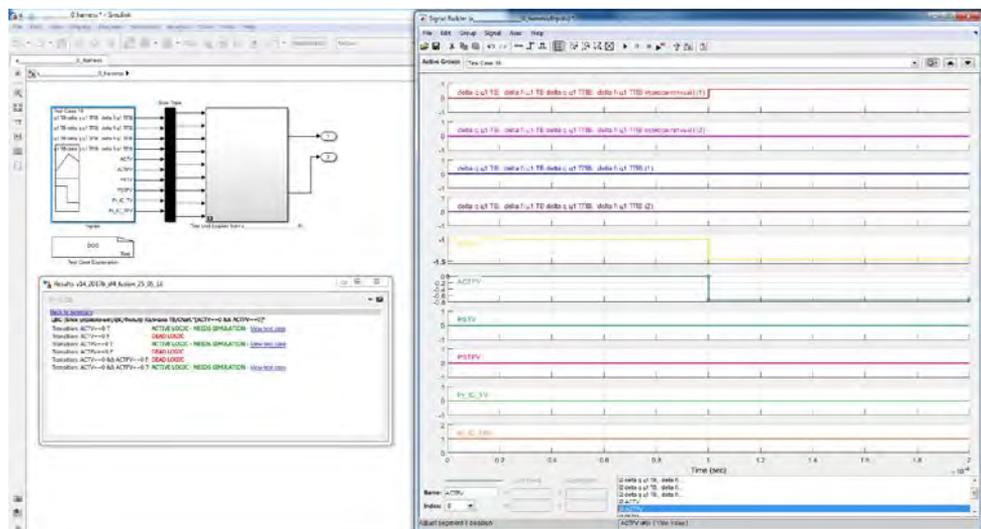


Рис. 10. Модель обвязки с сформированными тестовыми векторами, подтверждающими наличие мертвой логики в блоке управления модели ОЭС

Доказательство свойств системы. При работе в режиме доказательства свойств Simulink Design Verifier может определять нарушения утверждений (assertions), например, что указанный сигнал не выйдет за границы диапазона. Simulink Design Verifier проверяет, существуют ли какие-то сценарии, которые могут вызвать нару-

шение утверждения во время симуляции за число шагов, указанное в настройках анализа. В дополнение к утверждениям, доступным в Simulink, Simulink Design Verifier предлагает дополнительные блоки для задания ограничений для анализа, что позволяет тщательно анализировать поведение системы и искать ошибки проектирования до запуска симуляции. Утверждение, которое может нарушаться, подсвечивается красным цветом, и генерируется тестовый вектор, который вызывает нарушение этого утверждения.

На рис. 11 и 12 приведены результаты проверки утверждения, что значение сигнала внутри блока NKU не выйдет за пределы диапазона $[-1; 1]$.

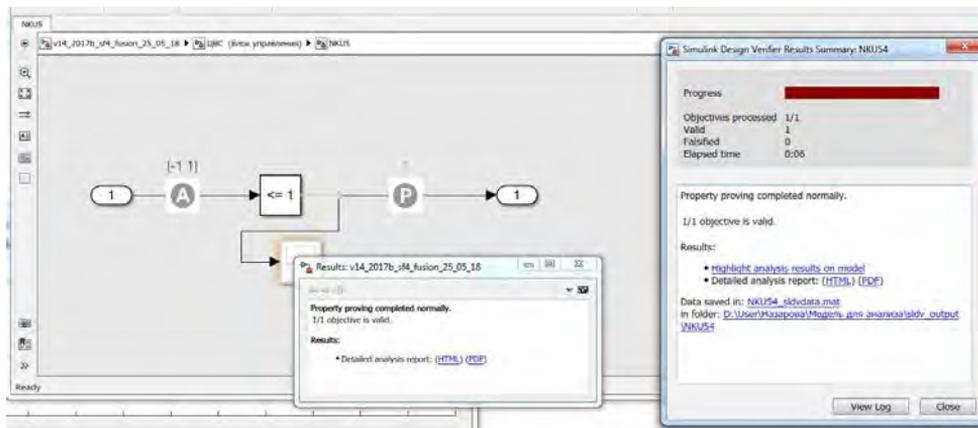


Рис. 11. Окно результатов после проверки

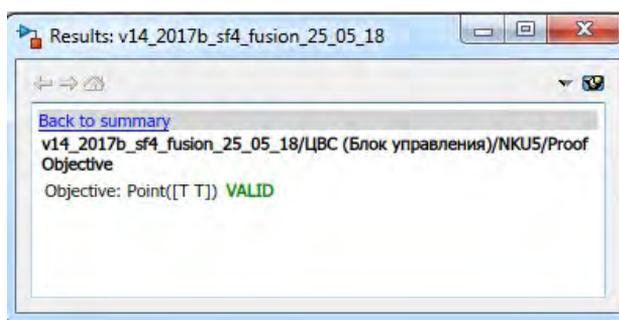


Рис. 12. Окно с результатом: блок прошел проверку

Автоматическая генерация тестов для 100%-ного покрытия. Генерация тестов для 100%-ного покрытия модели дополняет функциональные тесты, основанные на требованиях (созданные вручную или собранные во время симуляции всей системы). При таком подходе Simulink Design Verifier берет информацию о существующем покрытии модели и генерирует дополнительные тестовые векторы, которые выполняют все цели покрытия, не удовлетворенные во время тестирования на основании требований.

После этапа валидации и верификации, модель, прошедшая проверки, для которой подтверждено соответствие предъявляемым требованиям, соответствие стандарту моделирования, доказано отсутствие ошибок проектирования, проведено тестирование и обеспечено 100%-ное покрытие тестами, может быть передана для разработки программного кода, который в дальнейшем будет прошит на микропроцессорной системе и использован на реальном объекте управления.

Генерация С-кода из моделей Simulink для процессоров встроенных систем осуществляется с помощью пакета Embedded Coder [1]. Генерируемый С-код может быть универсальным или специализированным, настроенным под определенный тип процессора. Процесс генерации С-кода включает следующие процедуры [1]:

- выбор параметров решателя;
- выбор целевого файла;
- выбор аппаратной реализации;
- выбор опций оптимизации кода;
- выбор дополнительных опций;
- генерация С-кода.

Поддержка аппаратной реализации обеспечена либо фирмой MathWorks, либо фирмами-производителями микроконтроллеров. В последнем случае для генерации кода под определенный микроконтроллер необходимо установить дополнительное ПО. Например, для создания С-кода для процессоров семейства STM32F4-Discovery выбрать в браузере файл ert.tlc Embedded Coder (рис. 13), предварительно установив пакет поддержки STM32F4-Discovery. Это можно сделать из меню *Add-Ons* → *Get Hardware Support Packages* (рис. 14). Либо скачать библиотеки *Embedded Coder Support Package for STMicroelectronics Discovery Boards* и *Embedded Coder Support Package for ARM Cortex-M Processors* с официального сайта MathWorks и автономно установить. Затем выбрать аппаратную реализацию и сгенерировать С-код для блока управления (ЦВС) модели ОЭС, выбрав в контекстном меню блока *C/C++ Code* → *Build Subsystem*. На рис. 15 приведен фрагмент сгенерированного кода.

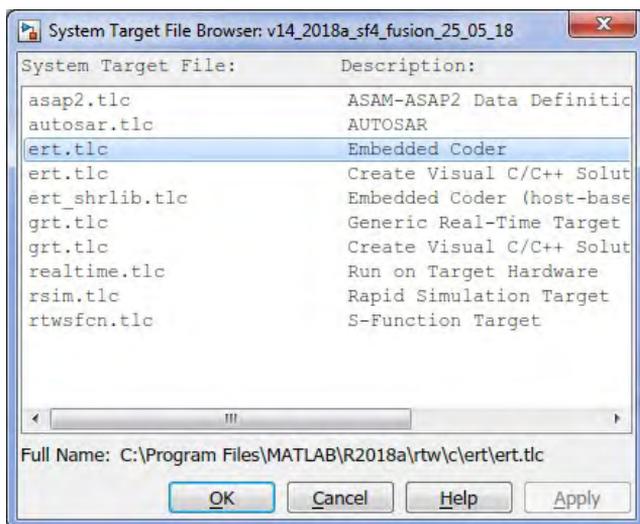


Рис. 13. Окно выбора целевого файла для генерации программного кода

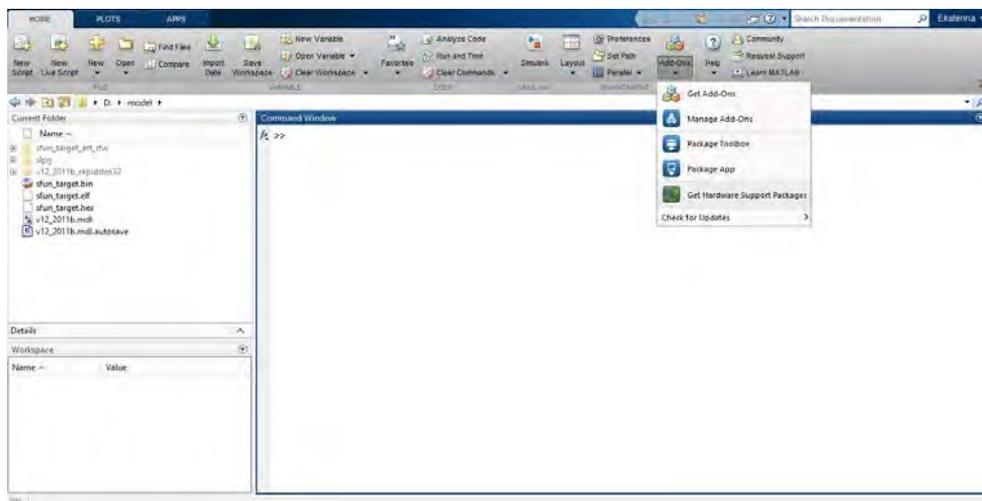


Рис. 14. Окно меню Add-Ons

```

18 #include "sfun_target.h"
19
20 /* Named constants for Chart: '<S15>/Chart' */
21 #define sfun_target_IN_AC          ((uint8_T)1U)
22 #define sfun_target_IN_ACTPV      ((uint8_T)2U)
23 #define sfun_target_IN_ACTV      ((uint8_T)3U)
24 #define sfun_target_IN_IC         ((uint8_T)2U)
25 #define sfun_target_IN_NO_ACTIVE_CHILD ((uint8_T)0U)
26
27 /* Block signals and states (default storage) */
28 DW_sfund_target_T sfund_target_DW;
29
30 /* External inputs (root inport signals with default storage) */
31 ExtU_sfund_target_T sfund_target_U;
32
33 /* External outputs (root outports fed by signals with default storage) */
34 ExtY_sfund_target_T sfund_target_Y;
35
36 /* Real-time model */
37 RT_MODEL_sfund_target_T sfund_target_M;
38 RT_MODEL_sfund_target_T *const sfund_target_M = &sfund_target_M;
39
40 /* Forward declaration for local functions */
41 static void sfund_target_enter_internal_AC(void);
42 static void rate_scheduler(void);
    
```

Рис. 15. Фрагмент С-кода, сгенерированного из блока управления модели ОЭС

Проведено сравнение результатов выполнения Simulink-модели ОЭС с Simulink-моделью, в которую вместо блока управления (ЦВС) добавлен С-код (рис. 16).

Для наглядности отображения результатов моделирования, возможности ввода данных и режимов работы в процессе моделирования создается графический интерфейс пользователя. MATLAB предлагает два варианта реализации графического пользовательского интерфейса:

- с помощью блоков библиотеки Simulink Dashboard;
- с помощью инструмента App Designer.

Создание интерфейса с помощью библиотеки Simulink Dashboard является более простым в реализации, а инструмент App Designer более гибкий и предоставляет больше возможностей.

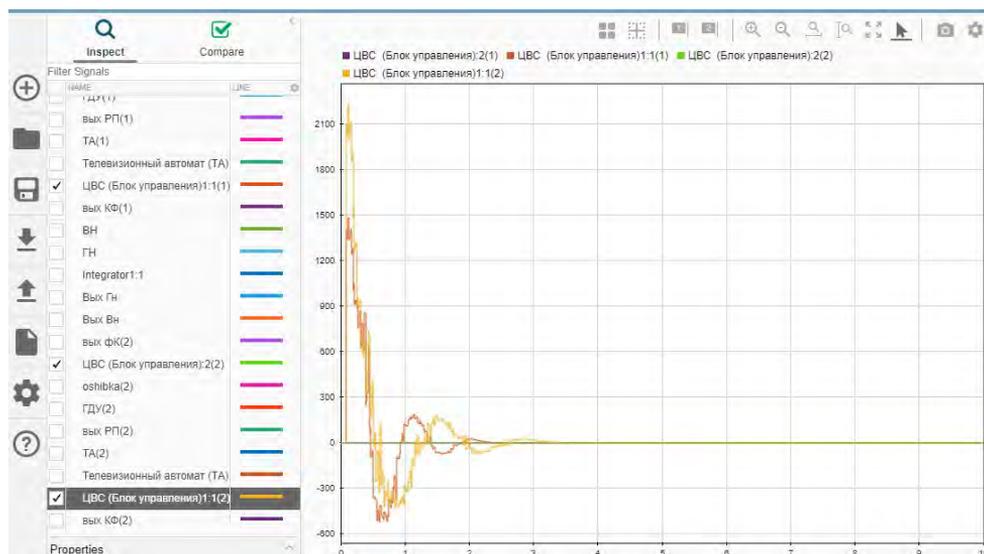


Рис. 16. Результаты выполнения Simulink-модели ОЭС

Результаты выполнения модели со сгенерированным кодом не отличаются от результатов моделирования непрерывной Simulink-модели.

Таким образом, показана возможность применения технологии верификации и валидации для подготовки модели к генерации С-кода. Технология апробирована на модели ОЭС. Из проверенной модели с использованием технологии генерации кода сгенерирован оптимизированный по времени выполнения и памяти С-код.

Ранняя верификация кода является эффективным способом снизить расходы на разработку и сроки ее сдачи. Ошибки, обнаруженные на поздних стадиях процесса разработки, сложнее отлаживать. Стоимость исправления проблем, обнаруженных на поздних стадиях тестирования, уже при реализации в микроконтроллере может быть в 10–20 раз выше стоимости исправления той же ошибки во время кодирования.

Литература

- [1] Понятский В.М., Кушников Д.В., Федорищева В.Г. Методика генерации из моделей MATLAB текста программ на языке С для процессоров встроенных систем. *Сб матер. 11-й Междунар. конф. «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта*

- (CAD/CAM/PDM — 2011)» (Москва, 18–20 октября 2011 г.) / под ред. Е.И. Артамонова. Москва, Институт проблем управления РАН, 2011, с. 83–87.
- [2] Понятский В.М., Федорищева В.Г., Богданова Л.А., Игумнова Т. ИТ-отладки программного обеспечения на основе Polyspace MATLAB для систем управления. *Современные информационные технологии и ИТ-образование. Научный журнал. МГУ*, 2015, т. 2, № 11, с. 462–473.
- [3] URL: <http://www.mathworks.com/hardware-support/index.html>

Сведения об авторах:

Богославский Никита Владимирович — генеральный директор, Центр инженерных технологий и моделирования «Экспонента», Москва, 115088, Россия

Понятский Валерий Мариафович — канд. техн. наук, доцент, кафедра «Проектирование автоматизированных комплексов», Тульский государственный университет, Тула, 300012, Россия, ORCID: 0000-0001-8326-165X

Федорищева Вера Георгиевна — ведущий инженер-программист, кафедра «Проектирование автоматизированных комплексов», Тульский государственный университет, Тула, 300012, Россия

Рословец Павел — инженер, Центр инженерных технологий и моделирования «Экспонента», Москва, 115088, Россия

Use of MATLAB for Validation and Verification of the Built in Software

©	N.V. Bogoslovskiy ¹	tech@exponenta.ru
	V.M. Ponjatskiy ²	granat@home.tula.net
	V.G. Fedorischrva ²	granat@home.tula.net
	P.V. Rosloavez ¹	tech@exponenta.ru

¹ Exponenta, Moscow, 115088, Russia

² Tula State University, Tula, 300012, Russia

The technology of check of the developed control system at early design stage of c is considered by use of the MathWorks tools. The technology supports approach implementation "from model to the program" and includes procedures of creation of communication of model with the document of requirements; check of model on compliance to standards of modeling; functional testing of model; the analysis on model covering tests; check on design errors; the proof of properties of model and automatic generation of tests for 100% covering of model.

Keywords: verification, validation, traceability, functional testing, the analysis on covering

References

- [1] Ponyatsky V.M., Kushnikov D.V., Fedorishcheva V.G. Metodik of generation from the MATLAB models of the text of programs in language C for processors of the embedded systems. *11th international conference "Systems of Design, Technology Preparation of Production and Management of Stages of Life Cycle of an Industrial Product (CAD/CAM/PDM — 2011)"*.

/ Under the editorship of Artamonov E.I. Moscow, Institute of problems of management of the Russian Academy of Sciences, 2011, pp. 83–87.

- [2] Ponyatsky V.M., Fedorishcheva V.G., Bogdanova L.A., Igumnova T. IT of debugging of the software on the basis of Polyspace Matlab for management systems. *Modern information technologies and IT education. Scientific log*, 2015, vol. 2, no. 11, pp.462–473.
- [3] URL: <http://www.mathworks.com>

Information about authors:

Bogoslovskiy N.V. — General manager, Exponenta, Moscow, 115088, Russia

Ponjatskiy V.M. — Cand. Tech. Sci., the associate professor, Department of Design of the automated complexes, Tula State University, Tula, 300012, Russia, ORCID: 0000-0001-8326-165X

Fedorishcheva V.G. — the leading software engineer, Department of Design of the automated complexes, Tula State University, Tula, 300012, Russia

Roslavez P.V. — Engineer, Exponenta, Moscow, 115088, Russia

УДК 681.5.01

Методология разработки тяжелого БВС вертолетного типа и настройки его САУ

© | С.С. Виноградов

svinogradov@ardntechology.com

ООО «ОКБ Авиарешения», Казань, Россия

Приводится обзорный анализ текущих беспилотных воздушных судов (далее — БВС) средней грузоподъемности. Описан процесс создания БВС вертолетного типа SKYF нестандартной конфигурации, где исключен автомат перекоса с сохранением управляемости и тяговых характеристик. Приводятся летно-технические характеристики БВС. Также описана методология создания и настройки автопилота, обеспечивающего полностью автономный полет данного БВС. Методология включает в себя сбор и обработку информации со стендовых испытаний, разработку математических моделей и настройку автопилота с использованием модельно-ориентированного проектирования. В конце представлены результаты реальных летных испытаний в сравнении с результатами моделирования.

Ключевые слова: БВС, БПЛА, САУ, MATLAB, SKYF, HIL, моделирование

Введение. С развитием элементной базы и алгоритмов управления значительно возросло количество работ, посвященных созданию малоразмерных БВС вертолетного типа, иначе дронов. Такие БВС обладают простотой использования и дешевизной. На текущий момент существует множество конфигураций как в плане конструкции, так и в степени автоматизации [1], способных решать широкий спектр задач. Несмотря на все усилия разработчиков, функциональность дронов ограничена их грузоподъемностью и временем автономной работы. Необходимость в решении таких задач вынуждает прибегать к использованию классических вертолетов, что, в свою очередь, приводит к большим финансовым затратам, связанным с их стоимостью и сложностью использования.

Успехи в области малоразмерных мультикоптерных БВС побудили к началу работ над тяжелыми БВС схожей конфигурации, но в увеличенном масштабе. Так, немецкой фирмой разработан Volocopter VC200 [2], имеющий восемнадцать несущих винтов на электродвигателях. Он способен поднимать в воздух двух пассажиров и преодолевать до 27 км. Китайский Ehang 184 [3] имеет квадрокоптерную схему со спаренными винтами на электродвигателях, он способен транспортировать одного человека на расстояние до 25 км. Оба аппарата имеют возможность полета в полностью автоматическом режиме с человеком на борту и без него.

Представленные аппараты активно испытываются и позиционируются как легкодоступный воздушный транспорт на электродвигателях. Однако несмотря на большие успехи, основным недостатком создаваемых моделей является малое время автономной работы, связанное с использованием аккумуляторных батарей в качестве источников энергии. Возможно, именно поэтому крупные авиационные компании ведут работы над созданием своих версий тяжелых дронов, не объявляя дату начала продаж. Так, Boeing и Airbus предоставили концепты своих летающих автомобилей: Boeing Next [4] и Airbus CityAirbus [5].

Другим путем пошла израильская компания Tactical Robotics LTD, которая использует для своего БВС AirMule турбовальный двигатель [6], при этом аппарат выполнен по продольной схеме. Данные решения позволяют увеличить грузоподъемность до 635 кг и продолжительность полета до 5 ч. Однако основным недостатком такого решения является большая стоимость.

Основная часть. В данной работе представлена методология создания БВС SKYF, изображенного на рис. 1, и его системы автоматического управления (далее — САУ). Данный аппарат разрабатывается как промышленное БВС, основным назначением которого будет работа в сельском хозяйстве и транспортировка грузов в полностью автономном режиме. Основными требованиями к SKYF являются грузоподъемность выше 250 кг, длительность полета 6 ч, крейсерская воздушная скорость 50 км/ч, практический потолок 1000 м, габариты должны позволять перевозить аппарат по дорогам общего пользования.

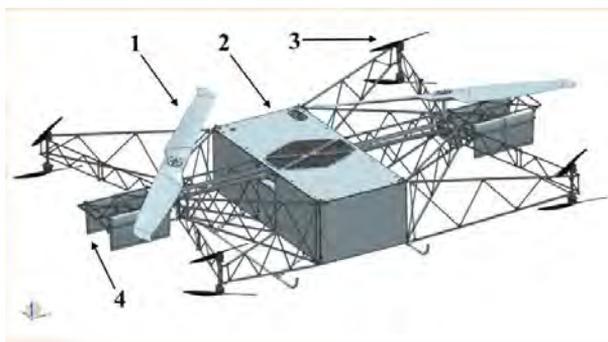


Рис. 1. БВС SKYF

Схема данного аппарата сочетает в себе преимущества малоразмерных дронов и классических вертолетов. Основная подъемная сила создается двумя несущими винтами (далее — НВ) диаметром 2,8 м каждый (поз. 1 на рис. 1). Винты размещены согласно поперечной схеме, вращаются синхронно, при этом каждый установлен на свободном горизонтальном шарнире с углом упреждения 45° . Данное решение обеспечивает разгрузку валов при горизонтальном полете. В качестве силовой установки, приводящей во вращение несущие винты и электрогенератор, выступает автомобильный двигатель внутреннего сгорания (далее — ДВС) мощностью 240 л.с., размещенный внутри фюзеляжа (поз. 2 на рис. 1). Электрогенератор, в свою очередь, приводит в движение спарки управляющих винтов на электродвигателях (поз. 3 на рис. 1), выполняющих функцию угловой стабилизации. Управление по рысканию осуществляется с помощью аэродинамических поверхностей, находящихся в индуктивном потоке НВ (поз. 4 на рис. 1).

На рис. 2 представлена схема, в которой отражен основной порядок создания БВС. Каждый этап играет важную роль в эволюции аппарата. Основная цель — создание серийного образца с заявленными характеристиками.

Основное назначение ПИ — научно-исследовательская работа с целью проверки возможности полета по заданию в автоматическом режиме без целевой нагрузки. Конструкция недорогая и тяжелая. Более подробно разработка и результаты летных испытаний описаны в [7, 8].

Основное назначение П2 — опытно-конструкторская работа с целью достижения заявленных летно-технических характеристик БВС SKYF. Для этого был увеличен диаметр НВ, введена облегченная складная ферменно-балочная конструкция, установлен облегченный турбированный ДВС, увеличены плечи до УВ.

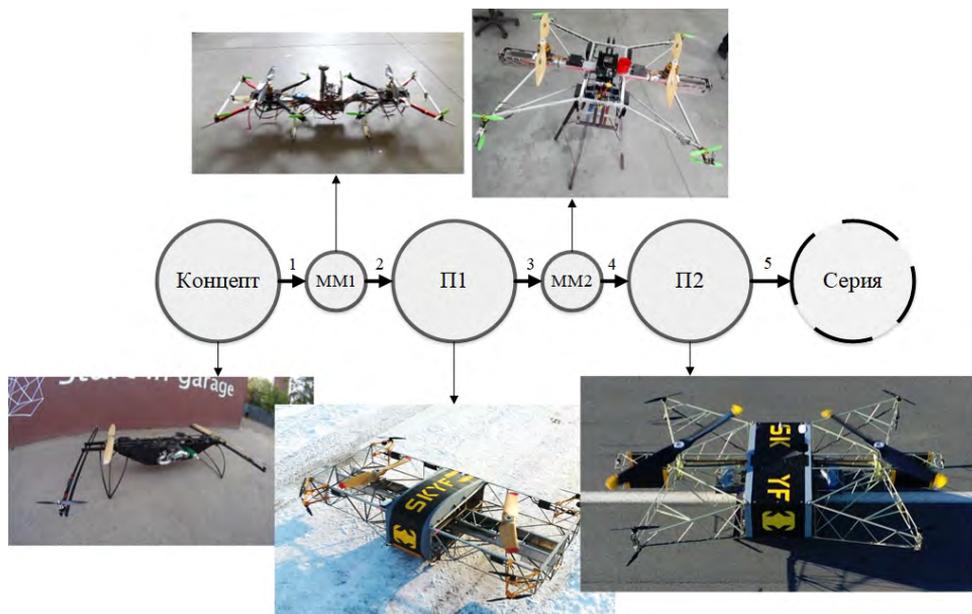


Рис. 2. Хронология разработки

Каждому прототипу (П1 и П2) предшествует масштабная модель (ММ1 и ММ2 соответственно). Это необходимо для проверки работоспособности принятой схемы, проверки эффективности нововведений и отработки программных решений. В масштабных моделях используются автопилот и программное обеспечение, аналогичные полноразмерному аппарату, различаются лишь весовые коэффициенты и коэффициенты регуляторов, что позволяет убедиться в правильности выбранных решений и перенести их на полноразмерный аппарат. При этом из-за использования доступной элементной базы сохраняется возможность быстрого и недорого восстановления работоспособности масштабной модели.

Стоит отметить, что ММ первой версии, в отличие от второй, также использовалась для отработки методики сбора данных с целью определения технических характеристик и построения математической модели объекта управления. В уменьшенном масштабе обрабатывалась конструкция стенов, эти знания впоследствии были использованы для построения больших экземпляров, что позволило сократить ошибки проектирования.

Так, на рис. 3 представлено масштабирование стендовых испытаний с ММ1 на П1. В верхней части рис. 3 представлено размещение аппарата в стенде крена. Данные испытания необходимы для определения передаточной функции разомкнутого канала крена с выключенными и вращающимися НВ. Данный метод использовался в [9, 10]. После грубой настройки регулятора на этом же стенде проверяется замкнутый

контур управления и происходит более тонкая настройка. Аналогичные испытания проводятся для каналов тангажа и рыскания.

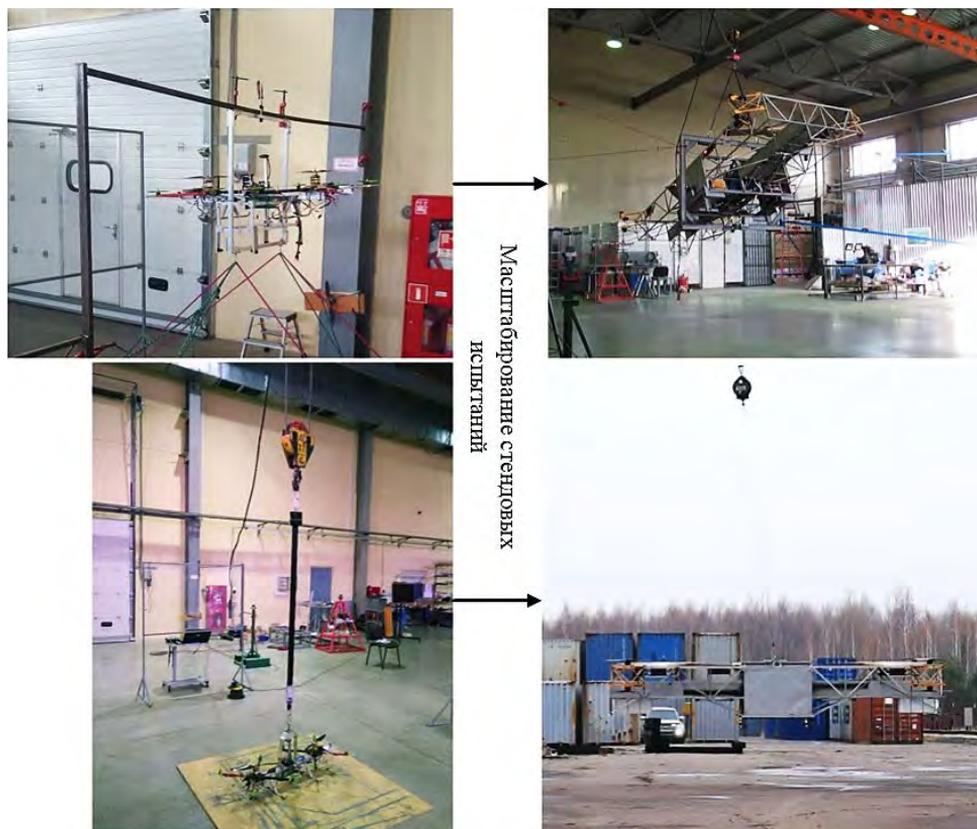


Рис. 3. Применение методологии испытаний MM1 на П1

В нижней части рис. 3 представлены итоговые стендовые испытания перед началом летных испытаний. Здесь аппарат подвешивается на страховочную систему и проверяется работа САУ в режиме удержания положения. В этом режиме в первую очередь анализируется работа датчиковой группы, а также контуров управления угловым положением и канала высоты.

Настройка САУ. Разработка автопилота полностью автономного БВС нестандартной конфигурации является сложной задачей. Данный процесс дополнительно усложняют большая стоимость возможной ошибки, отсутствие возможности многократных летных испытаний полноразмерного аппарата, а также повышенные требования к срокам разработки. Для решения поставленной задачи был выбран метод модельно-ориентированного проектирования, который обладает следующими достоинствами: безопасная разработка, наглядность применяемых решений, возможность многократного тестирования алгоритмов, удобство работы в команде [11].

Основой данного метода является математическая модель. От степени ее проработки зависит качество разрабатываемых законов управления. На рис. 4 представлена

используемая структурная схема. Входы — сигналы управления с автопилота и внешние возмущения, выходы — положение в пространстве. Винтомоторная группа НВ включает в себя модели ДВС и гувернера, НВ с горизонтальным шарниром и эффект земли. Винтомоторная группа УВ включает в себя регуляторы оборотов, электродвигатели и винты. Группа управляющих пластин включает в себя модели сервоприводов и аэродинамических поверхностей. Поверхность земли включает в себя взаимодействие шасси с землей, а фюзеляж описывает влияние аэродинамических эффектов.

Для создания нелинейной модели использовались известные математические зависимости, при этом идентификация и корректировка моделей проведены с использованием множества испытания отдельных подсистем. Среди них такие испытания, как испытания тяговых характеристик НВ и УВ на разных высотах и режимах полета; определение скоростей индуктивных потоков; определение динамики различных сервоприводов; определение динамики ДВС; испытания и настройка гувернера ДВС; испытания шасси; продувка в аэродинамической трубе и др. Адекватность итоговой нелинейной модели в первую очередь определялась по результатам стендовых испытаний каналов управления, описанных ранее. Далее по результатам летных испытаний проводилась циклическая корректировка.

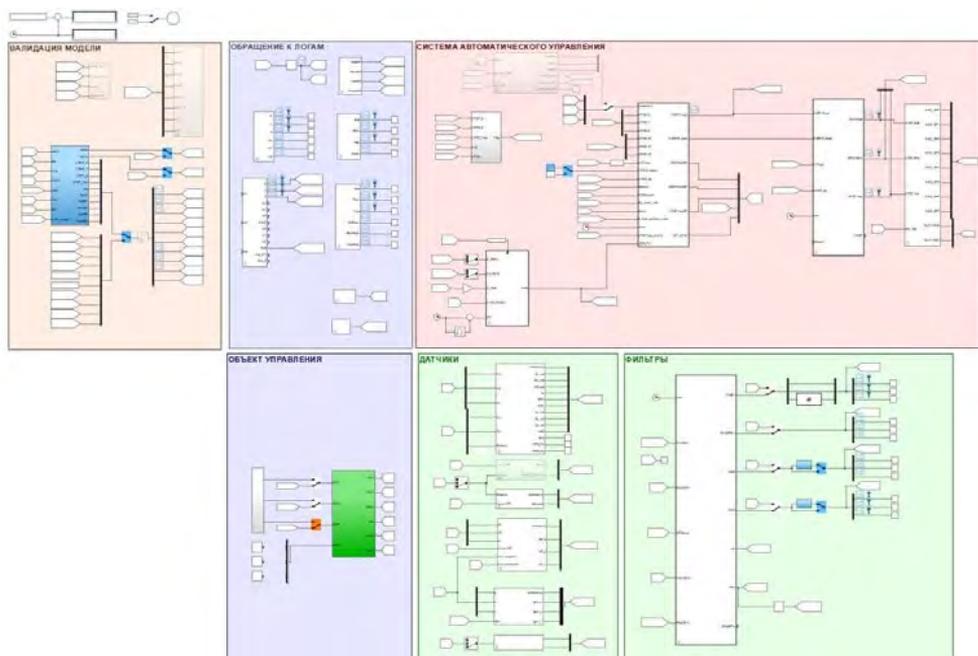


Рис. 4. Общая имитационная модель БВС

Разработана общая имитационная модель в среде MATLAB/Simulink (рис. 4), в которую подгружаются параметры исходя из исследуемой конфигурации БВС. Данная модель состоит из нескольких основных блоков: объект управления — математическая модель БВС, структурная схема которого представлена на рис. 5; система автоматического управления — имитационная модель внутреннего и внешнего кон-

туров автопилота; датчики — имитационная модель датчиковой группы; фильтры — имитационная модель алгоритмов комплексирования и фильтрации; обращение к логам — логика, позволяющая тестировать различные подсистемы БВС и имитировать произведенный полет; валидация модели — блок, позволяющий работать в режиме полунатурного моделирования. Данная общая модель обладает возможностью работы в нескольких режимах: 1-й режим исследования — режим, когда производится настройка регуляторов и их покрытие тестами; 2-й режим — анализ логов испытаний; 3-й режим — полунатурное моделирование.

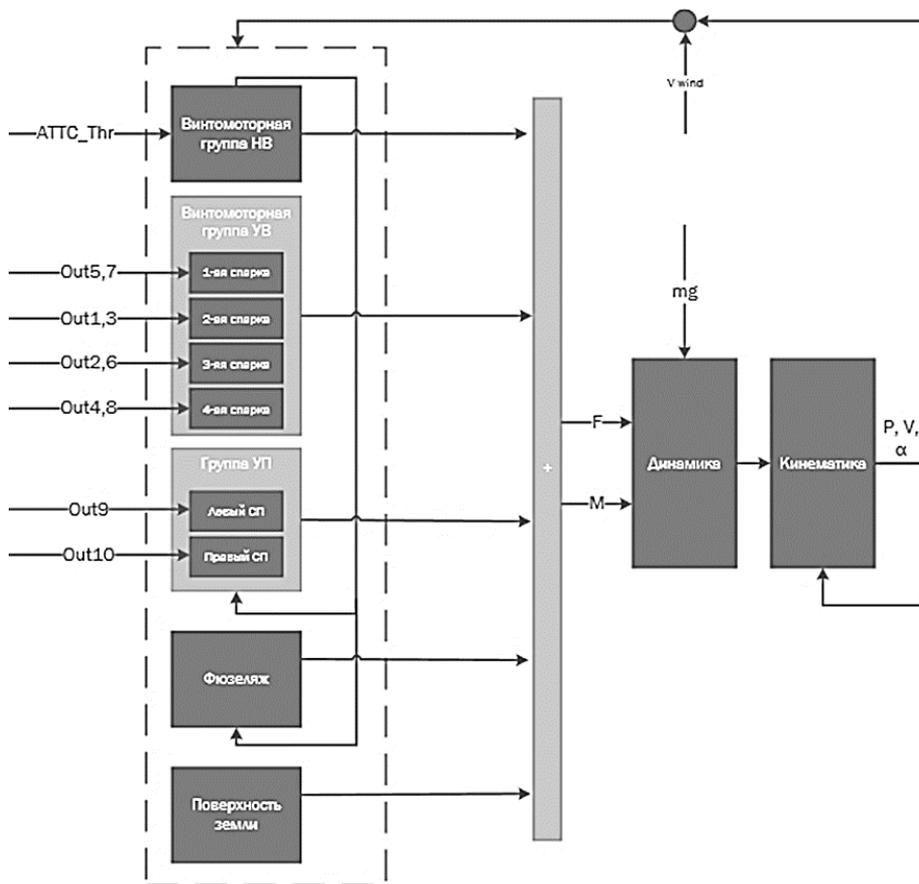


Рис. 5. Структурная схема объекта управления

Важной частью тестирования алгоритмов САУ является проверка алгоритмов в режиме полунатурного моделирования. Разработаны среда визуализации и система сопряжения оборудования, которые вместе с имитационной моделью позволяют проводить симуляцию в реальном времени с целевым автопилотом в контуре управления. Этот режим также используется для отработки наземного пункта управления и действий оператора. На рис. 6 представлены наземный пункт управления и среда визуализации.

Если по результатам летных испытаний обнаруживается некорректная работа какой-либо подсистемы САУ, то вводятся корректировки в полную нелинейную имитационную модель, после чего изменяется алгоритм автопилота или его настройки. Данные нововведения проходят тройную проверку: 1 — отработка на общей имитационной модели в режиме исследования с помощью многократного тестирования в разных сценариях полета; 2 — проводится отработка на полунатурном стенде; 3 — в случае целесообразности проводится отработка на соответствующей масштабной модели в реальном полете.

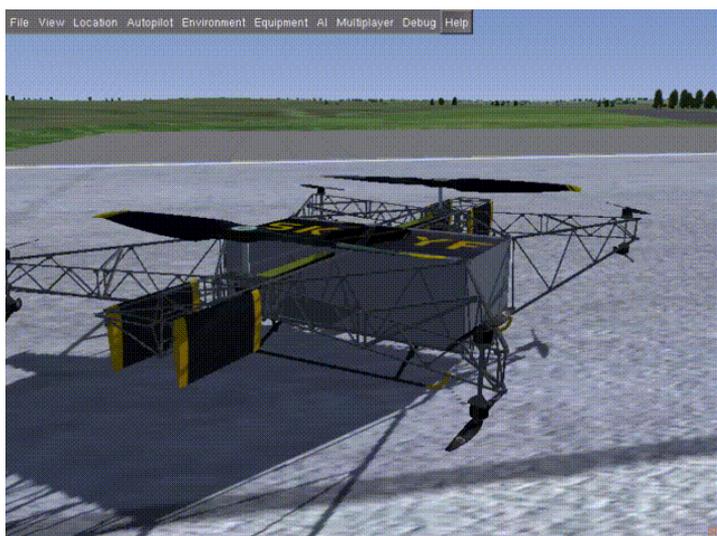
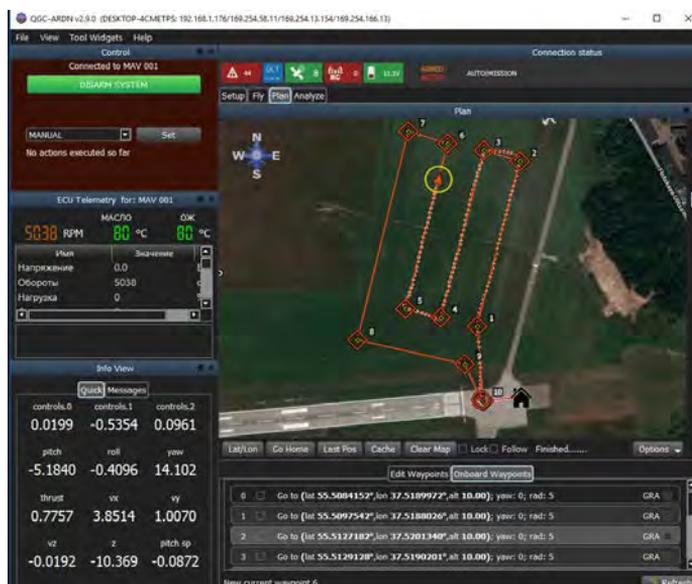


Рис. 6. Полунатурная отработка

Результаты. С использованием вышеописанной методологии удалось за три года в соответствии с хронологией, представленной на рис. 2, подготовить предсерийный образец БВС. На данный момент проводятся летные испытания по заранее заданному маршруту в полностью автоматическом режиме с целевой нагрузкой с воздушными скоростями до 10 м/с на высотах до 50 м. В качестве целевой нагрузки выступают подвешенный груз массой 100 кг и система опрыскивания химикатов.

На рис. 7 представлено фото с летных испытаний SKYF с подвешенным грузом массой 100 кг при скорости ветра 5 м/с.



Рис. 7. Летные испытания БВС SKYF

На рис. 8 представлено сравнение результатов работы имитационной модели с результатами летных испытаний для линейных перемещений (см. рис. 8, а), для угловых перемещений (см. рис. 8, б) и для оборотов ДВС (см. рис. 8, в). При этом представлены результаты работы имитационной модели с учетом аэродинамических эффектов, возникающих от набегающего воздушного потока и без него. На графиках видна высокая сходимость полетных данных с результатами моделирования при введении аэродинамики.

Дальнейшая работа над проектом связана с повышением скорости, высоты и дальности полета для достижения заявленных летно-технических характеристик. С этой целью проводится продувка элементов конструкции в аэродинамической трубе, проводится CFD-анализ, анализируются результаты летных испытаний. Также ведется постоянная работа над оптимизацией конструкции и программного кода, доработка бортового радиоэлектронного оборудования и наземного комплекса управления и обслуживания.

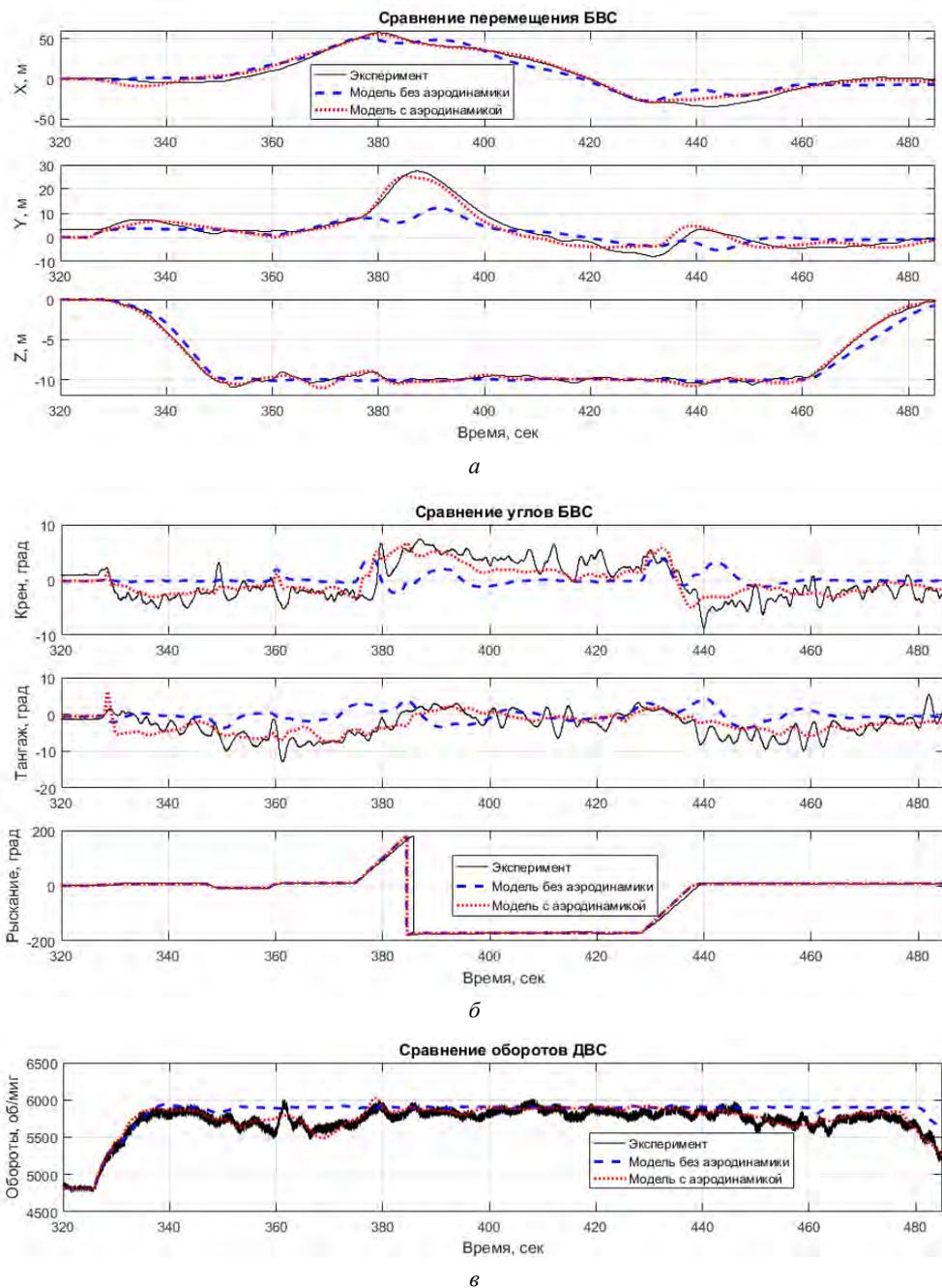


Рис. 8. Сравнение летных данных с результатами работы имитационной модели без использования и с использованием модели аэродинамики:
a — сравнение линейных перемещений; *б* — сравнение угловых перемещений;
в — сравнение оборотов ДВС

Литература

- [1] Kendoul F. A survey of advances in guidance, navigation and control of unmanned rotorcraft systems. *J Field Robot. Journal Offfield Robotics*, 2012, March, pp. 315–378.
- [2] Official site of Volocopter project [Электронный ресурс]. URL: <https://www.volocopter.com/> (дата обращения 10.04.2019).
- [3] Official site of Ehang project [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ehang.com/> (дата обращения 10.04.2019).
- [4] Official site of Boeing Next Airbus project [Электронный ресурс]. URL: <https://www.auroga.aero/pav-evtol-passenger-air-vehicle/> (дата обращения 10.04.2019)
- [5] Official site of Airbus CityAirbus project [Электронный ресурс]. URL: <https://www.airbus.com/newsroom/stories/urban-air-mobility-the-sky-is-yours.html> (дата обращения 10.04.2019).
- [6] Official site of Tactical Robotics LTD [Электронный ресурс]. URL: <http://www.urbanaero.com/> (дата обращения 10.04.2019).
- [7] Сабиров М.И., Виноградов С.С., Зиннуров Н.Р. Разработка универсальной беспилотной авиационной платформы вертикального взлета-посадки мультироторного типа повышенной грузоподъемности. *Тез. докл. Междунар. конф. «XI Четаевская конференция»*. Казань, 13–17 июня 2017 г., с. 20–28.
- [8] Виноградов С.С., Синтез комбинированного закона управления вертикального канала БЛА мультикоптерного типа. *XXIII Туполевские чтения, (школа молодых ученых)*. Казань, 8–10 ноября 2017 г.: матер. конф. Казань, КГТУ им. Туполева, 2017, т. 2, с. 118–123.
- [9] Гаркушенко В.И., Маханько А.А., Виноградов С.С. Экспериментальное исследование законов угловой стабилизации БПЛА на лабораторном вертолетном стенде. *Тез. докл. 16-го Всерос. семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов*. СГУ. Самара, 18–20 июня 2013 г., с. 38–39.
- [10] Виноградов С.С. Синтез нечеткого навигационного регулятора для малоразмерного вертолета «Раптор». *Электронный журнал «Труды МАИ»*, № 73. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=48562>
- [11] Сорокин С.С., Ефремов А.А., Зенков С.М. Модельно-ориентированное проектирование – международный стандарт инженерных разработок: *Тр. V Междунар. науч. конф. «Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB»*. Харьков, 11–13 мая 2011 г.

Сведения об авторе:

Виноградов Сергей Сергеевич — научный сотрудник, ООО «ОКБ Авиарешения», Казань, Россия

The Methodology of Heavy UAV Helicopter Development and Control Design

© | **S.S. Vinogradov**

svinogradov@ardntechnology.com

LLC Aviaresheniya, Kazan, Russia

The survey analysis of the current pilotless aircrafts (further — UAV) average payload capacity is provided. Process of creation of UAV of the helicopter SKYF type of a non-standard configuration is described. In the process of UAV creation the distortion swash plate with saving of controllability and thrust characteristics are excluded. UAV flight technical characteristics are given. The methodology of creation and the autopilot tuning

are described. They provide completely autonomous flight of this UAV. The methodology includes data collection and data processing from rig tests, development of mathematical models and autopilot tuning with using of the model oriented design. At the end results of real flight tests in comparison with results of modeling are presented.

Keywords: UAV, Automatic control system, MATLAB, SKYF, HIL, simulation

References

- [1] Kendoul F. A survey of advances in guidance, navigation and control of unmanned rotorcraft systems. *J Field Robot. Journal Offfield Robotics*, March 2012, pp. 315–378.
- [2] Official site of Volocopter project [Electronic resource]. URL: <https://www.volocopter.com/> (access date: 10.04.2019)
- [3] Official site of Ehang project [Electronic resource]. URL: <http://www.ehang.com/> (access date 10.04.2019).
- [4] Official site of Boeing Next Airbus project [Electronic resource]. URL: <https://www.aurora.aero/pav-evtol-passenger-air-vehicle/> (access date: 10.04.2019)
- [5] Official site of Airbus CityAirbus project [Electronic resource]. URL: <https://www.airbus.com/newsroom/stories/urban-air-mobility-the-sky-is-yours.html> (access date: 10.04.2019).
- [6] Official site of Tactical Robotics LTD [Electronic resource]. URL: <http://www.urbanaero.com/> (access date: 10.04.2019).
- [7] Sabirov M.I., Vinogradov S.S., Zinnurov N.R. Razrabotka universalnoj bespilotnoj platformy s vertikalnym vzletom i posadkoj. *Proc. of international conference “XI Chetaevskaya konferenciya”*. Kazan, 13–17 July 2017, p. 20-28.
- [8] Vinogradov S.S. Sintez kombinirovannogo zakona upravleniya vertikalnogo kanala BLA multikopternogo tipa. *Proc. of conference XXIII Tupolevskie chteniya, (school of young scientists)*. Kazan, 8–10 Nov 2017, vol. 2, p. 118–123.
- [9] Garkushenko V.I., Mahanko A.A., Vinogradov S.S. Eksperimentalnoe issledovanie zakonov uglovoj stabilizacii BPLA na laboratornom vertoletnom stende. *Proc. of 16-s All-Russian Seminar*. SSU, Samara, 18–20 Jun 2013, p. 38–39.
- [10] Vinogradov S.S. Sintez nechetkogo navigacionnogo regulatora dlya malorazmernogo vertoleta Raptor. *Electronic Journal “Trudi MAI”*, No 73. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=48562>.
- [11] Sorokin S.S., Efremov A.A., Zenkov S.M. Modelno-orientirovannoe proektirovanie – mezhdunarodnij standard inzhenernyh razrabotok. *Proc. of V International science conference “Proektirovanie inzhenernyh i nauchnyh prilozhenij d srede MATLAB”*. Kharkov, 11–13 May 2011.

Information about author:

Vinogradov S.S. — researcher, LLC Aviaresheniya, Kazan, Russia

УДК 681.3.068(03)

Модели систем наведения: построение средствами визуализации

© С.Н. Данилов
Д.Д. Мельникова
Д.А. Сыщикова

plabz@mail.ru
Darja resbn@jesby.tstu.ru
resbn@jesby.tstu.ru

Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

В качестве объекта моделирования рассмотрена система наведения ракеты класса «воздух-воздух» на самолет-цель, который в качестве защиты применяет буксируемую или отстреливаемую ловушку с ретранслятором. Для построения модели системы наведения построены модели составных частей системы, которые в виде subsystem объединялись вместе в соответствии со структурой исходного объекта. Движение самолета-цели задавалось на основе известных уравнений, а ракеты — системой уравнений для осесимметричного крестокрылого объекта. Параметры относительного движения объектов рассчитываются в subsystem кинематического звена, часть которого реализована средствами пакета визуализации, а часть — программно. Авторами предложен метод моделирования обработки сигналов в системах с дискриминационной характеристикой на входе. До дискриминатора величина сигналов соответствует только величинам параметров и не несет информации об амплитуде реального сигнала. Только на выходе в величине сигнала учитывалась амплитуда входного сигнала. Так как величина входных сигналов для цели и ловушки соответствует величине параметров, невозможна одновременная обработка в дискриминаторе. Она проводится раздельно в совершенно одинаковых парах каналов. Таким образом, модель реализована в виде вложенных друг в друга subsystem, что позволило получить достаточно простую в использовании и в то же время достаточно сложную, отражающую многие детали реальности модель. Предложенная модель проста в применении и наглядна. Кроме того, она имеет некоторые скрытые резервы, связанные с возможностями по изменению и усложнению структуры модели и ее внутренних связей. Использование средств визуализации позволяет даже начинающему исследователю избежать некоторых ошибок, связанных с моделированием при применении стандартных средств и методов.

Ключевые слова: модель, система наведения, цель, ракета, самолет, траектория

Введение. Разработчик системы или процесса всегда должен предвидеть и оценивать последствия своей деятельности. Поэтому для проектируемой системы всегда необходима априорная оценка ее свойств.

Математическое моделирование на ЭВМ позволяет решить эту проблему с достоверностью, которая определяется компетентностью разработчика и эффективностью применяемых им методов. Применение «хороших» методов и инструментов моделирования позволяет разработчикам сложных систем получать на основе построенных математических моделей правдоподобные оценки проектируемых систем и прогнозировать возможные эффекты от применения этих систем.

Хороший метод моделирования должен давать исследователю набор правил и алгоритмов, выполнение которых неизбежно приведет к построению модели, адекватной заданному процессу. При этом гарантируется вполне определенная степень правдоподобия.

Пусть некоторый сложный объект (система наведения ракеты на цель в условиях применения последней ловушки-ретранслятора) обладает некоторым интересующим нас свойством H_0 (промах ракеты). Для получения математической модели, описывающей данное свойство, необходимо следующее.

1. Определить показатель этого свойства, т. е. определить меру свойства в некоторой системе измерения. В нашем случае это минимально достигаемое расстояние цель — ракета.

2. Установить перечень свойств H_1, \dots, H_m , с которыми свойство H_0 связано некоторыми отношениями. Это могут быть внутренние свойства объекта и свойства внешней среды. В нашем случае это все начальные параметры систем и подсистем модели.

3. Описать свойства внешней среды как внешние факторы (помеховые сигналы, шумы), влияющие на искомый показатель, внутренние свойства объекта как параметры и константы блоков и подсистем, а неучтенные свойства отнести к группе факторов (w_1, \dots, w_p).

4. Выяснить закономерные отношения между H_0 и всеми учитываемыми факторами и составить математическую модель.

При моделировании систем часто возникает необходимость создания различных вариантов построения отдельных подсистем моделей. Это, как правило, объясняется желанием найти наилучшую реализацию подсистемы или использовать несколько моделей, каждая из которых в отдельности отражает лишь некоторые свойства моделируемой системы, но которые в совокупности дают необходимую информацию.

В настоящее время существует множество систем графической визуализации. Мощным средством в этом ряду является Simulink пакета MATLAB [1–3].

В качестве объекта моделирования будем рассматривать систему наведения ракеты класса «воздух-воздух» на самолет-цель, который в качестве защиты применяет буксируемую или отстреливаемую ловушку с ретранслятором [4].

Структура объекта моделирования. Как сказано выше, возьмем в качестве объекта моделирования систему наведения ракеты класса «воздух-воздух» на цель, буксирующую (отстреливающую) ловушку-ретранслятор (рис. 1).

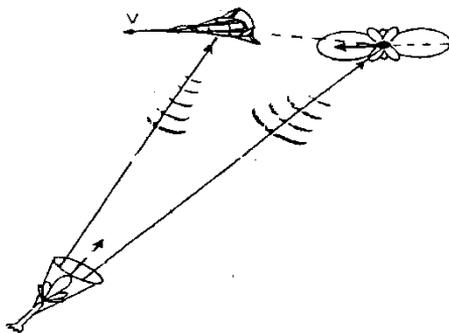


Рис. 1. Объект моделирования: система наведения ракеты класса «воздух-воздух» на цель, буксирующую (отстреливающую) ловушку-ретранслятор

В самом общем виде такая система будет иметь структуру, показанную на рис. 2.

Для построения модели системы наведения, показанной на рис. 2, были построены модели составных частей системы. Полученные модели составных частей в виде subsystem объединялись вместе в соответствии со структурой исходного объекта.



Рис. 2. Общий вид структуры системы наведения

Движение самолета-цели задавалось на основе известных уравнений [5], а ракеты — подобной же системой уравнений, но с учетом того, что ракета является осесимметричным крестовидным объектом:

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = g(n_x - \sin \theta); & V_0 \\ \frac{d\theta}{dt} = \frac{g}{V}(n_y - \cos \theta); & \theta_0 \\ \frac{d\varphi}{dt} = -\frac{g}{V}n_z; & \varphi_0 \\ \frac{dX}{dt} = V \cos \theta \cos \varphi; & X_0 \\ \frac{dY}{dt} = V \sin \theta; & Y_0 \\ \frac{dZ}{dt} = -V \cos \theta \sin \varphi, & Z_0 \end{cases} \quad (1)$$

где V — скорость движения; n_x, n_y, n_z — перегрузки по соответствующим осям связанной системы координат; θ — угол вертикального наклона траектории к горизонту; φ — курсовой угол; X, Y, Z — смещение ракеты в земной системе координат.

На рис. 3 цель и ракета представлены в виде subsystem Target и Missile. Движение ловушки задается относительно движения защищаемой ею цели. Отстрел ловуш-

ки производился по достижению расстоянием ракета-цель D заданной величины dsh , т. е. когда будет выполнено условие

$$D \leq dsh.$$

Кроме того, на основе знания относительной дальности и скорости сближения цель — ракета, а также основных параметров радиолокационной головки самонаведения (РГС), бортовой РЛС подсвета (истребителя) рассчитывается в момент отстрела T_{shot} , отношение амплитуд сигналов цели и ловушки Sc/SI , а также частота сигнала ловушки Fdl .

Параметры относительного движения объектов рассчитываются в подсистеме кинематического звена *Kinemat*, где функция *kinemat Fcn* реализована программно.

В качестве входных параметров используются данные о координатах подвижных объектов, т. е. величины X_g, Y_g, Z_g для ракеты, цели (выражение 1) и ловушки.

Учитывая, что моделирование входного сигнала РГС на высокой частоте приводит к очень большим временным затратам, был выбран путь моделирования на низкой частоте относительно медленно меняющихся параметров сигнала: амплитуды, частоты, направления прихода в двух плоскостях. При этом амплитуда, с одной стороны, частота и угол прихода волны в двух плоскостях, с другой стороны, учитывались отдельно. Далее это показано на примере угломера.

Основную трудность для моделирования представляет РГС ракеты, с одной стороны, как наиболее сложное устройство, с другой, как именно то устройство, работа которого и исследуется. А поэтому его особенности наиболее полно должны быть отражены в модели.

Структурная схема Simulink-модели РГС (на рис. 3 подсистема *RGS*), приемника (подсистема *Empfenger*, входящая в *RGS*) и доплеровского канала (подсистема *Doppler*, входящая в *Empfenger*) показаны на рис. 4, 5 и 6 соответственно.

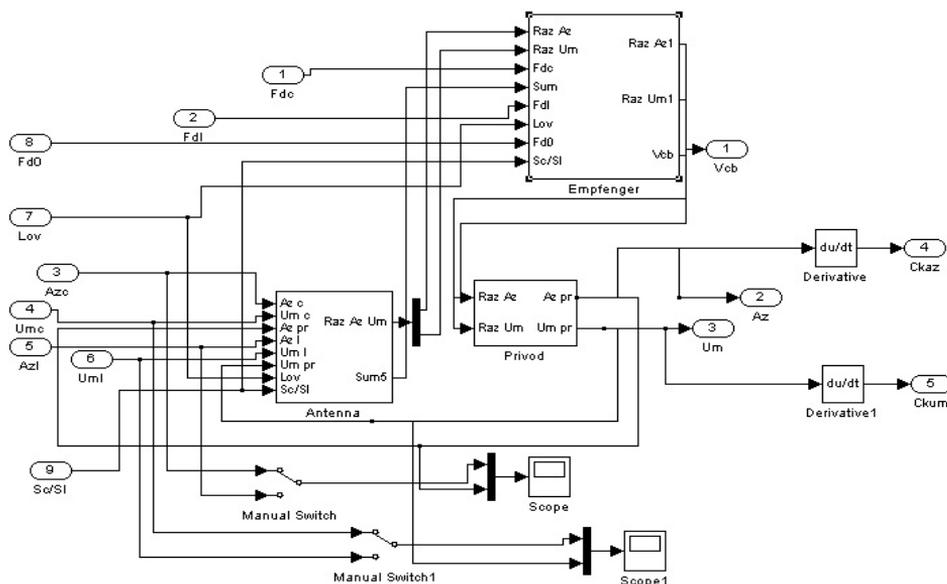


Рис. 3. Структура Simulink-модели РГС

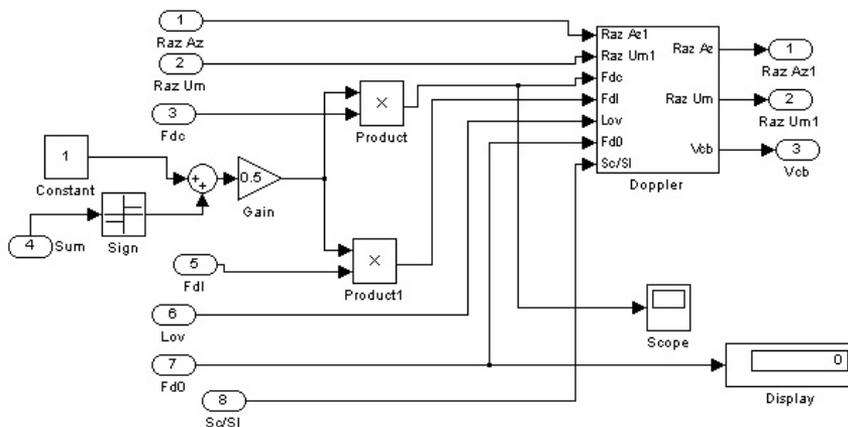


Рис. 4. Структура Simulink-модели приемника

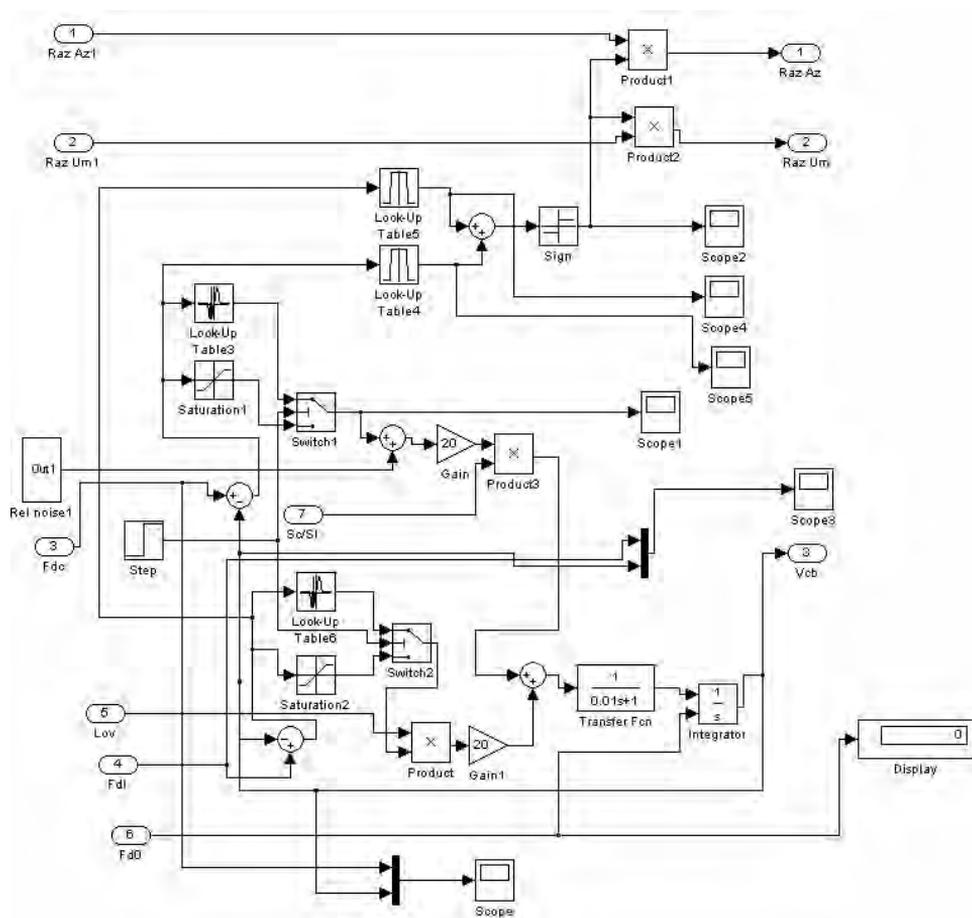


Рис. 5. Структура Simulink-модели доплеровского канала

В качестве примера рассмотрим предложенный авторами метод моделирования обработки сигналов в системах с дискриминационной характеристикой на входе (разностный канал моноимпульсной антенны, частотный дискриминатор доплеровского канала) на примере разностного канала моноимпульсной антенны (рис. 6).

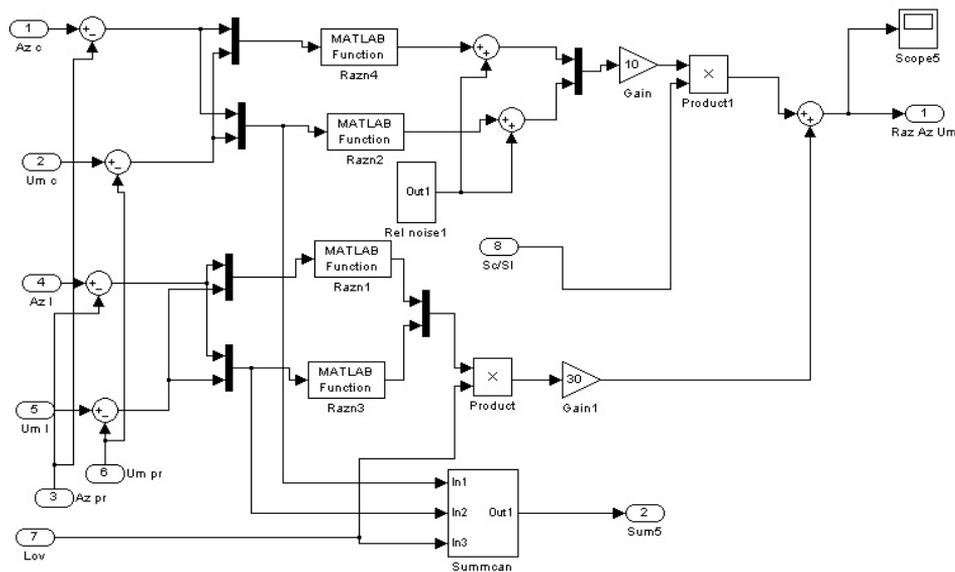


Рис. 6. Структура Simulink-модели антенны моноимпульсной РГС

Сигналы углового положения цели: углы Az_c , Um_c и ловушки Az_l , Um_l поступают на вход антенны в виде величин, пропорциональных соответствующим углам.

Вычитание обработанных значений углов Az_{pr} , Um_{pr} (с выхода привода, RGS: подсистема *Privod*) соответствует повороту антенны, а именно равносигнального направления на величину этих углов. Разность углов проходит через угловой дискриминатор, который производит функциональное преобразование: разность углов \rightarrow сигнал ошибки по углу в соответствующей плоскости.

Форма ДН (разностной) для каналов азимута и угла места задана двумерной функцией $A = AntG(x, y)$ в виде М-файла *Razn1.m*.

Листинг показывает пример реализации MATLAB-функции *Razn1* на языке программирования пакета MATLAB (М-файл *Razn1.m*).

```
Function A=AntG(x,y)
b=20; a=1.57;
f1=(sin(b*x-a)/(b*x-a))*(sin(b*y-a)/(b*y-a));
f2=(sin(b*x+a)/(b*x+a))*(sin(b*y-a)/(b*y-a));
f3=(sin(b*x-a)/(b*x-a))*(sin(b*y+a)/(b*y+a));
f4=(sin(b*x+a)/(b*x+a))*(sin(b*y+a)/(b*y+a));
AntrX=f1-f2+f3-f4;
A=AntrX;
```

До углового дискриминатора (УД) величина сигналов A_m_c , U_m_c , A_z_l , U_m_l соответствует только величинам соответствующих углов и не несет информации об амплитуде реального принимаемого сигнала.

Учитывать амплитуду можно только после УД, так как в реальности величина сигнала на выходе УД зависит уже и от угла рассогласования (например, по каналу азимута цели: $Az_c - Apr$) и от амплитуды входного сигнала. Поэтому именно здесь должны моделироваться как величина, так и флуктуации амплитуды, усиление по амплитуде (gain), а также подавление сигнала цели системой автоматической регулировки усиления при приеме мощного сигнала ловушки ($S_c \ll S_l$) (рис. 7).

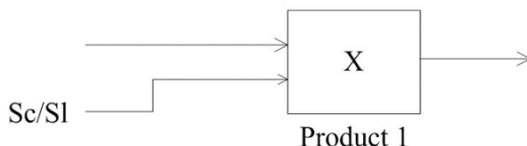


Рис. 7. Система автоматической регулировки усиления

Так как величина входных сигналов соответствует величине углов, невозможно одновременная обработка в едином дискриминационном блоке, она производится отдельно для цели и ловушки (азимут — угол места цели, азимут — угол места ловушки) в совершенно одинаковых парах каналов MATLAB function (Razn 2, Razn 4 и Razn 1, Razn 3), а потом уже на выходе учитывается изменение амплитуды реальных сигналов и далее сигналы цели и ловушки попарно складываются перед подачей на выход 1, образуя единые разностные сигналы азимута и угла места.

К сигналу цели добавляется релейский шум, сформированный в блоке Rel noise 1 на основе белой гауссовской последовательности. Вход 7 (Lov) служит для принудительного отключения канала ловушки. Суммарный канал выполнен в виде подсистемы Summsap.

Таким образом, видно, что модель была реализована в виде вложенных одна в другую подсистем, что позволило получить достаточно простую в использовании и в то же время достаточно сложную, отражающую многие детали реальности модель. Используемые во многих точках схемы средства отображения (SCOPE, DISPLAY) позволяют упростить отладку и контроль функционирования модели (пример отображения изменения доплеровской частоты сигнала цели и ловушки инструментом SCOPE показан на рис. 8).

Возможен просмотр траекторий движения объектов в виде трехмерного графика.

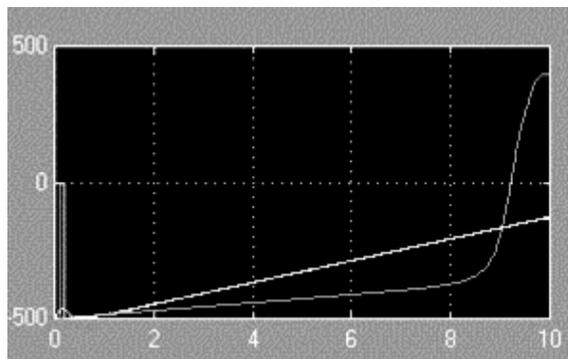


Рис. 8. Отображение доплеровской частоты сигнала цели и ловушки

Закключение. Таким образом, рассмотрена относительно простая модель системы наведения позволяющая оценивать влияние применения ловушек-ретрансляторов, на процесс наведения и промах. Модель проста в применении и наглядна. Кроме того, она имеет некоторые скрытые резервы, связанные с возможностями по изменению и усложнению структуры модели и ее внутренних связей. Использование средств визуализации позволяет даже начинающему исследователю избежать некоторых ошибок, связанных с моделированием при применении стандартных средств и методов.

Литература

- [1] Мещеряков В.В. *Задачи по математике с MATLAB и Simulink*. Москва, Диалог-МИФИ, 2007.
- [2] Дэбни Дж., Харман Т. *Simulink-4. Секреты мастерства*. Москва, Бинум, 2003.
- [3] Черных И. В. *Simulink: среда создания инженерных приложений*. Москва, Диалог-МИФИ, 2003.
- [4] Афинов В. Новое направление развития западных средств РЭП индивидуальной защиты самолетов. *Зарубежное военное обозрение*, 1999, № 7, 8.
- [5] Елсуков Л.П., Свиридов Н.А. *Дополнительные главы к лекционному курсу «Динамика полета и боевого маневрирования ЛА»*: учеб. пособие. Иркутск, ИВВАИУ, 1979.

Сведения об авторах:

Данилов Станислав Николаевич — д-р техн. наук, профессор, кафедра «Радиотехника», Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия, SPIN-code: 6059-1379, ORCID: 0000-0003-2443-3380

Мельникова Дарья Денисовна — студентка, кафедра «Радиотехника», Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

Сыщикова Дарья Александровна — студентка, кафедра «Радиотехника», Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

Models of Guidance System: Construction by Means of Visualization

© | **S.N. Danilov**
D.D. Melnikov
D.A. Syshikov

plabz@mail.ru
Darja resbn@jesby.tstu.ru
resbn@jesby.tstu.ru

Tambov State Technical University, Tambov, Russia

The mathematical modeling on the computer allows to receive an estimation of properties of system with use of means of graphic visualization. As object of modeling the system of prompting of a rocket of a class «air — air» aboard the plane — purpose is considered which as protection applies a towed or shot trap with transmitter. For construction of model of system of prompting the models of components of system are constructed which as subsystems were united together according to structure of initial object. The movement of the plane — target was set on the basis of the known equations, and rocket by system of the equations for symmetric of object. The parameters of relative movement of objects pay off in subsystem kinematical of a link, which part is realized by means of a package

of visualization, and part as the program. The author offers a method of modeling of processing of signals in systems with nonlinear by the characteristic on an input. Up to the discriminator the size of signals meets only to sizes of parameters and does not carry the information on amplitude of a real signal. Only on an output in size of a signal the amplitude of an entrance signal was taken into account. As the size of entrance signals for the purpose and trap corresponds to size of parameters, the simultaneous processing in the discriminator is not possible. She is made separately in completely identical pairs channels. Thus, the model is realized as the enclosed each other subsystems, that has allowed to receive rather simple in use and at the same time rather complex, reflecting many detail of a reality model. In clause nothing is told about preference in a choice of that or other way of realization of model. It — question of separate discussion, and frequently decision is — accepted proceeding from practical reasons.

Keywords: model, guidance system, target, rocket, plane, trajectory

References

- [1] Mescheryakov V.V. *Mathematics Tasks with MATLAB and Simulink*. Moscow, Dialogue MEPI, 2007.
- [2] Debny J., Harman T. *Simulink-4. Secrets of skill*. Moscow, Bean, 2003.
- [3] Chernykh I.V. *Simulink: environment for creating engineering applications*. Moscow, Dialogue-MEPI, 2003.
- [4] Athenov V. New direction of development of western rebs individual protection of aircraft. *foreign military review*, 1999, no. 7, 8.
- [5] Elsukov L.P., Sviridov N.A, *Additional chapters to the lecture course "The dynamics of flight and combat maneuvering LA"*: studies. custom. Irkutsk, IVVAIU, 1979.

Information about authors:

Danilov S.N. — Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Radio Engineering, Tambov State Technical University, Tambov, Russia, SPIN-code: 6059-1379, ORCID: 0000-0003-2443-3380

Melnikov D.D. — student, Department of Radio Engineering, Tambov State Technical University, Tambov, Russia

Syshikov D.A. — student, Department of Radio Engineering, Tambov State Technical University, Tambov, Russia

УДК 621.391

Кусочно-непрерывная сегментация экспериментальных сигналов

© | А.Г. Дмитриев

dag334a@fxmail.ru

Череповецкое высшее военное инженерное училище радиоэлектроники,
Вологодская область, Череповец, 162622, Россия

К настоящему времени существует много работ, посвященных анализу структурных сигналов, обработка которых в большинстве случаев сводится к двухэтапной процедуре: выделению «однотипных» фрагментов (этап сегментации) и последующего построения описания представленных сигналов в целом. Использование существующих методов оказывается недостаточно эффективным при исследованиях в условиях ограниченности экспериментальных наблюдений и неизвестном числе «однотипных» участков (интервалов разбиения). Кроме того, в результате сегментации экспериментальных сигналов строятся аппроксимирующие функции, которые на границах «однотипных» участков могут иметь разрыв. В статье предлагается алгоритм построения кусочно-непрерывной аппроксимирующей функции, доставляющий минимальное значение выбранному критерию качества аппроксимации. Построение кусочно-непрерывной аппроксимирующей функции выполняется слева направо, что позволяет для определения границ интервалов разбиения применить метод динамического программирования. Количество интервалов разбиения определяется исходя из экстремального характера поведения критерия качества аппроксимации.

Ключевые слова: аппроксимация, сегментация, структурные сигналы, динамическое программирование

В различных приложениях возникает задача анализа так называемых структурных экспериментальных сигналов, рассматриваемых в виде последовательной во времени комбинации более простых сигналов (функций), обладающих на соответствующих временных интервалах постоянными свойствами [1–4]. В [2] для решения этой задачи предлагается алгоритм кусочной аппроксимации, доставляющий глобальный минимум выбранному критерию качества аппроксимации, при этом на границах «однотипных» участков аппроксимирующая функция может иметь разрыв.

Целью работы является разработка алгоритма кусочно-непрерывной аппроксимации экспериментальных сигналов при заранее неизвестном числе интервалов разбиения сигнала на «однотипные» фрагменты, доставляющего при определенных условиях минимальное значение выбранному критерию качества аппроксимации и основанному на методе динамического программирования.

Постановка задачи сводится к следующему.

Пусть $y(t_k)$, $k = 1, \dots, N$, — выборка экспериментальных значений исследуемого сигнала $y(t)$. Критерий качества аппроксимации J на этой выборке экспериментальных значений зададим в виде

$$J = \sum_{j=1}^r \frac{n_j}{n_j - m - 1} \sum_{t_i \in (T_{j-1}, T_j]} [y(t_i) - F_j(t_i, \alpha_j)]^2, \quad (1)$$

где r — число однотипных участков (интервалов); n_j — число дискретных отсчетов на j -м интервале $(T_{j-1}, T_j]$; $F_j(t, \alpha_j) = \sum_{k=1}^m \alpha_{jk} \varphi_k(t)$ — многочлен по заданному набору базисных функций $\{\varphi_k(t), k=1, \dots, m\}$, $\alpha_j = (\alpha_{j1}, \dots, \alpha_{jm})$ — вектор оцениваемых параметров на j -м интервале. Веса $n_j / (n_j - m - 1)$ — это обычные нормирующие коэффициенты, учитывающие размерность модели.

Требуется найти разбиение $T = (T_0, T_1, \dots, T_r)$ ($T_0 < T_1 < \dots < T_r$) заданного отрезка $[t_1, t_N]$, $T_0 = t_1$, $T_r = t_N$ на r интервалов $(T_{j-1}, T_j]$, $j = 1, \dots, r$ (r — в общем случае неизвестно) и определить на каждом из этих интервалов такие значения векторов параметров α_j , чтобы критерий (1) принимал минимальное значение при условии ограничений на непрерывность аппроксимирующей функции:

$$F_j(T_j, \alpha_j) = F_{j+1}(T_j, \alpha_{j+1}), \quad j = 1, \dots, r - 1. \quad (2)$$

Обозначим через $\varepsilon(T_{j-1}, T_j)$ ошибку аппроксимации на интервале $(T_{j-1}, T_j]$, подсчитанную по методу наименьших квадратов при ограничениях (2). Тогда критерий (1) примет вид

$$J = \sum_{j=1}^r \frac{n_j}{n_j - m - 1} \varepsilon(T_{j-1}, T_j).$$

Сделаем следующее предположение. Пусть задано некоторое разбиение $T = (T_0, T_1, \dots, T_r)$. Для этого разбиения кусочно-непрерывную функцию будем строить слева направо, т. е. сначала рассматриваем отрезок $[T_0, T_1]$ и находим локальную аппроксимирующую функцию $F_1(t, \alpha_1)$, доставляющую минимум $\varepsilon(T_0, T_1)$. Далее рассматриваем $[T_1, T_2]$ находим локальную аппроксимирующую функцию $F_2(t, \alpha_2)$, доставляющую минимум $\varepsilon(T_1, T_2)$, при ограничении на непрерывность на границе T_1 : $F_1(T_1, \alpha_1) = F_2(T_1, \alpha_2)$, и т. д.

При этом предположении критерий (1) с ограничениями (2) обладает следующим свойством. Пусть T_j^* — некоторое фиксированное положение правой границы j -го интервала. Тогда границы T_1^*, \dots, T_{j-1}^* , полученные минимизацией (1) только по границам T_1, \dots, T_{j-1} , не зависят от значений границ T_{j+1}, \dots, T_{r-1} . Действительно, функционал (1) можно представить в виде суммы двух неотрицательных величин $J = J_a + J_b$, где

$$J_a = J_a(T_1, \dots, T_{j-1} / T_j^*) = \sum_{k=1}^j \frac{n_k}{n_k - m - 1} \varepsilon(T_{k-1}, T_k);$$

$$J_b = J_b(T_{j+1}, \dots, T_{r-1}/T_j^*) = \sum_{k=j+1}^r \frac{n_k}{n_k - m - 1} \varepsilon(T_{k-1}, T_k);$$

$$T_j = T_j^*.$$

Но тогда очевидно, $\arg \min_{T_1, \dots, T_{j-1}} J = \arg \min_{T_1, \dots, T_{j-1}} J_a$. Из этого свойства следует, что если T_j^* —

оптимальное положение j -й границы, то и границы T_1^*, \dots, T_{j-1}^* , полученные минимизацией J по T_1, \dots, T_{j-1} , также оптимальны. Рассмотренное свойство критерия (1) позволяет воспользоваться процедурой динамического программирования [3] для определения оптимальных границ интервалов.

Пусть число интервалов равно r_0 . Следующий рекуррентный алгоритм находит разбиение и локальные аппроксимирующие функции, доставляющие оптимальное значение функционалу (1) (при сделанном выше предположении).

Сначала последовательно табулируются функции $J_j(T_j)$, $j = 1, 2, \dots, r_0 - 1$, где

$$J_1(T_1) = \frac{n_1}{n_1 - m - 1} \varepsilon(T_0, T_1); \quad T_1 = t_p, \dots, t_{N-(r_0-1)p};$$

$$J_j(T_j) = \min_{T_{j-1} = t_{(j-1)p}, \dots, t_{T'_j - p}} \left(J_{j-1}(T_{j-1}) + \frac{n_j}{n_j - m - 1} \varepsilon(T_{j-1}, T_j) \right); \quad T_j = t_{j,p}, \dots, t_{N-(r_0-j)p};$$

$$j = 2, \dots, r_0 - 1.$$

Здесь T'_j — номер отсчета, соответствующий границе T_j ; p — заданное минимально допустимое число отсчетов на интервале разбиения. Одновременно запоминаются значения $M_{j-1}(T_j)$, $T_j = t_{j,p}, \dots, t_{N-(r_0-j)p}$; $j = 2, \dots, r_0 - 1$ — значения оптимальных положений границ T_{j-1} для каждого T_j . Далее определяются оптимальные границы интервалов:

$$T_{r_0-1}^* = \arg \min_{T_{r_0-1} = t_{(r_0-2)p}, \dots, t_{N-p}} \left\{ J_{r_0-1}(T_{r_0-1}) + \frac{n_{r_0}}{n_{r_0} - m - 1} \varepsilon(T_{r_0-1}, t_N) \right\};$$

$$T_{r_0-2}^* = M_{r_0-2}(T_{r_0-1}^*), \dots, T_1^* = M_1(T_2^*).$$

Для нахождения разбиения $T^H = (T_0, T_1^H, \dots, T_{r_0-1}^H, T_{r_0})$ при неизвестном числе интервалов используется экстремальный характер зависимости J от r . Действительно, при увеличении r , с одной стороны, происходит увеличение весов $n_j / (n_j - m + 1)$ — за счет уменьшения в среднем n_j , что при прочих равных условиях приводит к увеличению критерия (1). С другой стороны, при увеличении числа интервалов происходит уменьшение обычной квадратичной невязки, что приводит к уменьшению (1). Одновременное действие этих факторов приводит к тому, что функционал (1) дости-

гает своего минимального значения на некотором промежуточном (не граничном) значении r_H .

Для определения r_H можно воспользоваться подходом, предложенном в работе [2]. Сначала подсчитываются минимальные значения функционала (1) $J_j(t_N)$, $j = 2, \dots, r_{\max}$. Одновременно запоминаются значения $M_{j-1}(T_j)$ оптимальных положений границ T_{j-1} для каждого T_j . Далее производится выбор числа интервалов и определяются оптимальные границы. В качестве r_H выбирается такое наименьшее число интервалов r , при котором $J_r(t_N)$ принимает минимальное значение. Оптимальные границы $T_1^H, \dots, T_{r_H-1}^H$ определяются из выражений, аналогичных (4):

$$T_{r_H-1}^H = M_{r_H-1}(t_N), \quad T_{r_H-2}^H = M_{r_H-2}(T_{r_H-1}^H), \dots, T_1^H = M_1(T_2^H).$$

Величина r_{\max} выбирается из содержательных или статистических соображений. В частности, в качестве r_{\max} можно использовать величину $[N/p]$, где $[x]$ — целая часть x .

Таким образом, предложенный подход позволяет применить метод динамического программирования для построения кусочно-непрерывной аппроксимирующей функции. Используя экстремальный характер поведения критерия качества аппроксимации, определяется число интервалов разбиения.

Литература

- [1] Моттль В.В., Мучник И.Б. *Скрытые марковские модели в структурном анализе сигналов*. Москва, Физматлит, 1999.
- [2] Дмитриев А.Г. Алгоритм оптимальной структурной аппроксимации экспериментальных многомерных сигналов. *Научно-технические ведомости СПбГПУ*, 2010, № 9, с. 31–35.
- [3] Костин А.А., Красоткина О.В., Марков М.В., Моттль В.В., Мучник И.Б. Алгоритмы динамического программирования для анализа нестационарных сигналов. *Журнал вычислительной математики и математической физики*, 2004, т. 44, № 1, с. 70–86.
- [4] Дмитриев А.Г., Дорофеев А.А. Методы кусочной аппроксимации многомерных кривых. *Автоматика и телемеханика*. 1984. № 12, с. 101–108.
- [5] Беллман Р., Дрейфус С. *Прикладные задачи динамического программирования*. Москва, Наука, 1969.

Сведения об авторе:

Дмитриев Александр Георгиевич — канд. техн. наук, доцент, кафедра математики, Череповецкое высшее военное инженерное училище радиоэлектроники, Череповец, Россия, SPIN-code: 2509-0426

Piecewise Continuous Segmentation of the Experimental Signals

© | A.G. Dmitriev

dag334a@fxmail.ru

Cherepovets Higher Military Engineering School of Radio Electronics,
Cherepovets, Russian Federation

By now there are many articles dedicated to the analysis of structural signals being processed in the majority of cases in two stages: singling out «one type» fragments (a stage of segmentation) and giving then a general description of the signals presented. Application of the existing methods is not effective enough, when the research is carried out under conditions limited experimental observations and the unknown number of «one type» fragments (intervals of partitioning). In addition, the result of segmentation of the experimental signals are constructed approximating functions that are on the borders of the «one type» areas can have a break. This paper proposes an approach for constructing the piecewise-continuous approximating function that delivers extreme value of the selected criterion of approximation quality. The construction of a piecewise-continuous approximating function is executed “from left to right”, which allows to determine the boundaries of intervals partitioning to apply the method of dynamic programming. The number of intervals partitioning is determined based on the extreme nature of the behavior criterion of approximation quality.

Keywords: approximation, segmentation, structural signals, dynamic programming

References

- [1] Mottl V.V., Muchnik I.B. *Hidden Markov models in structural analysis of signals*. Moscow, Fizmatlit, 1999.
- [2] Dmitriev A.G. The Algorithm of optimal structural approximation of experimental multidimensional signals. *Naukoemkie tehnologii*, 2010, no. 9, pp. 31–35.
- [3] Kostin A.A., Krasotkina O.V., Markov M.V., M. Mottl V.V., Muchnik I.B. Dynamic programming algorithms for analysis of non-stationary signals. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2004, vol. 44, no 1, pp. 62–77.
- [4] Dmitriev A. G., Dorofeyuk, A. A. Methods for piecewise approximation of multidimensional curves. *Automatics and telemechanics*, 1984, no. 12, pp. 101–108.
- [5] Bellman R., Dreyfus S. *Applied problems of dynamic programming*. Moscow, Nauka, 1969.

Information about authors:

Dmitriev A.G. — PhD; academic status of associate Professor; the position of associate Professor; Cherepovets Higher Military Engineering School of Radio Electronics, Cherepovets, Russia, SPIN-code: 2509-0426

УДК

Математическая модель батареи фотоэлектрической с регулированием мощности параллельного типа

© В.Г. Еременко
Е.Д. Щеглов

YeremenkoVG@mpei.ru

Национальный исследовательский университет
«Московский энергетический институт», Москва, Россия

Математическая модель содержит упрощенную модель батареи фотоэлектрической, упрощенную модель регулятора импульсной мощности параллельного типа и упрощенную модель нагрузки (бортовая сеть), а также обоснования ко всем элементам модели. Все испытания математической модели идентичны испытаниям макетного, а также готового, летного, образца регулятора импульсной мощности и системы управления регулятором импульсной мощности.

Ключевые слова: батарея фотоэлектрическая, аккумуляторная батарея, регулятор тока, аппаратура регулирования и контроля

Введение. В настоящее время регулирование избыточной мощности от батарей фотоэлектрических (БФ) — актуальная тема в космонавтике. Существует большое количество разновидностей регуляторов тока разработанных для регулирования избыточной мощности от космических солнечных батарей. Сравнительно недавно начали разрабатывать аппаратуру регулирования и контроля (АРК) на базе полевых транзисторов с резервированием методом глубокого секционирования, в том числе регулятор избыточной мощности, что приводит к стабильности системы при выходе из строя одного или нескольких элементов. Математическая модель, рассматриваемая в дальнейшем, будет упрощенной, но на работу и результаты испытаний это никак не повлияет.

Расчетные исследования регулятора тока. Выбор метода расчетных исследований переходных процессов регулятора тока. На сегодняшний день по очевидным причинам обладают большей популярностью программы математического моделирования, нежели макетирование или расчет характеристик вручную. Идя в ногу со временем исследование регулятора тока будет проводиться в программе математического моделирования Pspice [5].

Идеальная математическая модель будет состоять из солнечной батареи, регулятора тока и бортовой сети.

Исследования математической модели регулятора тока. Исследование режимов работы электронного ключа в схеме РТ АРК при различных значениях параметров эквивалентной схемы БФ.

Исследование проведено с помощью математического моделирования эквивалентной схемы генератора БФ, подключенного к входу регулятора тока, схема представлена на рис. 1.

На рис. 2 представлена эквивалентная схема нескольких ячеек батареи фотоэлектрической. Диоды 1, 2 и n эмитируют ячейки батареи фотоэлектрической, а диоды 1.1, 2.1, $n.1$ представляют собой обратные диоды, которые устанавливаются спе-

циально параллельно каждой ячейке для резервирования каждой ячейки БФ. При выходе любой из ячеек солнечная батарея продолжит работать, образуя замкнутую цепь за счет обратных диодов.

Параметры БФ указаны в таблице. Остальные параметры указаны на схеме математической модели (рис. 4). Частота коммутации транзистора $VT = 20$ кГц, скважность $\gamma = 2$.

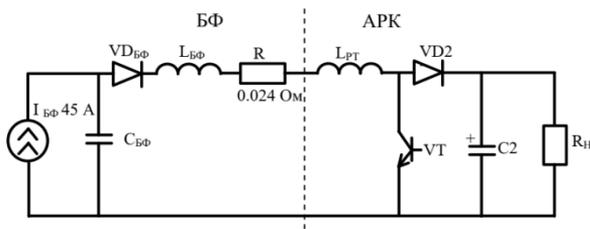


Рис. 1. Схема модели БФ и РТ

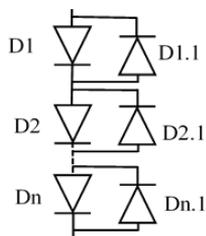


Рис. 2. Эквивалентная схема ячеек батареи фотоэлектрической

В модели представлена батарея фотоэлектрическая, состоящая из источника тока, прямых и обратных диодов, эмитирующих ячейки БФ, дроссели, имитирующие индуктивность проводов, паразитная емкость самой БФ, электронный ключ, представляющий собой набор параллельно соединенных транзисторов регулятора импульсной мощности (рис. 3).

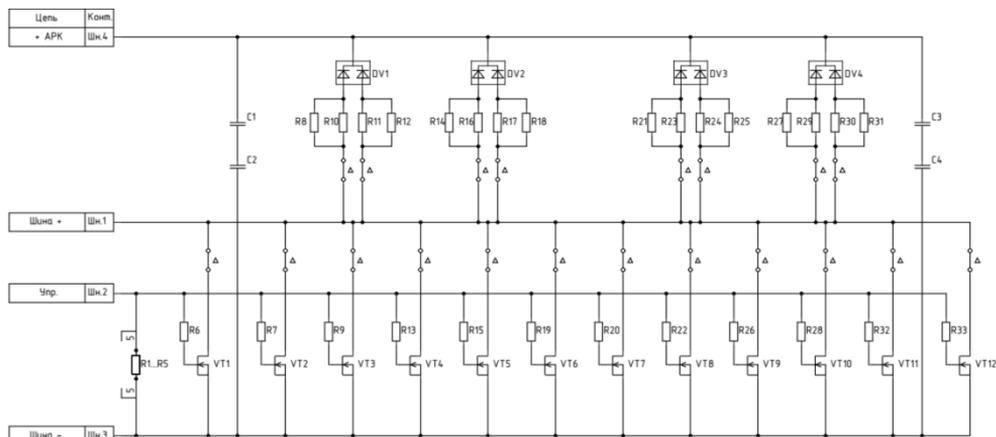


Рис. 3. Схема регулятора импульсной мощности батареи фотоэлектрической

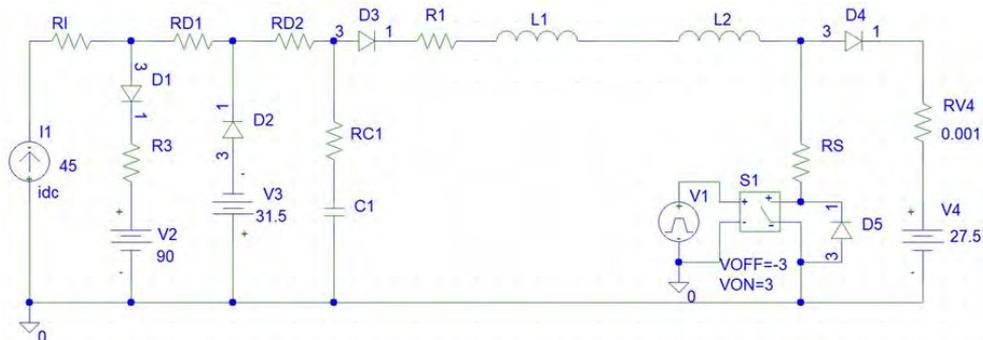


Рис. 4. Математическая модель батареи фотоэлектрической, регулятора импульсной мощности и нагрузки

Параметры моделирования

$I_{БФ}$	$C_{БФ}^*$	$L_{БФ}^*$	$L_{РТ}$	№ рисунка
45 А	1 мкФ	1 мкГн	0,1 мкГн / 10мкГн	5

* — неизменяемые параметры, заданные конструкцией БФ.

Результаты моделирования отражены на рис. 5–7.

В результате испытаний математической модели было выявлено, что математическая модель работает, а также регулирование тока от БФ регулятором тока напряжение зависит от величины размерности дросселя. Чем больше номинал дросселя, тем меньше пульсации тока через транзистор регулятора тока.

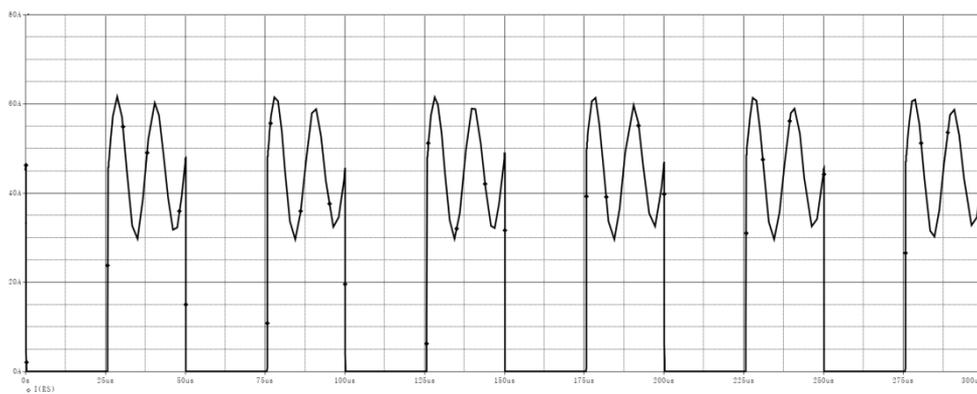


Рис. 5. Результаты моделирования ($I_{VT}, L_{РТ} = 0,1 \text{ мкГн}$)

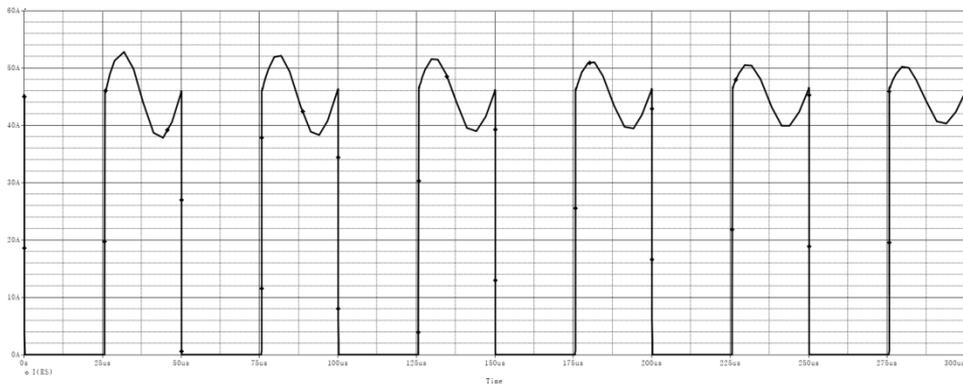


Рис. 6. Результаты моделирования (I_{VT} , $L_{PT} = 10$ мкГн)

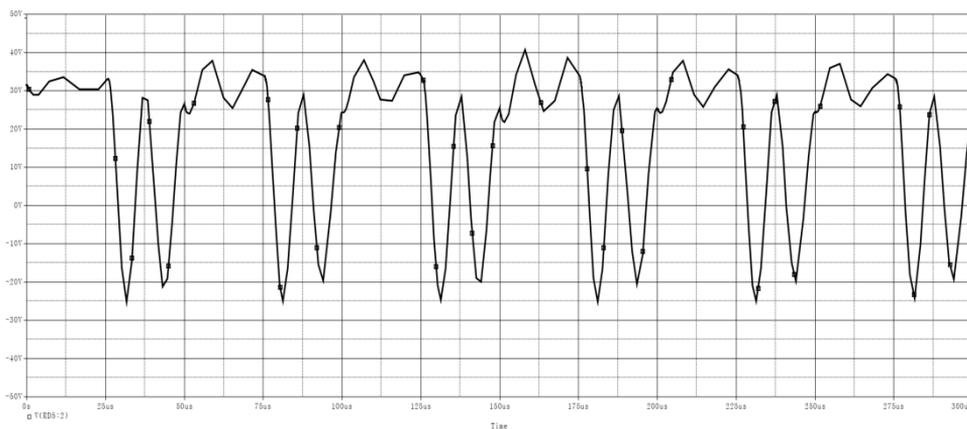


Рис. 7. Результаты моделирования (U_{CBF} , $L_{PT} = 0,1$ мкГн)

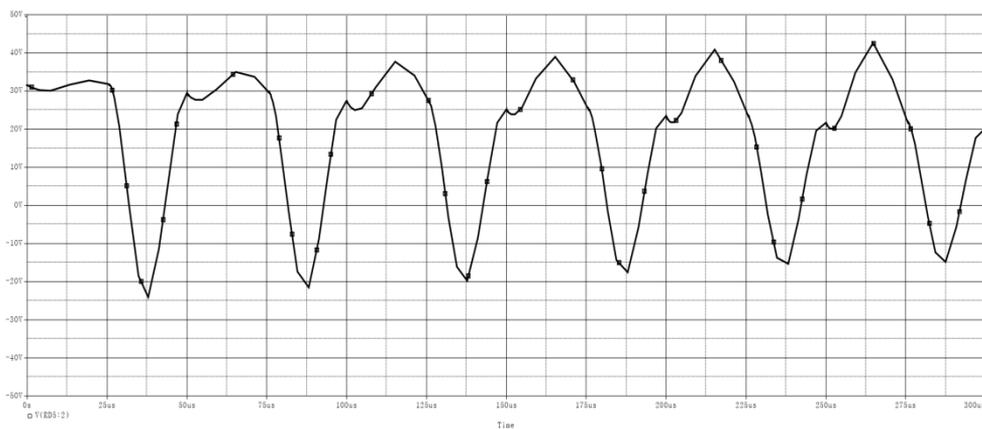


Рис. 8. Результаты моделирования (U_{CBF} , $L_{PT} = 10$ мкГн)

Заключение. Разработанная математическая модель актуальна на сегодняшний день, как для исследований переходных процессов системы регулирования мощности солнечной батареи, так и в образовательных целях. Преимуществом модели являются простота самой схемы и простота изменения параметров модели. В качестве плюсов можно отметить близкое сходство результатов исследования данной математической модели к реальному макетному образцу, исследованного в лаборатории с использованием имитатора солнечной батареи. В качестве минусов — нечеткая вольт-амперная характеристика батареи фотоэлектрической, приближенная к реальной более линейными участками, а также невозможность использования данной модели солнечной батареи в других системах управления ее мощностью, например в последовательной.

На сегодняшний день начали создавать батареи фотоэлектрические с более высоким напряжением выхода, т. е. более мощные, но за счет этого вырастает паразитная емкость батареи, также ей сложнее управлять из-за больших напряжений и вопросов резервирования таких систем управления, не понижая КПД и обеспечивая высокую надежность системы.

Выражаем большую благодарность генеральному конструктору АО «АВЭКС» М.Ю. Ганзбургу и начальнику сектора 1, ОГК-1, АО«АВЭКС» Ю.К. Бедрину за предоставление материалов, макетного образца и лаборатории для исследований данной математической модели.

Литература

- [1] Пономарев И.Г. *Исследование некоторых методов повышения надежности транзисторных преобразователей и способов их реализации*: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 1976, 197 с.
- [2] Веденеев Г.М. Стабилизация выходного напряжения статических преобразователей на транзисторах. *Электротехника*, 1968, № 10, с. 34–38.
- [3] Сарафанов А.В., Трегубов С.И. *Электрические, электрофизические, эксплуатационные, теплофизические, физико-механические и надежность параметры ЭРЭ и материалов конструкций РЭС*: Справочник. Красноярск, КГТУ, 1998, 178 с.
- [4] Крылов А.В. Геостационарные спутники связи и вещания за первые 10 лет XXI века. *Connect*, 2011, № 7, с. 93–96.
- [5] *Отчет о НИР «Разработка комплексных математических моделей Cals-технологий проектирования радиоэлектронных средств с учетом дестабилизирующих факторов»*. Москва, МГИЭМ, 2001, 45 с.
- [6] Грузков С.А. *Конспект лекций по курсу «Системы электроснабжения летательных аппаратов»*. 2018.
- [7] Грузков С.А., Останин С.Ю., Сугробов А.М. и др. *Электрооборудование летательных аппаратов: Т. 1. Системы электроснабжения летательных аппаратов*. Москва, Изд-во МЭИ, 2005, 568 с.

Сведения об авторах:

Еременко В.Г. — д-р техн. наук, почетный академик АЭН РФ, профессор Московского энергетического института, г. Москва, Россия

Щеглов Е.Д. — студент Московского энергетического института, г. Москва, Россия

Mathematical Model of Photoelectric Battery with Regulated Power of Parallel Type

© | V.G. Eremenko
E.D. Scheglov

YeremenkoVG@mpei.ru

National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russia

The mathematical model contains a simplified model of a photovoltaic battery, a simplified model of a parallel-type impulse power regulator, and a simplified load model (on-board network). There are also justifications for all elements of the model. All tests of the mathematical model are identical to the tests of the prototype, as well as the finished, flight, sample of the pulse power controller and the control system of the impulse power controller.

Keywords: *photoelectric battery, storage battery, current regulator, regulation and control equipment*

References

- [1] Ponomarev I.G. *Issledovaniya nekotorykh metodov povysheniya nadezhnosti tranzistornykh preobrazovateley i sposobov ih realizacii*. Moscow, PhD thesis, 1976. 197 p.
- [2] Vedeneev G.M. Stabilizaciya vyhodnogo napryazheniya staticheskikh preobrazovateley na tranzistorah. *Electrical engineering*, 1968, № 10, pp. 34–38.
- [3] Saraphanov A.V., Tregubov S.I. Elektricheskie, elektrofizicheskie, ekspluatacionnye, teplofizicheskie, fiziko-mekhanicheskie i nadyozhnostnye parametry ERE i materialov konstrukcij RES. Krasnoyarsk, KSTU, 1998, 178 p.
- [4] Krylov A.V. Geostacionarnye sputniki svyazi i veshchaniya za pervye 10 let XXI veka. *Connect*, 2011, №7. pp. 93-96.
- [5] Otchyot po NIR: “*Razrabotka kompleksnykh matematicheskikh modelej Cals-tehnologij proektirovaniya radioelektronnykh sredstv s uchyotom destabiliziruyushchih faktorov*”. Moscow, MIEM, 2001, 45 p.
- [6] Gruzkov S.A. *Konspekt lekcij po kursu “Sistemy elektrosnabzheniya letatel'nykh apparatov”*. 2018.
- [7] Gruzkov S.A., Ostanin S.U., Sugrobov A.M. et al. *Elektrooborudovanie letatel'nykh apparatov. Vol. 1. Sistemy elektrosnabzheniya letatel'nykh apparatov*. Moscow, MPEI, 2005, 568 p.

Information about authors:

Eremenko V.G. — DSc, professor, MPEI, Moscow, Russia

Scheglov E.D. — student, MPEI, Moscow, Russia

УДК 004.7

Прогноз самоподобного сетевого трафика на основе фрактальной авторегрессионной модели скользящего среднего

© | И.П. Иванов
М.А. Басараб
А.В. Колесников

igor.ivanov645@gmail.com

bmic@mail.ru

avkolesnikov89@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Большинство современных протоколов передачи трафика разрабатывались на базе теории массового обслуживания и статистических показателях трафика [1]. Разработка и тестирование таких алгоритмов проводились на основе модели Пуассона и других процессов восстановления [2]. В таких моделях не учитывается тот факт, что трафик современных корпоративных сетей обладает периодами сильных всплесков активности или так называемым «взрывным» характером. АКФ таких процессов не обращается в нуль при больших значениях лага. В современных работах все чаще указывается, что трафик высоконагруженных корпоративных сетей обладает самоподобным характером и распределением с тяжелым хвостом. Совокупность потоков данных, проявляющих свойства бесконечной дисперсии, приводит к самоподобию. Такой процесс передачи данных отличается от пуассоновского, короткие периоды повышенной активности приводят к переполнению буферов коммутаторов даже при невысокой средней нагрузке на сеть. В настоящей работе проведено исследование статистических и динамических характеристик передаваемого трафика одного из серверов корпоративной сети, установлены самоподобные и хаотические свойства, рассчитаны показатели Ляпунова и Херста, указывающие на возможность прогнозирования исследуемых процессов. В среде MATLAB Simulink разработана модель исследуемой сети, представляющая собой стандартную топологию типа «звезда» с узлом, моделирующим работу маршрутизатора с буфером конечной длины, а также с переменным количеством узлов, генерирующих пакеты переменной длины и базовые алгоритмы TCP. Установлено соответствие характеристик реальных и моделируемых данных, на основе которых проведен сравнительный анализ нескольких моделей временных рядов, различными метриками выполнена оценка точности получаемых прогнозов, установлено, что фрактальная интегрированная модель авторегрессии — скользящего среднего — лучше других описывает поведение самоподобных процессов, а также подходит для задач прогнозирования фрактального телекоммуникационного трафика [3]. Полученные результаты могут быть использованы при разработке протоколов управления трафиком в SDN-сетях, борьбы с перегрузками на уровне коммутатора, разработках модификаций протокола TCP и т. д.

Ключевые слова: модель, трафик, компьютерная сеть, нагрузка, моделирование, самоподобие

Введение. Как известно [1, 2], для повышения качества обслуживания абонентов (QoS) в сети, реализуется комплекс алгоритмов управления трафиком, предотвращения перегрузок, управления очередями коммутаторов и т. д. Разработка

подходящих способов прогнозирования трафика может быть внедрена на любом уровне задачи обеспечения качества обслуживания.

В работе проведен сбор данных передаваемого трафика одного из нагруженных серверов сети, проведен анализ данных, сделан вывод о допустимости прогнозирования данных. Для дальнейших испытаний разработана модель сегмента сети, установлено соответствие характеристик моделируемых и реальных данных. На основе различных моделей рядов выполнен прогноз с небольшим горизонтом прогнозирования и установлена математическая модель ряда, наиболее оптимально описывающая процесс передачи трафика. Для обработки очереди коммутатора разработана модификация алгоритма RED с учетом краткосрочного прогнозирования состояния буфера и перераспределения ресурсов, как это могло бы быть реализовано в архитектуре DiffServ [4], получены количественные результаты снижения потерь пакетов при работе сегмента сети в режиме перегрузки, а также повышения полезной пропускной способности.

Анализ данных. В работе производился мониторинг сервера корпоративной сети МГТУ им. Н.Э. Баумана [5]. Физическая машина поделена на несколько виртуальных с ОС Linux, каждая из которых используется под ряд задач, таких как СУБД, web-серверы, файл-серверы и т. д. Большая часть трафика передается по HTTP, интерфейс 100 Мбит/с, Ethernet.

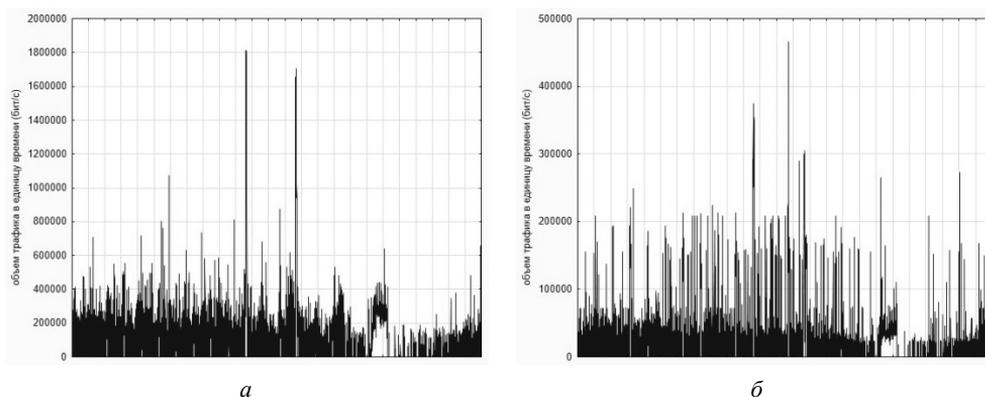


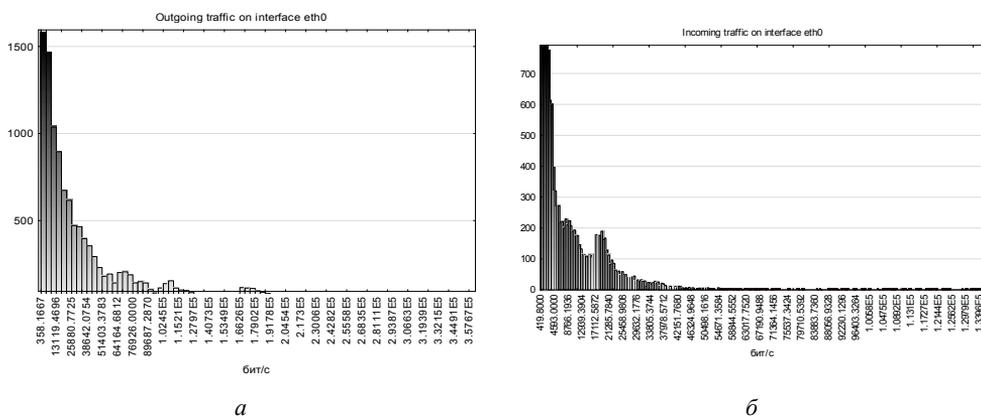
Рис. 1. Временная зависимость объема трафика в единицу времени:
а — входящий дневной трафик; *б* — исходящий дневной трафик

В первую очередь проанализируем функцию плотности распределения. На основе гистограмм (рис. 2) видно, что плотность распределения вероятности процессов передачи входящего и исходящего трафика имеет степенной характер и, соответственно, подчиняются некоторому классу распределений с тяжелым хвостом [6] (Стьюдента [17] или Парето [16]).

Из графиков АКФ (рис. 3) [18] также можно заключить, что процесс передачи трафика обладает медленно убывающей зависимостью.

Обычно при анализе долгосрочной устойчивости в поведении временного ряда в рамках теории случайных блужданий различными способами рассчитывают показатель Херста [7] H . Оценка показателя не только может помочь сделать заключение о самоподобии процесса, но и позволит в дальнейшем применить к нему ряд математических методов по прогнозированию фрактальных процессов [8]. Величина $H < 1/2$ говорит о долгосрочном некоррелированном характере ряда, $H > 1/2$ указывает на

долгосрочную положительную корреляцию. Как и ожидалось, значение параметра указало на существование долгосрочной зависимости и самоподобия. Значения показателя Херста трафика приведены в табл. 3.

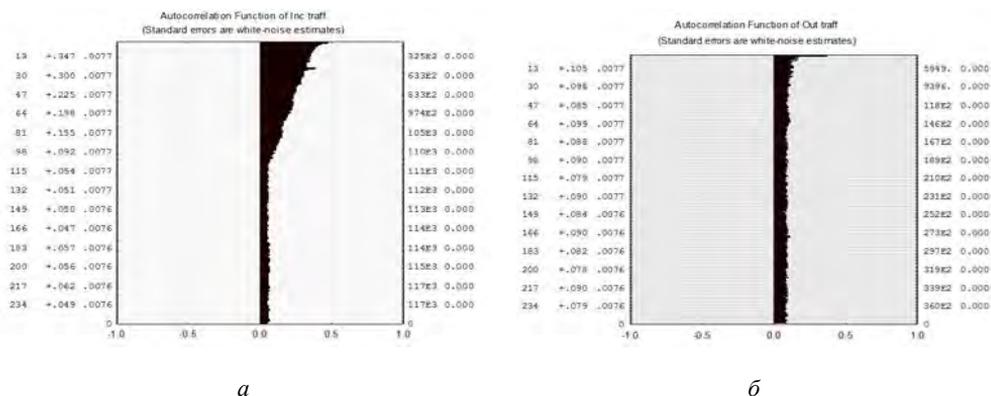


a

б

Рис. 2. Гистограммы собранных данных:

a — гистограмма исходящего трафика (интерфейс Eth0);
б — гистограмма входящего трафика (интерфейс Eth0)



a

б

Рис. 3. Гистограммы собранных данных:

a — гистограмма исходящего трафика (интерфейс Eth0);
б — гистограмма входящего трафика (интерфейс Eth0)

**Значения показателя Херста для сетевого трафика,
 полученные различными алгоритмами**

Характеристика	<i>R/S</i>	Периодограммный анализ	Метод агрегированных дисперсий
Входящий трафик, бит/с	0,9775	0,9687	0,8655
Исходящий трафик, бит/с	0,9712	0,9648	0,8511

Таким образом, можно сделать вывод о прогнозируемости полученных данных и перейти к выбору подходящей математической модели, наиболее достоверно описывающей процесс передачи трафика.

Выбор модели данных и прогнозирование. Формально задача прогнозирования временного ряда $X(t) = X(1), X(2), \dots, X(T)$ в момент времени T состоит в определении значений ряда $X(t)$ в моменты времени $T + 1, T + 2, \dots, T + T'$, где T' — время упреждения или горизонт прогноза. Другими словами, определение будущего состояния процесса основывается на известных значениях ряда, а прогноз основывается на модели, отражающей функциональную зависимость между будущими и прошлыми значениями ряда [9].

Для определения степени адекватности модели прогнозирования необходимо использовать ряд методик по оценке точности прогноза, в частности, ошибки прогнозирования. Ошибка прогнозирования e_τ — это разница между реализацией ряда и прогнозным значением ряда:

$$e_\tau = X_{T+\tau} - X'_{T+\tau},$$

где $X_{T+\tau}$ — реальное значение ряда; $X'_{T+\tau}$ — прогнозное значение ряда.

Для оценки точности модели рассчитывалась абсолютная средняя ошибка прогнозирования MAE [10]:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |e_t|.$$

Сравнительному анализу были подвергнуты $AR(p)$ — модель авторегрессии порядка p (с выбором порядка согласно ЧАКФ), $ARIMA(p, d, q)$ — модель авторегрессии скользящего среднего, алгоритм SSA — singular spectrum analysis [19], а также FARIMA — фрактальная авторегрессионная модель скользящего среднего [11]. Алгоритм оценки эффективности моделей сводился к следующему: выполнялся прогноз на 1 шаг вперед, состояние модели пересчитывалось, после чего вновь проводился прогноз и т. д.

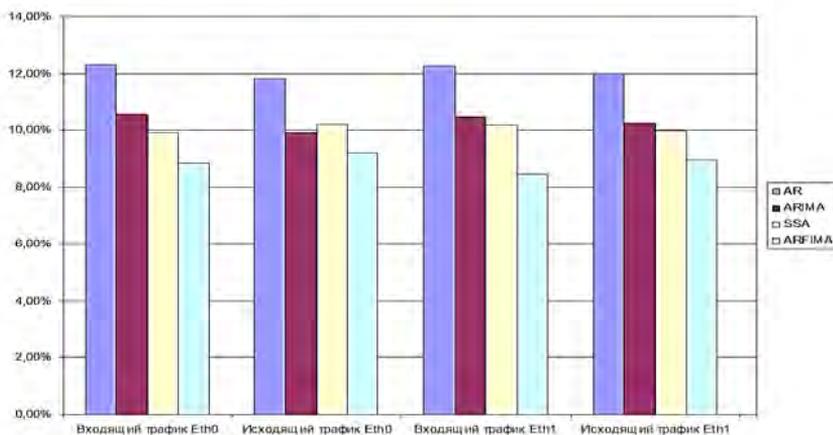


Рис. 4. Ошибка прогнозирования для различных моделей

Согласно оценке, модель FARIMA(p, d, q) превосходит остальные рассмотренные по точности прогнозирования, что согласуется со спецификой модели и самоподобным характером исследуемых процессов.

Разработка модели сегмента сети. Создание модели сегмента сети проводилось средствами библиотеки Sim Events [20] пакета MATLAB [12]. Принципиально модель представляет сеть с топологией типа «звезда» с переменным числом конечных устройств, подключенных к коммутатору. Источник трафика реализует модель протокола TCP с учетом алгоритма «скользящего окна», медленного старта, повторной передачи потерянных пакетов и т. д. [1].

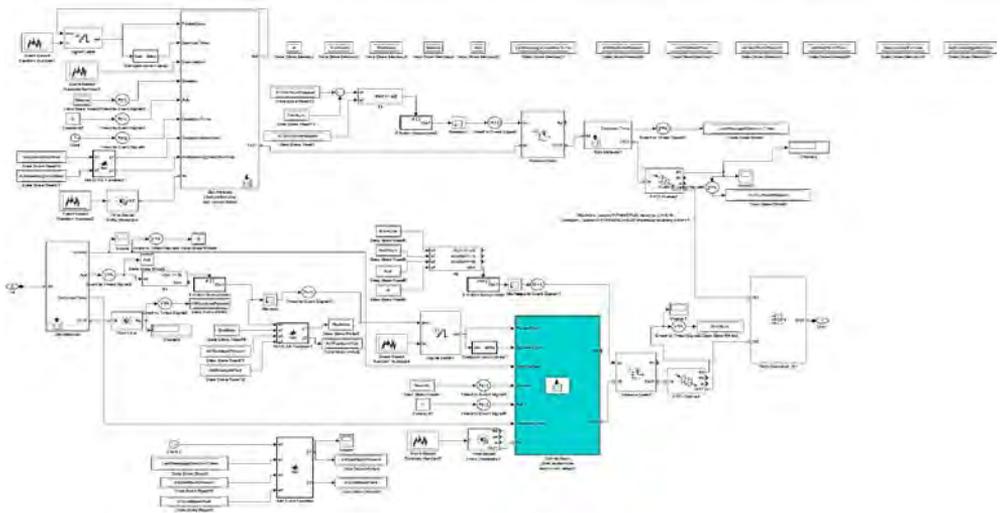
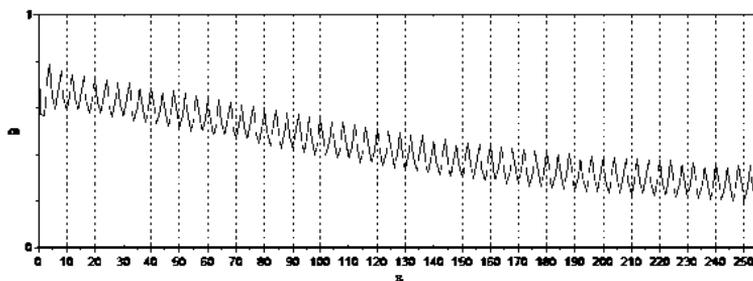


Рис. 5. Модель источника трафика

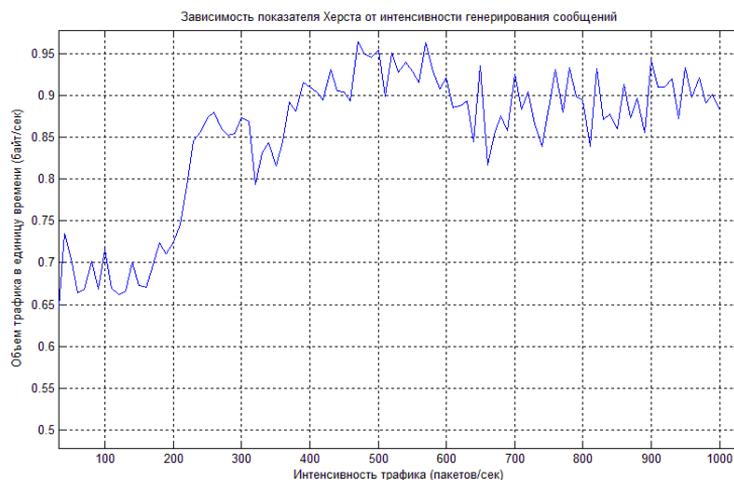
Коммутирующее устройство моделирует управление буфером согласно алгоритму RED [13] с возможностью перераспределения ресурсов между потоками, метки потоков задаются произвольно на конечных устройствах, как это может быть реализовано в архитектуре Diff Serv.

Характеристики моделируемого потока трафика совпадают с результатами анализа реальных данных: медленно затухающий характер АКФ, показатель Херста близкий к 0,9. Это указывает на наличие медленно убывающей зависимости и позволяет ввести прогноз. Показатель Херста экспоненциально стремится к значению 0,9 при росте нагрузки.

Для того чтобы задействовать прогнозирование на основе FARIMA(p, d, q) — модели для управления очередью коммутатора — был реализован модифицированный Advanced RED алгоритм [15], в котором среднее значение очереди коммутатора рассчитывалось на основе FARIMA модели поступающего трафика. Проведено моделирование работы сегмента сети в режиме перегрузок, установлено снижение процента потерь пакетов в диапазоне 9...12 % и повышения полезной пропускной способности на 12...17 % по сравнению с Advanced RED при переменной нагрузке.



a



б

Рис. 6. Характер моделируемого трафика:
a — АКФ; *б* — показатель Херста при различной нагрузке

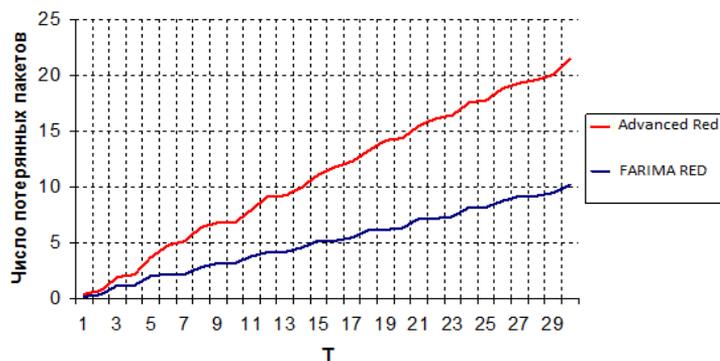


Рис. 7. Зависимость потерь пакетов от времени моделирования

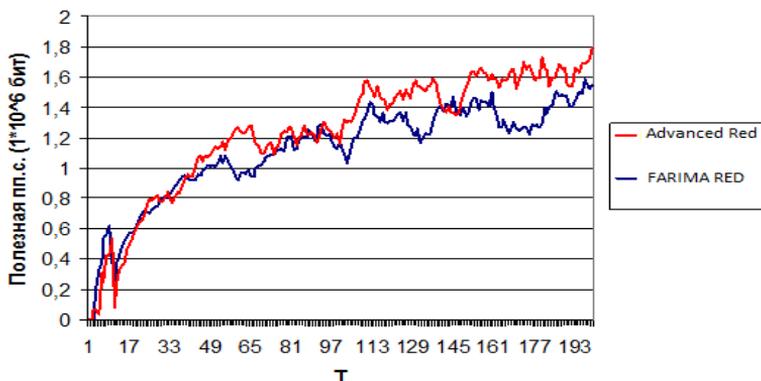


Рис. 8. Зависимость полезной пропускной способности от времени моделирования

Заключение. Использование модели FARIMA(p, d, q) эффективно при работе с самоподобными процессами и, в частности, может быть задействовано в задаче обеспечения качества обслуживания абонентов сети, управления перегрузками и т. д.

Литература

- [1] Stallings W. *Data and Computer Communications*. Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 2010.
- [2] Таненбаум Э., Уэзеролл Д. *Компьютерные сети*. 5-е изд. СПб., Питер, 2012.
- [3] Иванов И.П., Басараб М.А., Колесников А.В. Нелинейно-динамические модели сетевого трафика. *Нелинейный мир*, 2014, № 4, т. 12.
- [4] Khater A., Hashemi M.R. Dynamic Flow Management Based on DiffServ in SDN Networks. *Electrical Engineering (ICEE), Iranian Conference on*, IEEE, 2018, с. 1505–1510.
- [5] Basarab M.A., Ivanov I.P., Kolesnikov A.V. University corporative network traffic analysis on the base of nonlinear dynamics methods. *Science and Education. Electronic scientific and technical periodical*, 2013, no. 08. DOI: 10.7463/0813.0587054
- [6] Бельков Д.В., Едемская Е.Н. *Статистический анализ сетевого трафика*. Донецк, Донецкий национальный технический университет, 2011.
- [7] Hurst H., Black R. *Long-Term Storage: An Experimental Study*. London, Constable, 1965.
- [8] Kirillov D.S. Distribution of the Hurst Exponent of a Nonstationary Marked Time Series / D.S. Kirillov, O.V. Korob, N.A. Mitin, Yu.N. Orlov, R.V. Pleshakov. *Keldysh Institute of Applied Mathematics. Preprints*, 2013, no. 11.
- [9] Yang J. *Power System Short-term Load Forecasting: Thesis for Ph.d degree*. M. Sc., 2006.
- [10] Cao L.J. Support Vector Machine with Adaptive Parameters in Financial Time Series Forecasting. *Francis E.H. Tay*, 2003.
- [11] Baillie R.T., Chung C.-F. Tieslau Analysing inflation by the fractionally integrated ARFIMA-GARCH model. *Baillie. Journal of Applied Econometrics*. 1996, no. 11.
- [12] Moore H. *MATLAB for Engineers*. Pearson, 2017.
- [13] Low S.H. A duality model of TCP and queue management algorithms. *IEEE/ACM Transactions on Networking (ToN)*, 2003, no. 11 (4), pp. 525–536.
- [14] Bouras C., Primpas D., Sevasti A., Varnavas A. (2002). Enhancing the DiffServ architecture of a simulation environment. In Proceedings. *Sixth IEEE International Workshop on Distributed Simulation and Real-Time Applications*, IEEE, 2002, pp. 108–115.

- [15] Floyd S., Gummadi R., Shenker S. Adaptive RED: An algorithm for increasing the robustness of RED's active queue management, 2001.
- [16] Newman M.E. Power laws, Pareto distributions and Zipf's law. *Contemporary physics*, 2005, no. 46 (5), pp. 323–351.
- [17] Ismail M.E. Bessel Functions and the Infinite Divisibility of the Student t -Distribution. *The Annals of Probability*, 1977, no. 5 (4), pp. 582–585.
- [18] Alder B.J., Wainwright T.E. Decay of the velocity autocorrelation function. *Physical review A*, 1970, no. 1 (1), p. 18.
- [19] Vautard R., Yiou P., Ghil M. Singular-spectrum analysis: A toolkit for short, noisy chaotic signals. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1992, no. 58 (1–4), pp. 95–126.
- [20] Gray M.A. Discrete event simulation: A review of SimEvents. *Computing in Science & Engineering* 2007, no. 9 (6), p. 62.

Сведения об авторах:

Иванов Игорь Потапович — д-р техн. наук, доцент, кафедра «Теоретическая информатика и компьютерные технологии», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Басараб Михаил Алексеевич — д-р физ.-мат. наук, профессор, кафедра «Информационная безопасность», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Колесников Александр Владимирович — канд. техн. наук, кафедра «Информационная безопасность», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Prediction of Network Traffic, as a Self-Similar Process, Based on the Fractal AUTOREGRESSIVE moving Average Model

© | I.P. Ivanov
M.A. Basarab
A.V. Kolesnikov

igor.ivanov645@gmail.com
bmic@mail.ru
avkolesnikov89@gmail.com

BMSTU, Moscow, 105005, Russia

Most modern traffic transfer protocols have been developed using queuing theory and traffic statistics [1]. The development and testing of such algorithms was carried out on the basis of the Poisson model and other recovery processes [2]. Such models do not take into account the fact that the traffic of modern corporate networks has periods of strong bursts of activity or the so-called "Burst" character. The ACF of such processes does not vanish at large lag values. In modern works, it is increasingly indicated that the traffic of highly loaded corporate networks has a self-similar character and heavy-tail distribution. The combination of data streams exhibiting the properties of infinite dispersion leads to self-similarity. This data transfer process is different from Poisson, short periods of increased activity lead to overflow of the switch buffers even with a low average network load. In present work, we studied the statistical and dynamic characteristics of the traffic of one of the corporate network server, established self-similar and chaotic properties, calculated Lyapunov and Hurst indicators, indicating the possibility of predicting the processes under study. In the MATLAB Simulink environment, a model of the network under study was developed, which is a standard star topology with a node simulating the operation of the router with a finite-length buffer, as well as a variable number of nodes generating variable-length packets and basic TCP algorithms. The correspondence of the characteristics of real and simulated data was established, on the basis of which a comparative analysis of

several models of time series was carried out, the accuracy of the forecasts obtained using various metrics, it was found that the fractal integrated model of autoregression — the moving average describes the behavior of self-similar processes better than others, and is also suitable for forecasting problems fractal telecommunication traffic [3]. The results can be used in the development of traffic control protocols in SDN networks, the fight against congestion at the switch level, the development of modifications to the TCP protocol, etc.

Keywords: model, traffic, computer network, load, modeling, self-similarity

References

- [1] Stallings W. *Data and Computer Communications*. Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 2010.
- [2] Tanenbaum E., Uezeroll D. *Komp'yuternyye seti*. 5-ye izd. SPb., Piter, 2012.
- [3] Ivanov I.P., Basarab M.A., Kolesnikov A.V. Nelineynno-dinamicheskiye modeli setevogo trafika. *Nelineynnyy mir*, 2014, no. 4, t. 12.
- [4] Khater A., Hashemi M.R. Dynamic Flow Management Based on DiffServ in SDN Networks. *Electrical Engineering (ICEE), Iranian Conference on*, IEEE, 2018, c. 1505–1510.
- [5] Basarab M.A., Ivanov I.P., Kolesnikov A.V. University corporative network traffic analysis on the base of nonlinear dynamics methods. *Science and Education. Electronic scientific and technical periodical*, 2013, no. 08. DOI: 10.7463/0813.0587054
- [6] Бельков Д.В., Едемская Е.Н. *Статистический анализ сетевого трафика*. Донецк, Донецкий национальный технический университет, 2011.
- [7] Hurst H., Black R. *Long-Term Storage: An Experimental Study*. London, Constable, 1965.
- [8] Kirillov D.S. Distribution of the Hurst Exponent of a Nonstationary Marked Time Series / D.S. Kirillov, O.V. Korob, N.A. Mitin, Yu.N. Orlov, R.V. Pleshakov. *Keldysh Institute of Applied Mathematics. Preprints*, 2013, no. 11.
- [9] Yang J. *Power System Short-term Load Forecasting: Thesis for Ph.d degree*. M. Sc., 2006.
- [10] Cao L.J. Support Vector Machine with Adaptive Parameters in Financial Time Series Forecasting. *Francis E.H. Tay*, 2003.
- [11] Baillie R.T., Chung C.-F. Tieslau Analysing inflation by the fractionally integrated ARFIMA-GARCH model. *Baillie. Journal of Applied Econometrics*. 1996, no. 11.
- [12] Moore H. *MATLAB for Engineers*. Pearson, 2017.
- [13] Low S.H. A duality model of TCP and queue management algorithms. *IEEE/ACM Transactions on Networking (ToN)*, 2003, no. 11 (4), pp. 525–536.
- [14] Bouras C., Primpas D., Sevasti A., Varnavas A. (2002). Enhancing the DiffServ architecture of a simulation environment. In Proceedings. *Sixth IEEE International Workshop on Distributed Simulation and Real-Time Applications*, IEEE, 2002, pp. 108–115.
- [15] Floyd S., Gummadi R., Shenker S. Adaptive RED: An algorithm for increasing the robustness of RED's active queue management, 2001.
- [16] Newman M.E. Power laws, Pareto distributions and Zipf's law. *Contemporary physics*, 2005, no. 46 (5), pp. 323–351.
- [17] Ismail M.E. Bessel Functions and the Infinite Divisibility of the Student t Distribution. *The Annals of Probability*, 1977, no. 5 (4), pp. 582–585.
- [18] Alder B.J., Wainwright T.E. Decay of the velocity autocorrelation function. *Physical review A*, 1970, no. 1 (1), p. 18.
- [19] Vautard R., Yiou P., Ghil M. Singular-spectrum analysis: A toolkit for short, noisy chaotic signals. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1992, no. 58 (1–4), pp. 95–126.
- [20] Gray M.A. Discrete event simulation: A review of SimEvents. *Computing in Science & Engineering* 2007, no. 9 (6), p. 62.

Information about authors:

Ivanov I.P. — Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Department of Theoretical Computer Sciences and Computer Technologies, BMSTU, Moscow, 105005, Russia

Basarab M.A. — Doctor of Physic-Mathematical Sciences, Professor, Department of Information Security, BMSTU Moscow, 105005, Russia

Kolesnikov A.V. — Candidate of Engineering Sciences, Department of Information Security, BMSTU Moscow, 105005, Russia

УДК 621.371.3

К вопросу применения метода парных сравнений при разработке когнитивных систем связи

© А.Н. Копысов ¹	kan_kan@istu.ru
Г.А. Благодатский ¹	blagodatsky@gmail.com
В.В. Хворенков ¹	hvv@istu.ru
И.С. Батурин ²	baturin965@mail.ru
В.П. Баранов ²	kan_kan@istu.ru

¹ Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, Удмуртская Республика, Ижевск, 426069, Россия

² АО «Сарапульский радиозавод», Удмуртская Республика, Сарапул, 427960, Россия

Рассмотрена модель расхода ресурсов в когнитивной системе радиосвязи. Радиостанции, входящие в такую систему, должны содержать устройства анализа состояния как самой радиостанции, так и внешней географической, ситуационной и помеховой обстановки. Решение задач управления динамическими объектами включает формирование математической модели с последующим исследованием свойств этой модели и синтезом регулятора. Объектами управления в информационной системе являются приемники и передатчики информации. Причем может быть управление параметрами как отдельно передатчика — управление мощностью, так и одновременное управление приемником и передатчиком. Модель основана на применении метода парных сравнений параметров системы относительно расхода ресурсов, что приводит к вопросу нахождения собственных значений и собственных векторов матриц парных сравнений. При решении задач вычислительной математики хорошо себя зарекомендовал математический пакет MATLAB. В рамках данной статьи рассматривается функционирование системы когнитивного радио лишь применительно к аналоговым режимам. В результате исследования выявлено, что на расход ресурсов при управлении параметрами системы в первую очередь влияет режим работы системы, а ключевым параметром, влияющим на расход ресурсов, является регламент связи. Созданная в рамках исследования модель позволяет для заданного режима связи не только определить ключевой параметр, но и оценить степень его влияния при решении задачи оптимизации характеристик системы связи в целом.

Ключевые слова: имитационное моделирование, MATLAB, системы связи, когнитивные системы, метод парных сравнений

Введение. Согласно определению Международного союза электросвязи (МСЭ; ITU), система когнитивного радио [1] — это радиосистема, использующая технологию, позволяющую ей получать знания о своей среде эксплуатации и географической среде, об установившихся правилах и о своем внутреннем состоянии, динамически и автономно корректировать эксплуатационные параметры и протоколы согласно полученным знаниям для достижения заранее поставленных целей и обучаться на основе полученных результатов. Таким образом, радиостанции, входящие в такую систему, должны содержать устройства анализа состояния как самой радиостанции, так и внешней географической, ситуационной и помеховой обстановки.

Решение задач управления динамическими объектами включает формирование математической модели с последующим исследованием свойств этой модели и синтезом регулятора. Объектами управления в информационной системе являются приемники и передатчики информации. Причем может быть управление параметрами как отдельно передатчика, например управление мощностью, так и одновременное управление приемником и передатчиком, например при выборе наилучшего канала связи [2].

Режимы работы и ресурсы системы когнитивной радиосвязи. В общем случае функционирование любых систем радиосвязи, в том числе и когнитивных, можно рассматривать с нескольких позиций. Во-первых, с точки зрения сигналов, используемых системами, их можно подразделять на аналоговые и цифровые. Во-вторых, в зависимости от способов организации двусторонней связи в системах принято выделять симплексные, полудуплексные и дуплексные каналы передачи. В-третьих, с позиции передачи информации, системы могут поддерживать как потоковую, так и пакетную передачу информации [3, 4].

Из всего многообразия режимов работы в рамках данной статьи рассматривается функционирование системы когнитивного радио лишь применительно к аналоговым режимам. В свою очередь, режимы работы различаются по возможным состояниям сочетаний управляющих параметров системы (табл. 1). В качестве управляющих параметров выступают (далее на рис. 1–6): A_1 — управление мощностью передатчика; A_2 — управление регламентом связи; A_3 — управление видом модуляции; A_4 — управление частотой; A_5 — управление полосой.

Таблица 1

Рассматриваемые режимы работы системы когнитивной связи

№	Мощность, Вт	Регламент	Вид модуляции	Частота, МГц	Полоса, кГц
1	(1; 10; 100)	Временной симплекс	A1A — амплитудный телеграф	3...30 ВЧ (HF)	1
2	(1; 10; 100)	Временной симплекс	ЗЭЕ — Однополосная амплитудная телефония с подавленной несущей (до -40 дБ)	3...30 ВЧ (HF)	3,1
3	(1; 3; 10)	Временной симплекс	F3E — Частотная телефония	30...300 ОВЧ (VHF)	12,5
4	(1; 3; 10)	Временной симплекс	F3E — Частотная телефония	300...3000 УВЧ (UHF)	12,5
5	(1; 3; 10)	Временной симплекс	A3E — двухполосная амплитудная телефония	30...300 ОВЧ (VHF)	12,5
6	(1; 3; 10)	Временной симплекс	A3E — двухполосная амплитудная телефония	300...3000 УВЧ (UHF)	12,5

Для корректности применения метода парных сравнений на задачу наложены ограничения по ресурсам: b_1 — энергетическим затратам на передачу, b_2 — вычислительной нагрузке на приемо-передатчик, b_3 — времени на передачу, формирующие вектор ограничений.

$$\vec{b} = \{b_i\}, i = \overline{1, m}. \quad (1)$$

Расход ресурсов задается матрицей $A = \{a_{ij}\}$, $i = \overline{1, m}$; $j = \overline{1, n}$.

Представим ограничения на задачу в виде

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + a_{14}x_4 + a_{15}x_5 \leq b_1; \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + a_{24}x_4 + a_{25}x_5 \leq b_2; \\ a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + a_{34}x_4 + a_{35}x_5 \leq b_3. \end{cases} \quad (2)$$

По смыслу задачи (исходя из определения переменных вектора $\bar{x} = \{x_j\}$, $j = \overline{1, n}$), лучшие показатели будут достижимы при максимально возможных значениях x_j . Представим оптимизационную задачу в безразмерном виде, проведя нормирование в диапазоне $[0, 1]$ переменных и ограничений:

$$\bar{x} = \{x_j \in [0, 1]\}, j = \overline{1, n}; \quad (3)$$

$$\bar{b} = \{b_i \in [0, 1]\}, i = \overline{1, m}. \quad (4)$$

Строки матрицы расхода ресурсов также составляют нормированные значения расхода ресурсов по сумме элементов:

$$A = \{a_{ij} : \sum_{j=1}^n a_{ij} = 1\}, i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}. \quad (5)$$

Иными словами, коэффициенты a_{ij} матрицы A (по i -м строкам) показывают вклад переменных в расход ограниченных ресурсов b_i .

Цель исследования заключается в том, что необходимо установить влияние элементов находящихся на уровне I_1 , на расход ресурса I_0 .

Для примера исследуем первый режим работы (табл. 1). На первом этапе необходимо провести оценку влияния $I_1 \rightarrow I_0$ сил, расположенных на уровне I_1 , на цель системы I_0 . Для этого необходимо попарно сравнивать важность элементов $W_{I_1} = \{W_{I_1, j}\}$, $j = \overline{1, n_{I_1}}$ по шкале отношений $[1; 9]$, где доминирование элемента $W_{I_1, k}$ по отношению $W_{I_1, m}$ обозначается целым числом из шкалы отношений a_{km} . Проведя серию сравнений $C_{n_{I_1}}^2$, можно получить данные, необходимые для заполнения матрицы $A_{I_1} = [a_{ij}]$ парных сравнений размерности $n_{I_1} \times n_{I_1}$.

Заполнение матрицы A_{I_1} требует ответа на вопрос, какую значимость по отношению к расходу ресурсов при работе системы когнитивной связи имеют элементы уровня I_1 , взятые попарно. Результаты сравнения представлены в табл. 2.

Заполняя матрицу A_{I_1} , полагаем по Саати [5–11], что сравнение влияния $W_{I_1, m}$ на I_0 по отношению к $W_{I_1, k}$ заменяется обратной величиной влияния $W_{I_1, k}$ на I_0

по отношению к $W_{I_1, m}$ $a_{mk} = \frac{1}{a_{km}}$. При этом необходимо учитывать равную значимость влияния элемента в сравнении с самим собой: $a_{kk} = 1$, результат представлен в табл. 3.

Таблица 2

Какое воздействие и в какой степени оказывают параметры на расход емкости батарей

	Абсолютное	Очень сильное	Сильное	Слабое	Равенство	Слабое	Сильное	Очень сильное	Абсолютное	
Мощность		X								Регламент
Мощность					X					Тип СКК
Мощность					X					Частота
Мощность		X								Полоса
Регламент			X				X			Тип СКК
Регламент				X						Частота
Регламент										Полоса
Тип СКК		X								Частота
Тип СКК		X								Полоса
Частота					X					Полоса

Таблица 3

Парное сравнение влияния параметров на расход емкости батарей

A_{I_i}	$W_{I_i,1}$	$W_{I_i,2}$	$W_{I_i,3}$	$W_{I_i,4}$	$W_{I_i,5}$
$W_{I_i,1}$	1	7	1	1	7
$W_{I_i,2}$	$\frac{1}{7}$	1	$\frac{1}{5}$	5	3
$W_{I_i,3}$	1	5	1	7	7
$W_{I_i,4}$	1	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{7}$	1	1
$W_{I_i,5}$	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{7}$	1	1

Используя полученные данные, можно найти правый собственный вектор ω'_{I_i} матрицы A_{I_i} , соответствующий максимальному собственному числу [13], решая уравнение

$$A_{I_i} \omega'_{I_i} = \lambda_{\max I_i} \omega'_{I_i}. \quad (6)$$

Используя известный математический аппарат, входящий в состав пакета MATLAB [14], несложно задать итеративную процедуру нахождения собственного вектора [15], соответствующего максимальному собственному числу.

Пусть $y^{(0)} = \{1, \dots, 1\}$ единичный вектор размерности n_{I_1} . Запустив итеративный процесс $y^{(k)} = A_{I_1} y^{(k-1)} = A_{I_1}^{k-1} y^{(0)}$, добиваются достижения

$$\varepsilon^{(k)} = \left| \frac{y_j^{(k)}}{y_j^{(k-1)}} - \frac{y_j^{(k-1)}}{y_j^{(k-2)}} \right| \leq \varepsilon, \quad (7)$$

где ε — погрешность вычислений $\lambda_{\max I_1} = \frac{y_j^{(k)}}{y_j^{(k-1)}}$.

Получившийся на последнем шаге итерационного процесса вектор $y^{(k)}$ есть решение уравнения $A_{I_1} \omega'_{I_1} = \lambda_{\max I_1} \omega'_{I_1}$.

Проведя нормирование вектора ω'_{I_1} , по сумме координат несложно получить вектор

$$\omega_{I_1} = \left\{ \frac{\omega'_{I_1 i}}{\sum_{j=1}^{n_{I_1}} \omega'_{I_1 j}} \right\}, i = \overline{1, n_{I_1}}, \quad (8)$$

где ω_{I_1} — вектор весов влияния $I_1 \rightarrow I_0$ параметров, расположенных на уровне I_1 , на расход ресурсов системы I_0 .

В результате расчетов были получены следующие значения (рис. 1): $\omega_{I_1} = (0,34; 0,14; 0,38; 0,09; 0,05)$. Данные веса свидетельствуют о том, что действия по управлению регламентом связи вносят 38 % вклада во влияние на расход батарей системы.

В качестве меры корректности суждений вводится отношение согласованности (ОС) — отношение индекса согласованности (ИС) матрицы парных сравнений A_j к случайному индексу (СИ) — ИС для квадратной матрицы размерности $n \times n$, заполненной случайными числами. Для матриц размерности $n \times n$ ИС рассчитывается по формуле $ИС = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$. $ОС \leq 0,2$ считается допустимым для согласованности матрицы парных сравнений.

Проведя аналогичные вычисления, несложно получить векторы ω_{I_j} , $j = \overline{1, 3}$, отражающие влияние элементов уровней $I_j \rightarrow I_0$ на расход ресурсов системы.

Результаты расчетов. В результате применения метода парных сравнений для режимов работы (табл. 1) были рассчитаны показатели расхода ресурсов (7).

Рассматривая режим 1 (см. табл. 1), были получены расходы ресурсов системы на управление параметрами, результаты представлены на рис. 2–4. Остальные режимы работы отражены общим расходом ресурсов (рис. 5).

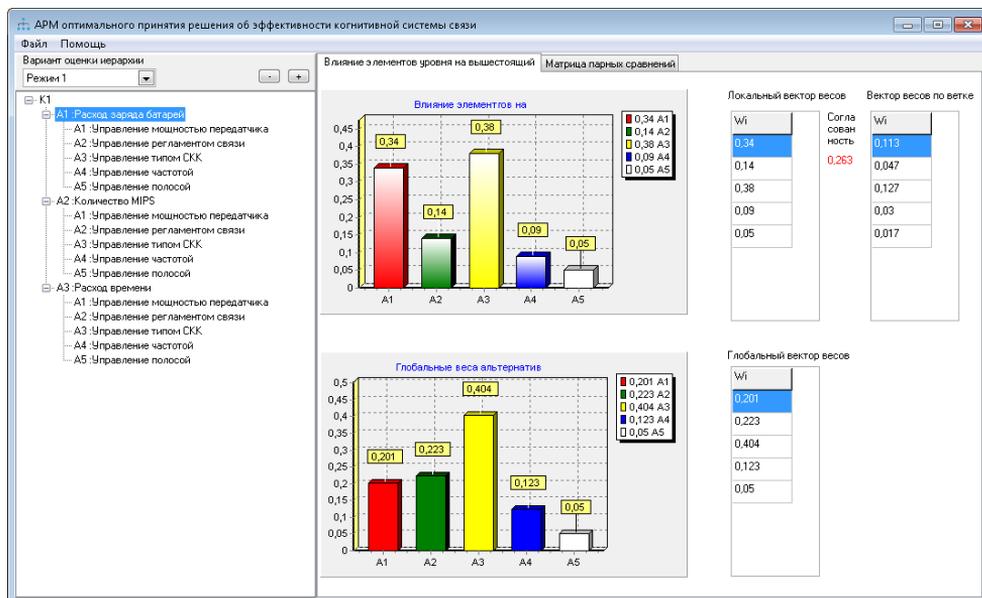


Рис. 1. Влияние параметров ω_{I_1} на цель системы $I_1 \rightarrow I_0$

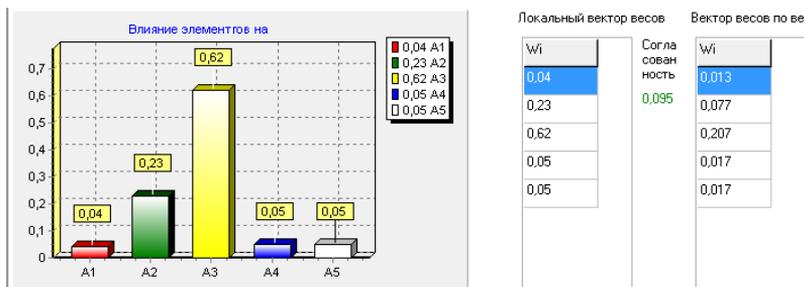


Рис. 2. Влияние параметров системы на количество MIPS в режиме № 1 (см. табл. 1)

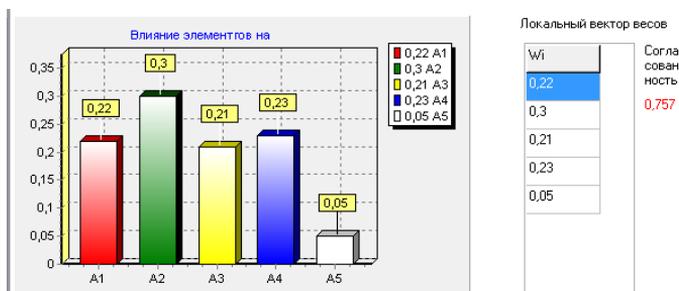


Рис. 3. Влияние параметров системы на расход временных ресурсов на прием передачу сообщений в режиме № 1 (см. табл. 1)

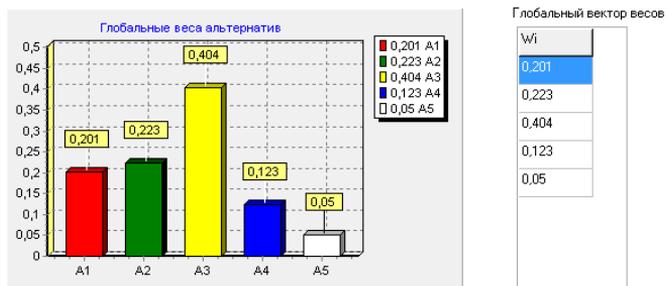


Рис. 4. Общая ресурсоемкость параметров системы в режиме № 1 (см. табл. 1) (ресурсы равноценны)

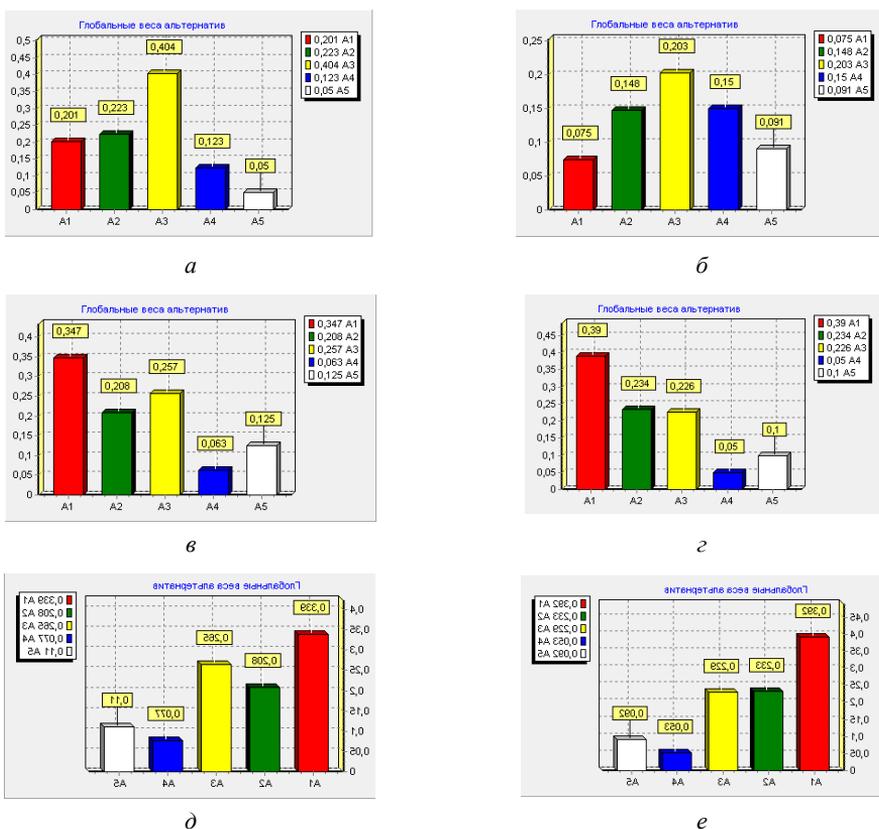


Рис. 5. Общая ресурсоемкость параметров системы в возможных режимах работы (ресурсы равноценны):

а — 1-й режим работы; б — 2-й; в — 3-й; г — 4-й; д — 5-й;
е — 6-й режимы работы соответственно (см. табл. 1)

Закключение. Представленные результаты по расходу ресурсов в системе при передаче сообщений отражают разное воздействие параметров системы на расход ресурсов в зависимости от применяемых режимов связи.

Созданная в рамках исследования модель позволяет для заданного режима связи определить не только ключевой параметр, но и оценить степень его влияния при решении задачи оптимизации характеристик системы связи в целом. Так, с точки зрения наибольшей ресурсоемкости системы с точки зрения производительности вычислительных ресурсов ключевым параметром является вид модуляции и связанные с ним алгоритмы формирования и обработки. В то же время, с точки зрения расходования емкости батареи, ключевым параметром является излучаемая мощность сигнала.

Представленные в работе результаты исследования могут быть полезны инженерам, так как показывают возможности использования метода парных сравнений при моделировании и проектировании радиосредств и когнитивных систем связи.

Литература

- [1] Definition of cognitive radio system. Report ITU-R SM.2152 09/2009. *Electronic Publication*. Geneva, 2009, p. 2. URL: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/rep/R-REP-SM.2152-2009-PDF-E.pdf (site visited 09.10.2018).
- [2] Благодатский Г.А., Копысов А.Н., Хворенков В.В., Батурин И.С. Анализ иерархической модели автоматизированной системы управления параметрами радиолиний когнитивной радиосистемы. *Научные технологии в космических исследованиях земли*, 2018, № 6 (10), с. 51–67.
- [3] Miroshnik I.V., Nikiforov V.O., Fradkov A.L. *Nelinejnoe i adaptivnoe upravlenie slozhnymi sistemami [Nonlinear and adaptive control of complex systems]*. Saint Petersburg, Science Publisher, 2000, 549 p. (In Russian)
- [4] Gorodeckij V.I. Multi-agent systems: current state of research and prospects. *Artificial intelligence news*, 1996, vol. 1, pp. 44–59. (In Russian).
- [5] Saaty T.L. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation (Decision Making Series)*. New York, McGraw-Hill, 1980, 287 p.
- [6] Saaty R.W. The Analytic Hierarchy Process — What it is and How it is Used. *Mathematical Modelling*, 1987, vol. 9 (3–5), pp. 161–176.
- [7] Quyen Nlhtt, Nguyen P.T., Huynh V.D.B., A hybrid multi criteria decision analysis for engineering project manager evaluation. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 2017, vol. 4 (4), pp. 49–52.
- [8] Lambert J.M. The Extended Analytic Hierarchy Decision Method. *Mathematical and Computer Modelling*, 1991, vol. 15 (11), pp. 141–151.
- [9] Ho W., Ma X., The State-of-the-art Integrations and Applications of the Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*. In Press, 2017. [Electronic resource]. Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.09.007> (10.10.2018).
- [10] Ivanco M., Hou G., Michaeli J. Sensitivity Analysis Method to Address User Disparities in the Analytic Hierarchy Process. *Expert Systems with Applications*, 2017, vol. 90, pp. 111–126.
- [11] Aguilar-Lasserre A.A., Bautista Bautista M.A., Ponsich A., González Huerta M.A., An AHP-based decision-making tool for the solution of multiproduct batch plant design problem under imprecise demand. *Computers & Operations Research*, 2009, vol. 36 (3), pp. 711–736.
- [12] Ishizaka A., Labib A. Review of the main developments in the analytic hierarchy process. *Expert Systems with Applications*, 2011, vol. 38, pp. 14336–14345.
- [13] Калиткин Н.Н. *Численные методы*. Москва, Наука, 1978, 177 с.
- [14] Система численно-математического моделирования MATLAB. Матх-блоки математических операций. URL: <http://boubabai.ru/cm/simulink096.htm> (дата обращения: 28.12.2018).
- [15] Пучков В.Н. *Вычисления в среде MathCad*. Севастополь, Изд-во ЭИП, 2001, 216 с.

Сведения об авторах:

Копысов Андрей Николаевич — канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «ИжГТУ им. М.Т. Калашникова»

Благодатский Григорий Александрович — канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «ИжГТУ им. М.Т. Калашникова»

Хворенков Владимир Викторович — д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «ИжГТУ им. М.Т. Калашникова»

Батурин Иван Сергеевич — заместитель главного конструктора по НИОКР ОАО «СРЗ»

Баранов В.П. — инженер по разработке программного обеспечения ОАО «СРЗ»

The research of Cognitive Radio Communication Systems by Using the Pairwise Comparison Method

© | **A.N. Kopysov**¹

G.A. Blagodatsky¹

V.V. Khvorenkov¹

I.S. Baturin²

V.P. Baranov²

kan_kan@istu.ru

blagodatsky@gmail.com

hvv@istu.ru

baturin965@mail.ru

kan_kan@istu.ru

¹Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov, Izhevsk, 426069, Russia

²Sarapul Radio Factory, Sarapul, 427960, Russia

The paper considers the model of resource consumption in a cognitive radio communication system. Radio stations included in such system must contain devices for analyzing the state of the radio station itself, as well as the external geographic, situational, and jamming environment. The solution of problems of controlling dynamic objects includes the formation of a mathematical model with the subsequent study of the properties of this model and the synthesis of the regulator. The objects of control in the information system are receivers and transmitters of information. Moreover, there may be control of the parameters of both a separate transmitter — power control, and simultaneous control of the receiver and transmitter. The model is based on the use of the method of pairwise comparisons of system parameters through the consumption of resources. This leads to the question of finding eigenvalues and eigenvectors of the matrix of pairwise comparisons. In solving problems of computational mathematics, the MATLAB mathematical package has proven itself well. In this article, the functioning of a cognitive radio system is considered only through analogue modes. As a result of the research, it was revealed that the consumption of resources during the management of system parameters is primarily influenced by the mode of operation of the system, and the main parameter affecting the consumption of resources is the data transmission rules. The model created as part of the study allows for a given communication mode to determine not only the key parameter, but also to assess the degree of its influence in solving the problem of optimizing the characteristics of the communication system as a whole.

Keywords: simulation modeling, MATLAB, system communication, Cognitive radio System, pairwise comparison

References

- [1] *Definition of cognitive radio system*. Report ITU-R SM.2152 09/2009. Electronic Publication. Geneva, 2009, p. 2. URL: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2152-2009-PDF-E.pdf (site visited 09.10.2018).
- [2] Blagodatsky G., Kopysov V., Khvorenkov V., Baturin I. Analysis of the hierarchical model of the automated control system of the parameters of the radio lines of the cognitive radio system. *High tech in earth space research*, 2018, vol. 10 (6), pp. 51–67. (In Russian)
- [3] Miroshnik I.V., Nikiforov V.O., Fradkov A.L. *Nelinejnoe i adaptivnoe upravlenie slozhnymi sistemami* [Nonlinear and adaptive control of complex systems]. Saint Petersburg, “Science” Publisher, 2000, 549 p. (In Russian)
- [4] Gorodeckij V.I. Multi-agent systems: current state of research and prospects. *Artificial intelligence news*, 1996, vol. 1, pp. 44–59. (In Russian)
- [5] Saaty T.L. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation (Decision Making Series)*. New York, McGraw-Hill, 1980, 287 p.
- [6] Saaty R.W. The Analytic Hierarchy Process — What it is and How it is Used. *Mathematical Modelling*, 1987, vol. 9 (3-5), pp. 161–176.
- [7] Quyen Nlhtt, Nguyen P.T., Huynh V.D.B. A hybrid multi criteria decision analysis for engineering project manager evaluation. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 2017, vol. 4 (4), pp. 49–52.
- [8] Lambert J.M. The Extended Analytic Hierarchy Decision Method. *Mathematical and Computer Modelling*, 1991, vol. 15 (11), pp. 141–151.
- [9] Ho W., Ma X., The State-of-the-art Integrations and Applications of the Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, In Press, 2017. [Electronic resource]. Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.09.007> (10.10.2018).
- [10] Ivanco M., Hou G., Michaeli J. Sensitivity Analysis Method to Address User Disparities in the Analytic Hierarchy Process. *Expert Systems with Applications*, 2017, vol. 90, pp. 111–126.
- [11] Alberto A. Aguilar-Lasserre, Marco A. Bautista Bautista, Antonin Ponsich, Magno A. González Huerta, An AHP-based decision-making tool for the solution of multiproduct batch plant design problem under imprecise demand. *Computers & Operations Research*, 2009, vol. 36 (3), pp. 711–736.
- [12] Alessio Ishizaka, Ashraf Labib, Review of the main developments in the analytic hierarchy process. *Expert Systems with Applications*, 2011, vol. 38, pp. 14336–14345.
- [13] Kalitkin N. *Numerical methods*. Moscow, Science, 1978, 177 p.
- [14] *MATLAB system of numerical and mathematical modeling*. Math-blocks of mathematical operations. 2001. Available at: <http://bourabai.ru/cm/simulink096.htm> (accessed 28.12.2018).
- [15] Puchkov V. *MATLAB computation*. Sevastopol, SIAE&P Publishing, 2001, 216 p.

Information about authors:

Kopysov A.N. — PhD, assistant professor Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia, SPIN-code: 1318-2960, Scopus Author ID: 56512137700, E-mail: kan_kan@istu.ru

Baturin I.S. — Deputy chief designer of R&D, JSC «SRZ», E-mail: baturin965@mail.ru

Blagodatskij G.A. — PhD, assistant professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

Khvorenkov V.V. — DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia, SPIN-code: 4487-1244, Scopus Author ID: 57190177214, E-mail: hvv@istu.ru

Baranov V.P. — Software Engineer, JSC «SRZ»

УДК 534.11

Нелинейные математические модели продольно-поперечных колебаний одномерных механических объектов с движущимися границами

© | В.Л. Литвинов

vladlitvinov@rambler.ru

Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

Произведена нелинейная постановка задач, описывающих продольно-поперечные колебания объектов с движущимися границами. Полученная математическая модель состоит из системы двух нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных с наибольшей производной по времени второго порядка и по пространственной переменной четвертого порядка. Нелинейные условия на движущейся границе имеют максимальную производную по времени второго порядка и по пространственной переменной третьего порядка. Учтены геометрическая нелинейность, вязкоупругость, изгибная жесткость колеблющегося объекта, а также упругость подложки, на которой расположен объект. Получены граничные условия в случае наличия энергетического обмена между частями объекта слева и справа от движущейся границы. Движущаяся граница имеет присоединенную массу. Учтен упругий характер присоединения границы. Масса границы и жесткость присоединения различны в продольном и поперечном направлениях. С помощью полученной дифференциальной модели можно описывать продольно-поперечные колебания объектов с движущимися границами большой интенсивности. При постановке использован вариационный принцип Гамильтона.

Ключевые слова: продольно-поперечные колебания, движущиеся границы, краевые задачи, математические модели, граничные условия, нелинейная система в частных производных, вариационные принципы

Введение. Колеблющиеся механические объекты с движущимися границами широко распространены в технике [7, 18]. Это канаты грузоподъемных установок [2, 3, 6, 9, 15, 16, 20], гибкие звенья передач [10, 12, 14, 19], лентопротяжные механизмы [1, 13], балки [4], рельсовые пути [8], бурильные колонны [6], струны музыкальных инструментов [13], тесемочные передачи и т. д. До настоящего времени задачи о колебаниях таких систем решались в основном при линейной постановке и жестком закреплении границ, когда отсутствует энергетический обмен через границу. В редких случаях учитывалось действие демпфирующих сил. Как показано в работе [3], при описании колебаний волновым уравнением в случаях, когда скорость движения границы стремится к скорости распространения волн и при стремлении длины объекта к нулю, энергия колебаний стремится к бесконечности, чего в реальных объектах быть не может. Возникла необходимость в построении более сложных математических моделей продольно-поперечных колебаний объектов с движущимися границами, учитывающих большее число факторов влияющих на колебательный процесс. В данной статье произведена нелинейная постановка таких задач. Получены граничные условия

в случае наличия энергетического обмена между частями объекта слева и справа от движущейся границы, учтено взаимодействие между продольными и поперечными колебаниями. При постановке использован вариационный принцип Гамильтона. Полученная математическая модель позволяет описывать колебания систем с движущимися границами большой интенсивности.

Описание объекта. Обобщенная схема объекта изображена на рис. 1. В отличие от существующих моделей здесь учтено взаимодействие частей объекта слева и справа от движущейся границы. Учтено упругое присоединение системы роликов и их масса, различная по отношению к продольному и к поперечному смещению. При получении математической модели учитывается геометрическая нелинейность.

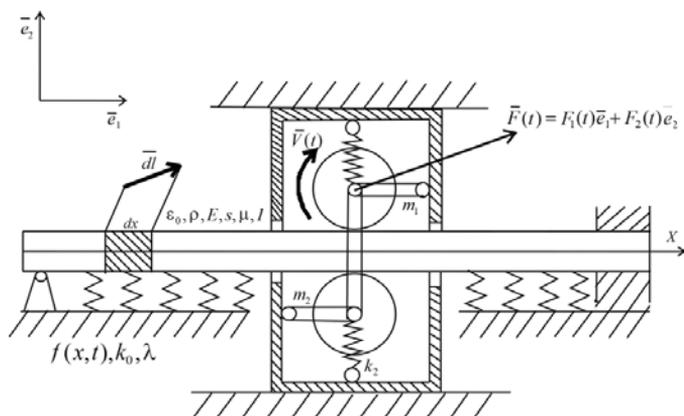


Рис. 1. Обобщенная схема объекта

Для объекта введены следующие обозначения: ρ — объемная плотность массы; S — площадь поперечного сечения; I — осевой момент инерции поперечного сечения объекта; E — модуль упругости материала объекта; μ — коэффициент, характеризующий вязкоупругость объекта на основе структурной модели Фойгта; ϵ_0 — начальная продольная деформация объекта, создающая натяжение $T = E S \epsilon_0$; x — расстояние от левой границы до точки объекта, находящегося в недеформированном состоянии; $L(t)$ — длина недеформированного в продольном направлении объекта слева от движущейся границы; t — время; L_0 — общая длина недеформированного объекта.

Для характеристики окружения объекта введены следующие параметры: $k_0 k_0$ — жесткость подложки, на которой лежит объект (сила, действующая на единицу длины при единичном поперечном смещении); $V(t)$ — окружная скорость роликов; λ_0 — коэффициент, характеризующий действие сил сопротивления внешней среды (силы сопротивления пропорциональны скорости поперечного движения и длине).

Движущаяся граница состоит из жестко соединенных роликов массой m_2 (масса по отношению к поперечному смещению). Масса системы роликов и каркаса равна m_1 (масса по отношению к продольному смещению). Пружина жесткости k_2 реагирует на поперечное смещение системы роликов. В продольном направлении имеет место жесткое соединение между системой роликов и каркасом. Между роликами и объектом проскальзывание отсутствует.

На объект в направлении вектора \bar{e}_2 действует распределенная нагрузка $f(x, t)$. На движущуюся границу действует сила $\bar{F}(t) = F_1(t)\bar{e}_1 + F_2(t)\bar{e}_2$.

Для характеристики продольно-поперечных колебаний объекта введем функции $u_1^*(x, t)$; смещения точек объекта с координатой x в момент времени t в направлении базисных векторов \bar{e}_1, \bar{e}_2 .

Для сокращения записей в дальнейшем вместо функции $u_1^*(x, t)$ будем использовать функцию

$$u_1(x, t) = u_1^* + x + \varepsilon_0 x. \quad (1)$$

Геометрия объекта. Рассмотрим геометрию объекта при больших продольных и поперечных смещениях, т. е. найдем изменение длины элемента dx и его кривизну.

Элементарный вектор \bar{dl} , в который перейдет элемент dx (рис. 1) в момент времени t , равен

$$\bar{dl} = (u_{1,x}^* + 1 + \varepsilon_0)dx\bar{e}_1 + u_{2,x}(x, t)\bar{e}_2 dx.$$

Здесь и далее под u_1^* и u_2 понимаются функции $u_1^*(x, t)$ и $u_2(x, t)$. После запятой указана переменная, по которой берется частная производная.

Длина вектора находится по формуле $|\bar{dl}| = \sqrt{(1 + \varepsilon_0 + u_{1,x}^*)^2 + u_{2,x}^2} dx$.

Найдем относительную деформацию элемента:

$$\varepsilon(x, t) = \frac{|\bar{dl}| - dx}{dx} = \sqrt{(1 + \varepsilon_0 + u_{1,x}^*)^2 + u_{2,x}^2} - 1. \quad (2)$$

Если вместо функции u_1^* использовать функцию u_1 , то формула (2) будет иметь вид

$$\varepsilon(x, t) = \sqrt{u_{j,x}u_{j,x}} - 1. \quad (3)$$

Здесь и далее по повторяющимся индексам предусматривается свертывание.

Для нахождения кривизны элемента dx найдем угол между векторами $\bar{dl}(x, t) = u_{j,x}\bar{e}_j dx$ и $\bar{dl}(x + dx, t) = (u_{j,x} + u_{j,xx} dx)\bar{e}_j dx$. Угол находится по формуле

$$d\alpha = \frac{|\bar{dl}(x, t) \times \bar{dl}(x + dx, t)|}{|\bar{dl}(x, t)|^2},$$

где « \times » обозначено векторное произведение векторов.

Кривизна находится по формуле $K(x, t) = \frac{d\alpha}{|dl|}$. После преобразований получим

$$K(x, t) = \frac{u_{1,x}u_{2,xx} - u_{2,x}u_{1,xx}}{\sqrt{u_{j,x}u_{j,x}}^3}. \quad (4)$$

Описание областей колебаний и соотношений на границе. Для учета энергетического обмена, происходящего на границе, разобьем область колебаний в координатах x, t на две открытые области W_1, W_2 (рис. 2).

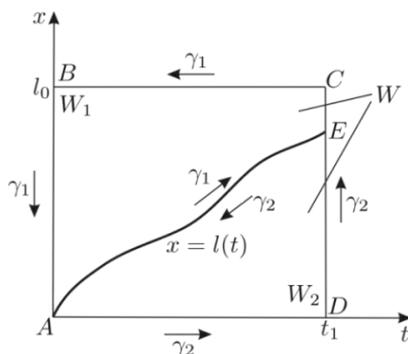


Рис. 2. Области колебаний

Области соответствуют частям объекта слева и справа от движущейся границы. Через W обозначена объединенная область, состоящая из W_1 и W_2 . Через γ_1 и γ_2 обозначены замкнутые контуры, окружающие области (положительное направление обхода против часовой стрелки). Обозначим $u_i(L(t) - 0, t)$ и $u_i(L(t) + 0, t)$, значения функций слева и справа от границы.

Из условия неразрывности объекта следует, что

$$u_i(L(t) - 0, t) = u_i(L(t) + 0, t), \quad i = \overline{1, 2}.$$

Характер закрепления исключает угловое смещение, поэтому при наличии изгибной жесткости

$$u_{2,x}(L(t) - 0, t) = u_{2,x}(L(t) + 0, t) = 0. \quad (6)$$

Продифференцируем соотношение (5) по t :

$$u_{i,x}(L(t) - 0, t)L'(t) + u_{i,t}(L(t) - 0, t) = u_{i,x}(L(t) + 0, t)L'(t) + u_{i,t}(L(t) + 0, t).$$

С учетом (6) получим

$$u_{2,t}(L(t) - 0, t) = u_{2,t}(L(t) + 0, t). \quad (7)$$

При отсутствии проскальзывания между роликами и объектом имеет место соотношение

$$\left(1 + u_{1,x}^*(L(t) \pm 0, t) + \varepsilon_0\right) dx = V(t) dt.$$

Здесь знак (+) соответствует движению границы вправо, а (–) — движению границы влево. С учетом того что $\frac{dx}{dt} = L'(t)$, получим

$$(1 + u_{1,x}^*(L(t) \pm 0, t) + \varepsilon_0) L'(t) = V(t). \quad (8)$$

При малых продольных деформациях можно записать $L'(t) = V(t)$.

4. Нахождение составляющих вариации интеграла действия

Для получения модели, описывающей продольно-поперечные колебания объекта, предлагается использовать вариационный принцип Гамильтона [7]: если заданы начальное и конечное состояния системы, то из всех возможных законов движения

реализуется такой, для которого действие $I = \int_{t_0}^{t_1} (T - U) dt$ принимает стационарное

значение (T — кинетическая энергия системы, U — потенциальная энергия). Для применения принципа понадобятся вариации интеграла действия от кинетической и потенциальной энергии системы.

4.1. Нахождение вариации от кинетической энергии объекта. Интеграл действия от кинетической энергии объекта определяется формулой

$$I_{T1} = \frac{1}{2} \int_0^{t_1} dt \int_0^{L_0} \rho S u_{j,t} u_{j,t} dx.$$

Представим двукратный интеграл в виде двойного:

$$I_{T1} = \frac{1}{2} \rho S \iint_W u_{j,t} u_{j,t} dW.$$

Найдем вариацию

$$\delta I_{T1} = \rho S \left(\iint_{W_1} u_{j,t} \delta u_{j,t} dW + \iint_{W_2} u_{j,t} \delta u_{j,t} dW \right). \quad (9)$$

Здесь интеграл по области W представлен как сумма интегралов по областям W_1 и W_2 .

Представим подынтегральное выражение в виде $u_{k,t} \delta u_k = \frac{\partial}{\partial t} (u_{k,t} \delta u_k) - u_{k,t} \delta u_k$.

С помощью формулы Грина преобразуем выражение (9). В результате получим

$$\delta I_{T1} = \rho S \left(\oint_{\gamma_1} u_{k,t} \delta u_k dx + \oint_{\gamma_2} u_{k,t} \delta u_k dx - \iint_W u_{k,t} \delta u_k dW \right). \quad (10)$$

Здесь γ_1 и γ_2 — замкнутые контуры, окружающие области W_1 и W_2 .

4.2. Нахождение вариации интеграла действия от кинетической энергии системы роликов и каркаса. Скорость движения границы в поперечном направлении

$$\text{равна } V_2(t) = \frac{du_2(L(t), t)}{dt}.$$

Положение системы роликов относительно оси x определяется выражением

$$x = L(t) + \varepsilon_0 L(t) + u_1^*(L(t), t).$$

После дифференцирования данного выражения по t с учетом (1) получим скорость движения границы в продольном направлении: $V_1(t) = \frac{du_1(L(t), t)}{dt}$. Здесь и далее под $\frac{d}{dt}$ понимается полная производная.

Кинетическая энергия границы равна $\frac{1}{2}(m_1V_1^2(t) + m_2V_2^2(t))$, где m_1, m_2 — массы границы по отношению к продольному и поперечному смещению (рис. 1). Интеграл действия от кинетической энергии системы роликов и каркаса равен

$$I_{T2} = \frac{1}{2} m_i \int_0^{t_1} \frac{du_i(L(t), t)}{dt} \frac{du_i(L(t), t)}{dt} dt.$$

Для вариации действия получим

$$\delta I_{T2} = m_i \int_0^{t_1} \frac{du_i(L(t), t)}{dt} \frac{d}{dt} (\delta u_i|_{x=L(t)}) dt. \quad (11)$$

Представим подынтегральное выражение в виде

$$\frac{du_i(L(t), t)}{dt} \frac{d}{dt} (\delta u_i|_{x=L(t)}) = \frac{d}{dt} \left(\frac{du_i(L(t), t)}{dt} \delta u_i|_{x=L(t)} \right) - \frac{d^2 u_i(L(t), t)}{dt^2} \delta u_i|_{x=L(t)}.$$

В результате вариация (11) примет вид

$$\begin{aligned} \delta I_{T2} = m_i \left(\frac{du_i(L(t), t)}{dt} \delta u_i|_{x=L(t)} \right)_{t=t_1} - m_i \left(\frac{du_i(L(t), t)}{dt} \delta u_i|_{x=L(t)} \right)_{t=0} - \\ - \int_0^{t_1} \left(\frac{d^2 u_i(L(t), t)}{dt^2} \delta u_i|_{x=L(t)} \right) dt. \end{aligned} \quad (12)$$

4.3. Нахождение вариации интеграла действия от упругой потенциальной энергии и вязкоупругих сил при продольной деформации объекта. Для учета зависимости между деформациями и напряжениями используется модель Фойгта

$$\sigma(t) = E\varepsilon(t) + \mu\dot{\varepsilon}(t), \quad (13)$$

где $\sigma(t)$ — напряжение; E — модуль упругости; $\varepsilon(t)$ — относительная деформация; μ — коэффициент вязкоупругости; $\dot{\varepsilon}(t)$ — производная от $\varepsilon(t)$.

Упругая потенциальная энергия находится по формуле

$$U_1 = \frac{1}{2} ES \iint_W \varepsilon^2(x, t) dW, \quad (14)$$

где $\varepsilon(x, t)$ определяется выражением (3).

Вариация интеграла действия представляет собой изменение энергии при изменении функций u_1, u_2 . Вариация интеграла действия от упругих и демпфирующих сил равна

$$\delta I_{U1} = S \iint_W (E\varepsilon(x,t) + \mu\varepsilon_t(x,t)) \delta\varepsilon(x,t) dW. \quad (15)$$

После преобразований вариация (15) примет вид

$$\delta I_{U1} = S \iint_W \left(E \left(\sqrt{u_{j,x} u_{j,x}} - 1 \right) + \mu \frac{u_{j,x} u_{j,xt}}{\sqrt{u_{j,x} u_{j,x}}} \right) \frac{u_{i,x}}{\sqrt{u_{j,x} u_{j,x}}} \delta u_{i,x} dW. \quad (16)$$

Представим подынтегральное выражение в виде

$$\begin{aligned} & \left(E \left(\sqrt{u_{j,x} u_{j,x}} - 1 \right) + \mu \frac{u_{j,x} u_{j,xt}}{\sqrt{u_{j,x} u_{j,x}}} \right) \frac{u_{i,x}}{\sqrt{u_{j,x} u_{j,x}}} \delta u_{i,x} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(E \left(\sqrt{u_{j,x} u_{j,x}} - 1 \right) + \mu \frac{u_{j,x} u_{j,xt}}{\sqrt{u_{j,x} u_{j,x}}} \right) \frac{u_{i,x} \delta u_i}{\sqrt{u_{j,x} u_{j,x}}} \right) - \\ & - \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(E \left(\sqrt{u_{j,x} u_{j,x}} - 1 \right) + \mu \frac{u_{j,x} u_{j,xt}}{\sqrt{u_{j,x} u_{j,x}}} \right) \frac{u_{i,x}}{\sqrt{u_{j,x} u_{j,x}}} \right) \delta u_i. \end{aligned} \quad (17)$$

После подстановки (17) в (16) и использования формулы Грина для областей W_1 и W_2 в выражение (16) примет вид

$$\begin{aligned} \delta I_{U1} = & -S \iint_W \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(E \left(\sqrt{u_{j,x} u_{j,x}} - 1 \right) + \mu \frac{u_{j,x} u_{j,xt}}{\sqrt{u_{j,x} u_{j,x}}} \right) \frac{u_{i,x}}{\sqrt{u_{j,x} u_{j,x}}} \right) \delta u_i dW - \\ & - S \oint_{\gamma_1} \left(\left(E \left(\sqrt{u_{j,x} u_{j,x}} - 1 \right) + \mu \frac{u_{j,x} u_{j,xt}}{\sqrt{u_{j,x} u_{j,x}}} \right) \frac{u_{i,x} \delta u_i}{\sqrt{u_{j,x} u_{j,x}}} \right) dt - \\ & - S \oint_{\gamma_2} \left(\left(E \left(\sqrt{u_{j,x} u_{j,x}} - 1 \right) + \mu \frac{u_{j,x} u_{j,xt}}{\sqrt{u_{j,x} u_{j,x}}} \right) \frac{u_{i,x} \delta u_i}{\sqrt{u_{j,x} u_{j,x}}} \right) dt. \end{aligned} \quad (18)$$

4.4. Нахождение вариации интеграла действия от потенциальной энергии и вязкоупругих сил для деформаций изгиба объекта. При описании состояния объекта с помощью модели Фойгта (13) изгибающий момент в сечении записывается следующим образом: $M = I(EK(x,t) + \mu K_t(x,t))$. Здесь I — момент инерции поперечного сечения объекта, $K(x,t)$ — кривизна объекта. Сделаем предположение, что $u_{1,x}^*$, $u_{2,x}$, ε_0 малы. Линеаризация выражения (4) дает $K(x,t) = u_{2,xx}$.

Интеграл действия энергии упругой деформации определяется выражением

$$I_{U2} = \frac{1}{2} EI \iint_W u_{xx}^2 dW.$$

Вариация интеграла действия упругой деформации и вязкоупругих сил имеет вид

$$I_{U2} = I \iiint_W (Eu_{2,xx} \delta u_{2,xx} + \mu u_{2,xxl} \delta u_{2,xx}) dW. \quad (19)$$

Сделаем следующие преобразования подынтегральных составляющих:

$$u_{2,xx} \delta u_{2,xx} = \frac{\partial}{\partial x} (u_{2,xx} \delta u_{2,x}) - \frac{\partial}{\partial x} (u_{2,xxx} \delta u_2) + u_{2,xxx} \delta u_2; \quad (20)$$

$$u_{2,xxl} \delta u_{2,xx} = \frac{\partial}{\partial x} (u_{2,xxl} \delta u_{2,x}) - \frac{\partial}{\partial x} (u_{2,xxll} \delta u_2) + u_{2,xxll} \delta u_2. \quad (21)$$

С помощью формулы Грина и с учетом (20), (21) для вариации (19) получим

$$\begin{aligned} I_{U2} = & I \iiint_W (Eu_{2,xxx} + \mu u_{2,xxxl}) \delta u_2 dW + \\ & + I \oint_{\gamma_1} ((Eu_{2,xxx} + \mu u_{2,xxxl}) \delta u_2 - (Eu_{2,xx} + \mu u_{2,xxl}) \delta u_{2,x}) dt + \\ & + I \oint_{\gamma_2} ((Eu_{2,xxx} + \mu u_{2,xxxl}) \delta u_2 - (Eu_{2,xx} + \mu u_{2,xxl}) \delta u_{2,x}) dt. \end{aligned} \quad (22)$$

4.5. Получение вариаций интеграла действия от факторов внешнего окружения объекта. Вариация интеграла действия от упругой деформации подложки

$$\delta I_{U3} = k_0 \iint_W u_2 \delta u_2 dW. \quad (23)$$

Вариация интеграла действия от упругого присоединения системы роликов

$$\delta I_{U4} = k_2 \int_0^{t_1} u_2(L(t), t) \delta u_2|_{x=L(t)} dt. \quad (24)$$

Вариация интеграла действия внешних сил сопротивления

$$\delta I_{U5} = \lambda \iint_W u_{2,l} \delta u_2 dW. \quad (25)$$

Вариация интеграла действия от внешней распределенной нагрузки

$$\delta I_{U6} = - \iint_W f(x, t) \delta u_2 dW. \quad (26)$$

Вариация интеграла действия от внешней нагрузки

$$\delta I_{U7} = - \int_0^{t_1} F_k \delta u_k|_{x=L(t)} dt. \quad (27)$$

5. Получение системы дифференциальных уравнений, граничных и начальных условий, описывающих колебания объекта. Согласно вариационному принципу Гамильтона, вариация интеграла действия должна быть равна нулю, т. е.

$$\delta I = -\delta I_{T1} - \delta I_{T2} + \delta I_{U1} + \delta I_{U2} + \delta I_{U3} + \delta I_{U4} + \delta I_{U5} + \delta I_{U6} + \delta I_{U7} = 0. \quad (28)$$

Составляющие вариации определены выражениями (10), (12), (18), (22)–(27).

5.1. Получение системы дифференциальных уравнений в частных производных. Приравняем нулю коэффициенты перед δu_1 , δu_2 составляющих вариации (28), содержащих двойные интегралы. В результате получим систему дифференциальных уравнений, описывающую продольно-поперечные колебания объекта:

$$\rho S u_{1,t} - S \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(E \left(\sqrt{u_{j,x} u_{j,x}} - 1 \right) + \mu \frac{u_{j,x} u_{j,xl}}{\sqrt{u_{j,x} u_{j,x}}} \right) \frac{u_{1,x}}{\sqrt{u_{j,x} u_{j,x}}} \right) = 0; \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \rho S u_{2,t} - S \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(E \left(\sqrt{u_{j,x} u_{j,x}} - 1 \right) + \mu \frac{u_{j,x} u_{j,xl}}{\sqrt{u_{j,x} u_{j,x}}} \right) \frac{u_{2,x}}{\sqrt{u_{j,x} u_{j,x}}} \right) + \\ + I (E u_{2,xxx} + \mu u_{2,xxxl}) + \lambda u_{2,t} + K_0 u_2 - f(x, t) = 0. \end{aligned} \quad (30)$$

5.2. Получение граничных условий при $x = 0$, $x = L_0$. Граничные условия на неподвижных границах (см. рис. 1) имеют классический вид:

$$u_1^*(0, t) = 0, \quad u_2(0, t) = 0, \quad u_{2,xx}(0, t) = 0, \quad u_1^*(L_0, t) = 0, \quad u_2(L_0, t) = 0, \quad u_{2,x}(L_0, t) = 0. \quad (31)$$

5.3. Получение граничных условий при $x = L(t)$. Выпишем части вариаций по замкнутым контурам γ_1 и γ_2 выражений (10), (12), (18), (22), (24), (27), соответствующих линии $x = L(t)$:

$$\begin{aligned} \int_0^{t_1} \left(\rho S (u_{k,t}(L(t) - 0, t) - u_{k,t}(L(t) + 0, t)) L'(t) \right) \delta u_k \Big|_{x=L(t)} + m_i \frac{d^2 u_i(L(t), t)}{dt^2} \delta u_i \Big|_{x=L(t)} + \\ + \left(ES \left(\sqrt{u_{j,x}(L(t) - 0, t) u_{j,x}(L(t) - 0, t)} - 1 \right) + \mu S \frac{u_{k,x}(L(t) - 0, t) u_{k,xl}(L(t) - 0, t)}{\sqrt{u_{j,x}(L(t) - 0, t) u_{j,x}(L(t) - 0, t)}} \right) \times \\ \times \frac{u_{i,x}(L(t) - 0, t)}{\sqrt{u_{j,x}(L(t) - 0, t) u_{j,x}(L(t) - 0, t)}} - \\ - \left(ES \left(\sqrt{u_{j,x}(L(t) + 0, t) u_{j,x}(L(t) + 0, t)} + 1 \right) + \mu S \frac{u_{k,x}(L(t) + 0, t) u_{k,xl}(L(t) + 0, t)}{\sqrt{u_{j,x}(L(t) + 0, t) u_{j,x}(L(t) + 0, t)}} \right) \times \\ \times \frac{u_{i,x}(L(t) + 0, t)}{\sqrt{u_{j,x}(L(t) + 0, t) u_{j,x}(L(t) + 0, t)}} \Big|_{x=L(t)} - \\ - I (E u_{2,xxx}(L(t) - 0, t) + \mu I u_{2,xxxl}(L(t) - 0, t) - \\ - E u_{2,xxx}(L(t) + 0, t) - \mu u_{2,xxxl}(L(t) + 0, t)) \delta u_2 \Big|_{x=L(t)} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & +I \left(Eu_{2,xx}(L(t)-0,t) + \mu Iu_{2,xxx}(L(t)-0,t) - \right. \\
 & \left. - Eu_{2,xx}(L(t)+0,t) - \mu u_{2,xxx}(L(t)+0,t) \right) \delta u_{2,x} \Big|_{x=L(t)} + \\
 & + K_2 u_2(L(t),t) \delta u_2 \Big|_{x=L(t)} - F_k(t) \delta u_k \Big|_{x=L(t)} \Big) dt = 0. \quad (32)
 \end{aligned}$$

Приравняем коэффициенты перед вариациями к нулю. С учетом соотношений (5)–(7) получим

$$\begin{aligned}
 & \rho S \left(u_{1,t}(L(t)+0,t) - u_{1,t}(L(t)-0,t) \right) L'(t) + m_1 \frac{d^2 u_1(L(t),t)}{dt^2} + \\
 & + \left(ES \left(\sqrt{u_{j,x}(L(t)-0,t)u_{j,x}(L(t)-0,t)} - 1 \right) + \mu S \frac{u_{k,x}(L(t)-0,t)u_{k,xt}(L(t)-0,t)}{\sqrt{u_{j,x}(L(t)-0,t)u_{j,x}(L(t)-0,t)}} \right) \times \\
 & \times \frac{u_{1,x}(L(t)-0,t)}{\sqrt{u_{j,x}(L(t)-0,t)u_{j,x}(L(t)-0,t)}} - \left(ES \left(\sqrt{u_{j,x}(L(t)+0,t)u_{j,x}(L(t)+0,t)} - 1 \right) + \right. \\
 & \left. + \mu S \frac{u_{k,x}(L(t)+0,t)u_{k,xt}(L(t)+0,t)}{\sqrt{u_{j,x}(L(t)+0,t)u_{j,x}(L(t)+0,t)}} \right) \frac{u_{1,x}(L(t)+0,t)}{\sqrt{u_{j,x}(L(t)+0,t)u_{j,x}(L(t)+0,t)}} - F_1(t) = 0; \quad (33)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & m_2 \frac{d^2 u_2(L(t),t)}{dt^2} + E I u_{2,xxx}(L(t)+0,t) + \mu I u_{2,xxx}(L(t)+0,t) - \\
 & - E I u_{2,xxx}(L(t)-0,t) - \mu I u_{2,xxx}(L(t)-0,t) + K_2 u_2(L(t),t) - F_2(t) = 0. \quad (34)
 \end{aligned}$$

К полученным граничным условиям на границе необходимо добавить соотношения

$$\begin{aligned}
 & u_1(L(t)-0,t) = u_1(L(t)+0,t); \quad u_2(L(t)-0,t) = u_2(L(t)+0,t); \\
 & u_{2,x}(L(t)-0,t) = u_{2,x}(L(t)+0,t) = 0. \quad (35)
 \end{aligned}$$

При отсутствии изгибной жесткости соотношение (6) не выполняется. При этом вместо граничного условия (34) необходимо использовать следующее условие:

$$\begin{aligned}
 & m_2 \frac{d^2 u_2(L(t),t)}{dt^2} + \left(ES \left(\sqrt{u_{j,x}(L(t)-0,t)u_{j,x}(L(t)-0,t)} - 1 \right) + - \right. \\
 & \left. + \mu S \frac{u_{k,x}(L(t)-0,t)u_{k,xt}(L(t)-0,t)}{\sqrt{u_{j,x}(L(t)-0,t)u_{j,x}(L(t)-0,t)}} \right) \frac{u_{2,x}(L(t)-0,t)}{\sqrt{u_{j,x}(L(t)+0,t)u_{j,x}(L(t)+0,t)}} - \\
 & - \left(ES \left(\sqrt{u_{j,x}(L(t)+0,t)u_{j,x}(L(t)+0,t)} - 1 \right) + \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \mu S \frac{u_{k,x}(L(t)+0,t)u_{k,xt}(L(t)+0,t)}{\sqrt{u_{j,x}(L(t)+0,t)u_{j,xt}(L(t)+0,t)}} \frac{u_{2,x}(L(t)+0,t)}{\sqrt{u_{j,x}(L(t)+0,t)u_{j,xt}(L(t)+0,t)}} + \\
 & + \rho S (u_{2,t}(L(t)-0,t) - u_{2,t}(L(t)+0,t)) L'(t) + K_2 u_2(L(t),t) - F_2(t) = 0.
 \end{aligned}$$

Полученные граничные условия называются естественными [7].

В выражении (32) присутствуют вариации $\delta u_1|_{x=L(t)}$, $\delta u_2|_{x=L(t)}$, $\delta u_{2,x}|_{x=L(t)}$. Если функции заданы, то их вариации равны нулю. Кроме естественных граничных условий граничные условия могут быть также следующими:

$$\begin{aligned}
 u_1(L(t)-0,t) = u_1(L(t)+0,t) = f_1(t); \quad u_2(L(t)-0,t) = u_2(L(t)+0,t) = f_2(t); \\
 u_{2,x}(L(t)-0,t) = u_{2,x}(L(t)+0,t) = f_3(t),
 \end{aligned}$$

где $f_1(t)$, $f_2(t)$, $f_3(t)$ — заданные функции.

5.4. Получение начальных условий. Выпишем части вариаций выражений (10), (12), соответствующих отрезкам $t = 0$ и $t = t_1$:

$$\begin{aligned}
 m_i \left(\frac{du_i(l(t),T)}{dt} \delta u_i|_{x=L(T)} \right) \Big|_0^{l_i} - \int_0^{L(0)-0} u_{k,t}(X,0) \delta u_k|_{t=0} dx - \int_{L(0)+0}^{L_0} u_{k,t}(x,0) \delta u_k|_{t=0} dx + \\
 + \int_0^{L(0)-0} u_{k,t}(x,0) \delta u_k|_{t=t_1} dx + \int_{L(0)+0}^{L_0} u_{k,t}(x,0) \delta u_k|_{t=t_1} dx = 0. \quad (36)
 \end{aligned}$$

Начальные условия обычно задаются при $t = 0$ в виде

$$u_1(x,0) = \varphi_1(x); \quad u_2(x,0) = \varphi_2(x); \quad u_{1,t}(x,0) = \varphi_3(x); \quad u_{2,t}(x,0) = \varphi_4(x), \quad (37)$$

где $\varphi_1(x)$, $\varphi_2(x)$, $\varphi_3(x)$, $\varphi_4(x)$ — заданные функции. Вариации заданных функций равны нулю, что обеспечивает равенство нулю частей выражения (36) при $t = 0$.

Если решение задачи однозначно, то функции $u_1(x,t)$ и $u_2(x,t)$ при $t = t_1$ однозначно определены и их вариации равны нулю. Это обеспечивает равенство нулю частей выражения (36) при $t = t_1$.

Таким образом модель, описывающая колебания объекта, изображенного на рис. 1, определяется системой дифференциальных уравнений (30), граничными условиями (31), (33), (34); соотношениями (35) и начальными условиями (37).

6. Линеаризация задачи. Предположим, что смещения u_1^* , u_2^* и их производные малы. При этом квадратичными членами, а также значениями $\varepsilon_0 u_1^* u_{1,x}^*$, $u_{2,x}^*$ по сравнению с единицей можно пренебречь. При линеаризации задача получается расщепленной, т. е. отсутствует взаимодействие между продольными и поперечными колебаниями.

6.1. Задача для продольных колебаний

$$\begin{aligned}
 \rho u_{1,tt}^* - E u_{1,xx}^* - \mu u_{1,xt}^* = 0; \\
 u_1^*(0,t) = 0; \quad u_1^*(L_0,t) = 0;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & m_1 \frac{d^2 u_1(L(t), t)}{dt^2} - Sp \left(u_{1,t}^*(L(t) + 0, t) - u_{1,t}^*(L(t) - 0, t) \right) L'(t) - \\
 & \quad - SE \left(u_{1,x}^*(L(t) + 0, t) - u_{1,x}^*(L(t) - 0, t) \right) - \\
 & \quad - S\mu \left(u_{1,x}^*(L(t) + 0, t) - u_{1,x}^*(L(t) - 0, t) \right) - F_1(t) = 0; \\
 & \quad u_1^*(L(t) + 0, t) = u_1^*(L(t) - 0, t); \\
 & \quad u_1^*(x, 0) = \varphi_1(x); \quad u_{1,t}^*(x, 0) = \varphi_2(x).
 \end{aligned}$$

6.1. Задача для поперечных колебаний

$$\begin{aligned}
 & \rho S u_{2,tt} - ES \varepsilon_0 u_{2,xx} + E l u_{2,xxxx} + \mu l u_{2,xxxxt} + \lambda u_{2,t} + K_0 u_2 - f(x, t) = 0; \\
 & \quad u_2(0, t) = 0, u_{2,xx}(0, t) = 0, u_2(L_0, t) = 0, u_{2,x}(L_0, t) = 0; \\
 & \quad m_2 \frac{d^2 u_2(L(t), t)}{dt^2} + E l u_{2,xxx}(L(t) + 0, t) + \mu l u_{2,xxx}(L(t) + 0, t) - \\
 & \quad - E l u_{2,xxx}(L(t) + 0, t) - \mu l u_{2,xxx}(L(t) + 0, t) + K_2 u_2(L(t), t) - F_2(t) = 0; \\
 & \quad u_2(L(t) + 0, t) = u_2(L(t) + 0, t); u_{2,x}(L(t) + 0, t) = 0; u_{2,x}(L(t) + 0, t) = 0; \\
 & \quad u_2(x, 0) = \varphi_3(x); \quad u_{2,t}(x, 0) = \varphi_4(x).
 \end{aligned}$$

Полученные задачи соответствуют классическим постановкам таких задач.

Выводы. В работе представлены нелинейные постановки задач, описывающих продольно-поперечные колебания объектов с движущимися границами. Полученные математические модели состоят из системы двух нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных с наибольшей производной по времени второго порядка и по пространственной переменной — четвертого порядка. Получены граничные условия в случае наличия энергетического обмена между частями объекта слева и справа от движущейся границы. Учтен упругий характер присоединения границы. С помощью полученной математической модели описываются продольно-поперечные колебания большой интенсивности объектов с движущимися границами. При построении модели учитывались геометрическая нелинейность, вязкоупругость, действие внешних сил сопротивления, изгибная жесткость, взаимодействие между частями объекта слева и справа от границы, взаимодействие между продольными и поперечными колебаниями. Произведена линеаризация полученной модели.

В среде MATLAB разработан программный комплекс ТВ-Analysis, предназначенный для решения некоторого класса краевых задач с движущимися границами, математического моделирования и изучения резонансных свойств объектов, состояние которых описывается этими постановками задач. Рассмотренные методы постановки и решения задач рассматриваемого типа, а также методы анализа резонансных свойств позволяют решить проблемы, возникающие при изучении колебаний объектов с движущимися границами.

Литература

- [1] Рагульский К.И. Вопросы динамики прецизионных лентопротяжных механизмов. *Динамика машин*. Москва, Наука, 1971, с. 169–177.
- [2] Горошко О.А., Савин Г.Н. *Введение в механику деформируемых одномерных тел переменной длины*. Киев, Наукова думка, 1971, 270 с.
- [3] Весницкий А.И. *Волны в системах с движущимися границами*. Москва, Физматлит, 2001, с. 320.
- [4] Лежнева А.А. Изгибные колебания балки переменной длины. *Изв. АН СССР. Механика твердого тела*, 1970. № 1, с. 159–161.
- [5] Анисимов В.Н., Литвинов В.Л., Корпен И.В. Применение метода Канторовича — Галеркина для решения краевых задач с условиями на движущихся границах. *Известия Российской академии наук. Механика твердого тела*, 2018, № 2, с. 70–77.
- [6] Sahebkar S.M., Ghazavi M.R., KhademS.E., Ghayesh M.H. Nonlinear vibration analysis of an axially moving drill string system with time dependent axial load and axial velocity in inclined well. *Mech. and Mach.Theory*, 2011, no. 5, pp. 743–760.
- [7] Анисимов В.Н., Литвинов В.Л. Математические модели нелинейных продольно-поперечных колебаний объектов с движущимися границами. *Вестник Самарского государственного технического университета. Физико-математические науки*, 2015, № 2 (19), с. 382–397.
- [8] Ерофеев В.И., Колесов Д.А., Лисенкова Е.Е. Исследование волновых процессов в одномерной системе, лежащей на упруго-инерционном основании, с движущейся нагрузкой. *Вестник научно-технического развития*, 2013, № 6 (70), с. 18–29.
- [9] Анисимов В.Н., Литвинов В.Л. Поперечные колебания каната, движущегося в продольном направлении. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2017, т. 19, № 4, с. 161–165.
- [10] Zhu W.D., Zheng N.A. Exact response of a translating string with arbitrarily varying length under general excitation. *Trans. ASME. J. Appl.Mech.*, 2008, vol. 75, no. 3.
- [11] Ding Hu, Chen Li-Qun. Galerkin methods for natural frequencies of high-speed axially moving beams. *J. Sound and Vibr.*, 2010. no. 17. pp. 3484–3494.
- [12] Анисимов В. Н., Литвинов В.Л. Исследование поперечных колебаний каната, движущегося в продольном направлении. *VIII Междунар. науч. молодежная школа-семинар «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» имени Е.В. Воскресенского*. Средне-Волжское математическое общество, Саранск, 2018, с. 120–125.
- [13] Самарин Ю.П. Об одной нелинейной задаче для волнового уравнения в одномерном пространстве. *Прикладная математика и механика*, 1964, т. 26, вып. 3, с. 77–80.
- [14] Анисимов В.Н., Литвинов В.Л. Вычисление собственных частот поперечных колебаний вязкоупругого каната, движущегося в продольном направлении и имеющего изгибную жесткость. *Математическое моделирование и краевые задачи: тр. V Всерос. науч. конф. с междунар. участием. Ч. 1: Математические модели механики, прочности и надежности элементов конструкций*. Самара, СамГТУ, 2008, 358 с.
- [15] Zhu W.D., Chen Y. Theoretical and experimental investigation of elevator cable dynamics and control. *Trans. ASME. J. Vibr. And Acoust.*, 2006. no. 1, pp. 66–78.
- [16] Весницкий А.И., Потапов А.И. Поперечные колебания канатов в шахтных подъемниках. *Динамика систем*. Горький, Горьк. ун-т, 1975. № 7, с. 84–89.
- [17] Kotera Tadashi. Vibration of a string with time-varying length. *Bulleten Japan Society of Mechanical Engineers*, 1978, vol. 21, no. 162, pp. 1677–1684.
- [18] Анисимов В.Н., Литвинов В.Л. Сравнительный анализ линейной и нелинейной моделей, описывающих колебания систем с движущимися границами. *Матер. X Всерос. конф. по механике деформируемого твердого тела (18–22 сентября 2017 г., Самара, Россия): в 2 т. Т. 1 / под ред. Н.Ф. Морозова, А.В. Манжирова, В.П. Радченко*. Самара, СамГТУ, 2017, с. 35–39.
- [19] Тихонов В.С., Абрамов А.А. Поперечные колебания гибкой нити переменной длины в потоке. *Вестник МГУ*, 1993, сер. 1, № 5, с. 45–48.

- [20] Кечеджиян Л.О., Пинчук Н. А., Столяр А.М. Об одной задаче математической физики с подвижной границей. *Извест. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естественные науки*, 2008, № 1, с. 22–27.

Сведения об авторе:

Литвинов Владислав Львович — канд. техн. наук, заместитель заведующего кафедрой Обще-теоретических дисциплин Сызранского филиала ФГБОУ ВО «СамГТУ», ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6108-803X>

Nonlinear Mathematical Models of Longitudinal-Cross Oscillations of One-Dimensional Mechanical Objects with Moving Boundaries

© | V.L. Litvinov

vladlitvinov@rambler.ru

Samara State Technical University, Samara, Russia

The nonlinear formulation of problems for describing longitudinal-cross oscillations of objects with moving borders is noted. The geometric nonlinearity, visco-elasticity, the flexural stiffness of the oscillating object and the elasticity of the substrate of object are taken into account. Boundary conditions in the case of energy exchange between the parts of the object on the left and right of the moving boundary are given. The moving boundary has got an joined mass. The elastic nature of borders joining is considered. The mass of the border and stiffness of the joining are different in longitudinal and cross directions. The longitudinal-cross oscillations of objects with moving borders of high intensity can be described by the resulting of differential model. The Hamilton's variational principle is used in the formulation of the problem.

Keywords: *longitudinal-cross oscillations, moving borders, mathematical models, boundary conditions, nonlinear system of partial differential derivetiv, variational principles*

References

- [1] Ragulsky K.I. Voprosy dinamiki pretsizionnykh lentoprotiazhnykh mekhanizmov [Questions of dynamics of precision tape drive mechanisms]. *Dynamics of cars*. Moscow, Science, 1971, pp. 169–177.
- [2] Goroshko O.A., Savin G.N. *Introduction in mechanics of one dimensional deformable bodies of variable length*. Kiev, Naukova Dumka, 1971, 270 pp. (In Russian).
- [3] Vesnitskii A.I. *Vaves in systems with moving boundaries and loads*. Moscow, Fizmatlit, 2001, pp. 320 (In Russian).
- [4] Lezhnyya A.A. Bending vibration of beam of variable length. *Izv. Acad. Nauk USSR. Mechanic of solidstate*, 1970, no. 1. pp. 159–161 (In Russian).
- [5] Anisimov V.N., Litvinov V.L., Korpen I.V. Use of the Kantorovich — Galerkin method for solving boundary value problems with conditions on moving boundaries. *News of the Russian Academy of Sciences. Solid mechanics*, 2018, no. 2, pp. 70–77 (In Russian).
- [6] Sahebkar S.M., Ghazavi M.R., Khadem S.E., Ghayesh M.H. Nonlinear vibration analysis of an axially moving drill string system with time dependent axial load and axial velocity in inclined well. *Mech. and Mach.Theory*, 2011. no. 5, pp. 743–760.
- [7] Anisimov V.N., Litvinov V.L. Mathematical models of nonlinear longitudinal-cross oscillations of object with moving borders. *Vestn. Samar. Tekhn. Univ., Ser. Fiz.-Mat. Nauki*, 2015, vol. 19, no. 2, pp. 382–397 (In Russian).

- [8] Erofeev V.I., Kolesov D.A., Lisenkova E.E. Investigation of wave processes in a one-dimensional system lying on an elastic-inertial base, with a moving load. *Bulletin of Scientific and Technical Development*, 2013, № 6 (70), pp. 18–29 (In Russian).
- [9] Anisimov V.N., Litvinov V.L. Transverse vibrations of a rope moving in the longitudinal direction. *News of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2017, vol. 19, no. 4, pp. 161–165 (In Russian).
- [10] Zhu W.D., Zheng N.A. Exact response of a translating string with arbitrarily varying length under general excitation. *Trans. ASME. J. Appl. Mech.*, 2008, vol. 75, no. 3.
- [11] Ding Hu, Chen Li-Qun. Galerkin methods for natural frequencies of high-speed axially moving beams. *J. Sound and Vibr.*, 2010. no. 17. pp. 3484–3494.
- [12] Anisimov V.N., Litvinov V.L. Investigation of lateral vibrations of a rope moving in the longitudinal direction. *VIII International Scientific Youth School-Seminar “Mathematical Modeling, Numerical Methods and Program Complexes” named after E.V. Voskresensky*. Middle Volga Mathematical Society, Saransk, 2018, pp. 120–125 (In Russian).
- [13] Samarin Yu.P. Ob odnoi nelineinoi zadache dlia volnovogo uravneniia v odnomernom prostanstve [About one nonlinear task for the wave equation in one-dimensional space of] / Yu.P. Samarin. *Applied mathematics and mechanics*, 1964, t. 26, century 3, pp. 77–80.
- [14] Anisimov V.N., Litvinov V.L. Calculation of natural frequencies of transverse vibrations of a viscoelastic rope moving in the longitudinal direction and having flexural rigidity. *Mathematical modeling and boundary value problems: Proceedings of the Fifth All-Russian Scientific Conference with international participation. Part 1: Mathematical models of mechanics, strength and reliability of structural elements*. Samara, Samara State Technical University, 2008, 358 p. (In Russian).
- [15] Zhu W.D., Chen Y. Theoretical and experimental investigation of elevator cable dynamics and control. *Trans. ASME. J. Vibr. And Acoust.*, 2006, no. 1, pp. 66–78.
- [16] Vesnitsky A.I., Potapov A.I. Transverse oscillations of ropes in mine hoists. *Dynamics of systems*. Gorky, Gorky. University, 1975, no. 7, pp. 84–89.
- [17] Kotera Tadashi. Vibration of a string with time-varying length. *Bulleten Japan Society of Mechanical Engineers*, 1978, vol. 21, no. 162, pp. 1677–1684.
- [18] Anisimov V.N., Litvinov V.L. Comparative analysis of linear and nonlinear models describing oscillations of systems with moving boundaries. *Proceedings of the X All-Russian Conference on Solid Mechanics (September 18 — 22, 2017, Samara, Russia): in 2 volumes. T. 1* / ed. N.F. Morozova, A.V. Manzhirova, V.P. Radchenko. Samara: Samara State Technical University, 2017, pp. 35–39 (In Russian).
- [19] Tikhonov V.S., Abramov A.A. Transverse oscillations of a flexible thread of variable length in the flow. *Vestnik MGU. Ser. 1*, 1993, № 5, pp. 45–48 (In Russian).
- [20] Kechedgiyan L.O., Pinchuk N.A., Stolyar A.M. A problem of mathematical physics with moving boundary. *Vest.Vuzov North-Kaukaz. Region.Natural Sciences*, 2008, no. 1, pp. 22–27 (In Russian).

Information about author:

Litvinov V.L. — PhD (Technical), Deputy Head of Dept., Dept. of General-Theoretical Disciplines, Syzran' Branch of Samara State Technical University, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6108-803X>

УДК 53.072

Использование компьютерных моделей преподавателем для усиления наглядности при обучении физике

© | А.В. Ляпцев¹

lav@herzen.spb.ru

| А.А. Денисевич²

sashamy_one@mail.ru

¹ РГПУ им. Герцена, Санкт-Петербург, Россия

² ГБПОУ «ПКГХ», Санкт-Петербург, Россия

Использование компьютерных моделей при обучении физике на разных уровнях образования, несомненно, позволяет повысить эффективность учебного процесса. Спецификой физики по сравнению с другими дисциплинами является необходимость овладения учащимися математическим аппаратом, служащим фактически языком науки. Используемые при этом идеализации и математические абстракции могут привести к потере у учащегося связи между математическими объектами и реальными процессами, которые они описывают. Это в большой степени проявляется при изучении, например, физики микромира или такого раздела физики, как нелинейная динамика. Компьютерные модели в этом случае позволяют создать «виртуальную реальность», способную дать наглядное представление о сложных реальных процессах. Несмотря на существование достаточно большого набора образовательных ресурсов, в частности в Интернете, их использование не всегда является удобным как в плане доступности, так и в плане целесообразности для конкретного занятия в школе или вузе. Из этого следует, что изучение физики в вузе должно включать овладение простейшими навыками построения наглядных моделей, демонстрирующих физические явления и процессы. Это особенно полезно для студентов — будущих учителей физики, которым такое моделирование позволяет как самим лучше понять физические явления, так и использовать полученные навыки в дальнейшей работе со школьниками. Заметим, что изучение программ, с помощью которых можно строить подобные модели, например, Flash, PowerPoint, Photoshop, CorelDraw, MathCad, MatLab, входит в образовательные программы педагогических университетов. В данном сообщении предлагается ряд моделей, реализация которых доступна студентам в процессе практических занятий и применение которых на занятиях по физике могут наглядно иллюстрировать ряд физических процессов.

Ключевые слова: обучение физике, компьютерное моделирование, наглядность

В соответствии со стандартами обучения будущий педагог должен в совершенстве владеть и уметь применять при обучении ИКТ. В настоящий момент практически в каждом кабинете физики есть персональный компьютер с интерактивной доской или с подключенным к компьютеру проектором. Этого набора вполне достаточно для использования на занятиях электронных тренажеров, демонстративных, имитационных, моделирующих и расчетных программ.

Однако, как показывает практика, использование данных программ ограничено или они не используются совсем. Учителя знакомы с этими программами, но, как правило, не знают, где их применить в процессе обучения физике. Часто готовых

анимационных моделей, имеющихся в этих программах, недостаточно для целей конкретного занятия. Поэтому если преподаватель умеет самостоятельно создавать анимированные модели или процессы с помощью программ, изучение которых входит в образовательные программы педагогических университетов, например, Flash, Powerpoint, Photoshop, CorelDraw, Mathcad, MatLab, то это будет способствовать пониманию сути процессов и явлений.

Далее мы приведем примеры возможных достижений большей наглядности при обучении физике и астрономии, основанные на опыте преподавания в школе и учреждения среднего профессионального образования.

Одна из проблем, связанных с наглядностью, может быть условно названа «выход в трехмерное пространство». Чаще всего с подобной проблемой приходится сталкиваться при обучении решению физических задач. Например, чтобы определить сопротивление проволочного кубика (рис. 1), нужно установить свойства симметрии объекта, в частности инвариантность относительно поворота вокруг оси, проходящей через точки 1–8, на угол 120° .

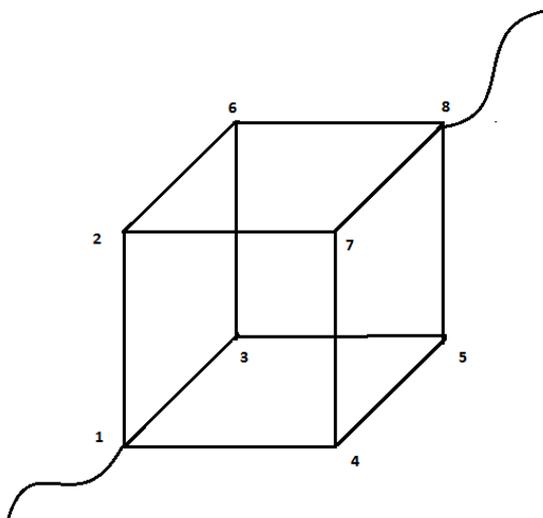


Рис. 1

Если учитель хочет, чтобы ученики сами установили это свойство, а именно такой метод наиболее полезен при обучении решению задач, необходимую подсказку можно обеспечить, используя трехмерную модель и «покрутив ее» на экране проектора, который в настоящее время есть во многих кабинетах физики. Для создания такой модели можно использовать как ряд графических редакторов, так и пакеты типа MATLAB. С подобными задачами учитель сталкивается в разделах механики и в еще большей степени в разделах электродинамики. Даже типичное движение заряженной частицы в однородном магнитном поле по винтовой линии и характер изменения этого движения при изменении угла между индукцией магнитного поля и скоростью частицы становятся более понятными при использовании соответствующей модели.

Другая проблема наглядности — представление исследуемого процесса в развертке по времени. Здесь можно выделить два аспекта — анимация реального про-

цесса и представление некоторого процесса при адиабатическом изменении внешних параметров. Примером первого случая является анимация движения маятника Фуко, реальная модель которого часто недоступна для демонстрации, а компьютерная модель легко может быть создана различными методами, например с использованием PowerPoint. Примером второго случая является демонстрация возникновения полного внутреннего отражения при адиабатическом изменении угла падения, что, как показывает опыт, способствует лучшему пониманию самого явления полного внутреннего отражения [1].

Обе вышеописанные проблемы наглядности в еще большей степени проявляются при обучении астрономии, которая недавно возвратилась в школьную программу. Положение тел на небесной сфере и анимацию их перемещения как суточного, так и годовичного несложно создать, например, используя среду MATLAB (рис. 2).

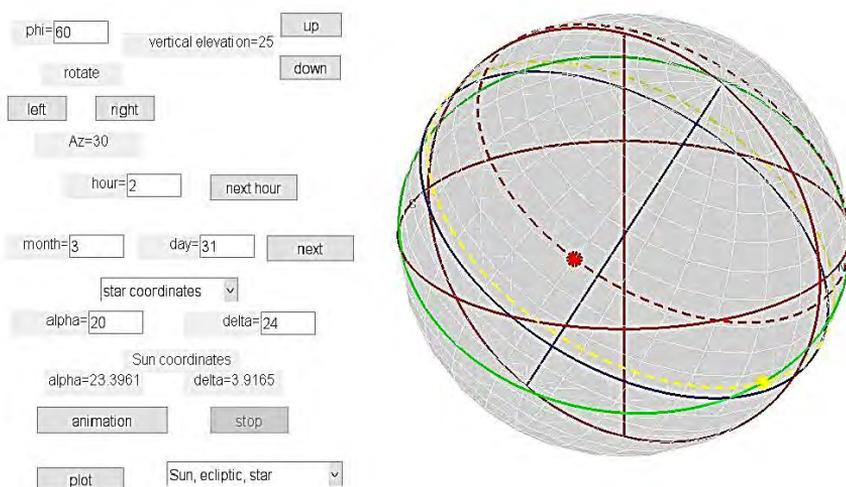


Рис. 2

Заметим, что многие из процессов, происходящих при движении небесных тел можно сделать понятными, используя компьютерные модели. Примером могут являться солнечные и лунные затмения, а также петлеобразное движение планет по небесной сфере.

Еще один аспект моделирования для усиления наглядности связан с обращением к визуально не наблюдаемым процессам. Примером может являться процесс дифракции электронов при объяснении концепции корпускулярно-волнового дуализма в квантовой теории. Несмотря на то что знакомство с этим свойством микромира входит в школьную программу, наглядное объяснение подобных свойств частиц может, на наш взгляд, быть достигнуто только при демонстрации компьютерной модели, в которой волновые свойства (определение положения частицы на экране) и корпускулярные свойства (попадание частицы в определенную точку) можно продемонстрировать в анимационной картине (рис. 3).

Создание подобной модели вполне доступно для учителя, если использовать, например, среду MATLAB. Основа модели описана, например, в учебном пособии [2].

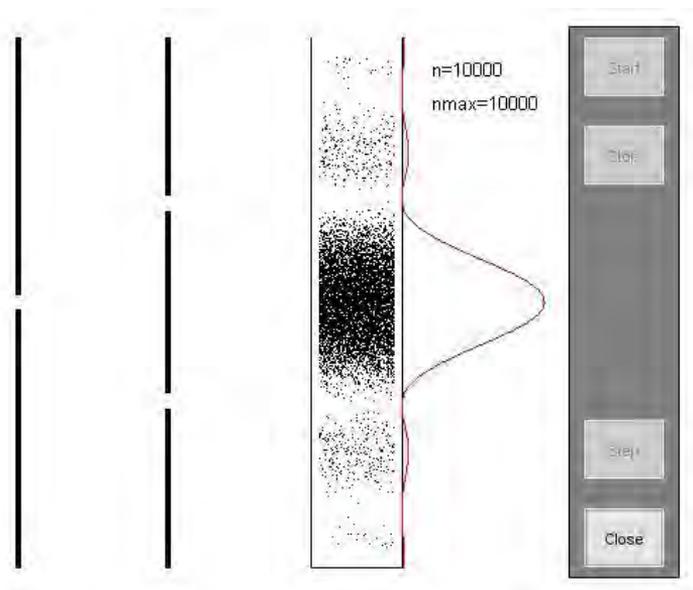


Рис. 3

Несколько в ином ключе проблема наглядности возникает при обучении физике и смежным дисциплинам в вузе. В данном случае возникает иной уровень «общения с компьютерными моделями». Преподавателю целесообразно не просто показывать уже сконструированную модель, но и предложить студенту построить и исследовать компьютерную модель, наглядно демонстрирующую тот или иной процесс. Именно подобные действия способствуют лучшему пониманию и усвоению изучаемого материала. И на этом пути возникают свои сложности. С одной стороны, студенты уже обладают определенными навыками программирования на языках высокого уровня, а использование для моделирования таких вычислительных сред, как MATLAB существенно сокращает объем рутинной работы благодаря использованию встроенных процедур. С другой стороны, предлагаемые модели должны быть достаточно просты, так что включение их реализации в образовательный процесс не потребовало бы существенного времени в рамках той или иной дисциплины.

В качестве примера приведем такой раздел физики, как нелинейная динамика, а также связанную с этим разделом междисциплинарную область исследования — синергетику. С одной стороны, динамика изначально создавалась для описания движения макроскопических тел, то есть движения, которое является весьма наглядным. С другой стороны, развитие исследований в этой области все в большей степени продвигалось в область абстрактных математических моделей, становясь, по сути дела, разделом математики. В большинстве учебных пособий знакомство с качественно новыми особенностями, характерными для систем, описываемых нелинейной динамикой, таких как переход от упорядоченного движения к хаосу при смене управляющего параметра, бифуркации, гистерезис, странный аттрактор и др., проводится на основе изучения абстрактных моделей (см. [4]). Например, понятие «странный аттрактор» изучается на основе системы Лоренца. Являясь достаточно простой для математического анализа и для программирования, эта модель далека от реальной системы — области жидкости или газа, в которой под внешним воздействием

возникают конвекционные потоки, давшей начало исследованиям Лоренца. В то же время для моделирования реальных наглядных особенностей в подобной системе — возникновения ячеек Бенара — необходимо уметь численно решать уравнения в частных производных, для освоения чего требуется достаточно большой объем учебной программы. Переход от хаотического к регулярному движению, как правило, демонстрируется на фазовом пространстве, так что сделать сопоставление с обычным пространством, в котором движение является наглядным не всегда просто.

Ниже мы кратко опишем предлагаемые студентам модели, демонстрирующие характерные особенности нелинейной динамики. Подробное описание данных моделей приведено в статьях [3–9].

Исходной является модель бильярда — ограниченного «стенками» различной формы пространства, между которыми движется частица, отражаясь от этих стенок. Исследование подобных систем, помимо всего прочего, представляет собой серьезную математическую задачу. Достаточно упомянуть присуждение международной Абелевской премии (AbelPrize) в 2014 году российскому математику Якову Григорьевичу Синаю за фундаментальные работы, связанные с изучением подобных систем («бильярды Синая»). Традиционно исследуемые бильярды представляют собой модель, в соответствии с которой частица движется между стенками с постоянной скоростью, упруго отражаясь от стенок. В соответствии с этой моделью угол падения равен углу отражения подобно тому, что имеет место в законах геометрической оптике. Эффекты, связанные с возникновением структур, появляются, если дополнить эту модель некоторыми особенностями, характерными для систем, изучаемых синергетикой. Во-первых, подобные системы являются диссипативными, т. е. системами, в которых происходит переход от упорядоченного движения к неупорядоченному, в частности тепловому, движению. В соответствии с этим будем считать, что при движении частицы на нее действует сила трения, пропорциональная модулю скорости и направленная против скорости (сила вязкого трения). В реальных системах подобная сила возникает вследствие трения о воздух. Заметим, что при малом сопротивлении необходимыми для дальнейшего моделирования свойствами будут обладать как сила сухого трения, так и сила трения качения (силы трения, не зависящие от скорости движения). Во-вторых, система должна быть открытой, так как в замкнутой диссипативной системе при любых начальных условиях макроскопическое движение затухает. Открытая система подпитывается энергией, вследствие чего движение может продолжаться, пока не прекратится внешнее воздействие. В соответствии с этим будем считать, что при каждом столкновении со стенкой частица приобретает потерянную за время движения от предыдущего столкновения энергию (стенка как бы подталкивает частицу). При этом будем полагать, что при столкновении изменяется лишь нормальная по отношению к стенке составляющая скорости, а тангенциальная составляющая остается неизменной. Подобная модель не лишена физического смысла. Так, например, при нагревании стенок сосуда с газом, стенки передают тепло газу, «подталкивая» молекулы газа при каждом столкновении. В соответствии с этим будем условно называть подобную модель «теплый бильярд».

Создание компьютерной модели, соответствующей описанному выше процессу, не требует от студентов владения какими-либо численными методами, поскольку все необходимые для программирования выражения могут быть представлены в виде аналитических формул. Само программирование может быть проведено с использованием любых языков программирования, которыми владеют студенты. Чтобы увидеть характерные особенности задачи, необходимо последовательно выполнять вы-

числения для определенных интервалов времени, используя на следующем временном интервале конечное состояние системы на предыдущем интервале.

В простейшей модели область, ограничивающая движение частицы, можно считать прямоугольником. Для численных расчетов удобно провести масштабное преобразование, положив одну из сторон прямоугольника и начальную скорость частицы равными единицам. В результате такая модель характеризуется двумя безразмерными параметрами — отношением сторон прямоугольника и коэффициентом диссипации, который должен быть малым по сравнению с единицей. Исследование модели представляет собой численный эксперимент, результаты которого могут различаться в зависимости от начального состояния — положения и направления начальной скорости частицы. Как показывает этот численный эксперимент, в большом интервале параметров с течением времени устанавливается замкнутая траектория движения частицы. На рис. 4 приведены траектории движения на временных интервалах (время, которое после масштабных преобразований также является безразмерным, отсчитывается от начала движения). Представленные расчеты проведены для отношения сторон прямоугольника 1 : 2, и коэффициента диссипации $\gamma = 0,01$.

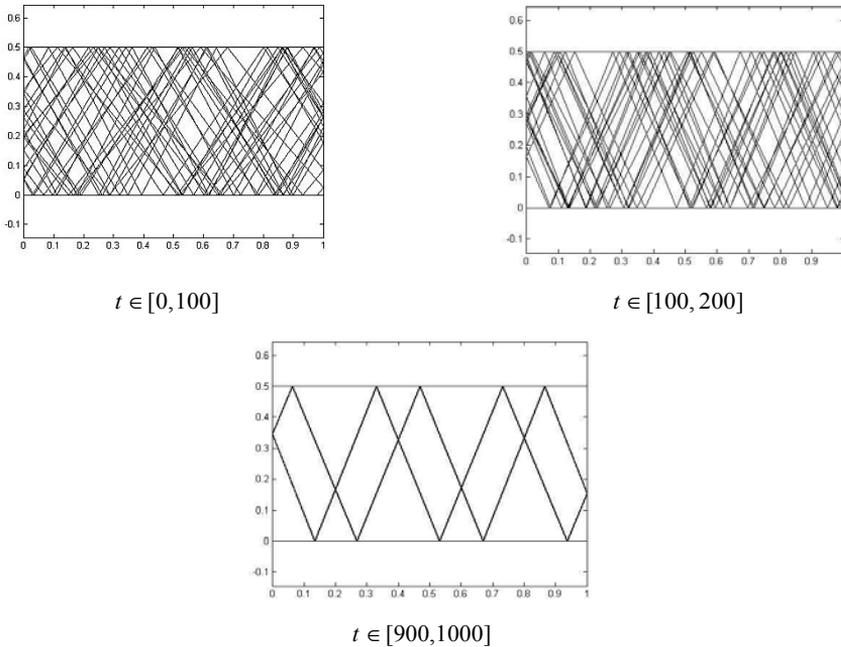


Рис. 4

Как видно из рисунка, за время порядка $10\gamma^{-1}$ траектория движения приобретает вид замкнутой ломаной линии с небольшим числом (порядка 10) столкновений со стенками. Заметим, что фазовая траектория движения также приобретает вид достаточно простой замкнутой линии в четырехмерном фазовом пространстве. Это означает, что подобная линия является регулярным аттрактором движения частицы. Траектория движения частицы, изображенная на рисунках, является просто проекцией

фазовой траектории на двумерную плоскость с координатами, являющимися координатами в реальном пространстве. Безусловно, процесс установления регулярной траектории в реальном пространстве является более наглядным и интуитивно понятным, по сравнению с подобным рассмотрением траектории в фазовом пространстве.

Предлагаемая модель, несмотря на свою простоту, позволяет продемонстрировать характерные свойства нелинейных систем. В данной модели имеется всего один управляющий параметр — отношение сторон. Проведение численного эксперимента при адиабатически медленном изменении управляющего параметра позволяет наблюдать скачкообразное изменение регулярных траекторий. То есть, начиная с некоторого значения управляющего параметра происходит срыв траектории с последующим установлением за время порядка $10\gamma^{-1}$ новой регулярной траектории. Подобные скачки в эволюции нелинейных систем — бифуркации в данном случае, также являются достаточно наглядными. Проявляется также и другое свойство нелинейных систем — гистерезис. Именно со срывом с переходом от одной регулярной траектории к другой происходит при разных значениях управляющего параметра при адиабатическом его изменении в сторону увеличения и уменьшения. Наконец, при некоторых значениях параметра регулярные траектории не устанавливаются, что соответствует хаотическому движению системы, а соответствующая траектория в фазовом пространстве для подобного движения носит название странного аттрактора.

Наблюдаемые свойства данной модели являются достаточно универсальными и сохраняются при модификации модели. Так, например, в качестве границы области, ограничивающей движение частицы, может быть взят эллипс, или замкнутая линия, состоящая из прямых линий и дуг окружностей. В этих случаях также могут устанавливаться регулярные траектории движения, которые могут быть получены лишь как результат численного эксперимента. Некоторое усложнение формул для расчета не является критичным, поскольку все они могут быть представлены в аналитическом виде. Примеры подобных регулярных траекторий приведены на рис. 5.

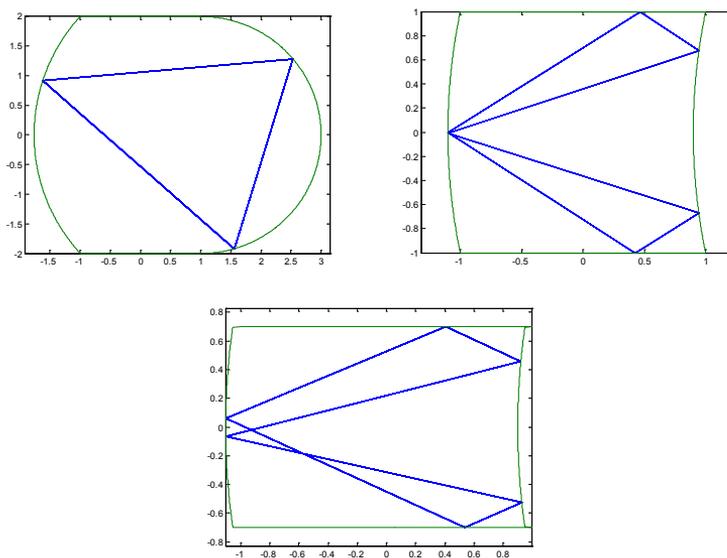


Рис. 5

Еще одной модификацией является добавление внешнего потенциального поля, воздействующего на частицу. Например, можно считать, что одна из сторон прямоугольника расположена вертикально в однородном поле тяжести. Процесс установления регулярных траекторий происходит и в этом случае. На рис. 6 приведен расчет при $\gamma = 0,01$.

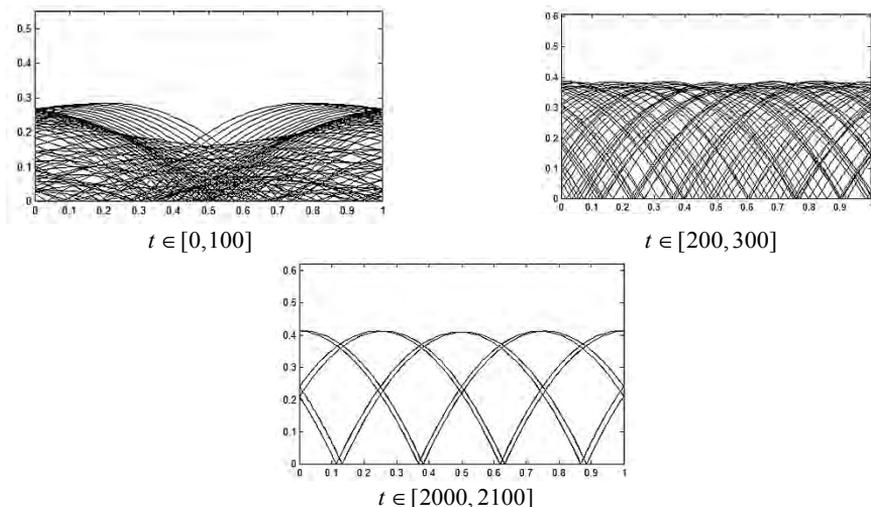


Рис. 6

Наконец, предлагаемая модель может быть модифицирована на случай движения частицы в трехмерном пространстве с сохранением характерных свойств. Заметим, что подобные численные эксперименты удобно проводить, используя графический интерфейс пользователя в вычислительной среде MATLAB, когда все необходимые параметры и полученные графики отражаются в одном сконструированном пользователем окне. На рис. 7 приведено такое окно с установившейся регулярной траекторией при движении частицы в трехмерном пространстве, ограниченной плоскими стенками.

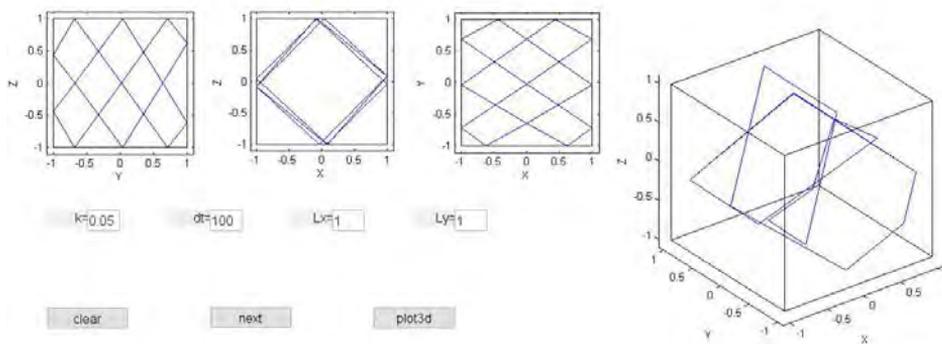


Рис. 7

В соответствии с общими положениями синергетики для образования устойчивых временных и пространственных структур необходимо наличие диссипации — процесса перехода энергии упорядоченного движения в энергию хаотического движения и внешнего воздействия на систему. Применительно к механическим системам, для которых движение носит наглядный характер, диссипация энергии обусловлена в основном двумя процессами — силой трения, возникающей при движении объектов и неупругим взаимодействием. В рассмотренной выше модели диссипация возникает вследствие силы трения. Чтобы показать возможность возникновения структур при диссипации вследствие неупругого взаимодействия, можно рассмотреть систему нескольких сталкивающихся между собой объектов, полагая, что столкновения являются не абсолютно упругими, т. е. происходят частичные потери механической энергии. Простейшей моделью, доступной для учебных целей, является модель одномерного движения. Реальная система, описываемая такой моделью, — насаженные на проволоку бусинки (рис. 8).

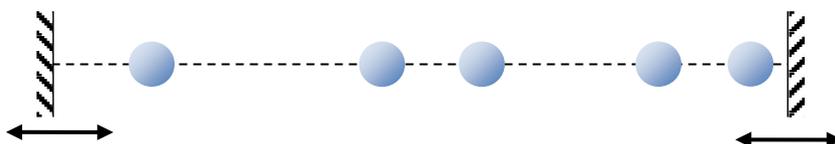


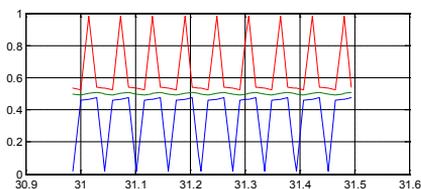
Рис. 8

Диссипация энергии происходит вследствие неупругого (имеется в виде не абсолютно неупругое) столкновения. Восполнение энергии, как и в предыдущей модели, происходит при столкновении со стенками. Между столкновениями движение бусинок является равномерным. Вычислительный эксперимент производится при некотором произвольном задании начальных положений и скоростей частиц. Параметрами задачи являются коэффициент диссипации — относительная величина потерянной энергии при столкновении, число частиц N и безразмерный коэффициент, равный отношению размеров области движения L к области, занимаемой частицами (диаметр бусинки — d):

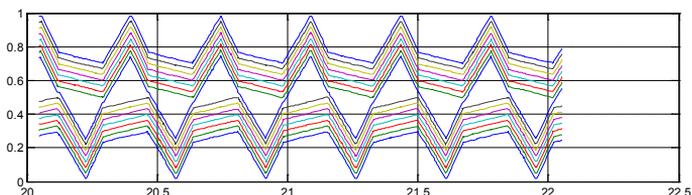
$$k = \frac{L}{Nd}.$$

Несмотря на простоту модели, поставленный с ней вычислительный эксперимент демонстрирует характерные особенности нелинейных систем. В зависимости от параметра k , который в данном случае является управляющим параметром в системе, могут устанавливаться регулярные (периодические) и хаотические движения. Установившийся режим наглядно наблюдается как на графиках фазовых диаграмм, так и на графиках зависимости координат частиц от времени. Регулярные временные структуры наблюдаются как при малом, так и при большом числе шаров. На рис. 9 приведены графики зависимости координат от времени при установившемся движении для случая трех и пятнадцати частиц.

Заметим, что аналогичные регулярные движения устанавливаются также при добавлении внешнего потенциального поля. Например, рассматриваемую цепочку можно расположить вертикально в однородном поле тяжести.



$$N = 3, k = 10, \gamma = 0,0625$$



$$N = 15, k = 2, \gamma = 0,0625$$

Рис. 9

Накопленный опыт обучения физике позволяет сделать ряд выводов, касающихся возможности использования компьютерных моделей как средства достижения наглядности. Во-первых, потенциал компьютерного моделирования с вышеуказанной целью весьма существенный и далеко не востребованный преподавателями, несмотря на наличие в современных образовательных учреждениях необходимого для этого оборудования. Во-вторых, подобная ситуация имеет место в силу того, что, несмотря на достаточную подготовку в области информационных технологий, преподаватели, если и используют соответствующие компьютерные модели, то стараются найти уже готовые модели, сделанные профессионалами. В то же время, как мы показали на примерах, приведенных в статье, использование простых и доступных программных средств позволяет преподавателю самостоятельно создавать необходимые модели. Конечно, процесс создания анимаций или вычислений с помощью программ трудоемкий, но это облегчает весь процесс обучения и даже мотивирует учащихся на самостоятельное более глубокое изучение явления или объекта. Применение данных методов и средств не только важно, но и необходимо в условиях современного образования.

Литература

- [1] Денисевич А.А. Создание и использование компьютерных моделей учителем как средство усиления наглядности при обучении физике. *Физическое образование в вузах*, 2018, т. 24, № 3, с. 63–73.
- [2] Кондратьев А.С., Ляпцев А.В. *Физика. Задачи на компьютере*. Москва, Физматлит, 2008, 200 с.
- [3] Денисевич А.А., Ляпцев А.В. Компьютерное моделирование процессов самоорганизации. Аналогия с ячейками Бенара. *Компьютерные инструменты в образовании*, 2017, № 1, с. 38–44.
- [4] Гритченко В.Т., Маципура В.Т., Снарский А.А. *Введение в нелинейную динамику: Хаос и фракталы*. Москва, Изд-во ЛКИ, 2007.

- [5] Денисевич А.А., Ляпцев А.В. Простейшая модель для демонстрации образования пространственных структур при изучении процессов самоорганизации. *Компьютерные инструменты в образовании*, 2014, № 1, с. 36–43.
- [6] Денисевич А.А., Ляпцев А.В. Компьютерное моделирование процессов самоорганизации в простейших механических системах. *Известия Российского государственного университета им. А.И. Герцена*, 2014, № 168, с. 93–103.
- [7] Денисевич А.А., Ляпцев А.В. Игры на «теплых бильярдах». Наглядная демонстрация понятий, характеризующих нелинейные системы: аттракторы, бифуркации, гистерезис. *Компьютерные инструменты в образовании*, 2014, № 5, с. 42–49.
- [8] Денисевич А.А., Ляпцев А.В. Компьютерное моделирование процессов самоорганизации. Аналогия с ячейками Бенара. *Компьютерные инструменты в образовании*, 2017, № 1, с. 38–44.
- [9] Денисевич А.А., Ляпцев А.В. Компьютерное моделирование процессов самоорганизации. Структуры в одномерной цепочке сталкивающихся шаров. *Компьютерные инструменты в образовании*, 2018, № 4, с. 27–34.

Сведения об авторах:

Ляпцев А.В. — д-р физ. мат. наук, профессор кафедры методов обучения физике, РГПУ им. Герцена, Санкт-Петербург, Россия

Денисевич А.А. — студент политехнического колледжа, Санкт-Петербург, Россия

The Use of Computer Models by the Teacher to Enhance the Clarity when Teaching Physics

© | **A.V. Liapzev**¹
A.A. Denisevich²

lav@herzen.spb.ru
sashamy_one@mail.ru

¹ Russian State Pedagogical University. A.I. Herzen, St. Petersburg, Russia

² Polytechnic College «PKGH», St. Petersburg, Russia

The use of computer models in teaching physics at different levels of education, of course, can improve the efficiency of the educational process. The specificity of physics in comparison with other disciplines is the need for students to master the mathematical apparatus, which is actually the language of science. The idealizations and mathematical abstractions used can result in the student losing the connection between the mathematical objects and the real processes they describe. This is largely manifested in the study of, for example, the physics of the microcosm, or such a section of physics as nonlinear dynamics. Computer models in this case allow to create a “virtual reality” that can give a visual representation of complex real processes. Despite the existence of a fairly large set of educational resources, in particular on the Internet, their use is not always convenient, both in terms of availability and in terms of expediency for a particular lesson at school or University. From this it follows that the study of physics at the University should include the mastery of the simplest skills of building visual models that demonstrate physical phenomena and processes. This is especially useful for students-future teachers of physics, which such modeling allows both themselves to better understand the physical phenomena, and to use these skills in further work with students. Note that the study of programs that can be used to build such models, such as Flash, PowerPoint, Photoshop, CorelDraw, MathCad, MatLab, is included in the educational programs of pedagogical universities. This report

proposes a number of models, the implementation of which is available to students in the process of practical training and the use of which in physics classes can clearly illustrate a number of physical processes.

Keywords: teaching physics, computational simulation, visualization

References

- [1] Denisevich A.A. Computer models' creating and using by the teacher for additional visualization while teaching physics. *Physical Education in Higher Education*, 2018, vol. 24, no. 3, pp. 63–73.
- [2] Kondrat'ev A.S., Liaptsev A.V. Physics. Tasks on the computer. M.: Fizmatlit, 2008, 200 p.
- [3] Denisevich A.A., Liaptsev A.V. Computer modeling of the processes of self-organization. *An analogy with Benard cells. Computer tools in Education*, 2017, no. 1, pp. 38–44.
- [4] Grinchenko V.T., Matsypura V.T., Snarsky A.A. *Introduction to nonlinear dynamics: Chaos and fractals*. Moscow, ed. LKI, 2007.
- [5] Denisevich A.A., Liaptsev A.V. The simplest model for demonstrating the formation of spatial structures in the study of self-organization processes. *Computer tools in education*, 2014, no. 1, pp. 36–43.
- [6] Denisevich, A. A., Liaptsev A. V. Computer simulation of self-organization processes in simple mechanical systems. *News of the Russian state University A.I. Herzen*, 2014, no. 168, pp. 93–103.
- [7] Denisevich A.A., Liaptsev A.V. Game to “warm Billiards”. Visual demonstration of the concepts characterizing nonlinear systems: attractors, bifurcations, hysteresis. *Computer tools in education*, 2014, № 5, pp. 42–49.
- [8] Denisevich A.A., Liaptsev A.V. Computer simulation of self-organization processes. The analogy with the Benard cells. *Computer Tools in Education*, 2017, № 1, pp. 38–44.
- [9] Denisevich A.A., Liaptsev A.V. Computer simulation of self-organization processes. Structures in a one-dimensional chain of colliding balls. *Computer Tools in Education*, 2018, no. 4, pp. 27–34.

Information about authors:

Liaptsev A.V. — doctor of physical and mathematical sciences, professor of the department of methods of teaching physics

Denisevich A.A. — teacher in Polytechnic College “PKGH”, Post-graduate student of the Department of Methods of Teaching Physics to the Russian State Pedagogical University. AI Herzen

УДК 542.63:621.929

Моделирование движения жидкости в рабочих органах механоактиватора с помощью MATLAB

© | М.С. Малов
С.О. Кожевников

mishamalov1@gmail.com
kojevnikov_so@mail.ru

Ивановский государственный политехнический университет, Иваново, Россия

Рассмотрено решение математической модели движения жидкости в рабочих органах устройства для механоактивации коллоидных дисперсных систем. Решение математической модели с графической визуализацией профилей скорости выполнено в среде MATLAB. Устройство для механоактивации представляет собой ротор со спицами, на концах которого закреплены рабочие органы, равномерно вращающиеся вокруг вертикального вала. Устройство позволяет получать материалы с высокодисперсионной структурой. Данные материалы широко представлены в современном мире, в том числе в рамках текстильной промышленности, как часть «облагораживания» ткани, являясь основой процесса колорирования. Наши исследования показали, что для получения высокодисперсных материалов можно использовать аппарат, оснащенный рабочим органом, состоящим из ротора с трубками переменного сечения. При прохождении жидкости через трубки переменного сечения, которые, в свою очередь, совершают вращательное движение, скорость среды на выходе многократно возрастает. Моделирование процесса движения жидкой среды позволит определить распределение скоростей движения жидкости в аппарате, выполнить его конструктивную, режимную оптимизацию и представляет особый интерес. Математическая модель представляет собой однородное дифференциальное уравнение с граничными условиями. Уравнение решено с помощью рядов Фурье. Были определены окружная, осевая и радиальная скорости потока в рабочем органе ротора. Профили вышеуказанных скоростей приведены в виде поверхностей отклика. Таким образом, разработанная модель и реализация ее в среде MATLAB позволяют выполнять моделирование и параметрический синтез процесса движения жидкости в рабочих органах устройства для механоактивации коллоидных дисперсных систем.

Ключевые слова: MATLAB, компьютерное моделирование, перемешивающее устройство, трубка переменного сечения, дисперсные системы

Введение. Аппаратурное оформление для получения материалов высокой дисперсности характеризуется наличием небольшого количества устройств. Анализ конструкций аппаратов, предназначенных для получения материалов высокой дисперсности, показал, что они требуют дальнейшего совершенствования. Кроме того, применяемые для этой цели конструкции достаточно энерго- и металлоемки [1].

Исследования, проведенные нами в лабораторных условиях [1], показали, что для получения высокодисперсных суспензий можно использовать принципиально новую конструкцию мешалки, состоящую из ротора с трубками переменного сечения. При прохождении жидкости через трубки переменного сечения, которые, в свою очередь, совершают вращательное движение, скорость среды на выходе многократно возрастает. Моделирование процесса движения жидкой среды представляет особый интерес.

Материалы и методы решения задач, принятые допущения. Математическая модель представляет собой однородное дифференциальное уравнение с граничными условиями. Уравнение решено с помощью рядов Фурье.

Результаты. Одним из перспективных направлений развития химико-технологических процессов является получение материалов высокой дисперсности. Аппаратурное оформление получения материалов высокой дисперсности характеризуется наличием небольшого количества устройств. Анализ способов и конструкций аппаратов для получения материалов высокой дисперсности показал, что существующие методы энерго- и материалоемки и требуют дальнейшего совершенствования [1, 2].

Наши исследования [2] и исследования других авторов [3] показали, что для получения высокодисперсных материалов наилучшим является применение вращающихся мешалок с дополнительным прохождением жидкости через трубки переменного сечения [4].

Моделирование движения жидкой среды через трубку переменного сечения, движущейся по окружности с постоянным радиусом, представляет наибольший интерес.

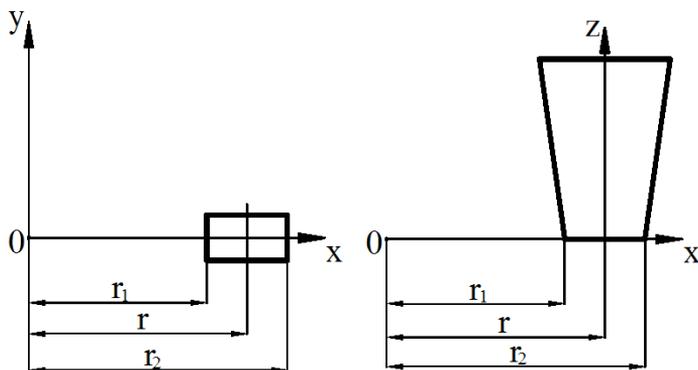


Рис. 1. Расчетная схема движения жидкой среды через трубку переменного сечения

Представим движение жидкости в трубке переменного сечения в цилиндрической системе координат в виде двухпараметрического винтового потока, симметричного относительно оси z (рис. 1) [5]:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + k^2 \psi = -D \quad (1)$$

с граничными условиями

$$\psi(0, r) = \psi((r_2 - r_1), r) = 0; \quad \psi(z, r_1) = \psi(z, r_2) = 0,$$

где ψ — функция тока, м; r — текущий радиус, м; z — координата по высоте конфузора, м; k — постоянная, равная удвоенному отношению модуля угловой скорости вращения частицы к модулю скорости ее перемещения.

Решение уравнения (1), удовлетворяющее указанным граничным условиям, можно представить в виде ряда Фурье. Для потока, линеаризованного в первом приближении, получим

$$\psi = \frac{4D}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n\omega_n^2} \Omega_n(r) \sin \frac{n\pi z}{r_2 - r_1}; \quad (2)$$

$$v_r = D \left\{ \frac{1}{r} \left(\frac{r_2 - r_1}{2} - z \right) - \frac{4(r_2 - r_1)}{\pi^2 r_1} \sum_{n=1,3,\dots} \frac{1}{n^2} \frac{r_1}{r} [1 - \Omega_n(r)] \cos \omega_n z \right\}; \quad (3)$$

$$v_\phi = \frac{C \left[1 + \frac{4k^2}{\pi} \sum_{n=1,3,\dots} \frac{1}{\pi\omega_n^2} \Omega_n(r) \sin \frac{n\pi z}{r_2 - r_1} \right]}{r}; \quad (4)$$

$$v_z = \frac{4D(r_2 - r_1)}{\pi^2 r_1} \sum_{n=1,3,\dots} \frac{1}{n^2} \Omega_n^*(r) \sin \omega_n z, \quad (5)$$

где v_r — радиальная скорость м/с; v_ϕ — окружная скорость, м/с; v_z — осевая скорость, м/с; D — коэффициент; n — нечетное число, $n = 1, 3, 5, \dots$, ω_n — пристенная продольная скорость, м/с; Ω_n , Ω_n^* — коэффициенты.

Значение коэффициента D определяется по формуле

$$D = k C, \quad (6)$$

где k — коэффициент, m^{-1} ; C — коэффициент, зависящий от скорости движения жидкости на входе в трубку переменного сечения, m^2/c .

Значение коэффициента k определяется по формуле

$$k = -\frac{\pi}{2(r_2 - r_1)}. \quad (7)$$

Коэффициент, зависящий от скорости движения жидкости на входе в трубку переменного сечения, определяется уравнением

$$C = v_\phi^{\text{вход}} r_2, \quad (8)$$

где $v_\phi^{\text{вход}}$ — окружная скорость на входе в трубку переменного сечения, м/с.

Пристенная продольная скорость

$$\omega_n = \frac{n\pi}{r_2 - r_1}. \quad (9)$$

Коэффициенты Ω_n , Ω_n^* определяются из уравнений

$$\Omega_n = 1 - \frac{r}{r_1} \frac{B_n I_1(\omega_n r) - C_n K_1(\omega_n r)}{A_n}; \quad (10)$$

$$\Omega_n^* = \frac{B_n I_0(\omega_n r) + C_n K_0(\omega_n r)}{A_n}, \quad (11)$$

где A_n , B_n , C_n — коэффициенты.

Значения коэффициентов A_n , B_n и C_n определяются из уравнений

$$A_n = I_1(\omega_n r_1) K_1(\omega_n r_2) - I_1(\omega_n r_2) K_1(\omega_n r_1); \quad (12)$$

$$B_n = K_1(\omega_n r_2) - \frac{r_1}{r_2} K_1(\omega_n r_1); \quad (13)$$

$$C_n = I_1(\omega_n r_2) - \frac{r_1}{r_2} I_1(\omega_n r_1), \quad (14)$$

где $I_1(x)$; $K_1(x)$; $I_0(x)$; $K_0(x)$ — функции Бесселя.

При практических расчетах значения аргумента бесселевых функций $x = \omega_n r$ оказываются обычно во втором и последующих членах ряда столь большими, что можно воспользоваться асимптотическими представлениями этой функции при $x \rightarrow \infty$ [5]:

$$I_n(x) \approx \frac{e^x}{\sqrt{2\pi x}}; \quad K_n(x) \approx \sqrt{\frac{\pi}{2x}} e^{-x}. \quad (15)$$

По приведенным уравнениям была составлена программа в среде MATLAB и проведен расчет однородного винтового потока в трубке переменного сечения. Расчет потока проведен при следующих параметрах: $r_1 = 0,02$ м, $r_2 = 0,01$ м. Распределение скоростей в трубке переменного сечения при $v_{\text{Ф}}^{\text{вход}} = 0,1$ м/с приведено на рис. 2.

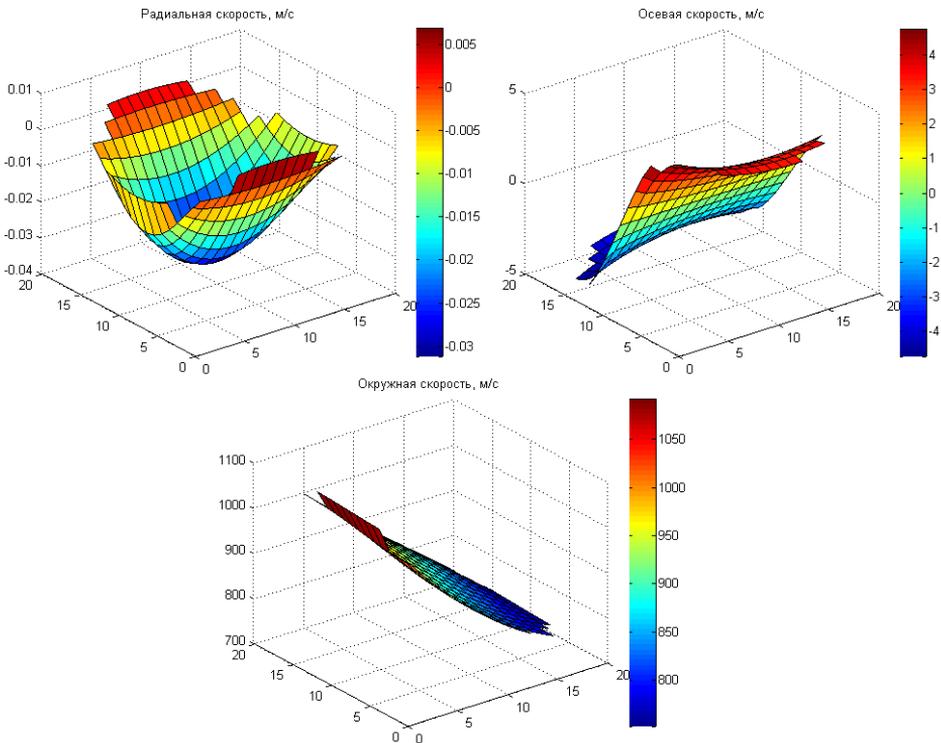


Рис. 2. Профили скоростей в трубке переменного сечения

Полученные уравнения могут быть использованы при расчете скоростей потока в трубках переменного и постоянного сечения без учета физических свойств движущейся среды.

Выводы.

1. Разработана модель движения идеальной жидкости в трубке переменного сечения равномерно вращающейся вокруг вертикальной оси.

2. Составлена программа и произведена апробация модели движения жидкости в среде MATLAB.

Литература

- [1] Кожевников С.О. *Разработка смесителя для перемешивания жидких и гетерогенных сред*: дис. ... канд. тех. наук: 05.02.13: защищена 07.07.05 / С.О. Кожевников. Иваново, 2005, 138 с.
- [2] Ладаев Н.М. *Исследование влияния рабочих органов перемешивающего устройства на время гомогенизации* / Н.М. Ладаев, С.О. Кожевников, Е.В. Жбанова, Ф.О. Герасимов. Инженерные и социальные системы: сб. науч.тр. инж-строит. ин-та ИВГПУ. Иваново, ИВГПУ, 2017. Вып. 2, с. 16–23.
- [3] Родионов С.А. Интенсификация процесса диспергирования пигментов в системах жидкость — твердое тело / С.А. Родионов, С.О. Кожевников. *Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX-2018)*: сб. материалов XXI Междунар. науч.-практ. форума (26–28 сентября 2018 г.). Иваново, ИВГПУ, 2018, ч. 2, с. 280–284.
- [4] Устройство для механоактивации коллоидных дисперсных систем. Патент на полезную модель РФ №184449. Опубл. 25.10.2018.
- [5] Васильев О.Ф. Основы механики винтовых и циркуляционных потоков. М.-Л., Госэнергоиздат, 1958, 144 с.

Сведения об авторах:

Малов Михаил Сергеевич — студент группы сПТМ-41, кафедра «Технической кибернетики и радиоэлектроники», Ивановского политехнического университета, SPIN-code: 5279-2656, ORCID: 0000-0003-3038-698X

Кожевников Сергей Олегович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Технической кибернетики и радиоэлектроники», Ивановского политехнического университета, SPIN-code: 9130-7573, Scopus Author ID: 346065, ORCID: 0000-0003-2222-6759

Simulation of Fluid Motion in the Working Bodies of the Mechanical Activator Using MATLAB

© | **M.S. Malov**
S.O. Kozhevnikov

mishamalov1@gmail.com
kojevnikov_so@mail.ru

Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo, Russia

The paper deals with the solution of the mathematical model of fluid motion in the working bodies of the device for mechanical activation of colloidal disperse systems. The mathematical model with graphical visualization of velocity profiles was solved in MATLAB. The device for mechanical activation is a rotor with spokes, at the ends of which the work-

ing bodies are fixed, uniformly rotating around the vertical shaft. The device allows to obtain materials with a high dispersion structure. These materials are widely represented in the modern world, including within the textile industry, as part of the “ennobling” of the fabric, being the basis of the coloring process. Our studies have shown that to obtain highly dispersed materials, you can use a device equipped with a working body consisting of a rotor with tubes of variable cross-section. When the liquid passes through the tubes of variable cross-section, which in turn make a rotational movement, the velocity of the medium at the outlet increases many times. Modeling of process of movement of liquid medium will determine the velocity distribution of the fluid in the apparatus, to make it constructive, modal optimization and is of particular interest. The mathematical model is a homogeneous differential equation with boundary conditions. The equation is solved by Fourier series. The circumferential, axial and radial flow rates in the working body of the rotor were determined. The profiles of the above-mentioned speeds are given in the form of response surfaces. Thus, the developed model and its implementation in the environment MATLAB allows modeling and parametric synthesis of the process of fluid motion in the working bodies of the device for mechanical activation of colloidal disperse systems.

Keywords: *MATLAB, computer modeling, mixing device, the tube of variable cross section, of a disperse system*

References

- [1] Kozhevnikov S.O. Razrabotka smesitelya dlya peremeshivaniya zhidkih i geterogennyh sred: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.02.13: zashchishchena 07.07.05 / S.O. Kozhevnikov. Ivanovo, 2005, 138 s.
- [2] Ladaev N.M. *Issledovanie vliyaniya rabochnih organov peremeshivayushchego ustrojstva na vremya gomogenizatsii* / N.M. Ladaev, S.O. Kozhevnikov, E.V. Zhanova, F.O. Gerasimov // Inzhenernye i social'nye sistemy: sb. nauch.tr. inzh-stroit.in-ta IVGPU. Ivanovo, IVGPU, 2017. Vyp. 2, s. 16–23.
- [3] Rodionov S.A. Intensifikatsiya processa dispergirovaniya pigmentov v sistemah zhidkost'-tverdoe telo / S.A. Rodionov, S.O. Kozhevnikov. *Fizika voloknistyh materialov: struktura, svoystva, naukoemkie tekhnologii i materialy (SMARTEX-2018)*: sb. materialov HXI Mezhdunar. nauch.-prakt. foruma, 26–28 sentyabrya 2018 goda. Ivanovo, IVGPU, 2018, ch. 2, s. 280–284.
- [4] Ustrojstvo dlya mekhanoaktivatsii kolloidnyh dispersnyh sistem. Patent na poleznuyu model' RF № 184449. Opubl. 25.10.2018.
- [5] Vasil'ev O.F. *Osnovy mekhaniki vintovyh i cirkulyacionnyh potokov*. M.-L., Gos-energoizdat, 1958, 144 s.

Information about authors:

Malov M.S. — student group sptm-41, Department Of “Technical Cybernetics and Radioelectronics”, Ivanovo Polytechnic University, SPIN-code: 5279-2656, ORCID: 0000-0003-3038-698X

Kozhevnikov S.O. — PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Department of “Technical Cybernetics and Radioelectronics”, Ivanovo Polytechnic University, SPIN-code: 9130-7573, Scopus Author ID: 346065, ORCID: 0000-0003-2222-6759

УДК 629.7

Математическое моделирование цифровых оптико-электронных систем военного назначения при проведении государственных летных испытаний

© | А.С. Молчанов
Е.В. Чаусов

andryoe@yandex.ru
ewhenig@yandex.ru

Войсковая часть 15650, Ахтубинск, Астраханская обл., Россия

Рассмотрены существующие методы оценки качества цифровых оптико-электронных систем на основе фоточувствительных приборов с переносом заряда и их основные недостатки. Разработаны методы математического моделирования цифровых оптико-электронных систем на основе обобщенной математической модели, реализованной в виде комбинации отдельных передаточных звеньев. Процессы преобразования сигналов, разнородных по своей физической природе, в различных звеньях цифровых оптико-электронных систем достаточно полно и строго описываются с помощью единого математического аппарата, принятого в общей теории автоматического управления и следящих систем. Каждое звено характеризуется своей оптической передаточной функцией? и считают, что все звенья работают в линейном режиме. Модуль оптической передаточной функции звена, характеризующий зависимость коэффициента передачи модуляции от пространственной частоты, определяет функция передачи модуляции звена цифровой оптико-электронной системы. Изложены особенности математического моделирования иконических оптико-электронных систем, представлены структура математической модели и основные критерии качества, используемые на практике для оценивания иконических оптико-электронных систем с использованием математической модели. Предложены новые методы оценки качества иконических оптико-электронных систем на основе математического моделирования с учетом апостериорной информации летных испытаний, обеспечивающие повышение объективности получаемых оценок и существенное сокращение финансовых, временных и человеческих ресурсов при проведении летных испытаний. Проведенные физические исследования по определению зависимостей разрешающей способности и линейного разрешения цифровой оптико-электронной системы от различных факторов и сравнение результатов исследования с аналитическими результатами подтверждают работоспособность использованных методов при проведении летных государственных испытаний.

Ключевые слова: цифровая оптико-электронная система, летные испытания, линейное разрешение, штриховая мира, разрешающая способность, функция передачи модуляции, математическая модель

Введение. При рассмотрении и анализе цифровых оптико-электронных систем (ЦОЭС), а также при оценке их качества с точки зрения обнаружения излучателя на фоне помех или измерения параметров излучателя? наиболее удобно отдельные звенья ЦОЭС представлять в виде линейных фильтров. В этом случае процессы преобразования сигналов, разнородных по своей физической природе, в раз-

личных звеньях ЦОЭС достаточно полно и строго описываются с помощью единого математического аппарата, принятого в общей теории автоматического управления и следящих систем.

Процесс прохождения информации в ЦОЭС может быть представлен в виде последовательного соединения отдельных передаточных линейных звеньев, каждое из которых влияет на преобразование информации. Каждое звено характеризуется своей оптической передаточной функцией и считает, что все звенья работают в линейном режиме. Модуль оптической передаточной функции звена, характеризующий зависимость коэффициента передачи модуляции T от пространственной частоты ν , определяет функция передачи модуляции (ФПМ) звена ЦОЭС [1, 2].

Описание математической модели. ФПМ ЦОЭС представляется как произведение ФПМ всех звеньев, существенно влияющих на качество изображения. Общую ФПМ для всей ЦОЭС можно представить следующим образом:

$$W_{\text{ЦОЭС}}(\nu) = W_{\text{ЦОЭС-МПИ}}(\nu)W_{\text{МПИ}}(\nu), \quad (1)$$

где $W_{\text{ЦОЭС-МПИ}}(\nu)$ — ФПМ ЦОЭС без учета влияния ФПМ матричного приемника излучения (МПИ), $W_{\text{МПИ}}(\nu)$ — ФПМ МПИ.

Функция передачи модуляции ЦОЭС без учета звена МПИ имеет вид [2, 9, 10]:

$$W_{\text{ЦОЭС-МПИ}}(\nu) = W_{\text{АТМ}}(\nu)W_{\text{СДВ}}(\nu)W_{\text{ОБ}}(\nu)W_{\text{ДИФ}}(\nu)W_{\text{СФ}}(\nu)W_{\text{ЭТ}}(\nu)W_{\text{ДИСП}}(\nu)W_{\text{ДЕШ}}(\nu), \quad (2)$$

где $W_{\text{АТМ}}(\nu)$ — ФПМ атмосферы; $W_{\text{СДВ}}(\nu)$ — ФПМ сдвига и вибраций; $W_{\text{ОБ}}(\nu)$ — ФПМ объектива; $W_{\text{ДИФ}}(\nu)$ — ФПМ дифракционных искажений объектива; $W_{\text{СФ}}(\nu)$ — ФПМ системы фокусировки; $W_{\text{ЭТ}}(\nu)$ — ФПМ электронного тракта; $W_{\text{ДИСП}}(\nu)$ — ФПМ дисплея отображения информации; $W_{\text{ДЕШ}}(\nu)$ — ФПМ зрительного анализатора оператора-дешифровщика.

Функция передачи модуляции атмосферы имеет следующий вид:

$$W_{\text{АТМ}}(\nu) = W_{\text{АД}}(\nu)W_{\text{ТА}}(\nu), \quad (3)$$

где $W_{\text{АД}}(\nu) = \frac{1}{1 + 2\rho_{\text{Д}}}$ — ФПМ, учитывающая влияние атмосферной дымки,

$\rho_{\text{Д}} = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_{\text{Д}}(\lambda_i)\tau_{\text{Ф}}(\lambda_i)}{n\tau_{\text{Ф}}}$ — коэффициент яркости дымки; $\rho_{\text{Д}}(\lambda) = b_1 r^2(\lambda) + b_2 r(\lambda)$ —

спектральный коэффициент яркости дымки, $\tau_{\text{Ф}}(\lambda)$ — спектральный коэффициент пропускания объектива, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5 — коэффициенты, учитывающие условия

съемки; $r(\lambda) = r_{\infty}(\lambda) \left[1 - \exp\left(\frac{-0,13H}{\cos\beta}\right) \right]$ — спектральный коэффициент рассеяния

слоя атмосферы; $r_{\infty}(\lambda) = b_3 \lambda^2 - b_4 \lambda + b_5$ — спектральный коэффициент рассеяния атмосферы, H — высота полета ЛА (БЛА); β — угол визирования.

Функция передачи модуляции турбулентной атмосферы [1, 2]:

$$W_{ТА}(v) = \exp(-2\pi^2 \sigma_{АТМ}^2 f^2 v^2), \quad (4)$$

где $\sigma_{АТМ}$ — параметр атмосферы; f — фокусное расстояние объектива.

Функция передачи модуляции с учетом сдвига и вибраций ЦОЭС аппроксимируется [3]:

$$W_{СДВ}(v) = \exp(-2\pi^2 \sigma_{СДВ}^2 v^2), \quad (5)$$

где $\sigma_{СДВ}$ — среднеквадратическое отклонение в плоскости изображения.

Функция передачи модуляции объектива зависит от угла поля зрения между оптической осью и направлением визирования. По центру оптической оси объектив имеет наилучшую ФПМ. На характер ФПМ объектива существенно влияет величина относительного отверстия. При уменьшении относительного отверстия от своего максимального значения ФПМ сначала уменьшается, так как уменьшаются значения остаточных aberrаций, а влияние дифракции еще незначительно. Далее, по мере уменьшения относительного отверстия, наблюдается увеличение дифракционных искажений, ведущее к ухудшению ФПМ. ФПМ объектива с учетом суммарного влияния aberrаций может быть представлена выражением [1, 3, 4]:

$$W_{ОБ}(v) = \exp\left(-0,0035 \frac{D_{вхзр}^2 \operatorname{tg} 2\beta}{f} v\right), \quad (6)$$

где $D_{вхзр}$ — диаметр входного зрачка; $\operatorname{tg} 2\beta$ — угол поля зрения объектива.

Функция передачи модуляции учета влияния дифракционных искажений [1, 5]:

$$W_{диф}(v) = \frac{2}{\pi} \left[\arccos \frac{\lambda v f}{D_{вхзр}} - \frac{\lambda v f}{D_{вхзр}} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda v f}{D_{вхзр}}\right)^2} \right] \text{ при } 0 \leq \frac{\lambda v f}{D_{вхзр}} \leq 1, \quad (7)$$

где λ — длина волны излучения, соответствующая середине видимого диапазона; $f/D_{вхзр}$ — диафрагменное число.

Как уже упоминалось, дифракционные явления будут сказываться на ФПМ ЦОЭС только при малых значениях величин относительного отверстия. Поэтому в нашей модели ФПМ дифракция не учитывалась.

Функция передачи модуляции системы фокусировки

$$W_{СФ}(v) = \frac{\sin\left(\frac{\sqrt{3}\pi\Delta f D_{вхзр} v}{2f}\right)}{\frac{\sqrt{3}\pi\Delta f D_{вхзр} v}{2f}} = \operatorname{sinc}\left(\frac{\sqrt{3}\Delta f D_{вхзр} v}{2f}\right), \quad (8)$$

где Δf — погрешность фокусировки.

Причинами возникновения расфокусировки Δf является перепад температур и давлений. Как следствие, достижение температурой и давлением значений, при которых деформация конструктивных материалов уже существенна.

Функция передачи модуляции электронного тракта определяется фазовыми сдвигами сигналов, а также ограниченностями спектра сигнала (искажения формы), имеющими место в отдельных звеньях.

Переход от пространственных частот ν к временной частоте f' , являющейся аргументом передаточных функций элементов электронного тракта, достаточно прост, например, при сканировании малоразмерного изображения вдоль оси x со скоростью V_x он имеет вид

$$\nu = \frac{f'}{V_x} = \frac{\tau_d f'}{\alpha_x}, \quad (9)$$

где τ_d — время пребывания изображения (по оси x) на элементе приемника с угловым размером α_x .

Учитывая большое разнообразие электронных трактов различных ОЭС, невозможно привести сколько-нибудь общее выражения для $W_{ЭТ}(\nu)$. Однако в расчетах в качестве ФПМ электронного тракта принимают следующее выражение:

$$W_{ЭТ}(\nu) = \left[1 - (\nu/\nu_N)^{2n} \right]^{-1/2}, \quad (10)$$

где n определяется типом электронного фильтра; для простейшего отсекающего фильтра $n = 1$, для простого полосового фильтра $n = 2$, для низкочастотного фильтра, устраняющего явление наложения частот (фильтр Баттерворта), $n = 4$.

В тех случаях, когда граничная частота в спектре сигнала не превышает частоты Найквиста ν_N , принимают $W_{ЭТ}[\nu] = 1$ [2, 12].

При использовании в составе ОЭП звена, реконструирующего (восстанавливающего) изображение в качестве $W_{ЭТ}(\nu)$, используют выражение

$$W_{ЭТ}[\nu] = \sin c(\nu/\nu_0) \sin c\left(\frac{\nu\alpha_p}{\tau_d\nu_0}\right), \quad (11)$$

где ν_0 — центральная частота полосы пропускания реконструирующего фильтра (частота восстановления).

Передаточная функция дисплея видеоконтрольного устройства, описывается следующей функцией:

$$W_{ДИСП}(\nu) = \frac{\sin(\pi\alpha_{LED}\nu)}{\pi\alpha_{LED}\nu} = \text{sinc}(\pi\alpha_{LED}\nu), \quad (12)$$

где α_{LED} — угловой размер элементарной излучающей площадки дисплея.

Функция передачи модуляции зрительного анализатора оператора-дешифровщика учитывает оптические свойства глазного яблока и сетчатки, а также тремор глаза и может быть аппроксимирована функцией

$$W_{ДЕШ}(\nu) = \exp\left(-\frac{\Gamma\nu}{2\pi M}\right), \quad (13)$$

где $\Gamma = 1,4445 - 0,34407 \lg L_0 + 0,039457 (\lg L_0)^2 + 0,0019652 (\lg L_0)^3$ (L_0 — средняя яркость экрана дисплея); M — увеличение системы, с которой работает глаз.

Стоит отметить, что для расчета $W_{\text{ДЕШ}}(v)$ используют и другие зависимости, например следующее выражение:

$$W_{\text{ДЕШ}}(v) = \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \sqrt[3]{v / v_{\max}} \right), \quad (14)$$

где v_{\max} — пространственная частота, на которой $W_{\text{ДЕШ}}(v)$ имеет максимум. В пространстве объектов для глаз часто принимают $v_{\max} = 0,3$ мрад⁻¹.

Функция передачи модуляции МПИ имеет вид [6, 7]:

$$W_{\text{МПИ}}(v) = W_{\text{НПЗ}}(v) W_{\text{ДИФ}}(v) W_{\text{ПИ}}(v) W_{\text{НАК}}(v) W_{\text{СИНХР}}(v), \quad (15)$$

где $W_{\text{НПЗ}}(v)$ — ФПМ неэффективности переноса заряда; $W_{\text{ДИФ}}(v)$ — ФПМ диффузии; $W_{\text{ПИ}}(v)$ — ФПМ приемника излучения; $W_{\text{НАК}}(v)$ — ФПМ накопления; $W_{\text{СИНХР}}(v)$ — ФПМ синхронизации.

Функция передачи модуляции, учитывающая неэффективность переноса заряда в МПИ, работающем в режиме временной задержки импульсов:

$$W_{\text{НПЗ}}(v) = Nx^{-1} \left(\frac{A(v)^2 + B(v^2)}{a(v)^2 + b(v)^2} \right)^{0,5}, \quad (16)$$

где $A(v) = 1 - \exp(-Nx \cdot a(v)) \cdot \cos(Nx \cdot b(v))$, $B(v) = \exp(-Nx \cdot a(v)) \cdot \sin(Nx \cdot b(v))$, $a(v) = \varepsilon \cdot (1 - \cos(v))$, $b(v) = \varepsilon \cdot \sin(v)$, $\varepsilon = P_{\Phi} \varepsilon_0$ — неэффективность переноса на один каскад (перенос на расстояние, равное дискретности фотоэлементов) (ε_0 — неэффективность переноса на один элементарный перенос, P_{Φ} — число фаз тактового питания); параметры Nx , Ny определяют количество элементов МПИ.

Часть носителей заряда генерируется вне обедненных областей МПИ. При диффузии этих носителей под действием электрического поля в обедненную область имеется боковая компонента, приводящая к расплыванию изображения. ФПМ диффузии для МПИ всех типов имеет вид

$$W_{\text{ДИФ}}(v) = \cosh \left(\frac{d}{L_0} \right) \cdot \cosh \left(\frac{d}{L(v)} \right), \quad (17)$$

где L_0 — диффузионная длина в материале; d — расстояние от места поглощения света до обедненной области.

$$L(v) = (L_0 + (2\pi v)^2)^{-0,5}. \quad (18)$$

Функция передачи модуляции элементарного приемника излучения (апертуры) определяется геометрией фотоэлемента и описывается преобразованием Фурье пространственного распределения чувствительности отдельного фотоэлемента:

$$W_{\text{ПИ}}(v) = \frac{\sin(A\pi v)}{A\pi v} = \text{sinc}(Av), \quad (19)$$

где A — размер фотоэлемента.

Функция передачи модуляции накопления обусловлена сдвигом изображения за время накопления заряда t_H (время экспозиции) и определяется выражением

$$W_{\text{НАК}}(v) = \text{sinc}(\delta v), \quad (20)$$

где δ — результирующий сдвиг изображения относительно МПИ за время накопления; величина сдвига зависит от типа оптической системы, элементов внешнего и внутреннего ориентирования снимка.

В случае равномерного прямолинейного полета ЛА при отсутствии систем компенсации сдвига изображения в условиях плановой съемки:

$$\delta = \frac{W}{H} f t_H, \quad (21)$$

где W — скорость носителя; f — фокусное расстояние оптической системы.

В этом случае величина результирующего сдвига за время накопления при равенстве скорости сдвига изображения и средней скорости перемещения зарядовых пакетов определяется дискретностью фотозаписи.

Функция передачи модуляции синхронизации учитывает несоответствие скорости сдвига изображения, средней скорости перемещения зарядовых пакетов и описывается sinc :

$$W_{\text{СИНХР}}(v) = \text{sinc}(N_x \cdot D \cdot \eta_V \cdot v), \quad (22)$$

где η_V — относительная погрешность компенсации сдвига изображения, зависящей от погрешности измерителя скорости и высоты полета носителя.

Результаты исследований. Существующие методики оценивания ЦОЭС предусматривают выполнение испытательных полетов на аэросъемку специального тест-объекта (штриховой миры) и проведение визуального анализа оператором-дешифровщиком полученных изображений миры. В качестве оценки линейного разрешения принимают ширину штриха штриховой миры, в изображении которой дешифровщик различает все штрихи в группе раздельно по всей их длине (имеется визуальное восприятие разницы в уровне серого тона между каждой светлой полосой и соседними с ней темными полосами по всей их длине) [2, 8, 9]. Такой подход не лишен недостатков, главными из которых являются:

1) найденное значение разрешения зависит от условий проведения испытаний, формы и контраста между элементами штриховой миры, характеристик устройства, с помощью которого рассматривается оцениваемое изображение, свойств наблюдателя (ошибка наблюдателя, в сознании которого еще не установился четкий критерий разрешения, достигает 40 %) [2];

2) предполагается проведение большого количества испытательных полетов в различных условиях, что значительно увеличивает сроки проведения испытаний, а также способствует расходованию ресурса ЛА (БЛА) ЦОЭС, горюче-смазочных материалов, а также сил и средств испытательной бригады.

С целью повышения объективности оценки качества ЦОЭС, использующих МПИ в процессе проведения летных испытаний, и сокращения материальных затрат предлагается расчетный метод определения ФПМ ЦОЭС и ее звеньев по результатам предыдущих испытаний. Определив экспериментальным путем два множителя в выражении (1), первый из которых в дальнейших испытаниях используется как «паспортный», а величина второго множителя определяется в процессе испытаний, мы

получаем возможность рассчитывать ФПМ всей ЦОЭС для тех же условий, при которых проводились испытания. Этим обеспечивается возможность сопоставления для одних и тех же условий ФПМ, использующих различные типы ЦОЭС и (или) МПИ.

Для того чтобы выполняемые сопоставления ФПМ ЦОЭС были корректны, их сравнение необходимо проводить при одних и тех же значениях освещенности на местности и контрасте миры, для чего «паспортные» значения ФПМ ЦОЭС определяются для каждого из значений. Полученные значения ФПМ ЦОЭС могут быть использованы в математической модели ЦОЭС.

Для реализации предлагаемого способа необходимо выполнить следующие операции.

1. Проверить соответствие ЦОЭС техническим условиям или тактико-техническому заданию на нее в соответствии с действующими методическими документами.

2. Составить ММ ЦОЭС $W_{\text{ЦОЭС}}(v)$ в соответствии с выражением (1) на основании аналитических выражений ФПМ ее звеньев $W_3^1(v)$, $W_3^2(v)$, ..., $W_3^i(v)$, $i = 1, 2, \dots, n$, где n — количество звеньев ЦОЭС.

3. Выполнить испытательный полет на аэросъемку штриховых (радиальных) мир при различных изменениях освещенности на местности и контрасте миры и по полученным с помощью ЦОЭС изображениям найти апостериорную ФПМ $W_{\text{ЦОЭС}}^{\text{эксп.}}(v)$ $W_{\text{ЦОЭС}}^{\text{эксп.}}(v)$.

Для определения апостериорной ФПМ системы используется программный комплекс обработки цифровых изображений (ПКОЦИ) [11], который позволяет оператору загружать цифровые изображения, полученные исследуемой ЦОЭС, выполнять измерения уровней освещенности интересующих участков изображения, рассчитывать значения коэффициентов передачи модуляции и строить графики экспериментальной ФПМ исследуемой ЦОЭС. Пример определения апостериорной ФПМ авиационной ОЭС наблюдения на основе анализа с помощью ПКОЦИ цифровых изображений, полученных ОЭС в ходе испытательного полета на аэросъемку штриховой миры, представлен на рисунке.

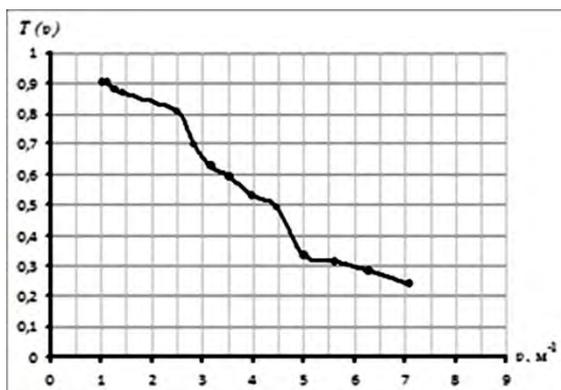


График апостериорной ФПМ авиационной ОЭС, построенной с помощью ПКОЦИ

4. Найти в математической модели ЦОЭС звено, ФПМ которого содержит параметр, характеризующий условия, при которых необходимо выполнить оценку ЦОЭС, и приводят ФПМ ЦОЭС к виду

$$W_{\text{ЦОЭС}}(v) = W_{\text{ЦОЭС-3}}(v) \cdot W_3^i(v, \mu), \quad (17)$$

где $W_{\text{ЦОЭС-3}}(v)$ — аналитическая ФПМ ЦОЭС без звена, содержащего параметр условий применения; $W_3^i(v, \mu)$ — аналитическая ФПМ i -го звена, содержащего параметр условий применения; μ — параметр условий применения ЦОЭС, при которых необходимо выполнить оценку ЛРМ.

5. Найти ФПМ ЦОЭС без i -го звена параметра условий применения $W_{\text{ЦОЭС-3}}^{\text{эксп}}(v)$ с учетом апостериорной ФПМ $W_{\text{ЦОЭС}}^{\text{эксп}}(v)$ и выражения (2) по формуле

$$W_{\text{ЦОЭС-3}}^{\text{эксп}}(v, \mu) = \frac{W_{\text{ЦОЭС}}^{\text{эксп}}(v)}{W_3^i(v, \mu)}. \quad (18)$$

6. Найти ФПМ i -го звена параметра условий применения ЦОЭС $W_3^{\text{эксп}}(v)$ с учетом апостериорной ФПМ $W_{\text{ЦОЭС}}^{\text{эксп}}(v)$ и выражения (2) по формуле

$$W_3^i \text{ эксп}(v, \mu) = \frac{W_{\text{ЦОЭС}}^{\text{эксп}}(v)}{W_{\text{ЦОЭС-3}}(v, \mu)}. \quad (19)$$

7. Найти ФПМ ЦОЭС с учетом апостериорной информации по формуле:

$$W_{\text{ЦОЭС-3}}^0(v, \mu) = W_{\text{ЦОЭС-3}}^{\text{эксп}}(v, \mu) \cdot W_3^i \text{ эксп}(v, \mu). \quad (20)$$

8. Выполнить синтез множества моделей ФПМ $W_{\text{ЦОЭС}}^0(v)$ $W_{\text{ЦОЭС}}^0(v, \mu)$ в зависимости от различных значений параметра условий применения ЦОЭС, при которых проводились испытания, и на основании выбранного критерия качества получить значения предельной пространственной частоты для каждого из моделируемых условий без выполнения дополнительных отдельных полетов в этих условиях [2, 8, 9]. Этим обеспечивается возможность сопоставления одних и тех же условий для расчета ФПМ ЦОЭС и определения характеристик качества цифровых оптико-электронных систем.

Заключение. Проведенные физические исследования по определению зависимостей разрешающей способности и линейного разрешения ЦОЭС от различных факторов и сравнение результатов исследования с аналитическими результатами подтверждают работоспособность использованных методов при проведении летных государственных испытаний. Методика испытаний ЦОЭС МПИ с использованием предложенной математической модели и апостериорной информации о передаточных характеристиках различных ЦОЭС позволяет по результатам оптико-электронной съемки, полученным в одном испытательном полете, оценивать, не проводя дополнительных испытательных полетов, качество этих ЦОЭС. Разработанная методика также может применяться для ранжировки и сопоставления различных типов МПИ.

Литература

- [1] Ребрин Ю.К. *Оптико-электронное разведывательное оборудование летательных аппаратов*. Киев, Киевское ВВАИУ, 1988, 450 с.

- [2] Молчанов А.С. *Теория построения иконических систем воздушной разведки*. Волгоград, Панорама, 2017, 224 с.
- [3] Дубинский Г.П., Кононов В.И., Федоровский А.Ф. *Методы оценки качества оптических систем*. Москва, Машиностроение, 1978, 231 с.
- [4] Кучко А.С. *Аэрофотографирование. Основы и метрология*. Москва, Недра, 1974, 272 с.
- [5] Павлов И.М., Якубов Н.Т. *Аэрофотография*. Москва, Недра, 1991, 335 с.
- [6] Пресс Ф.П. *Фоточувствительные приборы с зарядовой связью*. Москва, Радио и связь, 1991, 264 с.
- [7] Малинин В.В. *Моделирование и оптимизация оптико-электронных приборов с фотоприемными матрицами*. Новосибирск, Наука, 2005, 255 с.
- [8] Молчанов А.С. Методика оценки линейного разрешения на пиксель аэрофотосистем военного назначения при проведении летных испытаний. *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*, 2018, т. 62, № 4, с. 390–396.
- [9] Молчанов А.С. Оценка качества аэрофотосистем методом математического моделирования с использованием критерия Шадэ. *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*, 2017, т. 61, № 1, с. 28–33.
- [10] Молчанов А.С., Чаусов Е.В. Математическое моделирование цифровых оптико-электронных систем и их оценка при проведении летных испытаний. *Сборник материалов XIV Междунар. науч.-практ. конф.* Курск, ЮЗГУ, 2018, с. 178–181.
- [11] Молчанов А.С., Чаусов Е.В. *Программный комплекс обработки цифровых изображений*. Ахтубинск, 2018, 12 с.
- [12] Молчанов А.С. Исследование характеристик линейного разрешения и разрешающей способности цифровых аэрофотосистем с использованием теоремы Котельникова-Найквиста-Шеннона. *Инженерные решения: эл. научный журнал*, 2019, № 2 (3), 15 с.

Сведения об авторах:

Молчанов Андрей Сергеевич — канд. техн. наук, доцент, профессор Академии военных наук, заместитель начальника отдела — начальник отделения (старший инженер-испытатель) 1-го Управления научно-исследовательского испытательного войсковой части 15650

Чаусов Евгений Викторович — старший инженер-испытатель 1-го Управления научно-исследовательского испытательного войсковой части 15650

Mathematical Modeling of Digital Optical-Electronic Systems for Military Purposes During the State Flight Tests

© | A.S. Molchanov
E.V. Chausov

andryoe@yandex.ru
ewhenig@yandex.ru

Military unit 15650, Ahtubinsk, Russia

The article discusses the existing methods for assessing the quality of digital optical-electronic systems based on photosensitive devices with charge transfer and their main disadvantages. Methods for mathematical modeling of digital optoelectronic systems based on a generalized mathematical model implemented as a combination of individual transmission links have been developed. The processes of converting signals that are heterogeneous in their physical nature in different parts of digital optical-electronic systems are quite fully and strictly described using a single mathematical apparatus adopted in the general theory of automatic control and tracking systems. Each link is characterized by its optical transfer function and it is considered that all links operate in a linear mode. The module of the optical transfer function of the link, which characterizes the dependence of the modulation transfer

coefficient on the spatial frequency, determines the transfer function of the link modulation of a digital optical-electronic system. The features of mathematical modeling of iconic optical-electronic systems are set forth, the structure of the mathematical model and the main quality criteria used in practice for evaluating iconic optical-electronic systems using a mathematical model are presented. New methods for assessing the quality of iconic optical-electronic systems based on mathematical modeling, taking into account the a posteriori information of flight tests, are proposed to increase the objectivity of the resulting estimates and significantly reduce financial, time and human resources during flight tests. Physical studies to determine the dependences of the resolution and linear resolution of a digital optical-electronic system on various factors and a comparison of the results of the study with analytical results confirm the efficiency of the methods used during the flight state tests.

Keywords: digital optoelectronic system, flight tests, linear resolution, dashed world, resolution, modulation transfer function, mathematical model

References

- [1] Rebrin Y.K. *Optical-electronic reconnaissance equipment of aircraft*. Kiev, 1988.
- [2] Molchanov A.S. *Theory of building iconic aerial iconical systems*. Volgograd, Panorama, 2017.
- [3] Dubinsky G.P., Kononov V.I., Fedorovsky A.F. *Methods for assessing the quality of optical systems*. Moscow, Mashinostroenie, 1978.
- [4] Kuchko A.S. *Aerial photography. Fundamentals and metrology*. Moscow, Nedra, 1974.
- [5] Pavlov I.M., Yakubov N.T. *Aerial photography*. Moscow, Nedra, 1991.
- [6] Press F.P. *Photosensitive charge-coupled devices*. Moscow, Radio and communication, 1991.
- [7] Malinin V.V. *Modeling and optimization of opto-electronic devices with photo-receiving matrices*. Novosibirsk, Science, 2005.
- [8] Molchanov A.S. Methodology for estimating linear resolution per pixel of military aerial systems during flight tests. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Surveying and aerial photography*, 2018, vol. 62, № 4, pp. 390–396.
- [9] Molchanov A.S. Quality assessment of aerial systems using mathematical modeling using the Shade criterion. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Surveying and aerial photography?* 2017, vol. 61, № 1, pp. 28–33.
- [10] Molchanov A.S., Chausov E.V. Mathematical modeling of digital optical-electronic systems and their evaluation during flight tests. *Collection of materials of the XIV International Scientific and Practical Conference*. Kursk, SWSU, 2018, pp. 178–181.
- [11] Molchanov A.S., Chausov E.V. *Software complex processing of digital images*. Akhtubinsk, 2018, 12 p.
- [12] Molchanov A.S. Investigation of the characteristics of linear resolution and resolution of digital aerial photosystems using the Kotelnikov-Nyquist-Shannon theorem. *Engineering solutions: el. Science Magazine*, 2019, № 2 (3), 15 p.

Information about authors:

Molchanov A.S. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Academy of Military Sciences, Deputy Head of Department — Head of Department (Senior Testing Engineer) 1 of the Directorate for the Research Test Force 15650

Chausov E.V. — Senior Testing Engineer 1 of the Directorate of the Scientific Research Test Unit 15650

УДК 51.74, 519.24

Моделирование классификаторов для локационных систем

© Ю.В. Морозов
М.А. Райфельд
А.А. Спектор

yu.morozov@corp.nstu.ru
rajfeld@mail.ru
spektor@corp.nstu.ru

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Рассмотрен подход к моделированию спектральных классификаторов обнаруженных объектов в локационных системах различного назначения. В спектральных классификаторах в качестве классификационных признаков используются частотные составляющие амплитудных спектров огибающих принятых сигналов. Предложенная моделирующая программа в среде MATLAB включает в себя подсистемы предварительной обработки принятых сигналов, формирования базы эталонных спектров, принятия решения о принадлежности объекта классу, визуализации результатов. Предварительная обработка включает в себя адаптивную декорреляцию, получение огибающей со сглаживанием, наложение оконной функции. Эталонные спектры формируются для нескольких сочетаний параметров предварительной обработки сигналов. Архитектура предложенной программы максимально приближена к архитектуре программного обеспечения реальных локационных систем, выпускаемых предприятиями России. В программе имеется возможность обработки записей как реальных сигналов, так и имитационных сигналов, формируемых на основе статистических свойств реальных сигналов. Сигналы от нескольких датчиков подвергаются воздействию помех с заданными свойствами и разбиваются на циклы с заданным количеством отсчетов с учетом объема памяти реальной системы. Исходными данными для моделирующей программы являются координаты взаимного расположения датчиков, параметры стадий предварительной обработки принятого сигнала, объем эксперимента и ряд вспомогательных данных. В качестве результатов работы программы формируются графики принятых сигналов до и после предварительной обработки, графики функций принятия решений о принадлежности объекта к некоторому классу. В качестве числовых результатов выводится относительное количество ошибок отнесения объекта к тому или иному классу для разных объектов. Имеются дополнительные модули, которые позволяют реализовать двухэтапную классификацию, а также принятие решения о принадлежности объекта некоторому дополнительному неизвестному классу. Реализованный в рассматриваемой моделирующей программе алгоритм классификации включен в состав программного обеспечения сейсмической локационной системы «Азимут-1» производства ФГУП ПО «Север» Госкорпорации «Росатом».

Ключевые слова: классификация, спектр, моделирование, принятие решения, локация

Введение. Локационные системы, в том числе радиолокационные системы и системы пассивной сейсмической локации, решают задачи обнаружения, трассировки и классификации локационных целей. Решение этих задач не обходится без математического, алгоритмического и программного обеспечения. Построение

алгоритмов не обходится без их исследования путем имитационного моделирования и проведения натурных экспериментов.

Классификации объектов было посвящено много работ, начиная с 70-х годов прошлого века до сегодняшних дней [1–5]. Идентификация сейсмического сигнала на основе цифровой обработки сигналов, которая предшествует классификации, изложена в [1]. В [2] изложены теоретические основы классификации как распознавания образов. Выделение признаков, по которым классифицируются сейсмические сигналы, рассмотрено в [3]. Практическая реализация классификации сейсмических сигналов изложена в [4, 5]. Одним из примеров классификации сейсмических сигналов является классификация ударных воздействий на земную кору от взрывов, землетрясений, падения метеоритов, ударов молний и т. д. [4]. Другим примером является сейсмическая локация на морском дне для различения разных видов китов в целях контроля за их популяцией [5]. Классификатор сейсмических сигналов на основе спектральных признаков изложен в [6]. Упомянутые работы в основном посвящены теоретическим исследованию и анализу результатов экспериментов. В настоящей работе основное внимание сосредоточено на моделировании классификатора пассивной сейсмической локационной системы.

Описание моделирующей программы. Модель классификатора сигналов в сейсмической локационной системе включает в себя загрузку записей сейсмических сигналов, предварительную обработку, процедуру принятия решения, визуализацию, формирование классификационных признаков эталонов. Структура модели классификатора показана на рисунке. Предварительная обработка включает в себя адаптивное выбеливание и получение сглаженной огибающей.

Декорреляция или выбеливание осуществляется для ослабления сейсмического фона [6]. Затем путем детектирования выделяется огибающая сейсмического сигнала. Предусмотрены выбор типа детектора: квадратичный детектор или детектор на основе преобразования Гильберта.

Квадратичный детектор описывается выражением

$$u_{di}(m) = [u_i(m)]^2,$$

где m — дискретное время.

Достоинством данного детектора является простота реализации. В качестве недостатка следует отметить усиление отсчетов с большим уровнем сигнала и одновременное ослабление с малым уровнем, что приводит к искажениям огибающей.

В качестве альтернативы рассматривается детектор на основе преобразования Гильберта

$$u_{di}(m) = \left| \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M/2} U_i(n) H(n) \exp\left(\frac{2\pi jmn}{M}\right) \right|,$$

где $U_i(n)$ — результат быстрого преобразования Фурье (БПФ) сигнала $u_i(m)$; $H(n)$ — коэффициент передачи фильтра, формирующего аналитический сигнал; M — длительность цикла.

Наконец, огибающая подвергается скользящему сглаживанию путем усреднения некоторого количества соседних отсчетов. Задачей сглаживания является дальнейшее ослабление флуктуаций, вызванных действием сейсмического фона. Для объектов с импульсным воздействием на грунт сглаживание приводит к относительному ослаб-

лению выбросов фона, что способствует более качественной передаче сигнальных импульсов. Для этого, конечно, размер «окна» не должен превышать длительность импульсного сигнала. Как правило, интервал усреднения составляет от 15 до 50 отсчетов. Сглаженная огибающая выделенного сейсмического сигнала является основой для выделения классификационных признаков.

Затем огибающая подвергается быстрому преобразованию Фурье (БПФ). Чтобы избежать появления ложных спектральных составляющих, перед БПФ огибающая умножается на оконную функцию, тип которой определяется значениями параметров a_0, a_1, a_2 :

$$w(m) = a_0 \left(1 - a_1 \cos\left(2\pi \frac{m}{M}\right) + a_2 \cos\left(2\pi \frac{m}{M}\right) \right).$$

Далее классификатор, основанный на принципе максимального правдоподобия (МП), вычисляет функции правдоподобия для принятия решения о принадлежности объекта некоторому классу.

Все сейсмические сигналы, используемые в программе, имеют частоту дискретизации 600 Гц. Операции по обработке этих сигналов выполняются по циклам из 1000 отсчетов. Для каждого цикла вычисляется БПФ спектр, который включает в себя 501 спектральный отсчет.

Для реализации МП метода классификации требуется формирование базы эталонных распределений отдельных спектральных составляющих для каждого из классов сейсмических объектов в различных режимах предварительной обработки сейсмических сигналов. Принято, что сейсмический сигнал принадлежит одному из четырех классов: одиночный человек, группа людей, крупное животное, автомобиль. Имеется возможность увеличения количества классов.



Рис. 1. Структура программы для моделирования классификатора в сейсмической локационной системе

Карта эталонных распределений включает в себя среднее, среднее квадратическое отклонение (СКО) и тип распределения для каждой спектральной составляющей, используемой в качестве классификационного признака. Средние и СКО вычисляются по пучку из 20 БПФ спектров для каждого из упомянутых классов.

Эталонные распределения строятся для разных вариантов предварительной обработки в зависимости от способа получения огибающей, количества усреднений при сглаживании, типа и значений параметров оконной функции, накладываемой на огибающую перед вычислением БПФ.

Поскольку БПФ спектры огибающих существенно различаются в области низких частот, обычно в качестве классификационных признаков берется от 7 до 15 спектральных составляющих.

В процессе классификации функция правдоподобия с учетом карты эталонных распределений вычисляется для каждого класса для всех выбранных признаков на каждом цикле для каждого активного датчика, участвующего в классификации. Логарифмические функции правдоподобия для каждого из класса суммируются по всем признакам, циклам и датчикам. Затем в качестве искомого класса выбирается класс, которому соответствует максимальное значение суммарной функции правдоподобия.

Визуализация включает в себя вывод графиков исходных сигналов, результатов предварительной обработки, эталонных и рабочих БПФ спектров, логарифмических функций правдоподобия и функции принятия решений с указанием сведений о количестве ошибок классификации.

Для исследования классификатора при каких-либо произвольных параметрах режима предварительной обработки, например при каком-либо типе оконной функции и его параметре, необходимо каждый раз получать эталонную карту распределений именно для таких параметров, что несколько снижает гибкость моделирования.

Визуализация предусматривает возможность выбора отображаемого сигнала в зависимости от цикла и номера датчика. Также выводятся функции правдоподобия и принятия решений с последующим вычислением количества ошибок классификации.

Результаты. С использованием разработанной моделирующей программы в среде MATLAB были проведены вычислительные эксперименты по классификации сейсмических сигналов для различных типов детекторов и оконных функций. Показано, что количество ошибочных решений в пользу человека и группы людей составляет более 50 % от общего количества решений для квадратичного детектора и детектора на основе преобразования Гильберта при прямоугольном окне. Использование окна Хэннинга совместно с детектором на основе преобразования Гильберта позволяет снизить количество упомянутых ошибочных решений до 10 %. Количество ошибочных решений в пользу автомобиля или лошади не превышает 5 % при любых типах окон и детекторов.

Обсуждение полученных результатов. Исследования классификации сейсмических сигналов, выполненные с помощью разработанной моделирующей программы, позволили внедрить предложенный МП классификатор в сейсмической системе охраны «Азимут-1». Программа работает с реальными физическими сигналами, что позволяет адекватно учитывать их свойства и влияние сейсмического фона. Если объема экспериментальных данных, полученных в одних и тех же условиях, недостаточно, то следует воспользоваться имитатором сейсмических сигналов. Моделирующая программа поддерживает достаточно большое количество степеней свободы при задании параметров эксперимента.

Заключение (выводы и рекомендации). Таким образом, разработанная программа для моделирования классификатора сейсмических сигналов позволяет оценивать качество классификации сейсмических сигналов по доле ошибочно принятых решений о принадлежности объекта классу от общего количества решений. Наименьшее количество ошибок дает автомобиль, а наибольшее — человек или группа людей.

В предложенной моделирующей программе имеется возможность увеличения количества классов и количества этапов классификации, чтобы, например, различение человека и группы людей перенести на второй этап.

Литература

- [1] Красовский А.А. Цифровая обработка в ZETLAB при идентификации параметров сейсмического сигнала. *Цифровая обработка сигналов*, 2010, № 3, с. 70–76.
- [2] Фукунага К. *Введение в статистическую теорию распознавания образов*. Москва, Наука, 1979, 368 с.
- [3] Козлов Э.В., Левковская Т.В. Выделение информативных признаков сигналов сейсмических сенсоров пассивной локации. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2010, № 6, с. 36–41.
- [4] K. Nepeina, Automatic post processing algorithm for passive seismic monitoring data, *Journal of Physics: Conference Series* 510 (2014) 01207. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/510/1/012007/meta> (дата обращения 08.06.2017).
- [5] Matias L., Harris D., A single station method for the detection, classification and location of fin whale using ocean-bottom seismic stations. *Journal of the Acoustic Society of America*, 2015, vol. 138, pp. 504–520.
- [6] Морозов Ю.В., Спектор А.А. Классификация объектов на основе анализа спектральных характеристик огибающих сейсмических сигналов. *Автометрия*, 2017, т. 53, № 6, с. 49–56.
- [7] Соколова Д.О., Спектор А.А. Классификация движущихся объектов по спектральным признакам сейсмических сигналов. *Автометрия*, 2012, № 5, с. 112–119.

Сведения об авторах:

Морозов Юрий Владимирович — канд. техн. наук, доцент, кафедра теоретических основ радиотехники (ТОР), НГТУ, SPIN-code: 3288-5570, Scopus Author ID: 23493164400, ORCID: 0000-0002-5004-3653

Райфельд Михаил Анатольевич — д-р техн. наук, профессор, кафедра ТОР, НГТУ; SPIN-code: 3492-4519, Scopus Author ID: 36968332600, ORCID: 0000-0001-6885-7922.

Спектор Александр Аниселевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой ТОР, НГТУ; SPIN-code: 5105-1074, Scopus Author ID: 36968332600, ORCID: 0000-0003-0701-8185

Location System Classifier Simulation

© | **Yu.V. Morozov**
M.A. Rajfeld
A.A. Spektor

yu.morozov@corp.nstu.ru
rajfeld@mail.ru
spektor@corp.nstu.ru

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

The paper states the approach to simulation of spectral classifiers of detected targets in different location systems. Spectral components of received signals envelopes amplitude spectrums are used as classification criterions in spectral classifiers. The proposed simulation program made in Matlab consists of the subsystems including preprocessing, reference spectrum base generation, taking a solution on target belonging to a class, results presentations. The preprocessing includes adaptive decorrelation, obtaining a smoothed envelope and windowing. Reference spectrums are generated for several combinations preprocessing parameters. The proposed simulation program architecture almost similar to real location systems. The program gives the opportunity to process real signals records and imitated signals based on real signals statistical properties. Signals from several sensors are distorted by noise with given properties They are divided into cycles with the certain

number of samples with respect to memory size of a real system. The program accepts initial data including sensors coordinates, preprocessing steps parameters, experiment volume and etc. The results of the program execution include plots of received signals before and after preprocessing, solution functions. The output numeric results include the relative errors numbers for different classes. There are additional modules that permit to implement a two-step classification procedure and to test target belonging to some additional class. The implemented classification algorithm is a part of the software of the seismic location system "Azimit-1" produced by "Sever" Company of Rosatom Corporation.

Keywords: classification, spectrum, simulation, taking a solution, location

References

- [1] Krasovskiy A.A. Digital processing in ZETLAB with seismic signal parameters identification. *Tsifrovaya Obrabotka Signalov* [Digital Signal Processing]. 2010, № 3, с. 70–76.
- [2] Fukunaga K. Introduction to the statistical theory of pattern recognition. Moscow, Nauka, 1979.
- [3] Kozlov E.V., Levkovskaya T.V. Extraction of informative criteria from passive location seismic sensors. *Nauchno-tekhnicheskii Vestnik Informatsionnikh Tachnologiy, Mekhaniki i Optiki* [Scientific and Engineering Bull. On Information Technologies, Mechanics and Optics], 2010, no. 6, pp. 36–41.
- [4] K. Nepeina, Automatic post processing algorithm for passive seismic monitoring data, *Journal of Physics: Conference Series 510 (2014) 01207*. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/510/1/012007/meta> (дата обращения 8.06.2017).
- [5] Matias L., Harris D., A single station method for the detection, classification and location of fin whale using ocean-bottom seismic stations. *Journal of the Acoustic Society of America*, 2015, vol. 138, pp. 504–520.
- [6] Morozov Yu. V., Spektor A.A. Classification of objects based on spectral characteristics envelopes analysis. *Avtometriya*, 2017, no. 6, pp. 49–56.
- [7] Sokolova D.O., Spektor A.A. Moving objects classification with seismic signals spectral criteria. *Avtometriya*, 2012, no. 5, pp. 112–119.

Information about authors:

Morozov Yu.V. — Candidate of Technical Science; Associate Professor; Theoretical Fundamentals of Radio Engineering (TFRE) Department; Novosibirsk State Technical University (NSTU); SPIN-code: 3288-5570, Scopus Author ID: 23493164400, ORCID: 0000-0002-5004-3653, Web of Science Researcher ID: E-4796-2014

Rajfeld M.A. — Doctor of Technical Science; Professor; TFRE Dept.; NSTU; SPIN-code: 3492-4519, Scopus Author ID 36968332600, ORCID 0000-0001-6885-7922

Spektor A.A. — Doctor of Technical Science; Professor; Head of TFRE Dept.; NSTU; SPIN-code: 5105-1074, Scopus Author ID: 36968332600, ORCID: 0000-0003-0701-8185, Web of Science Researcher ID: E-5086-2014

УДК 621.396

Исследование производительности MIMO систем пятого поколения в неселективном канале Рэлея

© | В.П. Петров
И.Ю. Якушев

vick.petrov2011@yandex.ru
yakushevigor@mail.ru

СибГУТИ, Новосибирск, Россия

Рассмотрены модели MIMO с различными вариантами технологий для оптимизации производительности систем. Основное внимание уделено сравнительно новым антенным технологиям, которые рекомендуются для сетей пятого поколения. В основу моделирования положен неселективный канал Рэлея с комбинаторной обработкой узкополосных сигналов в приемнике. Моделирование систем производится как в MATLAB на основе M-функций, так и в Simulink на основе блок-схем. На основе исследований и решений получены оценки емкости и вероятности ошибок сетей в зависимости от числа антенн и вида модуляции.

Ключевые слова: MIMO, MRC, TAS, производительность, емкость, вероятность ошибки

Введение. Известны основные принципы мобильных сетей пятого поколения [1–3], внедрение которых в мировую практику планируется в 2020 году. В связи с этим возникает интерес к методам реализации основных положений грядущего поколения. Среди основных положений особое место занимает производительность сетей, поскольку стремительно растет как число пользователей, так и удельный объем информации, потребляемый пользователем. К настоящему времени возникли новые направления, которые потенциально при определенных условиях могут обеспечить существенный рост производительности. К ним следует отнести технологии в рамках системы MIMO (*Multiple-Input-Multiple-Output*). Эта система со множеством антенн на передающей и на приемной сторонах хорошо зарекомендовала себя в борьбе с деградацией характеристик сетей в городских условиях, вызванных многолучевостью. В рамках системы были разработаны технологии, позволяющие улучшать характеристики связи при определенных параметрах канала. К ним относятся:

- представление MIMO в виде параллельных каналов SISO (*Simple-input-Multiple-output*) — [4–6];
- пространственное мультиплексирование (*Spatial Multiplexing — SMX*) — [7, 8];
- пространственно-временное кодирование (*Space Time Coding — STC*) — [9, 10];
- пространственная модуляция сигналов (*Spatial Modulation — SM*) — [2, 11].

Технология выбора передающей антенны в последовательности излучателей сигналов (*Transmit Antenna Selection — TAS*) — [11, 12].

Наибольший интерес представляют новые, наименее изученные направления 4 и 5 в сравнении с технологиями 1–3 при исследовании производительности и помехоустойчивости сетей MIMO в городских условиях. Сети и каналы с плотной городской застройкой, включая каналы внутри помещений, относятся к плоским каналам при передаче сигналов с узкополосной модуляцией, к которым относятся M-арные

сигналы. Однако эти же каналы при передаче широкополосных сигналов OFDM, WCDMA относятся к частотно-селективным. При анализе сетей MIMO необходимо учитывать условия распространения сигналов и применимости сетей к этим условиям. Ниже будут рассмотрены системы MIMO применительно к частотно-независимым каналам. Задачей анализа является поиск оптимальных условий реализации MIMO, обеспечивающих наибольшую емкость системы и требуемый уровень помехоустойчивости.

Разложение системы MIMO на параллельные каналы. Канальная модель системы MIMO в условиях частотно-независимого многолучевого канала в матричной форме описывается уравнением:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (1)$$

где \mathbf{y} — матрица-столбец сигналов приемника, описывающая ансамбль сигналов на элементах приемной решетки; \mathbf{x} — матрица-столбец сигналов передатчика, описывающая ансамбль сигналов, излученных каждым из элементов передающей решетки; \mathbf{n} — матрица-столбец аддитивных шумов приемника и помех, создаваемых рассеивающей средой в пространстве между передатчиком и приемником; \mathbf{H} — прямоугольная комплексная матрица канала размерности $M \times N$. Компонент h_{ij} этой матрицы есть комплексный коэффициент передачи канала между j -й передающей антенной и i -й приемной антенной. При этом M — количество антенн в приемной решетке, N — количество антенн в передающей решетке.

На рис. 1, а представлена схема лучей, связывающая передающую и приемную антенные решетки.

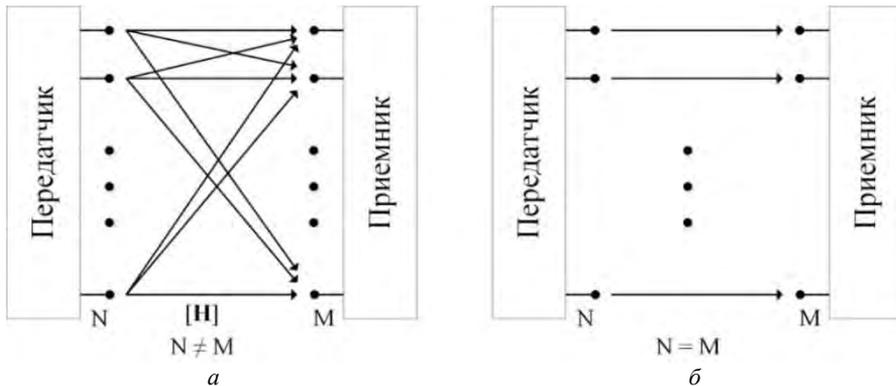


Рис. 1. Система MIMO

Преобразование сложной системы потоков в систему параллельных потоков от передатчика к приемнику (рис. 1б) осуществляется известным из теории матриц [13, 14] *сингулярным* разложением матрицы \mathbf{H} в виде

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^H. \quad (2)$$

В этом уравнении \mathbf{U} и \mathbf{V} — унитарные матрицы размерами $M \times M$ и $N \times N$ соответственно, $\mathbf{U}^H \mathbf{U} = \mathbf{1}_M$ и $\mathbf{V}^H \mathbf{V} = \mathbf{1}_N$, и $\mathbf{\Sigma}$ — есть диагональная матрица сингулярных

значений d_j матрицы \mathbf{H} размером $M \times N$. Известно, что сингулярные значения d_j и собственные значения λ_j связаны соотношением:

$$d_j = \sqrt{\lambda_j}.$$

Количество антенных элементов на передатчике и приемнике, как правило, различно ($M \neq N$). Пример — базовая и мобильная станции. Излучение N антенн распределяется на M приемных антенн. Чтобы представить реальный канал в виде виртуальных параллельных каналов SISO, необходимо допустить равенство антенн передатчика и приемника. Этим равенством является минимальное число M или N , которое в математических моделях является рангом канальной матрицы. В результате преобразований показано, что каждый элемент вектора \mathbf{y} может быть представлен следующим образом:

$$y_i = \sqrt{\lambda} x_i + [\mathbf{U}^H \mathbf{n}]_i. \quad (3)$$

Это уравнение характерно тем, что имеет только соответствующие i -е лучи от передатчика к приемнику. Отсутствуют канальные лучи h_{ij} . То есть MIMO каналы преобразованы в виртуальные параллельные SISO каналы, как отражено на рис. 1, б.

Когда информация о канале отсутствует на передатчике, мощность передатчика обычно равномерно распределяется по излучающим элементам антенной решетки. Однако, когда информация известна передатчику, мощность передатчика может быть оптимально распределена по излучающим некоррелированным элементам с целью максимально увеличить спектральную эффективность. Этот способ называется *алгоритмом «заполнения водой» (water-filling algorithm)* [4, 5, 6]. Этот алгоритм позволяет сконцентрировать излучаемую мощность только в «хороших» пространственных каналах и не тратить энергетические ресурсы передатчика на попытки передать информацию через «плохие» пространственные каналы. «Хорошие» каналы — это каналы, имеющие высокое ОСШ, «плохие» — наоборот. В результате применения этого алгоритма оптимальная спектральная эффективность определяется формулой [11]:

$$\eta = \sum_{i=1}^N \log_2 \left(1 + \frac{P_i}{\sigma^2} \lambda_i \right) = \sum_{i=1}^N \log_2 \left(\left(\bar{\gamma} + \sum_{l=1}^N \frac{1}{\lambda_l} \right) \frac{\lambda_i}{N} \right).$$

Разложение на параллельные виртуальные потоки — это одна из стратегий увеличения емкости системы MIMO. Существенное влияние, ограничивающие ее возможности, оказывает корреляция сигналов на передающей и приемной антенных решетках.

Ковариационные матрицы ансамблей сигналов на элементах приемной и передающей антенных решеток \mathbf{R}_y и \mathbf{R}_{xH} соответственно, запишем в виде

$$\mathbf{R}_y = E \{ \mathbf{y} \mathbf{y}^H \} = \mathbf{H} \mathbf{R}_x \mathbf{H}^H + \sigma_n^2 \mathbf{1}_n. \quad (4)$$

В этом уравнении надстрочный индекс H означает эрмитово сопряжение, символ E означает математическое ожидание (среднее значение) случайной величины, расположенной в фигурных скобках.

Разложение MIMO на параллельные виртуальные каналы SISO позволяет увеличить емкость системы. Нормализованная на один герц частоты емкость системы

ММО, т. е. спектральная эффективность η некоррелированных передающих сигналов определяется уравнением [3, 4, 10, 12]:

$$\eta = \log_2 \left| \mathbf{I}_N + \frac{1}{\sigma^2} \mathbf{H} \mathbf{R}_x \mathbf{H}^H \right| = \log_2 \left| \mathbf{I}_M + \frac{1}{\sigma^2} \mathbf{R}_x \mathbf{H}^H \mathbf{H} \right|. \quad (5)$$

Это исходное уравнение, на основании которого определяются формулы и алгоритмы, оптимизирующие спектральную эффективность системы при различных условиях.

Этот вывод следует рассматривать лишь как направление для оценки емкости системы ММО. Однако при оценке возникают несколько условий, которые дают различные результаты. К этим условиям относятся: 1) известны ли параметры канала передатчику или нет, полагая, что они всегда известны приемнику; 2) соотношение количества антенн передатчика и приемника; 3) корреляционные свойства канала, передатчика и приемника. К ним следует добавить пространственно-временные коды передатчика и способы обработки сигналов в приемнике. Первые три условия приняты во внимание при дальнейшем исследовании. Обработка сигналов в приемнике принята наилучшая — *MRC (Maximal Ratio Combining)*.

При неравном числе антенн на передатчике и приемнике вектор \mathbf{r} , определяющий распределение амплитуд сигналов в приемной решетке на основании уравнения (1), определяется соотношениями

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}^H \mathbf{y} = \mathbf{H}^H \mathbf{H} \mathbf{x} + \bar{\mathbf{n}}. \quad (6)$$

В этом уравнении вектор \mathbf{r} имеет порядок $N \times 1$. Обратим внимание на матрицу $\mathbf{H}^H \mathbf{H}$. Эта матрица так же, как и матрица $\mathbf{H} \mathbf{H}^H$, используется при моделировании условий ММО. Так как матрица \mathbf{H} имеет порядок $M \times N$, то матрица $\mathbf{H} \mathbf{H}^H$ имеет порядок $M \times M$, а матрица $\mathbf{H}^H \mathbf{H}$ — порядок $N \times N$. Порядок матрицы определяет количество собственных значений матрицы, причем количество ненулевых значений (ранг матрицы) определяется свойствами канала и может быть равно единице, если сигналы полностью коррелированы.

Матрицы $\mathbf{H}^H \mathbf{H}$ и $\mathbf{H} \mathbf{H}^H$ относятся к типу матриц Уишарта (Wishart), характеризующих многомерные хи-квадрат распределения [13, 14]. Эти матрицы имеют различные ковариационные матрицы, элементы которых определяются расстояниями между соседними излучающими элементами передающей и приемной антенных решеток. Отличие этих матриц друг от друга позволяет оценивать емкость системы при различных значениях числа антенн на передатчике и приемнике [12].

На основании уравнений (5) и оговоренных свойств, их сопровождающих, получены оценки емкости канала ММО для случая независимости лучей на элементах приемной решетки [12].

Средняя емкость определяется уравнением

$$E(\eta) = \sum_{i=1}^n E \left[\log_2 \left(1 + \frac{\bar{\gamma}}{N} \lambda_i \right) \right] = \sum_{i=1}^n \int_0^{\infty} \log_2 \left(1 + \frac{\bar{\gamma}}{N} \lambda_i \right) f_{\lambda_i}(\lambda_i) d\lambda_i.$$

Другой важной характеристикой канала является гарантированная емкость (*outage capacity*). Эта характеристика определяет вероятность, что емкость ниже заданного граничного уровня:

$$P(\eta < \eta_{out}) = P\left(\log_2 \prod_{i=1}^n \left(1 + \frac{\bar{\gamma}}{N} \lambda_i < \eta_{out}\right)\right) = P\left(\prod_{i=1}^n \left(1 + \frac{\bar{\gamma}}{N} \lambda_i\right) < 2^{\eta_{out}}\right).$$

При планировании сети и определении границ соты удобно пользоваться именно этой характеристикой.

Антенные технологии. Антенные технологии в многоантенных MIMO системах можно разделить на два вида (рис. 2): традиционные методы, включающие пространственное мультиплексирование (рис. 2, а) и пространственно-временное кодирование (рис. 2, б), и новые методы, включающие пространственную модуляцию (рис. 2, в) и селекцию передающих антенн (рис. 2, г). Рисунок дает упрощенное представление технологий с использованием двух антенн и двух сигнальных символов.

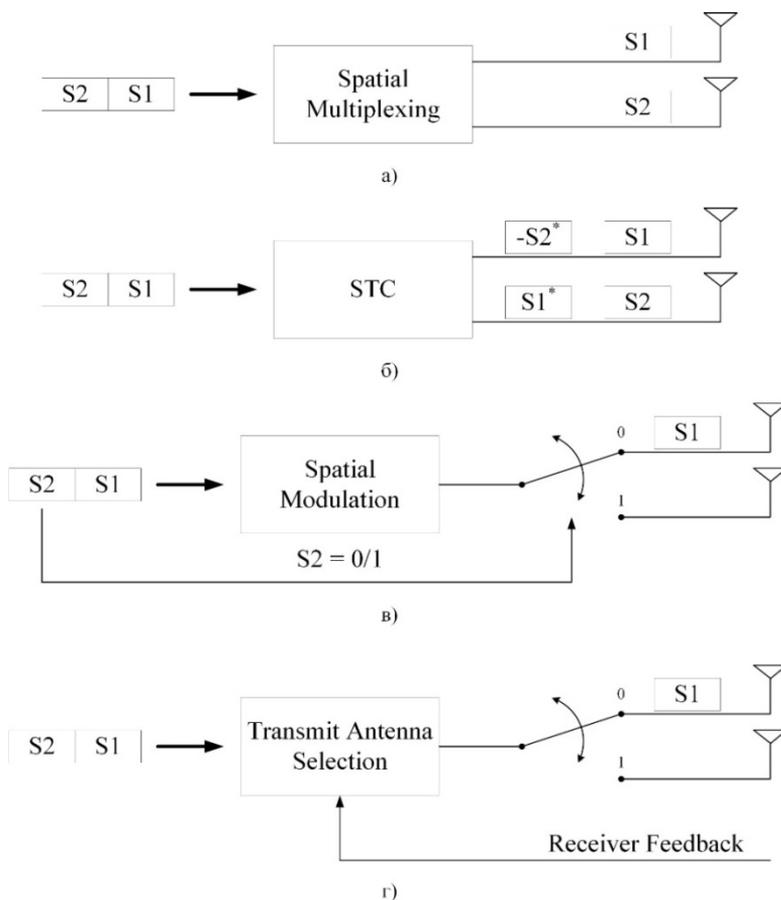


Рис. 2. Методы антенных технологий

В первом случае (пространственное мультиплексирование, например, BLAST) два символа одновременно излучаются в одном временном слоте. При этом спектральная скорость в канале определяется уравнением $R_{BLAST} = N_t \log_2 M$ бpcu (bits

per channel use); M — порядок модуляции M -PSK/ M -QAM; N_t — число излучателей в антенной решетке передатчика.

В случае пространственно-временного кодирования, например схема Аламоути, два ортогональных символа одновременно излучаются в два временных слота. При этом $R_{AI} = \log_2 M$ бpcu.

Новые методы требуют более детальных пояснений. Применительно к двум антеннам пространственная модуляция работает просто: бит 1 излучает активная антенна, бит 0 другая антенна не излучает. При передаче последовательного потока из единиц и нулей антенны переключаются, как клавиши на пианино. При двух антеннах выигрыш мал, не более 3 дБ, но чем больше число передающих антенн, тем больше выигрыш в производительности и в помехоустойчивости. Предположим, что из n передающих антенн в решетке m различных антенн являются активными, причем каждая активная антенна имеет свой кодовый набор нулей и единиц. Число комбинаций из n по m определяется соотношением

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}.$$

Например, $C_4^2 = 6$; $C_6^3 = 20$; $C_8^4 = 70$. Число комбинаций стремительно растет с ростом числа передающих антенн, часть из которых являются активными. Этот фактор, как следует из теории пространственной модуляции [11, 12], приводит к выигрышу основных характеристик системы ММО, в том числе *экономической эффективности* системы. Этот важный параметр имеет тенденцию уменьшаться с ростом *спектральной эффективности* при традиционных технологиях ММО. Пространственная модуляция особенно эффективна в миллиметровом диапазоне, как планируют в 5G, при антеннах из многих десятков излучателей, поддерживая 4–5 активных.

Почему эта технология называется *пространственной модуляцией*? Это название она получила, дополняя плоскую звездную диаграмму комплексного сигнала пространственной координатой активных излучателей, что создает трехмерную пространственную диаграмму.

Метод *селекции передающих антенн* (TAS — *Transmit Antenna Selection*) заключается в том, что антенная система представляется в виде выбранной последовательности одиночных излучателей информационных сигналов. Выбор излучателя осуществляется на основе параметров канала, например, «хорошего канала», который определяется приемной антенной решеткой и по обратному каналу передается передатчику для выбора активной антенны. Этот метод напоминает схему SIMO (одна передающая антенна и много приемных) с MRC селективной обработкой в приемнике, но с существенным дополнением — обработка сигнала проводится не по одной искаженной копии, а по нескольким, что уменьшает вероятность ошибки.

Выбор технологии из перечисленных выше определяется требованиями и условиями связи.

Производительность системы. Производительность ММО системы оценивается в основном двумя характеристиками — емкостью системы и вероятностью ошибки.

Для исследования 5G ММО систем в MATLAB были написаны М-функции (рис. 3), а в Simulink собраны блок-схемы (рис. 4) для получения зависимостей производительности от различных значений отношения сигнал/шум.

```

capacity_MIMO.m  x  +
1  %% Calculating MIMO Capacity
2  function capacity = capacity_MIMO(Nr,Nt)
3
4  EbNo = 0:20; % Range of SNR for simulation in dB
5  SNR = 10.^(EbNo/10);
6  N = 1000; % Number of iterations
7  capacity = zeros(1,length(SNR)); % Capacity of a MIMO system
8
9
10 for i = 1:N
11     H = rayleighchannel(Nr,Nt); %Rayleigh Fading
12     for c = 1:length(SNR)
13         capacity(c) = capacity(c) + log2(abs(det(eye(Nr)+SNR(c)*H*H'/Nt)));
14     end
15 end
16 capacity = capacity/N;
end
    
```

Рис. 3. М-функция в MATLAB для вычисления емкости системы MIMO

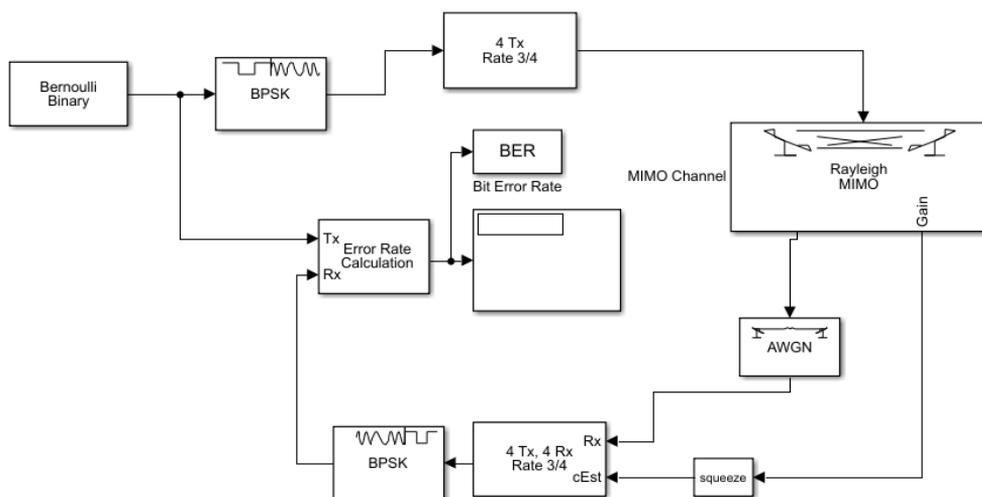


Рис. 4. Блок-схема в Simulink для вычисления вероятности ошибки

В основу моделирования положен неселективный канал Рэля с комбинаторной обработкой узкополосных сигналов в приемнике.

На рис. 5 отображена емкость системы MIMO в зависимости от используемого числа приемных и передающих антенн. Затем для метода пространственной модуляции (SM MIMO) были получены графики зависимости вероятности ошибок для различных видов модуляций (рис. 6, а) и для различных комбинаций передающих и приемных антенн (рис. 6, б).

Для остальных методов обработки сигнала на передаче поведение вышеприведенных зависимостей будет выглядеть подобным образом.

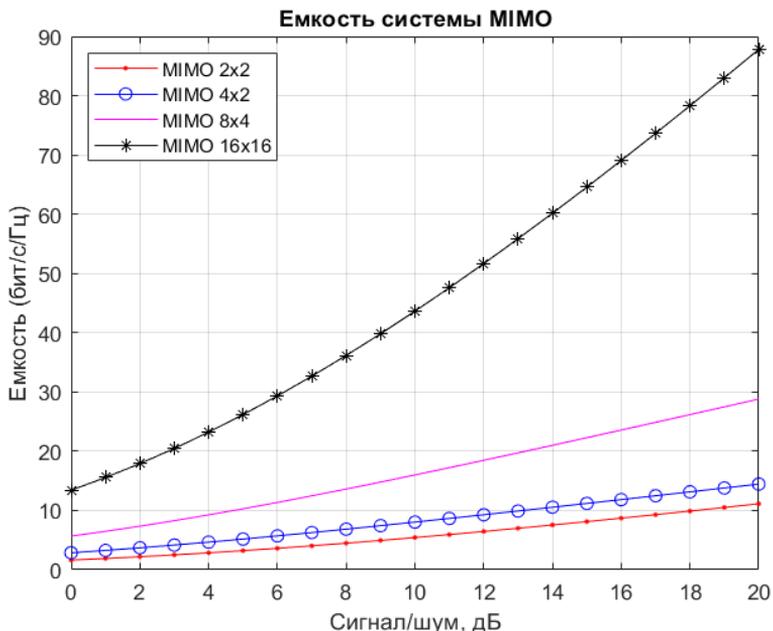


Рис. 5. Емкость системы MIMO

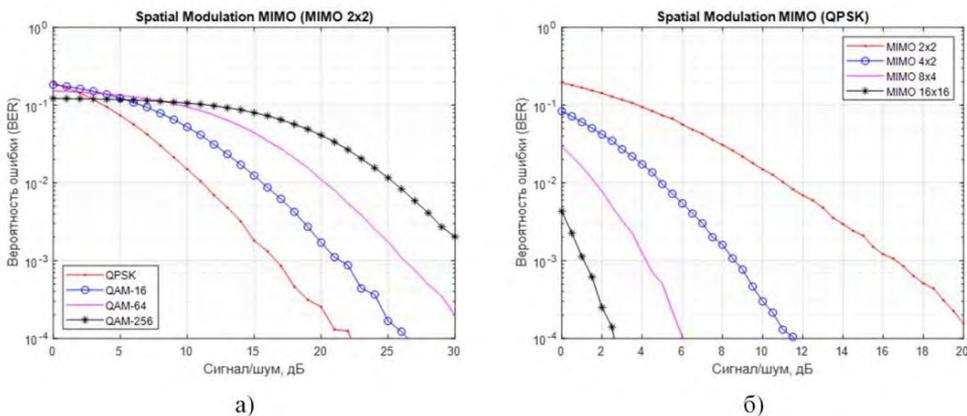


Рис. 6. Вероятность ошибки для метода пространственной модуляции

Сравнение методов обработки сигнала на передаче приведено на рис. 7, что позволяет выбрать наилучший из методов, достигая наименьшую вероятность ошибки.

Сравнивая полученные результаты, приходим к следующим выводам.

1. Емкость MIMO системы возрастает с увеличением числа передающих и приемных антенн на стороне базовых станций (на практике реально реализовать на данный момент MIMO 8x8 и MIMO 16x16). На стороне же мобильных станций из-за небольших размеров устройств достигается только MIMO 4x2, а в большинстве случаев используется SIMO 1x2 и MIMO 2x2.

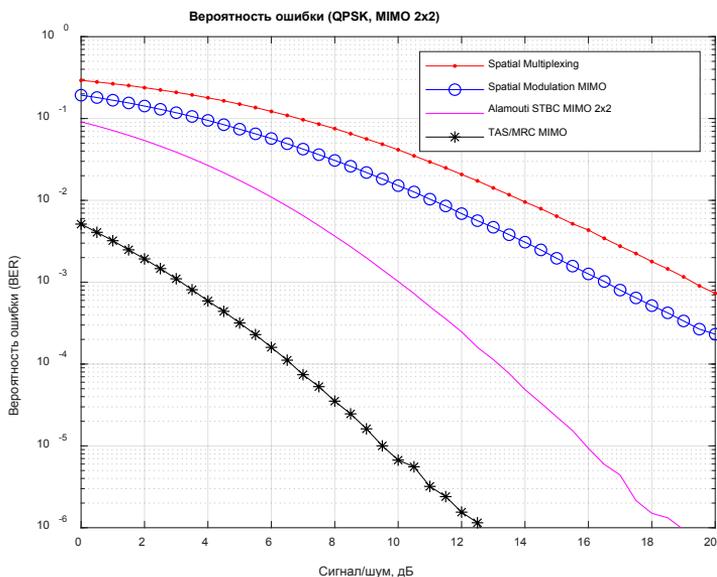


Рис. 7. Вероятность ошибки для различных систем MIMO

2. Вероятность ошибки снижается с увеличением числа антенн и возрастает с увеличением позиционности сигнала при постоянном отношении сигнал/шум.

3. Вероятность ошибки будет наименьшей при совместном использовании методов обработки сигналов TAS на передачу и MRC на прием при постоянном отношении сигнал/шум по сравнению с остальными методами обработки сигнала. Данный вывод подтверждает сказанное ранее: определение «хороших» каналов для передачи в системе MIMO и обработка нескольких копий сигнала на приеме снижают вероятность ошибки.

Заключение. На рубеже перехода от четвертого к пятому поколению мобильной связи рассмотрены возможности новых антенных технологий в сопоставлении с действующими и подтверждена их эффективность. В результате проведенного исследования различных технологий была оценена производительность MIMO систем с не-селективным каналом Рэля и выбраны оптимальные параметры и методы для достижения наибольшей производительности MIMO системы.

Литература

- [1] Rodriguez J. *Fundamentals of 5G Mobile Networks*. John Wiley & Sons, 2015.
- [2] Kanatas A.G., Nikita K.S., Mathiopoulos P. *New Directions in Wireless Communications Systems. From Mobile to 5G*. CRC Press, 2018.
- [3] Dahlman E., Parkvall S., Skold J. *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology*. Academic Press, 2018.
- [4] Cho Y., Kim J., Yang W., Kang C. *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB*. John Wiley & Sons, 2010.
- [5] Vitetta G.M. *Wireless Communications Algorithmic Techniques*. John Wiley & Sons, 2013.
- [6] Бакулин М.Г., Варукина Л.А., Крейнделин В.Б. *Технология MIMO. Принципы и алгоритмы*. Москва, Горячая линия – Телеком, 2014.

- [7] Rao K.D. *Channel Coding Techniques for Wireless Communications*. Springer, 2015.
- [8] Kumbhani B., Kshetrimayum R.S. *MIMO Wireless Communications over Generalized Fading Channels*. CRC Press, 2017.
- [9] Elnashar A. *Simplified Robust Adaptive Detection and Beamforming for Wireless Communications*. Wiley & Sons, 2018.
- [10] Mohammadi A., Ghannouchi M. *RF Transceiver Design for MIMO Wireless Communications*. John Wiley & Sons, 2012.
- [11] Mesleh R., Alhassi A. *Space Modulation Techniques*. John Wiley & Sons, 2018.
- [12] Safak M. *Digital Communications*. John Wiley & Sons, 2017.
- [13] Гантмахер Ф.П. *Теория матриц*. Москва, Наука, 1967.
- [14] Воеводин В.В., Кузнецов Ю.А. *Матрицы и вычисления*. Москва, Наука, 1984.

Сведения об авторах:

Петров Виктор Петрович — д-р техн. наук, профессор, кафедра систем мобильной связи, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики; Scopus Author ID 57194542754

Якушев Игорь Юрьевич — преподаватель, кафедра систем мобильной связи, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики; Scopus Author ID 52164972400

Fifth Generation MIMO Systems Performance Research in Non-selective Rayleigh Channel

© | V.P. Petrov
I.Yu. Yakushev

vick.petrov2011@yandex.ru
yakushevigor@mail.ru

SibsUTIS, Novosibirsk, Russia

In the paper fifth generation MIMO systems with various antenna technology for optimizing systems performance is researched. The focus is on new technologies recommended for fifth generation networks. The simulation is based on the non-selective Rayleigh channel with combinatorial processing of narrow-band signals in the receiver. The systems are simulated both in Matlab (M-functions) and in Simulink (block diagrams). Based on researches and decisions performance estimates (capacity and bit error rate) of networks are obtained depending on the number of antennas and modulations.

Keywords: BER, capacity, MIMO, MRC, performance, TAS.

References

- [1] Rodriguez J. *Fundamentals of 5G Mobile Networks*. John Wiley & Sons, 2015.
- [2] Kanatas A.G., Nikita K.S., Mathiopoulos P. *New Directions in Wireless Communications Systems. From Mobile to 5G*. CRC Press, 2018.
- [3] Dahlman E., Parkvall S., Skold J. *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology*. Academic Press, 2018.
- [4] Cho Y., Kim J., Yang W., Kang C. *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB*. John Wiley & Sons, 2010.
- [5] Vitetta G.M. *Wireless Communications Algorithmic Techniques*. John Wiley & Sons, 2013.
- [6] Bakulin M.G., Varukina L.A., Kreyndelin V.B. *MIMO Technology: Principles and Algorithms*. Moscow, Publishing House “Hot line – Telecom”, 2014 (in Russian).

- [7] Rao K.D. *Channel Coding Techniques for Wireless Communications*. Springer, 2015.
- [8] Kumbhani B., Kshetrimayum R.S. *MIMO Wireless Communications over Generalized Fading Channels*. CRC Press, 2017.
- [9] Elnashar A. *Simplified Robust Adaptive Detection and Beamforming for Wireless Communications*. Wiley & Sons, 2018.
- [10] Mohammadi A., Ghannouchi M. *RF Transceiver Design for MIMO Wireless Communications*. John Wiley & Sons, 2012.
- [11] Mesleh R., Alhasssi A. *Space Modulation Technique*. John Wiley & Sons, 2018.
- [12] Safak M. *Digital Communications*. John Wiley & Sons, 2017.
- [13] Gantmacher F.R. *The Theory of Matrices*. Moscow, Nauka, 1967 (in Russian).
- [14] Voevodin V.V., Kuznetsov Yu.A. *Matrices and calculations*. Moscow, Nauka, 1984 (in Russian).

Information about authors:

Petrov V.P. — degree of Senior Doctorate, professor, Mobile Communication Systems Department, Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences; Scopus Author ID: 57194542754

Yakushev I.Yu. — Master's degree, lecturer, Mobile Communication Systems Department, Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences; Scopus Author ID: 52164972400

УДК 658.011.56

Исследование с помощью MATLAB компенсации систематической ошибки с помощью фильтра Калмана в информационно-измерительных системах

© | В.М. Понятский

granat@home.tula.net

Тульский государственный университет, Тула, 300012, Россия

Рассматривается возможность оценивания состояния процесса на основе данных измерений нескольких датчиков при наличии систематической ошибки измерений, не поддающейся предварительной оценке и учету. Проводится анализ существующих подходов к комплексированию информации, использующих фильтрацию Калмана. Предложено проводить оценивание состояния процесса с отдельной коррекцией по показаниям отдельных датчиков. Компенсация систематической ошибки реализуется в процедуре предсказания, используя измерения с систематической ошибкой в качестве внешнего управляющего сигнала.

Ключевые слова: *фильтр Калмана, комплексирование, систематическая ошибка измерений, оценивание, вектор состояния, коррекция, вектор управления, датчик, система*

Введение. В современных информационно-измерительных системах, использующих несколько датчиков для получения информации о параметрах объекта или процесса, центральным является вопрос выбора способа объединения полученных данных. Традиционно применяемым алгоритмом оценивания параметров процесса на основе зашумленных данных измерений является фильтр Калмана, позволяющий получить несмещенную оценку с минимальной дисперсией при условии априорного знания характеристик шумов, присущих измерителю и самому процессу. Однако в ряде случаев в показаниях датчиков могут присутствовать помимо шумов систематические ошибки измерений, величина которых зачастую не может быть оценена и учтена заранее. В [1, 2] предложено в этом случае использовать измерения с систематической ошибкой в процедуре предсказания фильтра Калмана в качестве внешнего воздействия.

Известно несколько подходов к объединению показаний с различных измерителей. Согласно одному из них [3], для каждого из измерителей используется отдельный фильтр, вырабатывающий свои оценки вектора состояния и ковариационной матрицы. Получается итоговая оценка, оптимальная в смысле минимизации ее дисперсии, с учетом коррелированности оценок каждого фильтра. Этот подход получил устоявшееся название «объединение векторов состояния» (state vector fusion).

Другой подход предполагает использование одного фильтра Калмана независимо от числа измерителей и представляет собой «объединение измерений» (measurement fusion). При этом объединение показаний выполняется до начала процесса фильтрации и может сопровождаться комплексированием по критерию минимума среднеквадратической ошибки, как в [4].

В [5] предлагается выполнять оценки состояния процесса отдельно по показаниям отдельных датчиков с формированием множества векторов состояния, а предсказание выполнять по объединенной оценке вектора.

Последний подход позволяет проводить введение измерения с систематической ошибкой как внешнего управляющего воздействия и может быть использован при компенсации систематической ошибки в показаниях.

В настоящей работе рассматривается возможность компенсации систематической ошибки при комплексировании измерений, базирующейся на отдельной коррекции вектора состояния процесса по показаниям отдельных измерителей и на использовании измерений с систематической ошибкой как внешнего управляющего воздействия.

Учет систематической ошибки при объединении информации с датчиков. Дискретный алгоритм оценивания состояния объекта управления в рамках методов фильтрации Калмана имеет вид [6]:

$$\mathbf{x}_o(n | n - 1) = \mathbf{\Phi}(n)\mathbf{x}_o(n - 1) + \mathbf{B}(n)\mathbf{U}(n);$$

$$\mathbf{x}_0(n) = \sum_{i=1}^N \mathbf{C}_i(n)\mathbf{x}_{i0}(n);$$

$$\mathbf{x}_{i0}(n) = \mathbf{x}_0(n | n - 1) + \mathbf{K}_i(n)\{\mathbf{z}_i(n) - \mathbf{H}_i(n)\mathbf{x}_0(n | n - 1)\};$$

$$\mathbf{K}_i(n) = S_i\mathbf{P}(n | n - 1)\mathbf{H}_i^T\{\mathbf{H}_i(n)\mathbf{P}(n | n - 1)\mathbf{H}_i^T(n) + \mathbf{V}_{vi}(n)\}^{-1};$$

$$\mathbf{P}(n | n - 1) = \mathbf{G}(n)\mathbf{V}_w(n)\mathbf{G}^T(n) + \mathbf{\Phi}(n)\mathbf{P}(n - 1)\mathbf{\Phi}^T(n);$$

$$\mathbf{P}(n) = \mathbf{P}(n | n - 1) - \sum_{i=1}^N \mathbf{K}_i(n)\mathbf{H}_i(n)\mathbf{P}(n | n - 1);$$

$$\mathbf{x}_{k0}(n) = \sum (\mathbf{x}_0(n), \mathbf{U}(n)),$$

где $\mathbf{z}_i(n)$ — вектор наблюдений; $\mathbf{z}_0(n) = \mathbf{H}_i(n)\mathbf{x}_0(n | n - 1)$ — вектор оценок наблюдений; $\mathbf{x}_0(n)$ — оценка вектора состояния наблюдаемого объекта или процесса; $\mathbf{x}_{k0}(n)$ — оценка скорректированного вектора состояния наблюдаемого объекта или процесса; $\mathbf{x}_0(n | n - 1)$ — оценка вектора прогнозирования состояния наблюдаемого объекта или процесса; $\mathbf{\Phi}(n)$ — матрица упреждения; $\mathbf{H}_i(n)$ — матрица наблюдения; $\mathbf{K}_i(n)$ — матрица коэффициентов; $\mathbf{P}(n + 1 | n)$ — дисперсионная матрица предсказания вектора состояния наблюдаемого объекта или процесса; $\mathbf{P}(n)$ — дисперсионная матрица оценки вектора состояния наблюдаемого объекта или процесса; $\mathbf{V}_{vi}(n)$ — матрица интенсивности шумов; $\mathbf{V}_w(n)$ — матрица интенсивности полезного сигнала; $\mathbf{U}(n)$ — вектор управления; $\mathbf{B}(n)$ — матрица коэффициентов управления; $\mathbf{C}_i(n)$ — вектор весовых коэффициентов; $\sum (\mathbf{x}_0(n), \mathbf{U}(n))$ — процедура коррекции оценок фильтра Калмана, $S_i(n)$ — признак типа измерителя или отсутствия измерений $S_i(n) = 0$; N — количество измерителей.

На рис. 1 показана схема комплексирования сигналов N измерителей, включающая процедуры предсказания, объединения и коррекции, позволяющие получить на выходе оценку состояния процесса при наличии систематической ошибки в измерениях.

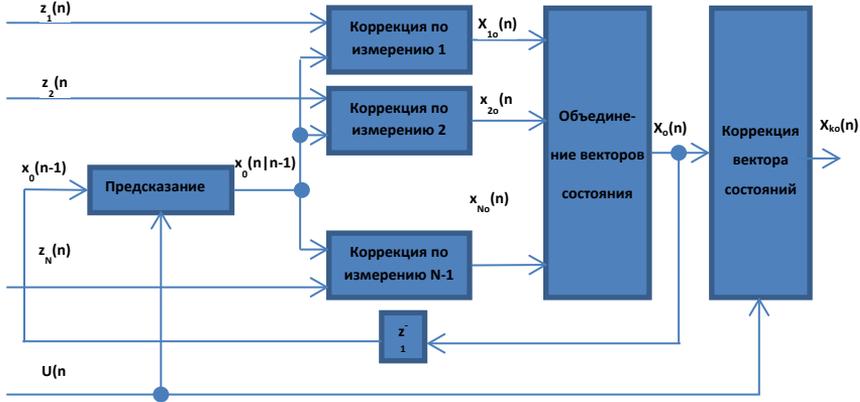


Рис. 1. Схема фильтра Калмана с компенсацией систематической ошибки измерений

Непрерывный алгоритм фильтрации Калмана имеет вид [7]:

$$\mathbf{x}_o = \sum_{i=1}^N \mathbf{C}_i(t) \mathbf{x}_{i0}(t);$$

$$\frac{d\mathbf{x}_{0i}}{dt} = \mathbf{\Phi}(t)\mathbf{x}_0(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{U}(t) + \mathbf{K}_i(t)(\mathbf{z}_i(t) - \mathbf{H}(t)\mathbf{x}_0(t));$$

$$\frac{d\mathbf{P}(t)}{dt} = \mathbf{V}_w(t) + \mathbf{\Phi}(t)\mathbf{P}(t) + \mathbf{P}(t)\mathbf{\Phi}^T(t) - \sum_{i=1}^N \mathbf{P}(t)\mathbf{H}^T(t)\mathbf{V}_{vi}^{-1}(t)\mathbf{H}(t)\mathbf{P}(t); \quad (1)$$

$$\mathbf{x}_{k0}(t) = \Xi(\mathbf{x}_0(t), \mathbf{U}(t)),$$

где $\mathbf{z}_i(t)$ — вектор измерений i -го датчика; $\mathbf{z}_0(t) = \mathbf{H}(t)\mathbf{x}_0(t)$ — вектор оценок наблюдений; $\mathbf{x}_{k0}(t)$ — оценка скорректированного вектора состояния наблюдаемого процесса; $\mathbf{x}_0(t)$ — оценка вектора состояния наблюдаемого процесса; $\mathbf{\Phi}(t)$ — матрица упреждения; $\mathbf{P}(t)$ — корреляционная матрица ошибок фильтрации; $\mathbf{H}(t)$ — матрица наблюдения; $\mathbf{K}_i(t) = \mathbf{S}_i(t)\mathbf{P}(t)\mathbf{H}^T(t)\mathbf{V}_{vi}^{-1}(t)$ — вектор коэффициентов усиления; $\mathbf{V}_{vi}(t)$ — матрица интенсивности шумов; $\mathbf{V}_w(t)$ — матрица интенсивности полезного сигнала; $\mathbf{U}(t)$ — вектор управления; $\mathbf{B}(t)$ — матрица коэффициентов управления; $\mathbf{C}_i(t)$ — матрица весовых коэффициентов; $\Xi(\mathbf{x}_0(t), \mathbf{U}(t))$ — процедура коррекции оценки фильтра Калмана; $\mathbf{S}_i(t)$ — признак либо типа и качества измерений, либо отсутствия измерений $\mathbf{S}_i(t) = 0$; N — количество измерителей.

Результаты исследования. Рассмотрим систему, в которой совокупность датчиков, состоящая из датчиков угловых скоростей и акселерометров, служит для определения ориентации твердого тела. Первые выдают достаточно точные показания на коротких промежутках времени, но обладают долгосрочной нестабильностью, выражающейся в появлении низкочастотного дрейфа, вызывающего со временем накопление ошибки. Акселерометры, напротив, выдают несмещенные, но сильно зашумленные в высокочастотной области показания. Выработка оценки состояния объекта на выходе фильтра возможна в рамках двух различных подходов [7]. Первый подход заключается в организации двухканального фильтра, предполагающего коррекцию оценки параметров процесса с помощью взвешенной суммы двух инноваций, причем каждая из них соответствует одному из имеющихся типов датчиков:

$$\frac{dx_0}{dt} = \Phi(t)x_0(t) + \sum_{i=1}^2 K_i(t)(z_i(t) - H_i(t)x_0(t)); \quad (2)$$

$$\frac{dP(t)}{dt} = V_w(t) + \Phi(t)P(t) + P(t)\Phi^T(t) - \sum_{i=1}^2 P(t)H_i^T(t)V_{vi}^{-1}(t)H_i(t)P(t).$$

Второй подход базируется на использовании данных датчика с систематической ошибкой при предсказании, т. е. в качестве вектора внешнего воздействия (управления) $U(t)$, влияющего на оценку состояния процесса, и при последующей корректировке ее с помощью измерений, полученных с другого датчика (одноканальный фильтр):

$$\frac{dx_0}{dt} = \Phi(t)x_0(t) + B(t)z_2(t) + K_1(t)(z_1(t) - H_1(t)x_0(t)); \quad (3)$$

Сравнительный анализ описанных подходов проводится на примере оценки регулярного гармонического воздействия системой, содержащей два измерителя, позволяющих получать показания по одной угловой координате $z_1(t) = \theta^u$, $z_2(t) = \dot{\theta}^u$, но может быть распространен на случай трехосевых измерений без потери общности. Реализации фильтров на основе уравнений (2) и (3) представлены на рис. 2 и 3 соответственно. Оценка вектора состояния $x = [\theta \quad \dot{\theta}]^T$ проводится с помощью фильтрующих звеньев второго порядка. Для двухканального фильтра соответствующие матрицы выглядят следующим образом (рис. 2):

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad H_1 = [1 \quad 0]; \quad H_2 = [0 \quad 1]; \quad K_1 = \begin{bmatrix} k_1^1 \\ k_2^1 \end{bmatrix}; \quad K_2 = \begin{bmatrix} k_1^2 \\ k_2^2 \end{bmatrix}.$$

Для одноканального фильтра при учете измерений угловой скорости в виде управляющего воздействия (рис. 3):

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad H_1 = [1 \quad 0]; \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad K_1 = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix}.$$

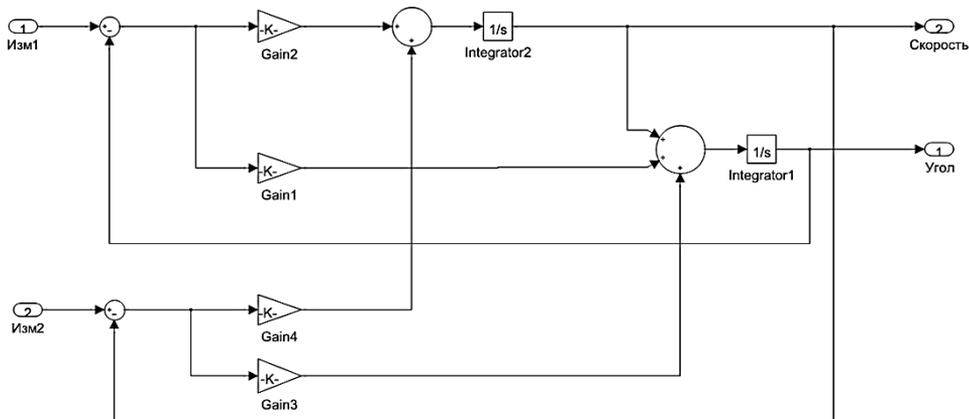


Рис. 2. Схема фильтра оценки угловой ориентации тела с двухканальной фильтрацией результатов измерения

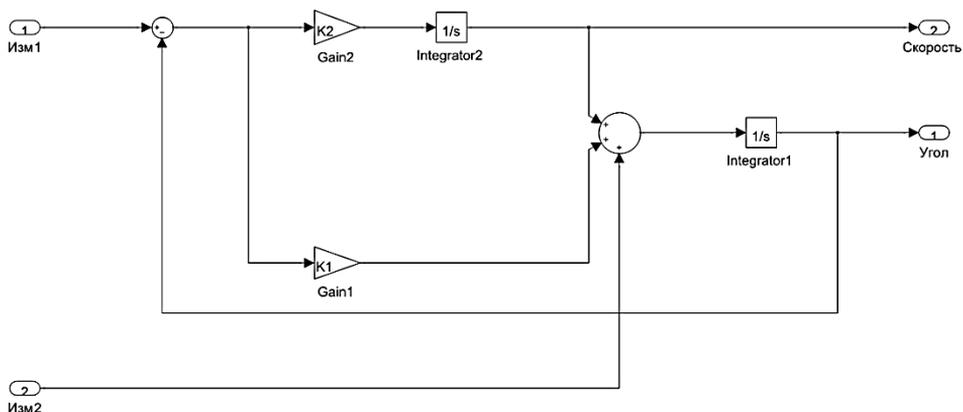
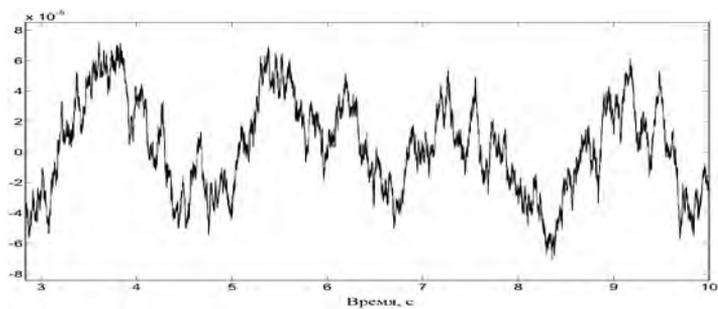


Рис. 3. Схема фильтра оценки угловой ориентации тела с одноканальной фильтрацией результатов измерения и управляющим входом

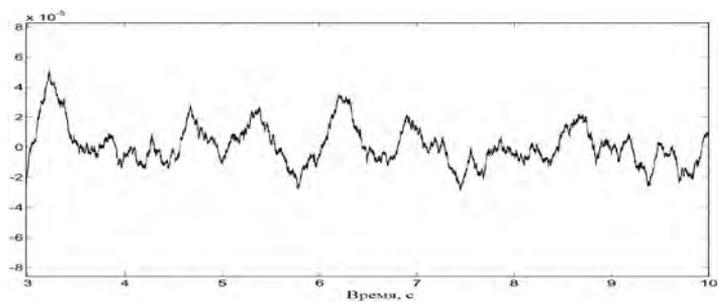
Результаты работы фильтров при небольших амплитудах шумов измерений представлены на рис. 4, а, б. Как видно из графиков, двухканальный вариант фильтра имеет в установившемся режиме большую ошибку оценивания, чем одноканальный.

В случае присутствия в системе сильно шумящих датчиков использование двухканального варианта фильтрации становится более предпочтительным, что хорошо иллюстрируется рис. 4, в, г.

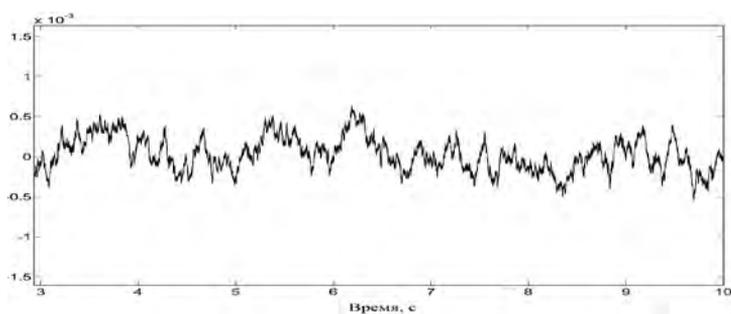
При появлении в данных одного из измерителей систематической ошибки одноканальный вариант фильтрации показывает лучшие результаты по сравнению с двухканальным фильтром. На рис. 5 приведены оценки угла, угловой скорости и систематической ошибки измерений на выходе двухканального и одноканального фильтра.



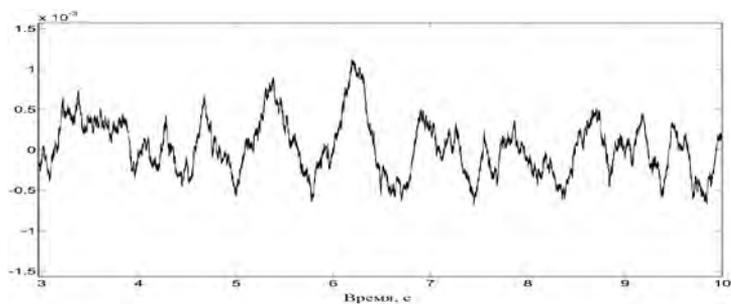
a



б



в



г

Рис. 4. Ошибки оценки угла на выходе:

a, в — двухканального фильтра; *б, г* — одноканального фильтра

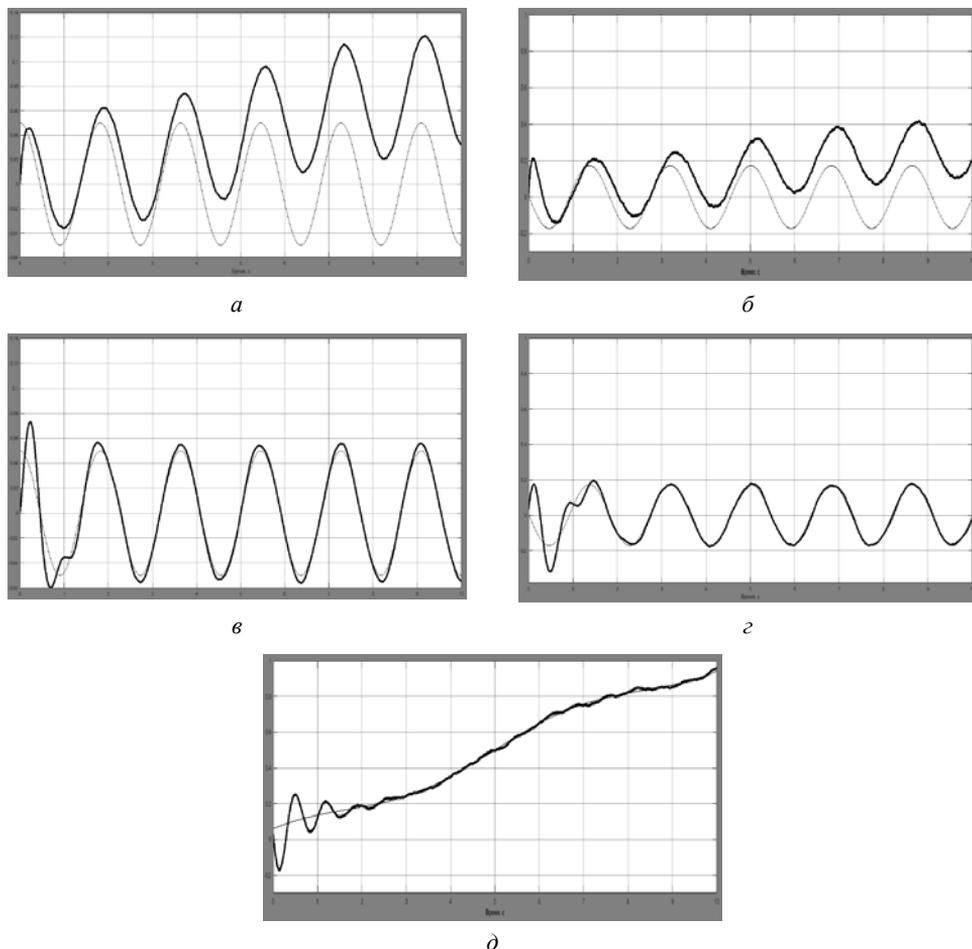


Рис. 5. Результаты оценки:

a — угла на выходе двухканального фильтра; *б* — угловой скорости на выходе двухканального фильтра;
в — угла на выходе одноканального фильтра; *г* — угловой скорости на выходе одноканального фильтра;
д — систематической ошибки измерений на выходе одноканального фильтра

Результаты показывают, что в одноканальном фильтре систематическая ошибка после окончания переходного процесса выделяется с достаточной степенью точности, что позволяет использовать ее для коррекции вектора состояний.

Заключение. Таким образом, получение несмещенной оценки состояния процесса на основе данных измерений возможно при раздельной коррекции вектора состояния по данным датчиков и введения в процедуру предсказания через внешнее воздействие результатов измерений, содержащих систематическую ошибку.

Литература

- [1] <http://blog.tkjelectronics.dk/2012/09/a-practical-approach-to-kalman-filter-and-how-to-implement-it>

- [2] Шпекторов А.Г., Фам В.Т. Анализ применения микромеханических измерительных систем для задач управления морскими подвижными объектами. *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*, 2017, № 5, с. 16–20.
- [3] Bar-Shalom Y., Campo L. The effect of the common process noise on the two-sensor fused-track covariance. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1986, vol. 22, no. 11, pp. 803–805.
- [4] Roecker J.A., McGillem C.D. Comparison of two-sensor tracking methods based on state vector fusion and measurement fusion. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1988, vol. 24, no. 4, pp. 447–449.
- [5] Gao J.B., Harris C.J. Some remarks on Kalman Filters for the multisensory fusion. *Information Fusion*, 2002, no. 3, pp. 191–201.
- [6] Поняцкий В.М. Повышение качества обработки информации, поступающей с нескольких видеосенсоров, в задачах управления. *Современные информационные технологии и ИТ-образование*, 2016, т. 12, № 4, с. 165–172.
- [7] Поняцкий В.М., Зенов Б.В. Применение фильтра Калмана для задач управления подвижными объектами. *Современные информационные технологии и ИТ-образование*, 2018, т. 14, № 3, с. 625–630.

Сведения об авторе:

Поняцкий Валерий Мариуфович — канд. техн. наук, доцент, кафедра «Проектирование автоматизированных комплексов», Тульский ГУ, Тула, 300012, Россия, ORCID: 0000-0001-8326-165X

Research by means of Matlab of compensation of a systematic error with the help of the filter of Kallman in information measuring systems

© | V.M. Ponjatskiy

granat@home.tula.net

Tula State University, Tula, Russia

Possibility estimation a status of process on the basis of these measurements several sensors in the presence the systematic error of measurements which is not giving in to a provisional estimate and accounting is considered. The analysis the existing approaches to integration information using Kallman's filtering is carried out. It is offered to carry out estimation a status of process with separate correction according to indications of separate sensors. Compensation of a systematic error is implemented in procedure of a prediction, using measurements with a systematic error as an external control signal.

Keywords: *Kallman's filter, integration, systematic error of measurements, estimation, state vector, correction, vector of management, sensor, system*

References

- [1] <http://blog.tkjelectronics.dk/2012/09/a-practical-approach-to-kalman-filter-and-how-to-implement-it>
- [2] Shpektorov A.G., Fam V.T. The analysis of use of micromechanical measuring systems for problems of management of sea mobile objects. *News SPBGETU of "LETU"*, 2017, no 5, pp. 16–20.

- [3] Bar-Shalom Y., Campo L. The effect of the common process noise on the two-sensor fused-track covariance. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1986, vol. 22, no 11, pp. 803–805.
- [4] Roecker J.A., McGillem C.D. Comparison of two-sensor tracking methods based on state vector fusion and measurement fusion. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1988, vol. 24, no. 4, pp. 447–449.
- [5] Gao J.B., Harris C.J. Some remarks on Kalman Filters for the multisensory fusion. *Information Fusion*, 2002, no. 3, pp. 191–201.
- [6] Ponyatsky V. M. Improvement of quality of the information processing arriving from several video sensors in problems of management. *Modern information technologies and IT education*, 2016, vol. 12, no. 4, pp. 165–172.
- [7] Ponyatsky V.M., Zenov B.V. Use of the filter of Kallman for problems of management of mobile objects. *Modern information technologies and IT education*, 2018, vol. 14, no. 3, pp. 625–630.

Information about author:

Ponjatskiy V.M. — Cand. Tech. Sci., the associate professor, Department of Design of the automated complexes, Tula State University, Tula, 300012, Russia, ORCID: 0000-0001-8326-165X

УДК 658.51:612.45

Использование MATLAB для оценки мощности приводов механизма панкратического объектива

© | В.М. Понятский
А.В. Романов

granat@home.tula.net

granat@home.tula.net

Тульский государственный университет, Тула, 300012, Россия

При разработке сложной оптической техники трудоемкой задачей является выбор шагового двигателя. Разработана методика по оценке мощности шагового двигателя, основанная на использовании САПР SolidWorks и MATLAB/Simulink. Для механизма панкратического объектива разработана динамическая модель, позволяющая определить необходимый крутящий момент, развиваемый двигателем, с учетом воздействия пружин, сложного профиля и программного изменения угла поворота кулачкового механизма.

Ключевые слова: возвратная пружина, люфтовывбирающая пружина, трансляция модели

Одной из актуальных проблем при создании малогабаритной оптической техники является выбор шагового двигателя с максимальной мощностью, достаточной для обеспечения корректной работы устройства. Наличие сложного профиля кулачкового механизма, программное изменение угла поворота кулачка и воздействие цилиндрических пружин растяжения и сжатия осложняют задачу.

Существуют современные САПР, позволяющие проводить исследование динамики и кинематики сложных механизмов.

Пакет программ SolidWorks обеспечивает высокую эффективность и качество разработки твердотельных моделей и узлов и позволяет проводить исследование их динамики и кинематики.

Программный модуль MATLAB/Simulink расширяет возможности САПР SolidWorks в части имитационного моделирования 3D-моделей. Благодаря включенной в его состав графической среде имитационного моделирования Simulink можно объединить элементы различной физической природы и моделировать движение механизмов и машин. Пакет расширения Simulink/ Simscape Multibody позволяет моделировать механизмы, состоящие из множества твердых тел и их компонентов — соединений, ограничителей движения, управляющих элементов.

Встраиваемый в САПР SolidWorks CAD-транслятор MATLAB позволяет генерировать из 3D-модели динамическую модель механических систем и их сборок. При этом все параметры твердотельной модели, определяющие ее динамику — масс-инерционные характеристики, координаты центров масс, параметры соединений и др., а также сопряжения 3D-модели преобразуются в степени свободы и передаются в динамическую модель MATLAB.

Методика оценки мощности шагового двигателя. Методика оценки мощности шагового двигателя включает в себя следующие этапы.

Этап 1. Экспорт 3D-модели SolidWorks в xml-файл данных (рис. 1, а).

Этап 2. Импорт xml-файла данных в среду MATLAB (рис. 1, б).

Этап 3. Доработка модели в соответствии с кинематической схемой механизма.

Этап 4. Моделирование функционирования механизма панкратического объектива и оценка максимальной мощности шагового двигателя.

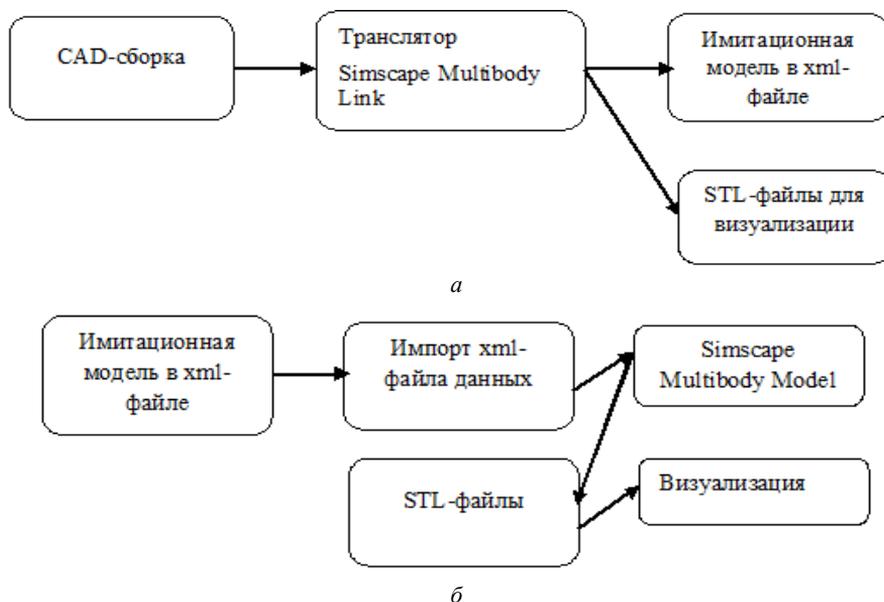


Рис. 1. Этапы трансляции 3D-модели SolidWorks в динамическую модель MATLAB:

a — экспорт 3D-модели SolidWorks в xml-файл данных (этап 1);

б — импорт xml-файла данных в среду MATLAB

Проведена оценка мощности шагового двигателя для механизма панкратического объектива в соответствии с предложенной методикой.

Этап 1. Экспорт 3D-модели механизма панкратического объектива в xml-файл данных. Исходная 3D-модель механизма панкратического объектива, выполненная в SolidWorks, представлена на рис. 2.

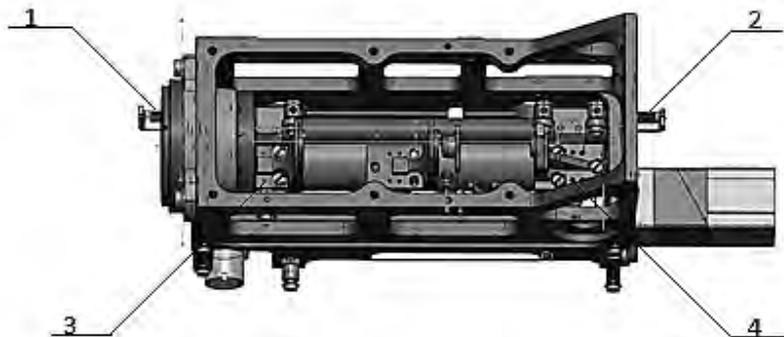


Рис. 2. 3D-модель механизма панкратического объектива, выполненная в SolidWorks:

1, 2 — люфтовывбирающие пружины; 3, 4 — каретки

Для экспорта из CAD-системы Solidworks 3D-модели механизма в САЕ-систему MATLAB необходимо наличие установленного CAD-транслятора Simscape Multibody Link и выполнение следующих действий: выбрать в пункте меню Инструменты команду Simscape Multibody Link: Export: Simscape Multibody, и появится окно для сохранения во внешний файл.

В результате экспорта получен файл — объектив панкратического.xml (рис. 3).

```

1 <?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="no" ?>
2 <SimscapeMultibodyImportXML version="2.0" xmlns="urn:mathworks:SimscapeMultibody:import" xmlns:xsi="http://www.w3.
3 <Created by="*" on="05/31/18|15:06:07" using="Simscape Multibody Link Version 5.2" from="SolidWorks 24.5.0"/>
4 <ModelUnits mass="kilogram" length="millimeter"/>
5 <DataUnits mass="kilogram" length="meter"/>
6 <RootAssembly name=" Объектив панкратический" uid="!Объектив панкратический" version="1213">
7 <AssemblyFile name=" Объектив панкратический.SLDASM" type="SolidWorks Assembly"/>
8 <InstanceTree>
9 <Instance name=" Шайба-1" uid="Шайба-1" entityUid=" Шайба:*--02">
10 <Transform>
11 <Rotation>0 0 1 -0.40852605867761688 0.91274665673522593 0 -0.91274665673522593 -0.40852605867761688 0</Rotation>
12 <Translation>0.079388919168312116 0.0057372170451097538 0</Translation>
13 </Transform>
14 </Instance>
15 <Instance name=" Копытс-1" uid="Копытс-1" grounded="true" entityUid="Копытс:*--01 (поп отпорный)">
16 <Transform>
17 <Rotation>1 0 0 0 1 0 0 0 1</Rotation>
18 <Translation>-0.0066110808316879044 0.01673721704510981 -0.028000000000000001</Translation>
19 </Transform>
20 </Instance>
21 <Instance name=" Оправа-1" uid="Оправа-1" entityUid="Оправа:*По умолчанию">
22 <Transform>
23 <Rotation>1 0 0 0 1 0 0 0 1</Rotation>
24 <Translation>0.062888919168312102 -0.019262782954890194 0</Translation>
25 </Transform>
26 </Instance>
27 <Instance name=" Объектив-1" uid="Объектив-1" entityUid="Объектив" rigid="true">
28 <Transform>
29 <Rotation>1 0 0 0 1 0 0 0 1</Rotation>
30 <Translation>0.057227506996770053 -0.019262782954890204 0</Translation>
31 </Transform>
32 <Instance name=" Кольцо-1" uid="Кольцо-1" entityUid="Кольцо:*Основная">

```

Рис. 3. xml-файл данных

При трансляции телам модели Simulink передаются соответствующие массоинерционные характеристики компонентов сборки SolidWorks, а сопряжения деталей 3D-моделей преобразуются в степени свободы динамической модели MATLAB. Для обеспечения визуализации модели Simulink геометрия элементов сборки SolidWorks передается с помощью транслируемых stl-файлов.

Этап 2. Импорт xml-файла механизма панкратического объектива в среду MATLAB. Импорт в среду MATLAB — это чтение системой MATLAB созданных Cad-транслятором xml- и stl-файлов.

Для импорта модели в MATLAB используется команда `smimport` ('Объектив панкратический.xml').

На рис. 4 представлена динамическая модель механизма панкратического объектива в среде Simulink пакета MATLAB, полученная путем трансляции xml-файла с помощью Simscape Multibody Link. Визуализация модели механизма панкратического объектива, выполненная в Simulink с помощью stl-файлов, представлена на рис. 5.

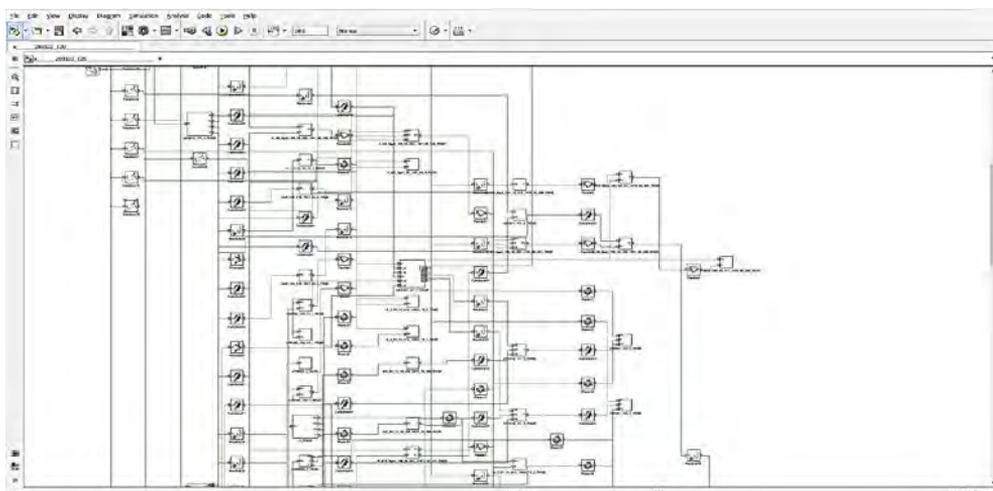


Рис. 4. Модель механизма панкратического объектива в Simulink

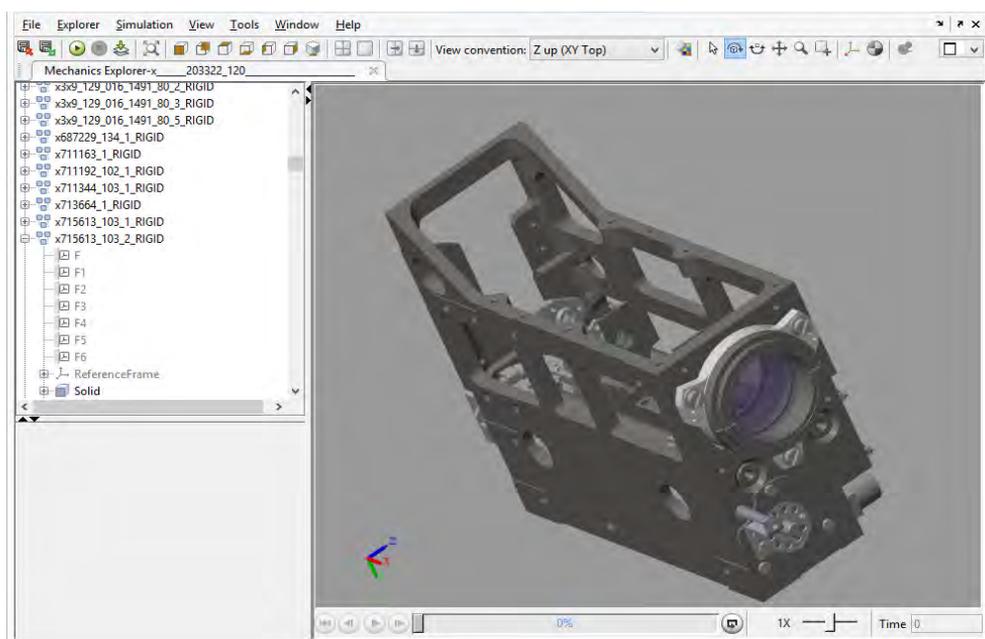


Рис. 5. Визуализация модели механизма панкратического объектива

Этап 3. Доработка модели механизма панкратического объектива. Реализация модели шагового двигателя. Для оценки мощности шагового двигателя механизма панкратического объектива необходимо провести следующие доработки модели:

- реализовать модель шагового двигателя;

- реализовать обратный ход шагового двигателя;
- реализовать переменный профиль кулачкового механизма;
- реализовать воздействия пружин (люфтовывбирающих и возвратной).

Реализация вращения кулачкового механизма. Моделирование вращение кулачка реализовано блоком Revolute Joint, обеспечивающим вращательную степень свободы. Доработка заключалась во введении в блок Revolute Joint дополнительного входа «q» и подключения через этот вход модуля, реализующего вращение шагового двигателя — Motor (рис. 6).

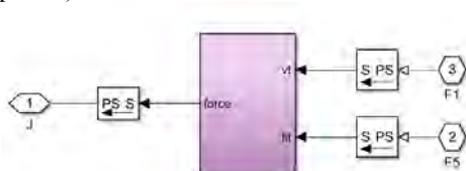


Рис. 6. Реализация дискретного вращающего момента на валу шагового двигателя

В модели шагового двигателя реализованы задание вращающего момента, программное изменение угла поворота, ограничение по максимальному моменту и режим реверса.

Реализация профиля кулачкового механизма. Были добавлены блоки Spline и Point On Curve Constraint. С помощью блока Spline задаются кривые, описывающие профиль кулачкового механизма. Данный блок находится в подсистеме кулачкового механизма. Математическое описание кривых, повторяющих профиль кулачка, задано в маске подсистемы кулачкового механизма (рис. 7).

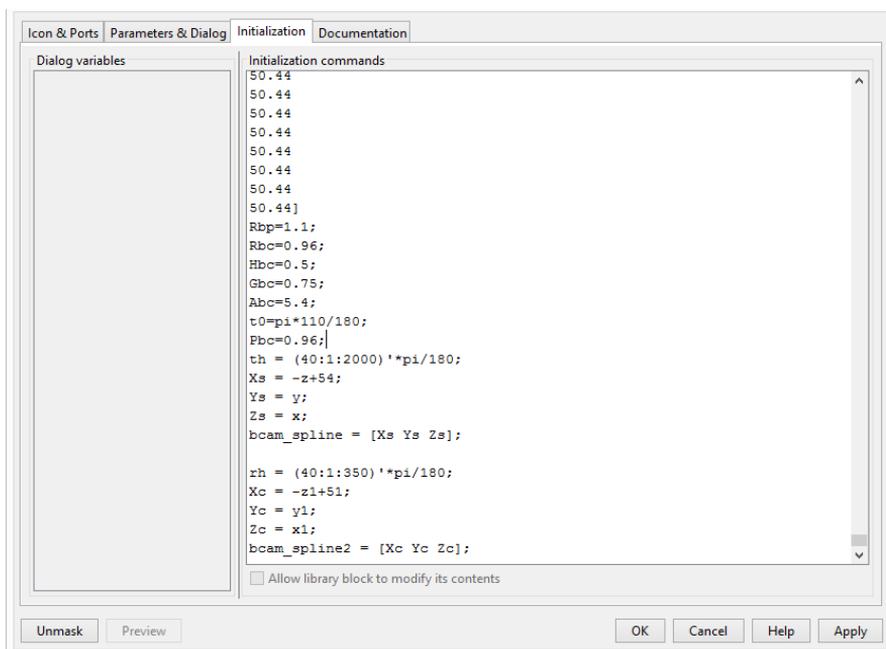


Рис. 7. Маска подсистемы кулачкового механизма

Параметры блока Spline с визуализацией кривой, описывающей профиль кулачкового механизма, представлены на рис. 8. Координаты точек интерполяции заданы в маске подсистемы кулачкового механизма.

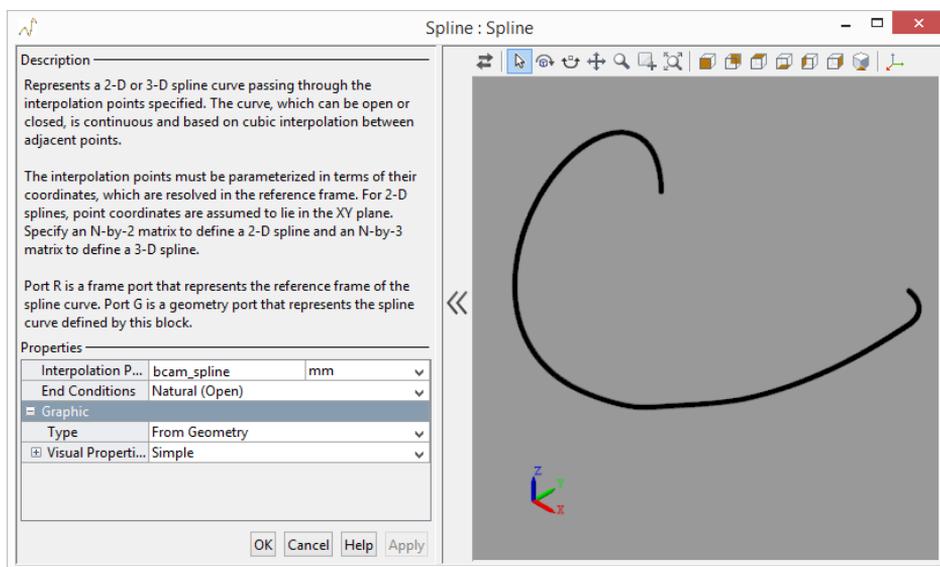


Рис. 8. Параметры блока Spline

Маска — настраиваемый пользовательский интерфейс, который скрывает содержание и различные настройки для блока из библиотеки Simulink. В нашем случае это уравнения кривых, описывающих профиль кулачкового механизма.

Связь профиля кулачкового механизма и каретки осуществляется блоком Point On Curve Constraint из библиотеки Simscape, позволяющим кареткам двигаться только вдоль кривой, описывающей профиль кулачкового механизма. В параметрах блока была выбрана опция Force Vector, необходимая для измерения силы как трехмерного вектора $[F_x, F_y, F_z]$.

Моделирование воздействия пружин. Моделирование люфтовывбирающих пружин осуществляется с помощью блока Spring and Damper Force из библиотеки Simscape. 3D-модель люфтовывбирающей пружины и вид блока Spring and Damper Force из библиотеки Simscape представлены на рис. 9.

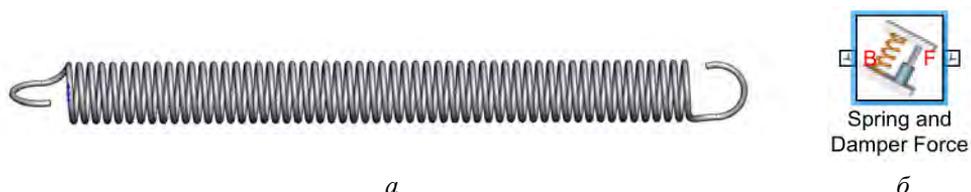


Рис. 9. Модель люфтовывбирающей пружины:

a — 3D-модель люфтовывбирающей пружины; *б* — блок Spring and Damper Force из библиотеки Simscape

На рис. 10 представлена 3D-модель возвратной пружины. Модель возвратной пружины представлена на рис. 11.



Рис. 10. 3D-модель возвратной пружины

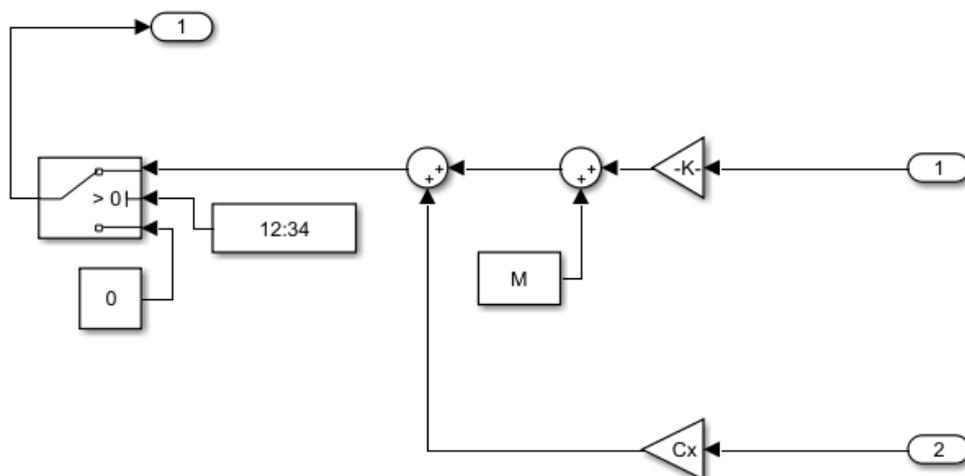


Рис. 11. Модель возвратной пружины

Этап 4. Моделирование функционирования механизма панкратического объектива. При моделировании используется модель шагового двигателя, задающего вращающий момент с программным изменением угла вращения с режимом реверса и ограничением по максимальному моменту и перемещение кареток, осуществляемое с помощью блоков Spline и Point On Curve Constraint.

Задан максимальный момент шагового двигателя, соответствующий FL20STH42-0804A с крутящим моментом, равным $200 \text{ г} \cdot \text{см}$.

График изменения углового положения вала ШД для $t = 2,18 \dots 2,23 \text{ с}$. (рис. 12).

На рис. 13 представлен результат моделирования крутящего момента ШД для $t = 2,18 \dots 2,23 \text{ с}$.

Результаты моделирования воздействия возвратной пружины представлены на рис. 14 и двух люфтовывбирающих пружин — на рис. 14, 15 для $t = 2,18 \dots 2,23 \text{ с}$.

На рис. 17 приведен результат моделирования суммарного момента с учетом воздействия шагового двигателя и пружин, для $t = 2,18 \dots 2,23 \text{ с}$.

Результат моделирования углового ускорения кулачкового механизма представлен на рис. 18 для $t = 2,18 \dots 2,23 \text{ с}$.



Рис. 12. Изменение углового положения вала ШД

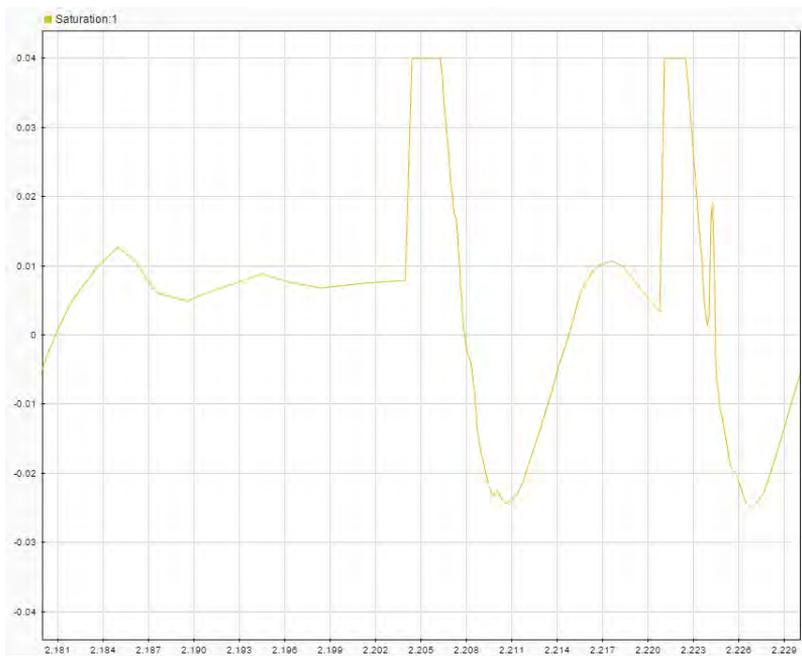


Рис. 13. Крутящий момент ШД

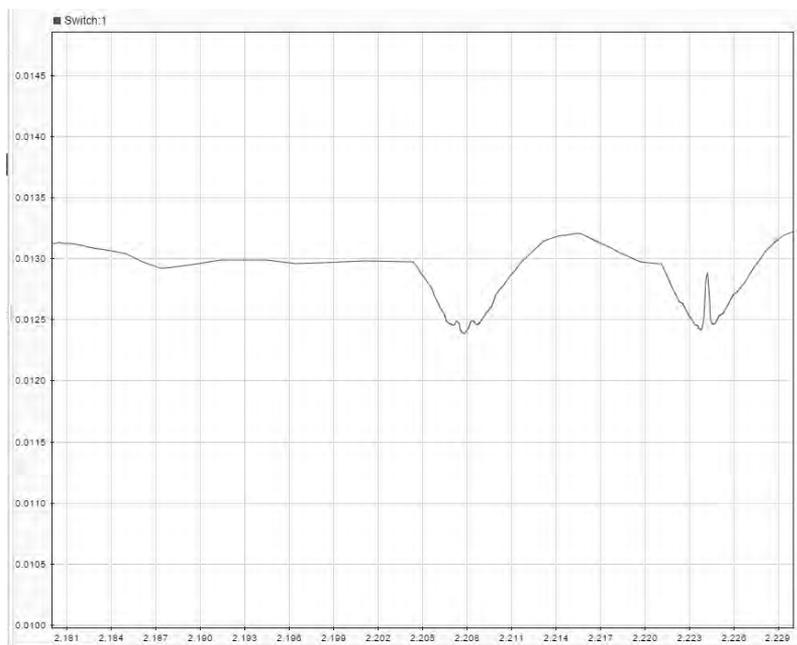


Рис. 14. Возвратная пружина

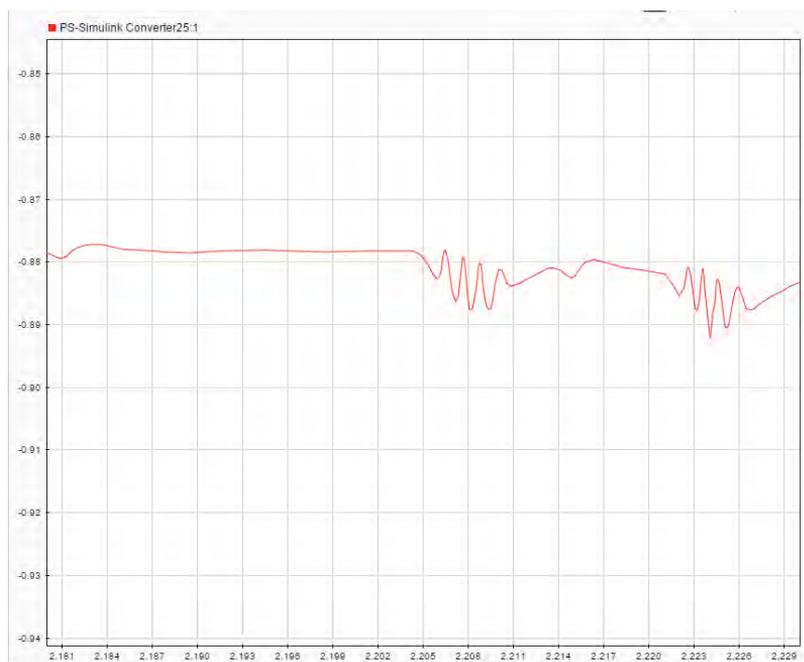


Рис. 15. Люфтовывбирающая пружина № 1

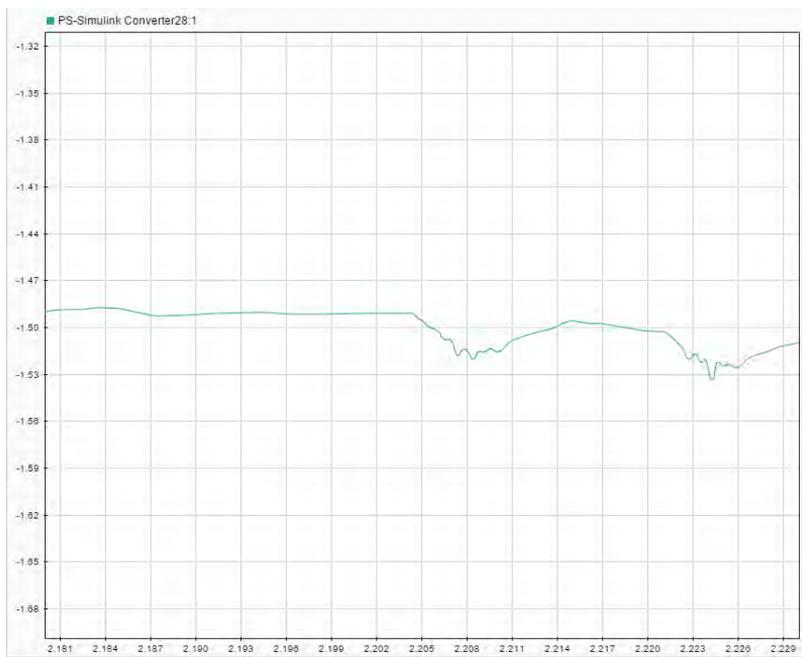


Рис. 16. Люфтовывирающая пружина № 2

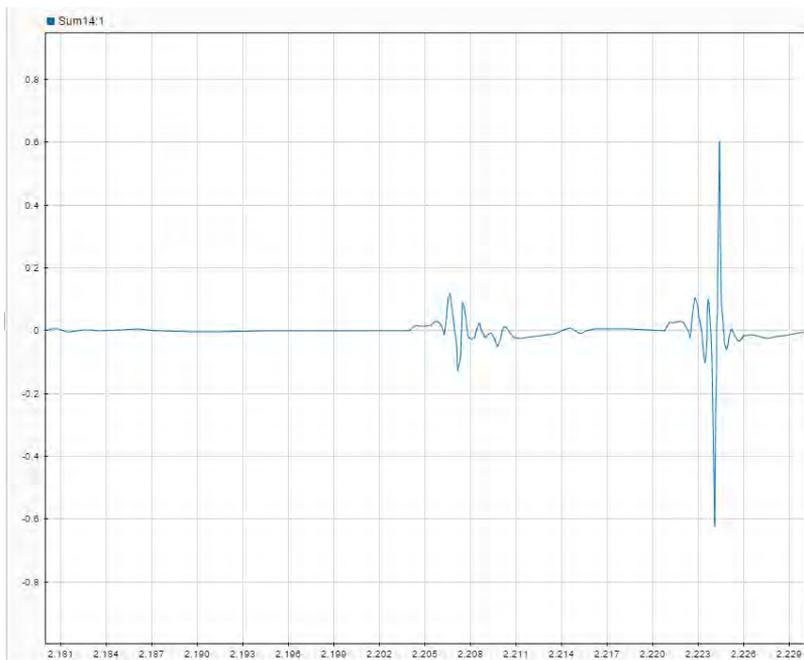


Рис. 17. Суммарный момент

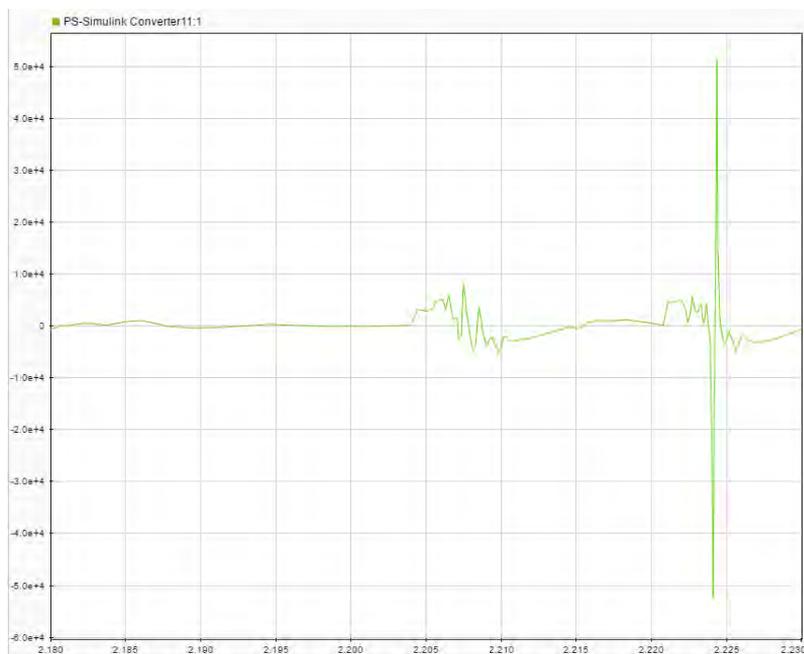


Рис. 18. Угловое ускорение

Выводы. В соответствии с рассмотренной технологией, основанной на использовании САПР SolidWorks и системы MATLAB, проведены разработка и исследование динамической модели сложного механизма панкратического объектива, позволившие осуществить выбор шагового двигателя необходимой мощности.

Литература

- [1] Дьяконов В.П. *MATLAB R2006/2007/2008 + Simulink 5/6/7. Основы применения.* изд. 2-е, перераб. и доп. Москва, Солон-Пресс, 2008, 800 с. (Сер. «Библиотека профессионала»).
- [2] Первицкий Ю.Д. *Расчет и конструирование точных механизмов.* Изд. 2-е, перераб. и доп. Ленинград, Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1976, 456 с.
- [3] Народецкая М.Э. *Техническая механика и детали машин приборов* / М.Э. Народецкая, Б.А. Торбан, А.И. Аркуша. Москва, Машиностроение, 1982, 456 с.

Сведения об авторах:

Понятский Валерий Мариафович — канд. техн. наук, доцент, кафедра «Проектирование автоматизированных комплексов», Тульский ГУ, Тула, 300012, Россия, ORCID: 0000-0001-8326-165X

Романов Алексей — инженер, кафедра «Проектирование автоматизированных комплексов», Тульский ГУ, Тула, 300012, Россия

Use of MATLAB for an Assessment of Power Drives of the Mechanism of a Pancratic lens

© | V.M. Ponjatskiy
A. V. Romanov

granat@home.tula.net
granat@home.tula.net

Tula State University, Tula, 300001, Russia

When developing difficult optical technique a labor-consuming task is the choice the stepping motor. The technique according to the power of the stepping motor based on use of a CAD of SolidWorks and Matlab/Simulink is developed. The dynamic model allowing to define the necessary torsional moment developed by the engine taking into account influence of springs, a difficult profile and program change of a turning angle of a cam gear is developed for the mechanism of a pancratic lens.

Keywords: *return spring, torsion spring, broadcast of model*

References

- [1] Dyakonov V.P. *MATLAB R2006/2007/2008 + Simulink 5/6/7. Application bases*. 2nd prod., reslave. and additional. Moscow, SOLON-PRESS, 2008, 800 s. (Library of the Professional series).
- [2] Pervitsky Yu.D. Calculation and designing of exact mechanisms. *Prod. the 2nd, additional and reworks*. Leningrad, "Mechanical engineering" (Leningr. Otd-niye), 1976, 456 s.
- [3] Narodetskaya M.E., Torban B.A., Arkusha A.I. Technical mechanics and parts of machines of devices. Moscow, Mechanical engineering, 1982, 456 p.

Information about autors:

Ponjatskiy V.M. — Cand. Tech. Sci., the associate professor, Department of Design of the automated complexes, Tula State University, Tula, 300012, Russia, ORCID: 0000-0001-8326-165X
Romanov A.V. — the engineer, Department of Design of the automated complexes, Tula State University, Tula, 300001, Russia

УДК 681.51:378

Моделирование системы управления приводом в учебном процессе

© | П.Л. Пушков
С.В. Евстафиева

roman.pushkov@gmail.com
svetlana.evstafieva@gmail.com

ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия

Наиболее распространенные системы управления приводами строятся по принципу многоконтурной системы управления, в составе которой выделяются контур тока, контур скорости и контур положения. Система управления по своему типу является подчиненной — контуры управления находятся один внутри другого. Такая система управления обладает рядом преимуществ, таких как простота расчета и настройки — система разбивается на ряд контуров. Каждый контур включает в себя регулятор, за счет придания которому определенных динамических свойств получают стандартные характеристики. При этом настройка в процессе наладки системы ведется начиная с внутреннего контура. Обеспечивается удобство ограничения предельных значений промежуточных координат системы; возможность оптимальной настройки регулирования каждой переменной как в статике, так и в динамике. В статье рассматриваются вопросы, связанные с обучением студентов настройке и моделированию современных приводов. Система подчиненного управления рассматривается на базе привода Sinamics S120 производства Siemens с двигателем 1FK7061-7AF71-1FH0 и контроллером Simotion D435. В рамках изучения настройки привода проводятся экспериментальные исследования системы управления с двигателем, затем проводятся моделирование системы управления и сравнение полученных результатов.

Экспериментальные исследования проводятся с помощью диагностической системы являющейся частью программного обеспечения устройства управления приводами и контроллера верхнего уровня — Simotion SCOUT. Эта система позволяет проводить качественный и количественный анализ характеристик привода без специальной аппаратуры, обеспечивая большое разнообразие входных диагностических сигналов. Имитационное моделирование проводилось в среде моделирования динамических систем Simulink, входящей в состав системы инженерных и научных вычислений MATLAB.

В процессе работы снимаются логарифмические амплитудо- и фазо-частотные характеристики, а также графики переходного процесса. При этом для выполнения работы необходимо предварительно настроить привод. Настройка привода может осуществляться в автоматическом режиме — такая возможность существует в рассматриваемом программном обеспечении, однако также можно провести настройку с учетом оптимизации какого-либо параметра вручную. При этом необходимо будет последовательно настраивать контуры управления, начиная с внутреннего, задавая параметры регуляторов и фильтров.

Сравнение полученных результатов осуществляется с помощью системы MATLAB, полученные результаты моделирования в среде Simulink и результаты экспериментальных исследований наносятся на графики.

адаптивное управление. Однако его основой является ПИ-регулятор. Контур тока (КТ) обеспечивает обратную связь по току двигателя (т. е. по нагрузке), которая улучшает динамические свойства привода, в том числе динамическую жесткость, и позволяет организовать эффективное ограничение по силе тока. Он включает регулятор тока (РТ), датчик тока (ДТ) и силовую часть, состоящую из силового преобразователя (СП) и двигателя (М). В качестве источника энергии (ИЭ) для СП, как правило, выступает трехфазный выпрямитель, обеспечивающий возможность рекуперации энергии в сеть. Замыкание контура положения может осуществляться или непосредственно в контроллере привода, или в устройстве управления верхнего уровня (УЧПУ станка). В первом случае удается существенным образом повысить быстродействие контура положения, а во втором проще обеспечить согласованную совместную работу нескольких приводов [6].

Для построения замкнутой системы следящего привода достаточно одного внешнего контура, содержащего информацию о перемещении. Однако наличие информации не только о выходной величине (пути), но и о ее производных (скорости и ускорении) дает возможность достаточно точно сформировать требуемую форму переходных процессов, т. е. создать систему с заданными динамическими характеристиками [7].

Регуляторы положения, скорости и тока являются программными модулями операционной системы контроллера, предназначенными для непосредственного управления соответствующими контурами привода. В них сравнивается фактический сигнал от обратной связи с управляющим сигналом. Разность этих двух сигналов после соответствующего преобразования подается на вход объекта управления, в качестве которого могут выступать внутренние контуры или силовая часть привода.

Схема управления приводом и настройка привода в SIMOTION SCOUT. На рис. 2 приведен пример настройки привода в специализированном программном обеспечении SIMOTION SCOUT [8]. Настройка начинается с внутреннего контура — контура тока, затем настраиваются контур скорости и контур положения. В контуре тока и скорости настраиваются ПИ-регуляторы, по приведенным ниже формулам рассчитываются их интегральные и пропорциональные составляющие. В контуре скорости также необходимо настроить фильтр низких частот [9]. Он реализован программно и необходимо указать его тип и временную константу.

Как уже подчеркивалось выше, современные системы управления электроприводами используют принцип подчиненного регулирования. На рис. 2 представлены элементы системы управления и блоки, которые будут в дальнейшем настраиваться. В среде SIMOTION SCOUT привод может быть настроен автоматически или вручную, когда специалист, основываясь на своем опыте настройки приводов и зная некоторые эмпирические закономерности, настраивает привод итерационно, вводя коэффициенты регуляторов, снимая полученные ЛАЧХ и ЛФЧХ и используя встроенные программные фильтры. Также для настройки можно использовать специальные алгоритмы.

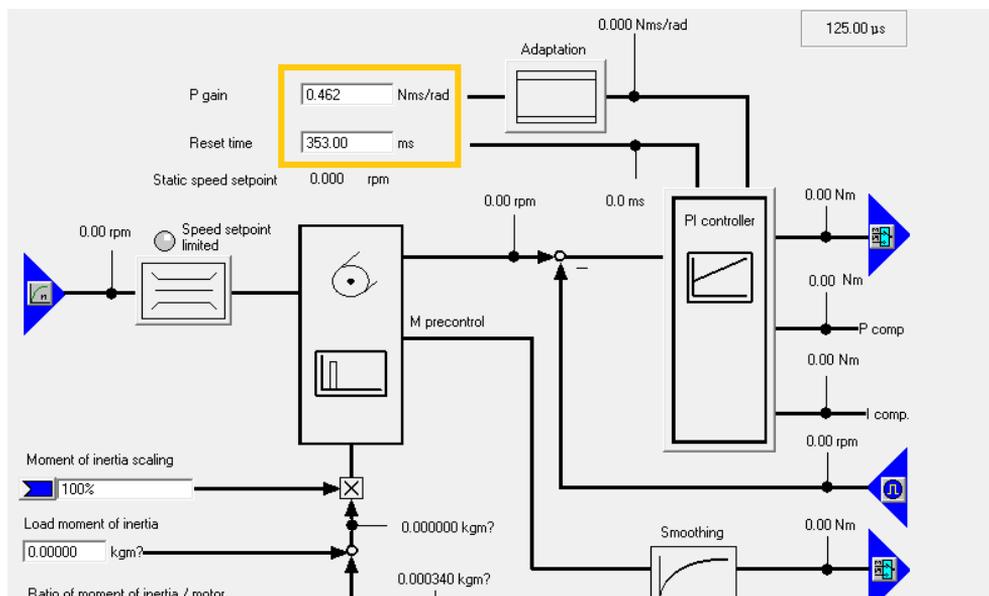
В качестве возможных способов настройки регуляторов приводов для самостоятельной проработки студентам предлагаются четыре способа.

Фильтр Баттерворта. АЧХ фильтров, передаточные функции которых определяются фильтром Баттерворта при различных значениях n .

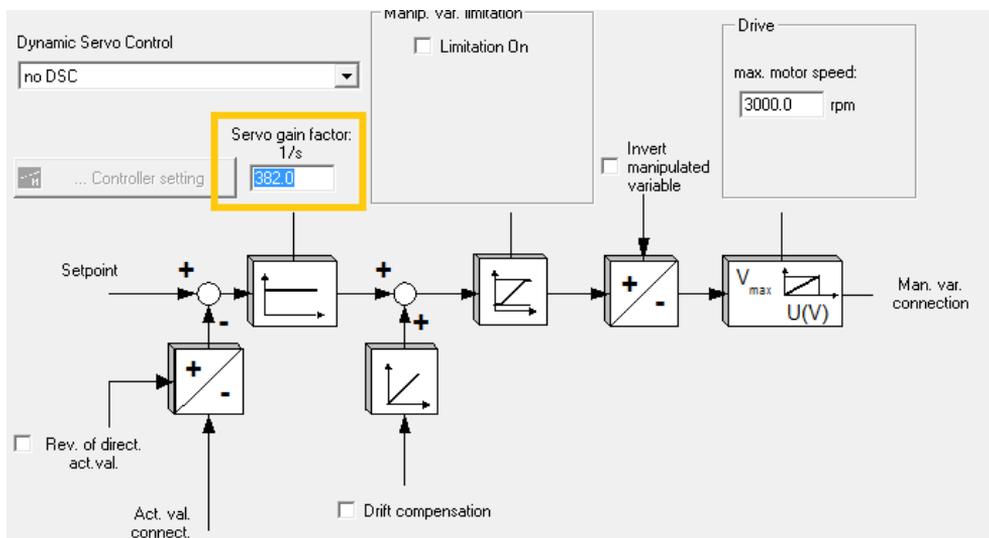
Полином $D_n(p)$ называется полиномом Баттерворта:

$$D_n(p) = 1 + d_1 p + d_2 p^2 + d_3 p^3 + \dots + p^n,$$

причем $d_0 = d_n = 1$.



a



б

Рис. 2. Настройка регуляторов:
a — скорости; *б* — положения

Коэффициенты полиномов Баттерворта вычислены и их значения приведены в таблицах. С увеличением n перерегулирование растет, но является практически удовлетворительным до $n = 5$, наименьшее время переходного процесса при $n = 2$.

При настройке по этой методике АЧХ максимально гладкая на частотах полосы пропускания и снижается практически до нуля на частотах полосы подавления.

Модульный оптимум. Замкнутый контур динамически оптимален, если он одинаково передает на выход разночастотные входные сигналы на возможно большем интервале частот, то есть, на этом интервале модуль АЧХ замкнутого контура является постоянным:

$$|W_3(j\omega)| = \text{const.}$$

Теоретически модульный оптимум может дать бесконечно большую полосу пропускания ($\omega_0 \rightarrow \infty$). Однако практически это невозможно из-за ограниченных возможностей реальных регуляторов и конечной полосы пропускания датчиков. Поэтому модульный оптимум называют также практическим или техническим оптимумом. Оптимизация на максимум полосы пропускания является также и оптимизацией по быстродействию, т. е. чем шире полоса пропускания, тем меньше время переходного процесса контура.

Биномиальное разложение. Простейшая стандартная форма — биномиальная, так как ей соответствует желаемая передаточная функция (ПФ) со знаменателем в виде бинома, где ω_0 — относительная частота.

$$\Phi_{\text{ж}}(p) = \frac{\omega_0^{\vartheta}}{(p + \omega_0)^{\vartheta}}.$$

ПФ соответствует, в свою очередь, последовательному соединению из ϑ инерционных звеньев первого порядка с одинаковыми постоянными времени $T_i = 1/\omega_0$ и, следовательно, с одинаковыми полюсами $p_i = -\omega_0$. На апериодический переходный процесс $h_{\text{ж}}(t)$ такого соединения ориентируются лишь в тех редких случаях, когда перерегулирование в синтезируемой системе нежелательно. При этом, как видно по графикам $h_{\text{ж}}(t)$ на рис. 4, а, переходные процессы имеют наибольшие длительности (t_n — длительность нарастания и t_n — длительность переходного процесса) по сравнению с другими стандартными формами.

Интегральный взвешенный модуль ошибки определяется уравнением

$$I = \int_0^{\infty} t |\varepsilon(t)| dt = \min,$$

где $\varepsilon(t)$ — величина ошибки.

Оценка придает больший вес тем значениям сигнала ошибки, которые имеют место в конце переходного процесса. Их можно использовать только при исследовании систем на моделях.

Для всех представленных способов расчета с учетом характеристик моделируемого привода (см. таблицу) рассчитываются коэффициенты регуляторов (П-регулятора в контуре положения и ПИ-регуляторов в контурах тока и скорости), а также коэффициенты фильтра нижних частот и параметры силовой части привода по приведенным формулам.

Расчет параметров для контура тока:

$$K_{\text{PT}} = \frac{d_3 T_3 R_3}{d_4^2 T_{\mu}}; \quad i_{\text{PT}} = \frac{K_{\text{PT}}}{T_3},$$

где d_3, d_4 — коэффициенты, зависящие от выбранного способа настройки регуляторов; T_s — электрическая постоянная времени, мс; R_s — сопротивление обмотки, Ом; T_μ — время задержки в системе управления, с.

Расчет параметров для контура скорости:

$$K_{PC} = \frac{d_2 J}{d_3 d_4 T_\mu K_m}; \quad i_{PC} = \frac{K_{PC} d_1}{d_2 d_4 T_\mu},$$

где d_2, d_3, d_4 — коэффициенты, зависящие от выбранного способа настройки регуляторов; J — момент инерции двигателя, 10^{-4} кг · м²; K_m — постоянная крутящего момента, Н · м/А; T_μ — время задержки в системе управления, с.

Параметры моделируемого привода

Параметр	Значение параметра
Момент инерции двигателя, 10^{-4} кг · м ²	3,74
Постоянная крутящего момента, Н · м/А	1
Сопротивление обмотки, Ом	0,74
Электрическая постоянная времени, мс	0,27
Время задержки в системе управления, с	0,00025

Расчет параметров для контура положения:

$$K_{pn} = \frac{1}{d_1 d_4 T_\mu},$$

где d_1, d_4 — коэффициенты, зависящие от выбранного способа настройки регуляторов; T_μ — время задержки в системе управления, с.

Расчет параметров для настройки фильтра:

$$T_\phi = \frac{d_2 T_\mu d_4}{d_1} 1000,$$

где d_1, d_2, d_4 — коэффициенты, зависящие от выбранного способа настройки регуляторов; T_μ — время задержки в системе управления, с.

Рассчитанные параметры заносятся в соответствующие блоки программного обеспечения SIMOTON SCOUT. Данные для регуляторов контуров тока и скорости заносятся в соответствующие блоки, ассоциированные непосредственно с выбранной осью и, соответственно, с двигателем и его приводом. Значение П-регулятора для контура положения указывается в блоке контроллера (см. рис. 2). После этого снимаются полученные характеристики переходного процесса, ЛАЧХ, ЛФЧХ. Для удобства сравнения характеристик с данными, полученными в модели, результаты можно сохранить в файле и затем обработать и добавить на графике в MATLAB [10].

Схема управления приводом и настройка привода в Simulink. На рис. 3 представлена модель управления приводом (1FK7061-7AF71-1FH0).

Структурно модель привода, построенная в Simulink (MATLAB), состоит из тех же контуров управления: контура тока, скорости и положения, а также в ней реализуется схема подчиненного регулирования. Так же, как и в SCOUT, настраивается


```

11 T=xlsread (file_name, sheet_name, ts);
12 Z=xlsread (file_name, sheet_name, zs);
13 X=xlsread (file_name, sheet_name, xs);
14 y = fft(X);
15 w = fft(Z);
16 l=y./w;
17 mm = abs(l);
18 mmr=20*log10(mm);
19 p = (angle(l));
20 f = 0:1/0.25575:2046/0.25575;
21 figure(3);
22 subplot(2,1,1),semilogx(f,mmr,'R');
23 xlim([1 4000]);
24 ylabel('Амплитуда [Дб]'), grid on
25 subplot(2,1,2),semilogx(f,p*180/pi,'R');
26 axis([1 4000 -180 180]);
27 ylabel('Фаза [Градусы]'), grid on
28 xlabel('Частота [Гц]')

```

Данные, извлекаемые из SIMOTION SCOUT, представляют собой таблицу, содержащую 2048 строк и три столбца — время, опорное значение, результат измерения.

В первых четырех строках указываются имя файла и название листа EXCEL из которого берутся данные и номера начальной и конечной строки, содержащей данные. В строках 5–7 указывается, в каких столбцах содержатся данные для построения. В строках 8–10 формируются массивы данных, которые затем в строках 11–13 читаются из файла Excel.

В строках 14–15 реализуется быстрое преобразование Фурье. В строке 16 осуществляется поэлементное деление вектора с результатами измерения на вектор с опорным значением. Затем выделяются значения амплитуды (строки 17–18) и фазы (строка 19). Рассчитывается количество точек для построения (строка 20).

В строках 21–28 происходит построение графиков: вся область графика разбивается на две части для отображения амплитудной и фазовой характеристик. На графиках амплитуды и фазы по оси X используется полулогарифмический масштаб (semilogx(f,mmr,'R')).

Результаты построения графиков представлены на рис. 4.

Для построения графиков переходного процесса также используется разработанная программа.

На следующем этапе выполняется сравнение результатов моделирования и данных с привода. Графики, полученные в результате моделирования системы в Simulink, наносятся на график характеристик, снятых с реального привода. Результат приведен на рис. 5, 6.

В результате сравнения полученных результатов можно сделать вывод, что построенная модель в полной мере отражает процессы, протекающие внутри контуров управления электропривода, а значит, является адекватной базой для исследования реального электропривода.

Все вышеизложенные аспекты обучения позволяют достаточно широко рассмотреть следующие основные вопросы управления приводами: принцип подчиненного управления в современных приводах, основы ПИД-регулирования, способы настройки приводов, понятия о контурах управления, практику применения современного инструментария для настройки приводов, моделирования, сравнения полученных результатов.

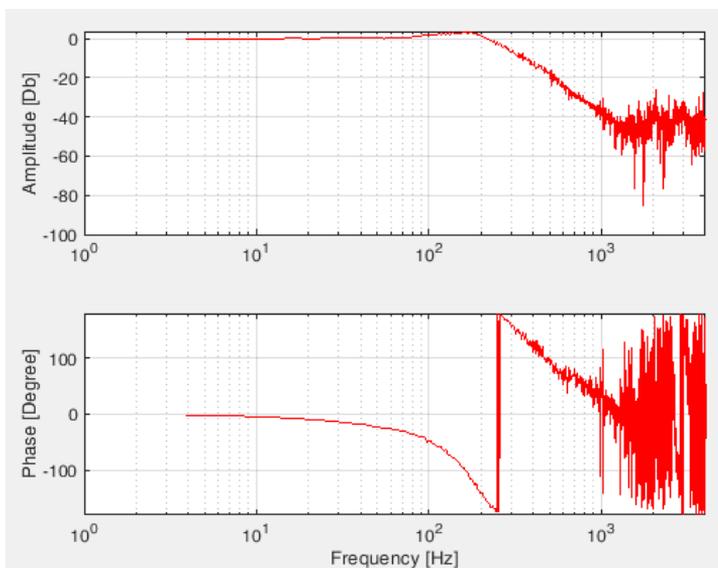


Рис. 4. Логарифмические амплитудо- и фазочастотные характеристики привода по данным с SIMOTION SCOUT

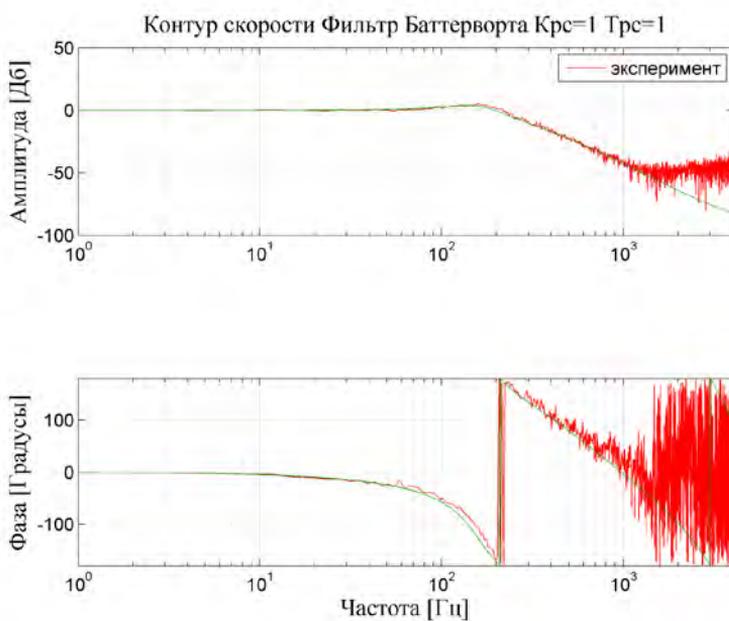


Рис 5. Сравнение результатов моделирования и измерений привода — ЛАФЧХ

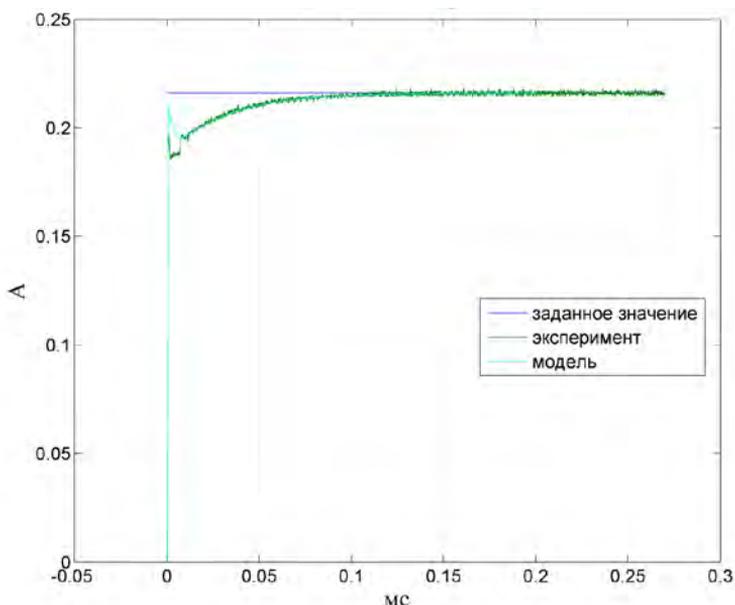


Рис. 6. Сравнение результатов моделирования и измерений привода — реакция на ступенчатое воздействие

В качестве развития данной работы студентам может быть предложено расширение модели электропривода путем добавления возможностей адаптивного регулирования [11–13] или добавления механической составляющей (например, шарико-винтовой передачи) для изучения динамики электромеханической системы [14]. Кроме того, применяются подходы к моделированию других мехатронных устройств [15].

Литература

- [1] Бушуев В.В., Евстафиева С.В., Молодцов В.В. Моделирование контуров управления следящего привода подачи. *СТИН*, 2016, № 3, с. 7–14.
- [2] Bushuev V.V., Evstafieva S.V., Molodtsov V.V. Control loops of a supply servo drive. *Russian Engineering Research*, 2016, vol. 36, no. 9, pp. 774–780.
- [3] Уемов А.И. *Логические основы метода моделирования*. Москва, Мысль, 1971, 311 с.
- [4] Терехов В.М., Осипов О.И. *Системы управления электроприводов*: учеб. для вузов. Москва, Издат. центр «Академия», 2005, 304 с.
- [5] *Следящие приводы*: В 3 т. 2-е изд., перераб. и доп. / под ред. Б.К. Чемоданова. Т. 2: Электрические следящие приводы. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. 880 с.
- [6] Евстафиева С.В., Молодцов В.В. Моделирование следящего привода подачи современных станков с ЧПУ. *Мехатроника, автоматизация, управление*, 2010, № 9, с. 37–44.
- [7] Соколовский Г.Г. *Электроприводы переменного тока с частотным регулированием*: учеб. для вузов. Москва, Издат. центр «Академия», 2006, 272 с.
- [8] SIMOTION SCOUT Configuration Manual. URL: https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/27002825/SCOUT_en-US.pdf
- [9] Найкин S. *Adaptive Filter Theory*. 4rd Edition. Paramus, NJ, Prentice-Hall, 2001.
- [10] Герман-Галкин С.Г. *MATLAB & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК*. Санкт-Петербург, КОРОНА-Век, 2008, 368 с.

- [11] Visioli A. *Practical PID Control*. London, Springer, 2006, 310 p.
- [12] Astrom K., Hagglund T. *PID Controllers. Theory, Design and Tuning*, Research Triangle Park. 2nd edition. NC, Intern. Soc. of Automation (ISA), 1995, 343 p.
- [13] Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID Control (ISA). *The Instrumentation, Systems, and Automation Society* (August 15, 2005). 461 p.
- [14] Михайлов О.П. *Динамика электромеханического привода металлорежущих станков*. Москва, Машиностроение, 1989, 224 с.
- [15] Подураев Ю.В. *Мехатроника: основы, методы, применение: учеб. пособие для студентов вузов*. Москва, Машиностроение, 2006. 256 с.

Сведения об авторах:

Пушков Роман Львович — старший преподаватель кафедры компьютерных систем управления, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия, SPIN-code: 9642-6371, Scopus Author ID: 56021436700, Web of Science Researcher ID: A-8719-2014

Евстафиева Светлана Владимировна — старший преподаватель кафедры компьютерных систем управления, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия, SPIN-code: 2222-4713, Scopus Author ID: 57191613874, Web of Science Researcher ID: A-8388-2014

Simulation of Drive Control System in the Educational Process

© | **R.L. Pushkov**
S.V. Evstafieva

roman.pushkov@gmail.com
svetlana.evstafieva@gmail.com

Moscow State Technological University “STANKIN”, Moscow, Russia

The most common drive control systems are built according to the principle of a multi-loop control system, which includes: current loop, speed loop, and position loop. The control system is subordinate in its type, i.e. control loops are one inside the other. Such a control system has a number of advantages, such as: ease of calculation and adjustment — the system is divided into a number of contours, each circuit includes a regulator, by giving which certain dynamic properties standard characteristics are obtained, while the adjustment in the process of setting up the system is carried out, starting with the internal circuit; convenience of limiting the limit values of intermediate coordinates of the system; the ability to optimally adjust the regulation of each variable, both in statics and in dynamics.

The article deals with issues related to teaching students how to configure and simulate modern drives. The subordinate control system is considered on the basis of the SINAMICS S120 drive manufactured by SIEMENS with the 1FK7061-7AF71-1FH0 engine and the controller — SIMOTION D435. As part of studying the drive configuration, experimental studies of the control system with the engine are carried out, then the control system is modeled and the results obtained are compared.

Experimental studies are carried out using a diagnostic system that is part of the drive control software and the top-level controller — Simotion SCOUT. This system allows for qualitative and quantitative analysis of the characteristics of the drive without special equipment, providing a large variety of input diagnostic signals. Simulation modeling was carried out in the simulation environment of dynamic systems Simulink, which is part of the engineering and scientific computing system MATLAB.

In the process, logarithmic amplitude and phase-frequency characteristics are taken, as well as graphs of the transition process. At the same time, to perform the work, it is necessary to pre-configure the drive. The drive can be configured in automatic mode — this possibility exists in the software in question, however, you can also adjust the settings with the optimization of any parameter manually. In this case, it will be necessary to sequentially adjust the control loops, starting from the internal one, setting the parameters of regulators and filters.

The comparison of the obtained results is carried out using the MATLAB system — the obtained simulation results in the Simulink environment and the results of experimental studies are plotted on graphs.

Keywords: *drive simulation, drive parameter setting, filter, PID controller, transition process, Bode diagram*

References

- [1] Bushuev V.V., Evstafieva S.V., Molodtsov V.V. Modelirovanie konturov upravlenija sledyaschego privoda podachi. *STIN*, 2016, № 3, pp. 7–14.
- [2] Bushuev V.V., Evstafieva S.V., Molodtsov V.V. Control loops of a supply servo drive. *Russian Engineering Research*, 2016, vol. 36, no. 9, pp. 774–780.
- [3] Uyosmov A.I. *Logicheskie osnovy metoda modelirovaniya*. Moscow, Mysl', 1971, 311 p.
- [4] Terekhov V.M., Osipov O.I. *Sistemy upravleniya elektroprivodov: ucheb. dlya vuzov*. Moscow, Izdatelskij centr "Akademiya", 2005, 304 p.
- [5] *Sledyaschie privody: v 3 t. 2-e izd., pererab. i dop. / pod red. B.K. Chemodanova. T. 2: Elektricheskiye sledyaschie privody*. Moscow, Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2003, 880 p.
- [6] Evstafieva S.V., Molodtsov V.V. Modelirovanie sledyaschego privoda podachi sovremennykh Stankov s CHPU. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye*, 2010, № 9, pp. 37–44.
- [7] Sokolovskij G.G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem: ucheb. dlya vuzov*. M.: Izdatelskij centr "Akademiya", 2006. 272 pp.
- [8] *SIMOTION SCOUT Configuration Manual*. [Electronic resource]. URL: https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/27002825/SCOUT_en-US.pdf
- [9] Haykin S. *Adaptive Filter Theory*. 4rd Edition. Paramus, NJ: Prentice-Hall, 2001
- [10] German-Galkin S.G. *MATLAB & Simulink*. *Proyektirovaniye mekhatronnykh system na PK*. SPb.: KORONA-Vek, 2008, 368 p.
- [11] Visioli A. *Practical PID Control*. London: Springer, 2006, 310 p.
- [12] Astroem K., Hagglund T. *PID Controllers. Theory, Design and Tuning*, Research Triangle Park, NC: Intern. Soc. of Automation (ISA), 1995. 343 pp. 2nd edition.
- [13] Astrom K.J., Hagglund T. *Advanced PID Control*, ISA — The Instrumentation, Systems, and Automation Society (August 15, 2005), 461 p.
- [14] Mikhailov O.P. *Dinamika elektromekhanicheskogo privoda metallorzechuskhikh stankov*. Moscow, Mashinostroeniye, 1989, 224 p.
- [15] Podurayev Yu.V. *Mekhatronika: osnovy, metody, primeneniye: ucheb. posobiye dlya studentov vuzov*. Moscow, Mashinostroeniye, 2006, 256 p.

Information about authors:

Pushkov R.L. — senior lecturer computer control system department, Moscow State Technological University "STANKIN", Moscow, Russia, SPIN-код: 9642-6371, Scopus Author ID: 56021436700, Web of Science Researcher ID : A-8719-2014/

Evstafieva S.V. — senior lecturer computer control system department, Moscow State Technological University "STANKIN", Moscow, Russia, SPIN-код: 2222-4713, Scopus Author ID: 57191613874, Web of Science Researcher ID: A-8388-2014

УДК 51-7

Обучение студентов использованию нейросетевых технологий в моделировании сложных технических объектов

© | Марина Геннадиевна Семененко

msemenenko@mail.ru

КФ РАНХиГС, Калуга, Россия

Современные технологии и методы прогнозирования состояния и управления сложными техническими объектами предполагают знакомство с современными математическими методами, обучение которым должно начинаться в вузе. В связи с развитием современных методов управления представляется крайне необходимым дать студентам общее представление и навыки применения к моделированию сложных технических объектов нейросетевых и облачных технологий с использованием современных систем вычислительной математики. Искусственные нейронные сети (ИНС) широко используются для решения как инженерных, так и научных задач. Поскольку они оказались весьма эффективным средством обработки информации, постоянно делаются попытки расширить область их применения или найти новые принципы их построения и работы. Поэтому знакомство студентов как с теоретическими основами построения ИНС, так и с возможностью их практического применения представляется чрезвычайно важным аспектом обучения инженеров. В данной работе обсуждается задача внедрения современных методов прогнозирования и моделирования сложных технических систем на основе нейросетевого подхода в процесс обучения студентов. В качестве примера рассмотрена задача решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) в нейросетевом базисе, которая имеет большое практическое применение. В частности, решение системы дифференциальных уравнений может быть существенной частью патентов. Рассмотрена методика построения нейронной сети для решения данной задачи на базе подсистемы визуального моделирования Simulink (MATLAB). Приведен пример решения системы ОДУ и проведено сравнение с аналитическим решением. В качестве альтернативной среды визуального моделирования также можно использовать бесплатный аналог MATLAB — систему Scilab. Проведен сравнительный анализ преимуществ и недостатков MATLAB и Scilab.

Ключевые слова: обыкновенные дифференциальные уравнения, нейросетевой базис, MATLAB, Simulink, Scilab

Введение. Современные технологии и методы прогнозирования состояния и управления сложными техническими объектами предполагают знакомство с современными математическими методами, обучение которым должно начинаться в вузе. Как отмечают многие преподаватели [1], такое обучение часто требует пересмотра стандартных методик преподавания. В современных условиях не только нецелесообразно, но и практически невозможно сохранить содержание даже классических математических курсов без учета возможностей современных систем вычислительной математики. Причем эти проблемы касаются не только технических, но и гуманитарных вузов.

В связи с развитием современных методов управления представляется крайне необходимым дать студентам общее представление и навыки применения к моделированию сложных технических объектов нейросетевых и облачных технологий с использованием современных систем вычислительной математики.

В данной работе рассмотрено построение нейронной сети для решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений в подсистеме Simulink системы MATLAB. Рассмотрены практические аспекты данной задачи, в частности, применительно к патентам.

Постановка задачи решения ОДУ в нейросетевом базисе. Искусственные нейронные сети (ИНС) широко используются для решения как инженерных, так и научных задач. Поскольку они оказались весьма эффективным средством обработки информации, постоянно делаются попытки расширить область их применения или найти новые принципы их построения и работы. В частности, нестандартной областью применения ИНС является решение систем ОДУ в нейросетевом базисе [2]. Эта задача может иметь большое практическое значение. Так, решение системы дифференциальных уравнений может быть существенной частью патентов определения динамических параметров системы [3]. Поэтому знакомство студентов как с теоретическими основами построения ИНС, так и с возможностью их практического применения представляется чрезвычайно важным аспектом обучения инженеров.

Базовые нелинейные элементы ИНС называются формальными нейронами. Как правило, формальный нейрон получает несколько входных сигналов x_i , суммирует их и выполняет нелинейное преобразование над этой суммой. Связи между нейронами характеризуются весами ω_{ij} . Нейроны могут также получать внешние сигналы X_k с весами ω'_{ik} . Таким образом, типичная операция, выполняемая нейроном в сети, — это преобразование вида

$$y = f \left(\sum_j \omega_{ij} x_j + \sum_k \omega'_{ik} X_k \right).$$

ИНС посылает y в качестве своего выходного сигнала другим нейронам или устройствам. Функцию f называют функцией активации. В общем случае функция активации может быть нелинейной.

Одно из основных свойств ИНС — способность к обучению. Обычно под обучением ИНС понимают процесс подбора весов ω_{ij} на «образцах» (паттернах) для того, чтобы добиться желаемых свойств отображения.

Рассмотрим систему n дифференциальных уравнений 1-го порядка, которую в матричном виде можно представить как

$$\mathbf{Y}'(\mathbf{x}) = \mathbf{A} \mathbf{Y}(\mathbf{x}), \quad (1)$$

где \mathbf{A} — квадратная матрица постоянных коэффициентов порядка n ; \mathbf{Y} — n -мерный вектор искомой функции аргумента \mathbf{x} .

Для метода Рунге — Кутты 1-го порядка (метод прямоугольников) решение системы (1) можно представить в виде:

$$\mathbf{Y}_{t+1} = \mathbf{Y}_t + h\mathbf{A}\mathbf{Y}_t = (\mathbf{E} + h\mathbf{A})\mathbf{Y}_t = \mathbf{B}_t\mathbf{Y}_t, \quad (2)$$

где h — шаг интегрирования; \mathbf{E} — единичная матрица порядка n ; элементами матрицы \mathbf{B} являются первые два члена разложения матричной экспоненты в степенной ряд.

Для системы двух уравнений выражение (2) принимает вид

$$y_{1t+1} = b_{11}y_{1t} + b_{12}y_{2t} = (1 + ha_{11})y_{1t} + ha_{12}y_{2t};$$

$$y_{2t+1} = b_{21}y_{1t} + b_{22}y_{2t} = ha_{21}y_{1t} + (1 + ha_{22})y_{2t}.$$

Схема соединения нейронов, реализующая решение системы, показана на рис. 1. Здесь Ne_1 и Ne_2 — нейроны, участвующие в операции интегрирования. Выходом сети являются сигналы y_1 и y_2 . Входные сигналы g_{10} и g_{20} задают начальные условия решения системы уравнений. Функция активации у обоих нейронов — симметричная линейная функция.

Для реализации схем, аналогичных показанной на рис. 1, удобно использовать системы визуального моделирования, например Simulink (MATLAB). Главное удобство систем типа Simulink заключается в том, что нет необходимости в написании какого-либо программного кода, который генерируется автоматически.

Отметим, что существует бесплатный аналог Simulink в системе вычислительной математики Scilab, которая также является полностью бесплатной и имеет открытый программный код. Файлы MATLAB (Simulink), как правило, без проблем открываются в Scilab.

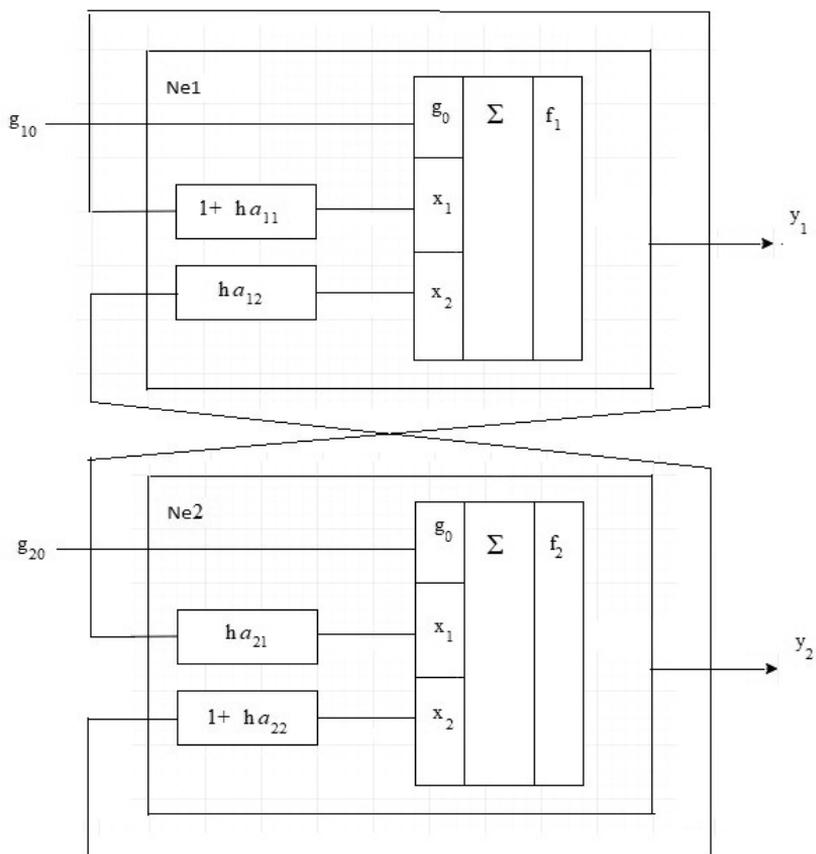


Рис. 1. Схема ИНС для решения системы ОДУ

Весомым преимуществом MATLAB является возможность получить код автоматически сгенерированной программы на языке Си с помощью подсистемы Simulink Coder и использовать его в контроллерах реальных технических устройств.

Пример решения системы ОДУ в нейросетевом базисе. В качестве примера разработаем ИНС для решения системы уравнений

$$y_1' = y_2;$$

$$y_2' = -y_1$$

при начальных условиях: $y_1(0) = -1$, $y_2(0) = 0$, $t = 0 \dots 2\pi$.

Блок-схема решения системы в нейросетевом базисе, созданная в среде Simulink, показана на рис. 2.

При построении схемы используются блоки из меню Neural Network Blockset: netprod, netsum (Net Input Functions), purelin (Transfer Functions). Для визуализации результатов используется блок Scope (Sinks), для задания шага интегрирования — блок Constant (Sources), для установки начальных значений — блок Unit Delay (Discrete). В окне задания параметров блока Unit Delay начальное значение Initial value нужно задать равным -1 , а значение Sample time — равным h . Для показа двух графиков в блоке Scope использован блок Mux (Signals & Systems).

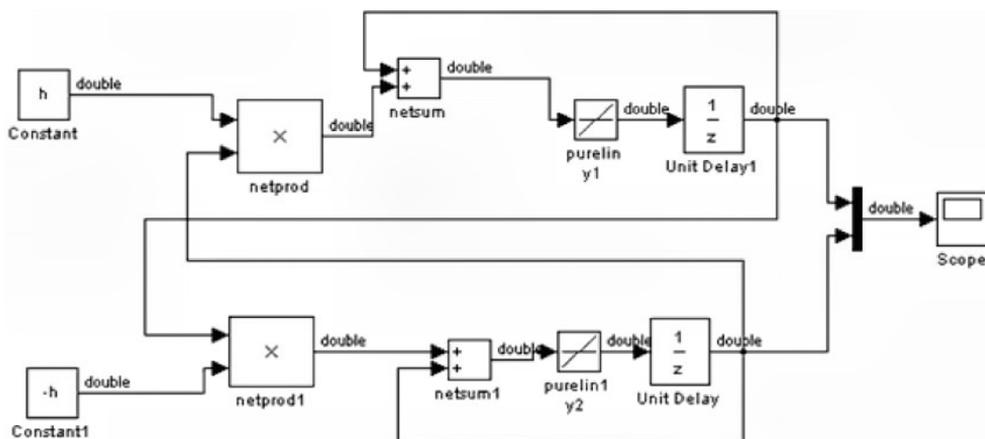


Рис. 2. Решение системы ОДУ в Simulink

После открытия блока Scope можно увидеть графики решения задачи.

В [4] описан алгоритм решения систем дифференциальных уравнений на основе нейросетевого подхода. Вычисления продемонстрировали более высокую скорость по сравнению со стандартными алгоритмами.

Заключение. Результаты данной работы показывают, что благодаря использованию современных вычислительных систем и включению их облачных версий, можно повысить эффективность обучения студентов и научить пользоваться ими в дальнейшей практической деятельности.

Рассмотренные подходы можно также использовать в научной и инженерной практике.

Литература

- [1] Соколов Д.Д. Наследие Фурье и проблемы модернизации курса математического анализа для физиков. *Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та*, 2018, № 3, с. 1830101-1–1830101-6.
- [2] Lazovskaya T.V., Tarkhov D.A., Vasilyev A.N. Parametric neural network modeling in Engineering. *Recent Patents on Engineering*, 2017, vol. 11, no 1, pp. 10–17.
- [3] Винокуров В.В., Воробьев А.В., Залесский С.Е., Качанов Б.О., Куликов В.Е. *Способ определения координат летательного аппарата*. Патент России № 2264598. 2005.
- [4] Semenenko M.G. Visual modelling electrochemical processes. *Journal of Power Sources*, 2009, vol. 191, no 3, pp. 91–96.

Сведения об авторе:

Семеновна Марина Геннадиевна — канд. физ.-мат. наук, доцент, кафедра ЕНиМД, Калужский филиал РАНХиГС, Калуга, Россия

Teaching the Students in Use of Neural Network Technologies in Modelling Complex Technical Objects

© | M.G. Semenenko

msemenenko@mail.ru

RANEPА, Kaluga branch, Kaluga, Russia

Modern technologies and methods of forecasting the state and management of complex technical objects involve familiarity with modern mathematical methods. And it seems essential to provide students with a general understanding and skills how to apply neural networks and cloud technologies using modern systems of computational mathematics. Artificial neural networks (INS) are widely used to solve both engineering and scientific problems. Therefore, the familiarity of students with both the theoretical foundations of INS construction and the possibility of their practical application seems to be an extremely important aspect of the training of engineers. This paper discusses the problem of introducing modern methods of forecasting and modeling complex technical systems based on the neural network approach into the process of student education. As an example, the problem of solving the system of ordinary differential equations (ODE) in a neural network basis is considered, which has a great practical application. In particular, solving a system of differential equations may be an essential part of patents. The method of neural network construction for solving this problem on the basis of Simulink visual modeling subsystem (MATLAB) is considered. An example of an ODE system solution is provided and compared to an analytical solution. A free Matlab analogue, the Scilab system, can also be used as an alternative visual modeling environment. Comparative analysis of advantages and disadvantages of Matlab and Scilab was carried out.

Keywords: ordinary differential equations, neural network basis, Matlab, Simulink, Scilab.

References

- [1] Sokoloff D.D. Heritage Fourier and problems of modernization of the course of mathematical analysis for physicists. *Memoirs of the Faculty of Physics*, 2018, № 3, pp. 1830101–1–1830101-6.
- [2] Lazovskaya T.V., Tarkhov D.A., Vasilyev A.N. Parametric neural network modeling in Engineering. *Recent Patents on Engineering*, 2017, vol. 11, no 1, pp. 10–17.

- [3] Vinokrov V.V., Vorobyev A.V., Zalesky S.E., Kachanov B.O., Kulikov V.E. *Method of determining coordinates of aircraft*. Patent of Russia № 2264598. 2005.
- [4] Semenenko M.G. Visual modelling electrochemical processes. *Journal of Power Sources*, 2009, vol. 191, no 3, pp. 91–96.

Information about autor:

Semenenko M.G. — candidat of Physics and Mathematics; Professor Assistant; RANEPА, Kaluga branch; Kaluga, Russia

УДК 004.94

Методика моделирования встраиваемой системы управления на базе программируемого контроллера

© | Ю.В. Цымай

m-walua@yandex.ru

Политехнический колледж городского хозяйства, Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрен метод моделирования встраиваемой системы управления на базе программируемого контроллера. Метод предполагается использовать в процессе обучения в сфере среднего профессионального образования (СПО) для студентов специальностей «Компьютерные системы и комплексы», «Радиоэлектроника», «Радиоаппаратостроение».

Работа носит междисциплинарный характер, находится на стыке дисциплин «Математика», «Микропроцессорная техника», «Периферийные устройства», «Моделирование и проектирование систем», «Автоматизация производства», «Системы автоматизированного проектирования».

Проанализированы основные проблемы моделирования встраиваемых систем. Выявлена и обоснована необходимость ограничения степени сложности модели в соответствии с базовым уровнем навыков и знаний контингента обучающихся.

Предложено частичное моделирование структуры. Описаны ключевые этапы и особенности построения модели с использованием классического системного подхода «от общего к частному». Приведено обоснование установленных ограничений, указаны минимально необходимые результаты этапа структурного моделирования.

Выполнены оценка точности абстрактной модели и проверка принятых допущений с привлечением математических методов. Определена дополнительная информация о системе с помощью программной модели. В результате синтеза полученных данных описан точный алгоритм функционирования моделируемой системы. Показаны узлы и параметры модели, требующие уточнения. Проанализирован процесс моделирования с численным и графическим подтверждением результатов.

В статье приведены необходимые схемы, алгоритмы, графики зависимостей для уточнения и наглядной реализации предложенного метода моделирования.

На основе анализа имеющихся в распоряжении автора аппаратных и программных средств установлена степень точности и рентабельности используемого метода моделирования встраиваемой системы управления.

Ключевые слова: моделирование, контроллер, абстрактная модель, структурная модель, численные методы

В системе образования в последние несколько лет пристальное внимание уделяется практикоориентированным задачам. Данная тенденция проявляется в заданиях на чемпионатах WorldSkills, при проверке качества обучения, во время аккредитаций учебных заведений. Образовательный процесс необходимо строить таким образом, чтобы преобладали в первую очередь прикладные задачи.

Одной из таких задач является проектирование встраиваемых управляющих систем на базе программируемых контроллеров. Задача считается выполненной, если

устройство спроектировано и собрано в соответствии с заявленной схемой и моделью поведения, а результаты работы оценены контрольными приборами как удовлетворяющие предъявляемым требованиям.

Процесс моделирования и сборки трудоемкий и многоступенчатый, обычно выполняется на двух последних курсах обучения и предполагает создание функционирующего устройства с возможностью программирования, которое способно управлять объектами различной степени сложности.

В данной статье будут рассмотрены начальные этапы моделирования и оценена важность полученных данных для дальнейшего процесса сборки устройства.

В качестве тестируемого образца рассматривается простейшая система на базе программируемого контроллера для управления мобильной метеостанцией. Для моделирования процессов используются функция определения текущего времени, процессы задания требуемой исходной величины атмосферного давления, слежения и ввода данных в память системы, сравнение результатов с заданными значениями и индикация величины отклонения.

Опираясь на теорию моделирования автоматических систем, основные исходные данные о проектируемой системе получаем с помощью абстрактной модели [1, 2].

Такой формализованный подход необходим для установления основных принципов архитектурной организации устройства. А абстракция позволит не учитывать на начальном этапе моделирования неизбежные конфликты между аппаратной и программной составляющей. Таким образом, будет ограничена степень сложности модели.

В соответствии с установленными требованиями к функциям проектируемого устройства его абстрактную модель можно представить в виде цифрового автомата с определенным числом входных сигналов X_i , выходных сигналов Y_j и состояний A_k (рис. 1) [3, 4].

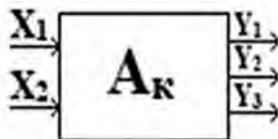


Рис. 1. Абстрактная модель программируемой системы управления мобильной метеостанцией:

X_1 — входное значение атмосферного давления; X_2 — измерение текущего времени; Y_1 — вывод информации о текущем значении времени; Y_2 — результат индикации атмосферного давления; Y_3 — результат индикации величины отклонения от заданного значения; A_0 — система в выключенном состоянии; A_1 — считывание заданной величины атмосферного давления; A_2 — ввод значения атмосферного давления с барометра; A_3 — сравнение величины атмосферного давления, введенного с барометра, с заданным значением атмосферного давления; A_4 — индикация текущего момента времени; A_5 — индикация текущего значения атмосферного давления; A_6 — индикация величины отклонения величины атмосферного давления от заданного значения; A_7 — ожидание входных параметров

Для детализации и обоснования включения некоторых параметров опишем проектируемую систему с помощью алфавита двоичной системы счисления (табл. 1). В таблице 2 приведены варианты поведения системы, которые в дальнейшем можно использовать для структурного и программного моделирования.

Для проверки правильности логики поведения системы при заданных параметрах используем метод графов. Он позволит пошагово отследить предполагаемые действия и при необходимости добавить или исключить некоторые состояния [5–7].

Таблица 1

Состояния моделируемой системы

Вариант события	X_1	X_2	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	Y_1	Y_2	Y_3
1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
3	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1
6	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
7	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1

Таблица 2

Варианты поведения моделируемой системы

Вариант события	Описание события
1	Система бездействует (выключена)
2	Не задано атмосферное давление и текущее время, результат — нет индикации
3	Не задано атмосферное давление, измерено текущее время, результат — индикация текущего времени
4	Задано, но не считано атмосферное давление, текущее время не измерено, результат — нет индикации
5	Задано и считано атмосферное давление, текущее время не измерено, введено значение атмосферного давления с барометра, результат — сравнение значений и вывод текущего атмосферного давления, также вывод величины отклонения от заданного значения
6	Задано, но не считано атмосферное давление, измерено текущее время, результат — индикация текущего времени
7	Задано и считано атмосферное давление, измерено текущее время, введено значение атмосферного давления с барометра, результат — сравнение значений атмосферного давления, вывод текущего атмосферного давления, вывод текущего времени, а также вывод величины отклонения от заданного значения

Исходным состоянием будем считать A_0 . Для построения будем использовать направленные графы, это позволит избежать двоякой интерпретации некоторых действий системы. Но стоит отметить, что для некоторых случаев моделирования с большим числом входных, выходных параметров и состояний удобнее использовать ненаправленные графы. Это связано с тем, что при получении численных значений модели расчетная цепочка данных слишком велика и результат крайне неудобно в дальнейшем соизмерять с реальными параметрами испытания готового устройства [8, 9].

В нашем случае выбор обоснован малым количеством исходных данных, принятых для моделирования, функциональной простотой проектируемого устройства и стремлением к упрощению алгоритма управляющей программы.

Модель проектируемой системы в виде графов отражает ее поведение при нормальной подаче сигнала. Наличие аварийной ситуации здесь не предусмотрено. Под

аварийной ситуацией подразумевается несрабатывание одного из состояний. Этот вариант развития событий предполагается учитывать при аппаратном и программном моделировании, которые в рамках данной статьи практически не затрагиваются. Все графы будем считать равнонагруженными (рис. 2).

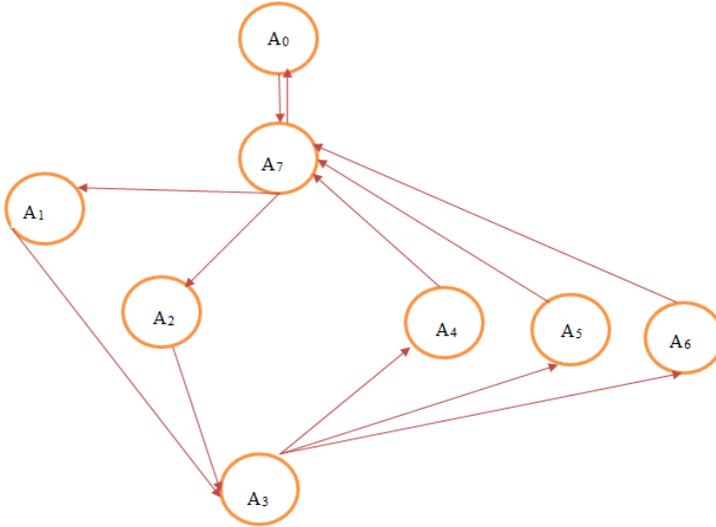


Рис. 2. Представление абстрактной модели методом графов

Для проверки нужного количества идентифицированных начальных параметров системы определим мощность явно минимальных конечных автоматов по формуле (1). Если $N_{КА} > 0$, то допущения приняты верно [10]:

$$N_{КА} = A_k^{X_i \cdot A_k} \prod_{i=0}^{k-1} (Y_j^{X_i} - k). \quad (1)$$

Для определения максимально возможной разрядности кода состояния используем формулу (2). В зависимости от желаемой точности расчетов и сложности модели можно определить разрядность для каждого кода или принять одно максимальное значение для всех состояний [11]:

$$L = \lceil \log_2 |A_k| \rceil. \quad (2)$$

Каждое состояние описывается по формуле

$$A_k = d_{ij} A_{k-1}, \quad (3)$$

где d_{ij} — вес графа, входящего в состояние A_k ; A_{k-1} — значение предыдущего состояния [11, 12].

При получении численных значений следует также учитывать, что на состояние A_k может влиять несколько предыдущих состояний.

Согласно теории графов, исходной точкой кодирования является состояние с наибольшим числом входных сигналов, т. е. A_7 . Состояния A_1 и A_2 равноценны, предполагают процесс сбора информации с датчиков, наиболее приближены к нулевой точке. Состояние A_3 наиболее нагруженное, активно при обработке данных, вес графа удваивается в связи с удаленностью от нуля. Состояния A_4, A_5, A_6 также равноценны, вес графа утроен, но код может соответствовать коду состояний A_1 и A_2 . Состояние A_0 наименее нагруженное, может кодироваться минимальным числом разрядов.

Таким образом, метод графов позволяет на начальном этапе моделирования не только уточнить параметры абстрактной модели, но и задать необходимую производительность системы. Определив размер возможного сигнала с помощью параметра d_{ij} и закодировав каждое из состояний, можно уже сейчас указать минимальные требования к аппаратной модели устройства. Выбрав на основании полученных данных управляющий контроллер, можно соотнести данные модели с реальной временной шкалой, которая будет соответствовать определенной тактовой частоте системы.

Одним из способов перехода от абстрактных данных к реальным является график соотношения коэффициента умножения, полученного по формуле (4), и коэффициента сложности системы, выбор которого основывается на данных табл. 3 [13, 14]:

$$k_{\text{ум}} = \frac{T}{\Delta}, \quad (4)$$

где T — тактовая частота управляющего контроллера, МГц; Δ — частота системной шины, МГц.

Таблица 3

Значение коэффициентов сложности $k_{\text{сл}}$

$k_{\text{сл}}$	Описание возможностей состояния системы
1	Ввод/вывод
2	Ввод/вывод, преобразование
3	Ввод/вывод, преобразование, сравнение
4	Ввод/вывод, преобразование, сравнение, расчет
5	Ввод/вывод, преобразование, сравнение, расчет, сложный расчет
6	Ввод/вывод, преобразование, сравнение, расчет, сложный расчет, представление с помощью системы координат X и Y
7	Ввод/вывод, преобразование, сравнение, расчет, сложный расчет, представление с помощью системы координат X и Y , трехмерное представление (X, Y, Z)
8	Ввод/вывод, преобразование, сравнение, расчет, сложный расчет, представление с помощью системы координат X и Y , трехмерное представление (X, Y, Z), анализ и преобразование

Для проектируемой модели были получены следующие параметры: $k_{\text{сл}} = 3$, $k_{\text{ум}} = 2$. График зависимости состояния системы от сложности задачи показывает диапазон эффективной работы в пределах установленных значений коэффициентов (рис. 3) [14, 15]. Для каждого состояния можно определить коэффициент сложности и, соответственно, объем необходимого ресурса системы обеспечения для нормальной производительности.

Зная параметры кодировок каждого из состояний, степень нагруженности графов, значение затрачиваемых ресурсов на реализацию состояний системы, тактовую частоту управляющего контроллера, можно построить временную диаграмму работы проектируемой системы без учета отклонений. Пример такой диаграммы частично представлен на рис. 4.

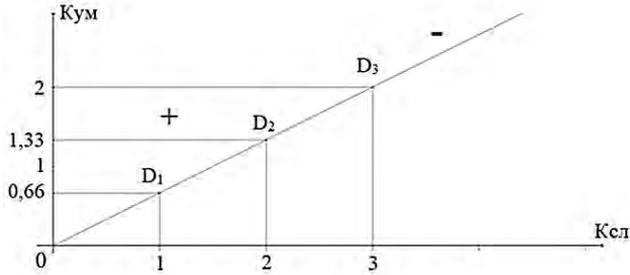


Рис. 3. Зависимость состояния системы от сложности задачи

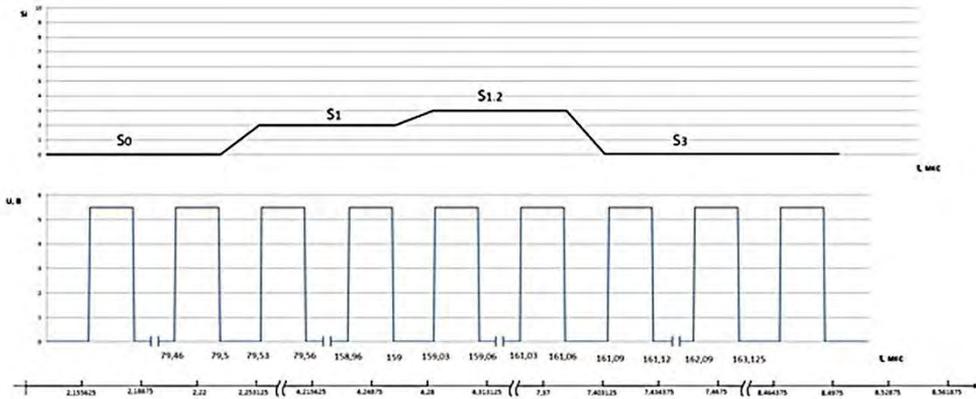


Рис. 4. Результаты абстрактного моделирования

Верхняя часть диаграммы показывает последовательность включения состояний системы S_0 , S_1 , S_2 , S_3 после их коррекции в соответствии с результатами аппаратной модели. Нижняя часть диаграммы отражает время работы системы в соответствии с синхронным импульсом.

Помимо вышесказанного, описанный процесс позволяет сформировать управляющую программу для контроллера, так как ее алгоритм фактически представлен средствами абстрактного моделирования. Исследования показали, что при проектировании систем аналогичной степени сложности полученные в результате абстрактного моделирования данные позволяют сформировать программную модель достаточной точности.

Литература

- [1] Данилов Н.Н. *Математическое моделирование радиотехнических систем*: учеб. пособие. Санкт-Петербург, Лань, 2016, 144 с.
- [2] Карпов Ю.Г. *Теория автоматов*: учебник для вузов. 1-е издание. Санкт-Петербург, Издат. дом «Питер», 2003, 208 с.
- [3] Захаров Н.Г., Рогов В.Н. *Синтез цифровых автоматов*: учеб. пособие. Ульяновск, УлГТУ, 2003, 136 с.
- [4] Савельев А.Я. *Прикладная теория цифровых автоматов*: учебник для вузов. Москва, Высшая школа, 1987, 272 с.
- [5] Баранов С.И. *Синтез микропрограммных автоматов (граф-схемы и автоматы)*. 2-е изд. перераб. и доп. Ленинград, Энергия, Ленингр. отделение, 1979, 232 с.
- [6] Воронин В.В. *Основы синтеза и диагностирования автоматов*: учеб. пособие. Хабаровск, Изд-во Хабар. гос. техн. университета, 2002, 235 с.
- [7] Мальцев Ю.Н., Петров Е.П. *Введение в дискретную математику. Элементы комбинаторики, теории графов и теории кодирования*. Москва, БУКИ, 2012, 214 с.
- [8] Камерон П., ван Линт Д. *Теория графов. Теория кодирования и блок-схемы*. Москва, Харвест, Астрель, Сова, 2011, 717 с.
- [9] Мелихов А.Н., Бернштейн А.С., Курейчик В.М. *Применение графов для проектирования дискретных устройств*. Москва, Наука, 2009, 304 с.
- [10] Остапенко А.Г. *Анализ и синтез линейных радиоэлектронных цепей с помощью графов*. Москва, Радио и связь, 2010, 280 с.
- [11] Зыков А.А. *Теория конечных графов*. Новосибирск; Москва, Наука, 2011, 544 с.
- [12] Антипенский Р. *Схемотехническое проектирование и моделирование радиоэлектронных устройств*. Москва, Техносфера, 2007, 128 с.
- [13] Афонин В.В., Федосин С.А. *Моделирование систем*: учеб.-практич. пособие. Москва, Интуит, 2016, 231 с.
- [14] Воробьев С.Н. *Статистическое моделирование информационных систем*: учеб. пособие. Ч. 1. Санкт-Петербург, ГУАП, 2010, 152 с.
- [15] Колбанев М.О., Яковлев С.А. *Модели и методы оценки характеристик обработки информации в интеллектуальных сетях связи*. Санкт-Петербург, Изд-во СПбГУ, 2002, 230 с.

Сведения об авторе:

Цымай Юлия Валериевна — магистр техники и технологии, преподаватель специальных дисциплин, отделение информационных технологий, СПб ГБПОУ «Политехнический колледж городского хозяйства», Санкт-Петербург, Россия, SPIN-code: 3235-9139, ORCID: 0000-0002-9795-7137.

Method of Modeling the Embedded Control System Based on the Programmable Controller

© | Yu.V. Tsumay

m-walua@yandex.ru

SPb Polytechnic College of municipal economy, St. Petersburg, Russia

The method of modeling the embedded control system based on the programmable controller is considered. The method is supposed to be used in the process of training in the field of secondary vocational education (SVE) for students majoring in “Computer systems and complexes”, “radio Electronics”, “radio equipment”.

The work is interdisciplinary, written at the intersection of disciplines “Mathematics”, “Microprocessor technology”, “Peripherals”, “Modeling and design of systems”, “automation of production”, “computer-aided design”.

The main problems of modeling embedded systems are analyzed. The need to limit the degree of complexity of the model in accordance with the basic level of skills and knowledge identified and justified of the contingent of students.

A partial modeling of the structure is proposed. The key stages and features of the model construction using the classical system approach “from General to particular” are described. The substantiation of the established restrictions is given, the minimum necessary results of the structural modeling stage are indicated.

The accuracy of the abstract model is evaluated and the assumptions are verified using mathematical methods. Additional information about the system is determined using the software model. As a result of synthesis of the received data the exact algorithm of functioning of the silated system is described. The nodes and parameters of the model that require refinement are shown. The modeling progress with numerical and graphical confirmation of the results is analyzed.

The article describes the necessary schemes, algorithms, dependency graphs for refinement and visual implementation of the proposed modeling method.

Based on the analysis of the available hardware and software, the degree of accuracy and profitability of the used method of modeling the embedded control system is established.

Keywords: modeling, controller, abstract model, structural model, numerical methods

References

- [1] Danilov N.N. *Mathematical modeling of radio engineering systems*: textbook. St. Petersburg, DOE, 2016, 144 p.
- [2] Karpov Y.G. *Theory of machines*: Textbook for universities. 1st edition. St. Petersburg, Izdat. house PETER, 2003, 208 p.
- [3] Zakharov N.G., Rogov V.N. *The synthesis of digital machines*: textbook. Ulyanovsk, ULGTU, 2003, 136 p.
- [4] Saveliev A.I. *Applied theory of digital machines. Textbook for universities*. Moscow, Vysshaya SHKOLA, 1987, 272 p.
- [5] Baranov S.I. *Synthesis of microprogramming automata (graph-schemes and machines)*. 2 ed. pererab. I DOP. Leningrad, Energy, lenigr. Department, 1979, 232 p.
- [6] Voronin V.V. *Basis for synthesis and diagnostics of machines*: textbook. Khabarovsk, Publishing house Habar. state tech. University, 2002, 235 p.
- [7] Maltsev Yu.N., Petrov E.P. *Introduction to discrete mathematics. Elements of combinatorics, graph theory and coding theory*; BUKI. Moscow, 2012, 214 p.
- [8] van Lint, D. P. *The Theory of graphs. Coding theory and flowchart*. Harvest, Astrel, Sovamoscov, 2011, 717 p.
- [9] Melikhov A.N., Bernstein A.S., Kureychik V.M. *The use of graphs for the design of discrete devices; the Main edition of the physical and mathematical literature of the publishing house. “Nauka”*, Moscow, 2009, 304 p.
- [10] Ostapenko A.G. *Analysis and synthesis of linear electronic circuits by means of graphs*. Moscow, Radio and communication, 2010, 280 p.
- [11] Zykov A.A. *Finite graph Theory*. Novosibirsk, Moscow, Nauka, 2011, 544 p.
- [12] Antipensky R. *Circuit design and modeling of electronic devices*. Moscow, Technosphere, 2007, 128 p.

- [13] Afonin V.V. *Modeling of systems: educational and practical manual* / V.V. Afonin, S.A. Fedosin. Moscow, Intuit, 2016, 231 p.
- [14] Vorobyov S.N. *Statistical modeling of information systems: textbook. 1* / S.N. Sparrows. St. Petersburg, GUAP, 2010, 152 p.
- [15] olbanev M.O., Yakovlev S.A. *Models and methods of evaluation of information processing characteristics in intelligent communication networks: monograph*. St. Petersburg, Publishing House Of St. Petersburg State University. 2002, 230 p.

Information about author:

Tsymay Yu.V. — magister of engineering and technology, lecturer of special disciplines, the Department of information technology, SPb Polytechnic College of municipal economy, St. Petersburg, Russia, SPIN-code: 3235-9139, ORCID: 0000-0002-9795-7137

УДК 621.396.67.012.12

Моделирование алгоритма коррекции кластеров спутниковой МГЗА при смещении наземных маяков из центров локальных зон покрытия

© Ю.И. Чони¹

П.В. Романов¹

В.В. Мочалов²

tchoni@rambler.ru

greenfreq@gmail.com

mvv115@mail.ru

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

² АО «Информационные спутниковые системы» им. академика М.Ф. Решетнёва», Железногорск, Россия

Исключительно жесткие требования, которые предъявляются к стабильности электродинамических характеристик крупногабаритных МГЗА спутникового базирования, порождают интерес к адаптивному регулированию весовых коэффициентов возбуждения кластеров, формирующих соответствующие лучи. В одном из вариантов построения системы компенсация эксплуатационных отклонений рефлектора от номинального профиля осуществляется за счет использование наземных маяков, которые расположены в центре соответствующей локальной зоны покрытия и «фокусируют» соответствующий луч на себя. При этом текущее состояние рефлектора отображается в совокупности сигналов, принятых кластером, что и позволяет перестроить весовой вектор кластера для компенсации деформаций рефлектора. Представляет интерес сохранить эти функции при произвольном расположении маяка в пределах локальной зоны. Для этого необходимо разработать алгоритм пересчета сигналов кластера в те сигналы, которые были бы при несмещенном положении маяка, и аттестовать этот алгоритм в имитационном режиме в связи с дороговизной реального эксперимента. Обсуждается идеология алгоритма пересчета и эффективная (по временным затратам) электродинамическая модель расчета лучей и фокальных пятен крупного рефлектора. Приводятся результаты имитационного моделирования, подтверждающие эффективность разработанного алгоритма пересчета. Они включают расчет характеристик для серии типичных ситуаций, а также статистические оценки точности ориентации лучей при варьируемом смещении маяка из центра локальной зоны.

Ключевые слова: крупногабаритная МГЗА, электродинамическая модель, имитационное моделирование, наземные маяки, алгоритм стабилизации лучей

Введение. Важнейшим элементом современных спутниковых систем связи высокой пропускной способности является крупногабаритная многолучевая гибридная зеркальная антенна (МГЗА), обеспечивающая предельно возможный энергетический потенциал. Формируя сотни узких лучей шириной в доли градусов, такие антенны покрывают зону обслуживания в пределах требуемого контура. В условиях эксплуатационных нагрузок геометрия МГЗА (профиль рефлектора, главным образом) претерпевает изменения. Даже при малом их уровне это приводит к смещению лучей, снижению коэффициента усиления и ухудшению электромаг-

нитной совместимости [1–17]. Единственным вариантом стабилизации лучей МГЗА, выполненной по схеме «один облучатель — один луч», служила механическая система компенсации текущих деформаций. В современных МГЗА лучи формируются кластерами облучателей, благодаря чему открывается возможность поддерживать номинальное состояние лучей путем адаптивной коррекции векторов весовых коэффициентов (ВВК) кластеров [13, 14]. При наличии на борту КА системы мониторинга состояния рефлектора [7, 8] может быть произведен расчет ВВК под текущее состояние МГЗА, что связано с решением сложной 3D электродинамической задачи. Альтернативным вариантом служит система, включающая наземные маяки. При этом ВВК формируются пропорционально комплексно сопряженным значениям принятых от маяка сигналов, за счет чего обеспечивается фокусировка луча на соответствующий маяк [4, 6, 11, 12]. Не всегда может оказаться возможным или удобным установить маяк непосредственно в центре соответствующей зоны обслуживания. В настоящей работе обсуждается алгоритм восстановления необходимых ВВК кластеров по сигналам от наземных маяков, значительно смещенных от центра соответствующей зоны обслуживания.

Моделирование крупногабаритной МГЗА. Строгий электродинамический расчет диаграммы направленности (ДН) зеркала размером порядка ста длин волн требует значительных временных затрат, которые кратно возрастают при расчете поля маяка на антенном полотне. Нами используется упрощенная модель, приемлемость которой обусловлена несколькими факторами. Во-первых, МГЗА строится по офсетной схеме (рис. 1) с длиннофокусным рефлектором, благодаря чему отпадает необходимость рассчитывать рассеяние поля полотном антенной решетки (АР) и деполяризацию поля при отражении от рефлектора. Во-вторых, диапазоны рабочих углов по углу места θ и азимуту φ ограничены значениями $\pm 3,6^\circ$ и $\pm 1,8^\circ$ соответственно.

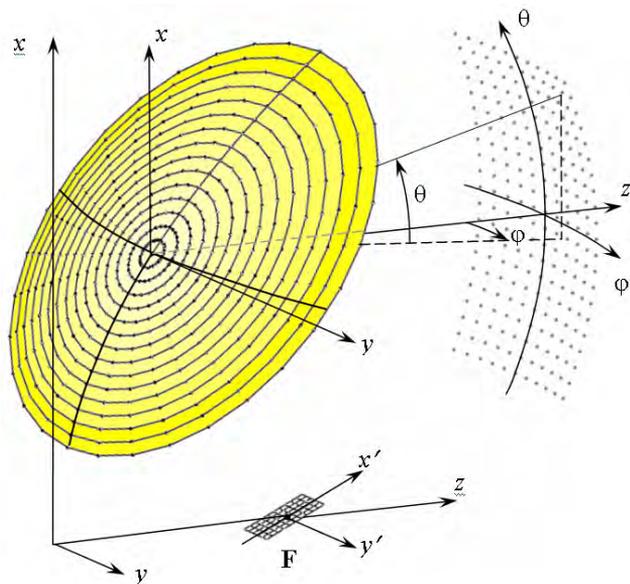


Рис. 1. Геометрия МГЗА

В силу выше сказанного точки (x_m, y_m, z_m) рефлектора можно считать источниками сферических волн от токов I_m , возбужденных падающей плоской волной с направления (θ, φ) . Пусть $r_{m,n}$ — расстояние от m -й точки рефлектора до n -го элемента АР. Тогда поле в точке расположения элемента есть сумма волн

$$\begin{aligned} E_n &= \sum_m I_m e^{-jkr_{m,n}} / r_{m,n}; \\ I_m &= \exp\{jk[x_m \sin \theta + \cos \theta(y_m \sin \varphi + z_m \cos \varphi)]\}. \end{aligned} \quad (1)$$

Как обычно, k — это волновое число $2\pi/\lambda$.

Для сокращения времени вычислений при старте программы формируется двумерный массив комплексных коэффициентов передачи $\exp(-jkr_{m,n})/r_{m,n}$ от десятков тысяч точек m рефлектора до сотен точек n АР и затем используется при дальнейших вычислениях.

Сопоставление с расчетами в среде Tigras Grasp. Для аттестации описанной модели МГЗА были осуществлены сопоставительные вычисления в среде Tigras Grasp, которая является мощным инструментом для расчета зеркальных антенн на основе метода физической оптики. Геометрия МГЗА соответствовала типичным для практики значениям: фокусное расстояние $F = 7,4$ м, диаметр рефлектора — 12 м, клиренс (зазор от оптической оси Oz) составлял 3 м. Расчеты проводились для длины волны $\lambda = 15$ см. Облучатель находится в фокусе.

Моделировались деформации рефлектора $\delta z = dZ(\rho/R_s)^2 \cos^2(\alpha/2)$, которые искажали номинальный профиль $z = (x^2 + y^2)/(4F) + \delta z$. Здесь ρ, α — полярные координаты точки рефлектора (угол α отсчитывается от оси Ox). Таким образом, радиальные ребра рефлектора изгибаются по оси z пропорционально ρ^2 , а угловая зависимость $\cos^2(\alpha/2)$ смещений означает, что у верхнего ребра край рефлектора отклоняется на величину dZ , у горизонтальных ребер — на $dZ/2$, нижний край рефлектора не смещается. Таким образом, деформации напоминают «козырек» со смещением верхней точки рефлектора на dZ .

Оценка отклонений амплитудных ДН (АДН) проводилась согласно [10]: по формуле $\varepsilon^2 = 1 - |(A_G(\theta), A_M(\theta))|^2 / (\|A_G(\theta)\|^2 \|A_M(\theta)\|^2)$. Здесь $A_G(\theta)$ — АДН, получаемая в Grasp, $A_M(\theta)$ — АДН по модельной программе; $(A_G(\theta), A_{\text{МГЗА}}(\theta))$ — скалярное произведение АДН.

На рис. 2 показаны угломестные сечения АДН при четырех деформациях рефлектора.

Обратите внимание на то, что под рисунком приведены значения СКО ε , а не ε^2 . Таким образом, расчеты подтверждают высокую точность моделирования крупногабаритной МГЗА в рамках модели, соответствующей формулам (1).

Алгоритм пересчета сигналов смещенного кластера. Известно [18], что при облучении параболического рефлектора плоской волной с направлений, близких к оптической оси, отраженные от рефлектора вторичные волны складываются в фазе в некоторой точке у фокуса F , формируя фокальное пятно $E(x', y', \theta, \varphi)$ на плоскости (x', y') АР. Положение его максимума и отчасти рельеф зависят от направления (θ, φ) облучения рефлектора. ДН элементов АР — это слабонаправленная ДН, и сигналы $S(x', y')$, принятые элементами АР, пропорциональны полю $E(x', y', \theta, \varphi)$. При облучении рефлектора с направления $(\theta + \Delta\theta, \varphi + \Delta\varphi)$ максимум пятна $S(x', y')$ смещается и соответствующие зависимости $\Delta x^{(\max)} = f_x(\theta, \varphi)$, $\Delta y^{(\max)} = f_y(\theta, \varphi)$ известны.

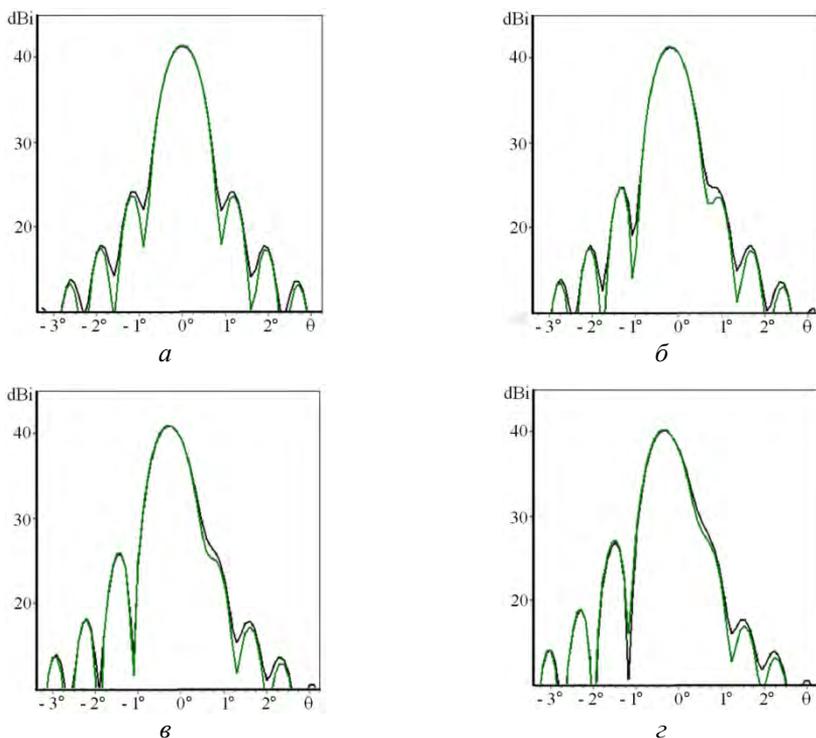


Рис. 2. АДН, рассчитанные в Grasp (зеленая линия) и по Delphi-программе (черная линия):
 а — $dZ=0$, $\epsilon=0,0365$; б — $dZ=2,5$ см, $\epsilon=0,0361$; в — $dZ=5$ см, $\epsilon=0,0367$; г — $dZ=7,5$ см, $\epsilon=0,0440$

В рельефе фокального пятна $S(x', y')$ «отпечаталось» текущее состояние рефлектора, и в соответствии с хорошо известным [11] принципом фокусировки ДН в желаемом направлении (θ, φ) элементы кластера следует возбуждать по правилу $\{W_n = S^*(x'_n, y'_n)\}$, где W_n есть комплексная амплитуда n -го элемента, а звездочка означает комплексное сопряжение. Таким образом, проблема состоит в том, чтобы сигналы $\{S(x'_n, y'_n)\}$ от смещенного маяка пересчитать в сигналы $\{S_0(x'_n, y'_n)\}$ от несмещенного маяка. В основе предлагаемого нами алгоритма лежат два обстоятельства: 1) максимум фокального пятна обусловлен синфазным сложением вторичных полей рефлектора; 2) по известным угловым смещениям $(\Delta\theta, \Delta\varphi)$ маяка однозначно определено необходимое смещение $(-\Delta x^{(\max)}, -\Delta y^{(\max)})$ точки фазирования вторичных волн. Алгоритм пересчета состоит в следующем.

По сигналам кластера $\{S_n(x'_n, y'_n)\}$ восстанавливается непрерывная функция $S(x', y')$ в виде разложения по базису $\{g_k(x', y')\}$, который должен хорошо аппроксимировать $S(x', y')$ в окрестности ее максимума:

$$S(x', y') = \sum_k a_k g_k(x', y'). \quad (2)$$

Коэффициенты $\{a_k\}$ вычисляются как решение СЛАУ:

$$\begin{pmatrix} g_1(x'_1, y'_1) & g_2(x'_1, y'_1) & \cdots & g_k(x'_1, y'_1) \\ g_1(x'_2, y'_2) & g_2(x'_2, y'_2) & \cdots & g_k(x'_2, y'_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_1(x'_n, y'_n) & g_2(x'_n, y'_n) & \cdots & g_k(x'_n, y'_n) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_k \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Решение СЛАУ (3) дает непрерывную функцию фокального пятна в виде (2). Введя требуемые смещения в базисные функции $\{g_k(x', y')\}$, после комплексного сопряжения и вычисления (2) в точках кластера получим ВВК $\{W_n\}$ для формирования луча в требуемом направлении.

Эффективность алгоритма пересчета. Моделировалась МГЗА указанной выше геометрии. Элементы АР расположены в узлах гексагональной сетки точек со стороной в 10 см. Каждый кластер состоит из семи элементов. Ширина центрального луча составляет $0,8^\circ$ по уровню -3дБ , таким образом, смещению маяка на половину радиуса рабочей зоны соответствует его угловому смещению на $0,2^\circ$. На рис. 3 приведены лучи, формируемые для четырех зон по угломестной плоскости θ в трех ситуациях. Смещение маяка составляло $\Delta\theta = 0,2^\circ$.

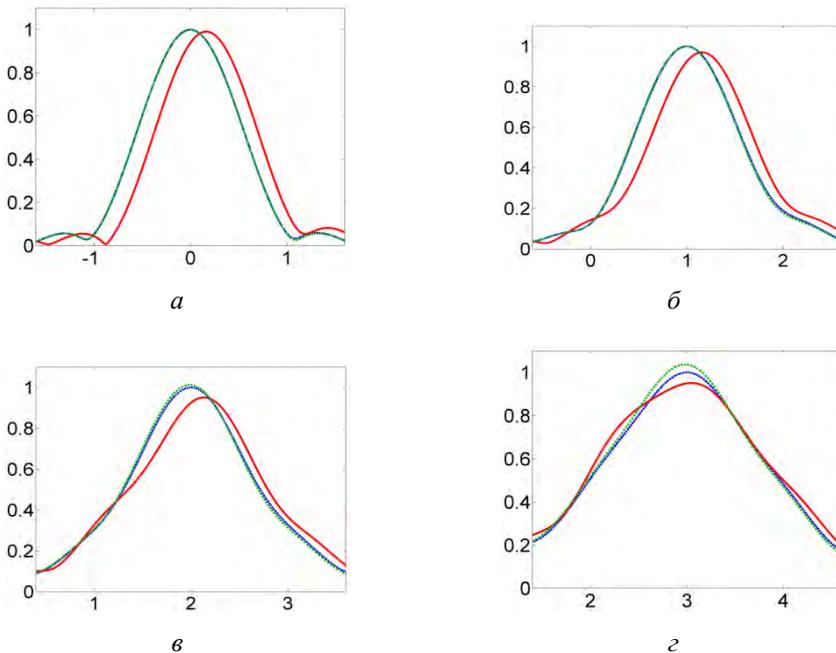


Рис. 3. Лучи, формируемые в направлениях:
a — $\theta = 0^\circ$; *б* — $\theta = 1^\circ$; *в* — $\theta = 2^\circ$; *г* — $\theta = 3^\circ$ (синяя линия — маяк не смещен; красная линия — маяк смещен, ВВК не корректируется; зеленая линия — маяк смещен, ВВК корректируется)

Обсуждение полученных результатов. Об эффективности моделируемого алгоритма пересчета ВВК, компенсирующего смещение маяка, говорит не только почти полное совпадение синих и зеленых кривых, но и следующие цифры. При фокусировке на несмещенный маяк края зоны обслуживания освещаются на относительном

уровне –3дБ. Иному лучу свойственна неравномерность освещения краев, и минимальный уровень характеризует качество покрытия требуемой зоны. Для четырех ситуаций эти минимумы составили –6,6 дБ, –6,2, –4,5, –3,1 дБ до коррекции ВВК и –3,0 дБ, –3,1, –3,1, –3,1 дБ после коррекции ВВК.

Заключение. Дальнейшее совершенствование алгоритма пересчета ВВК по сигналам от смещенных маяков может быть связано с поиском базисных функций $\{g_k(x', y')\}$, которые полнее отражали бы специфику фокальных пятен конкретной МГЗА. Другим направлением может быть учет сигналов от окружающих кластер элементов при формировании СЛАУ (3), что повысит точность аппроксимации фокального пятна.

Литература

- [1] Choni Yu.I., Romanov A.G., Danilov I.Yu., Mochalov V.V. On the efficiency of defocusing a large satellite multi-beam hybrid parabolic antenna. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 450:022020. Nov. 2018. Inst. of Phy. (Grande-Bretagne), IOP Publishing. DOI: 10.1088/1757-899X/450/2/022020
- [2] Романов А.Г., Тестоедов Н.А., Мочалов В.В., Данилов И.Ю., Чони Ю.И. Способствует ли дефокусировка многолучевой гибридно-зеркальной антенны сокращению числа облучателей? *Наукоемкие технологии*, 2018, №12, С 11–15. DOI 10.18127/j19998465-201812-03
- [3] Пономарев Л.И., Вечтомов В.А., Милосердов А.С. Бортовые цифровые многолучевые антенные решетки для систем спутниковой связи. М: Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016.
- [4] Чони Ю.И., Романов А.Г., Данилов И.Ю., Мочалов В.В. Дофокусировка многолучевой гибридно-зеркальной антенны в условиях эксплуатационных нагрузок. *Наукоемкие технологии*, 2017, №12, с. 85–90.
- [5] Huber S., Younis M., Krieger G., Moreira A., Wiesbeck W. A reflector antenna concept robust against feed failures for satellite communications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 4, 2015, pp. 1218 – 1224
- [6] Lian P., Wang W., Hu. N. Feed adjustment method of reflector antenna based on far field. *IET Microwaves. Antennas & Propagation*. 2014. vol. 8, no. 10, pp. 701–708.
- [7] Borja G., Jose A., Carey R., Antonio G. A new physical optics based approach to subreflector shaping for reflector antenna distortion compensation. *IEEE Transactions on antennas and propagation*. 2013. Vol. 61, No. 1
- [8] Голдобин Н.Н. Методика оценки формы поверхности крупногабаритного трансформируемого рефлектора космического аппарата. *Вестник Сибирского гос. аэрокосмич. ун-та им. академика М.Ф. Решетнева*, 2013, № 1 (47), с. 106–111.
- [9] Amend C., Nurnberger M., Oppenheimer P., Koss S., Purdy B. A Novel Approach for a Low-Cost Deployable Antenna. *Proceedings of the 40th Aerospace Mechanisms Symposium*, NASA Kennedy Space Center, May 12–14, 2010. NASA/CP-2010 -216272. p. 1-42.
- [10] Choni Yu.I. Adjoint operator method and its aspects in regard to antenna synthesis. *IX International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT)*, Odessa, Ukraine, 2013, pp. 86–91. DOI: org/10.1109/ICATT.2013.6650690
- [11] Acosta R.J. Compensation of reflector surface distortions using conjugate field matching. *International IEEE A/P-S Symposium and National Radio Science Meeting*. Philadelphia, Pennsylvania, June 9–13, 1986.
- [12] Cherette A.R., Acosta R.J., Lam P.T., Lee S.W. Compensation of reflector antenna surface distortion using an array feed. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1989, vol. 37, no. 8, pp. 966–978.
- [13] Волгаткин К.М., Сомов А.М. Патент RU 2524839. МПК H01Q5/00 Бортовая гибридная зеркальная антенна. Оpubл. 10.08.2014, бюл. № 22.

- [14] Ласкин Б.Н., Сомов А.М. Патент RU 578 289. МПК H01Q 25/00. Способ формирования кластерных зон облучающей решеткой многолучевой гибридной зеркальной антенны, опубл. 28.03.2016, бюл. № 9.
- [15] Верба В.С., Егоров М.А., Неронский Л.Б., Осипов И.Г. Сканирующая гибридная зеркальная антенна. Патент RU 2392703 МПК H01Q1/00 . Опубл. 20.06.2010.
- [16] Gillard C.W. System for controlling the radiation pattern of an antenna. Patent US 5,200,758. H01Q 1/120; H01Q 1/220; H01Q 3/300. Date of Patent: Apr. 6, 1993.
- [17] Saitto A., Mica G. Reflector distortion compensation system for multiple-beam wave satellite antennas. Patent US 4,586,051. H01Q 19/10. Date of Patent: Apr. 29, 1986.

Сведения об авторе:

Чони Юрий Иванович — канд. техн. наук, доцент, кафедра радиоэлектронных и телекоммуникационных систем, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ; SPIN-code: 5008-0141, Scopus Author ID: 6602618753, ORCID: 0000-0002-2787-7959, Web of Science Researcher ID: A-2896-2019, Казань, Россия

Романов Павел Валерьевич — аспирант, кафедра радиоэлектронных и телекоммуникационных систем, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

Мочалов Владимир Викторович — ведущий инженер, отдел антенн и устройств СВЧ, АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва», Железногорск, Россия

Simulation of a Satellite Communication System with a Large Multi-Beam Hybrid Parabolic antenna, the Adaptive Stabilization of the Beams of which is Carried out with Displaced Ground Beacons

© | Yu. I. Choni¹
P.V. Romanov¹
V.V. Mochalov²

tchoni@rambler.ru
greenfreq@gmail.com
mvv115@mail.ru

¹ Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev, Kazan, Russia

² JSC Academician M.F. Reshetnev Information Satellite Systems, Zheleznogorsk, Russia

The extremely stringent requirements that are imposed on the stability of the electro-dynamics' characteristics of large-sized satellite-based multi-beam hybrid parabolic antenna (MBHPA) arouse interest in adaptive control of the weight excitation coefficients of the clusters forming the corresponding beams. Compensation of the operational deviations of the reflector from the nominal surface is carried out through the use of ground beacons, which are located at the centers of the local coverage areas and "focus" the corresponding beams on themselves. The current shape of the reflector results in a set of array antenna signals, which can be used to rearrange the weight vector of the cluster for stabilizing the beam. In order to preserve these functions with an arbitrary location of the beacon within the local zone, we have developed an algorithm for recalculating cluster signals into those signals that would have been at an unbiased beacon position. Algorithm verification is possible only in simulation mode. The computationally efficient electro-dynamics' model

of a large-sized reflector is discussed, the acceptability of which is confirmed by comparison with calculations in the *Ticra Grasp* package. The results of simulation performed at Matlab show, in particular, the following. The displacement of the beacon from the nominal position by a quarter of the beam width causes the relative error of local area coverage at the level $\|\delta E\| / \|E\| \approx 0.48$. The error decreases to 0.02 due to the recalculation of cluster signals. This testifies to the effectiveness of the proposed algorithm for stabilizing the beams of the MBHPA.

Keywords: large-sized MBHPA, electrodynamics' model, simulation modeling, ground beacons, beams stabilization algorithm

References

- [1] Choni Yu.I., Romanov A.G., Danilov I.Yu., Mochalov V.V. On the efficiency of defocusing a large satellite multi-beam hybrid parabolic antenna. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 450:022020. Nov. 2018. Inst. of Phy. (Grande-Bretagne), IOP Publishing. DOI: 10.1088/1757-899X/450/2/022020
- [2] Romanov A.G., Tostoedov N.A., Mochalov V.V., Danilov I.Yu., Choni Yu.I. Does defocusing a multi-beam hybrid parabolic antenna reduce the number of the feeds? *High technology*, 2018, no. 12, pp. 11–15. DOI: 10.18127/j19998465-201812-03
- [3] Ponovarev L.I., Vechtomov V.A., Miloserdov A.S. *Onboard digital multi-beam antenna arrays for satellite communication systems*. Moscow, MGTU named after. N.E. Bauman, 2016.
- [4] Choni Yu.I., Romanov A.G., Danilov I.Yu., Mochalov V.V. Dofocusing multibeam hybrid-mirror antenna under operating conditions. *High technology*, 2017, no. 12, pp. 85–90.
- [5] Huber S. A reflector antenna concept robust against feed failures for satellite communications/ Huber S., Younis M., Krieger G., Moreira A., Wiesbeck W. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, vol. 63, no. 4, pp. 1218–1224.
- [6] Lian P., Wang W., Hu. N. Feed adjustment method of reflector antenna based on far field. *IET Microwaves. Antennas & Propagation*. 2014. vol. 8, no 10, p. 701–708.
- [7] Borja G., Jose A., Carey R., Antonio G. A new physical optics based approach to subreflector shaping for reflector antenna distortion compensation. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 2013. vol. 61, no. 1.
- [8] Goldobin N.N. Methods for assessing the surface shape of a large-sized transformable spacecraft reflector. *Bulletin of the Siberian State Aerospace University named after Academician M.F. Reshetnyov*. 2013. No. 1 (47). pp. 106–111.
- [9] Amend C., Nurnberger M., Oppenheimer P., Koss S., Purdy B. A Novel Approach for a Low-Cost Deployable Antenna. *Proceedings of the 40th Aerospace Mechanisms Symposium*. NASA Kennedy Space Center, May 12–14, 2010. NASA/CP-2010 -216272. pp. 1–42.
- [10] Choni Yu.I. Adjoint operator method and its aspects in regard to antenna synthesis. *IX International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT)*. Odessa, Ukraine, 2013, pp. 86–91. DOI: org/10.1109/ICATT.2013.6650690
- [11] Acosta R.J. Compensation of reflector surface distortions using conjugate field matching. *International IEEE A/P-S Symposium and National Radio Science Meeting*. Philadelphia, Pennsylvania, June 9–13, 1986.
- [12] Cherette A.R., Acosta R.J., Lam P.T., Lee S.W. Compensation of reflector antenna surface distortion using an array feed. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1989, vol. 37, no. 8, pp. 966–978.
- [13] Volgatkin K.M., Somov A.M. Patent RU 2524839. IPC H01Q5/00 *Onboard hybrid mirror antenna*. Date of Patent: 08/10/2014, bul. no. 22.
- [14] Laskin B.N., Somov A.M. Patent RU 578 289. IPC H01Q 25/00. *The method of forming cluster zones with an irradiating grating of a multibeam hybrid mirror antenna*. Date of Patent: 03/28/2016, bull. no. 9.

- [15] Verba V.S., Egorov M.A., Neronsky L.B., Osipov I.G. Scanning hybrid mirror antenna. Patent RU 2392703 IPC H01Q1 / 00. Date of Patent: 06/20/2010.
- [16] Gillard C. W. System for controlling the radiation pattern of an antenna. Patent US 5,200,758. H01Q 1/120; H01Q 1/220; H01Q 3/300. Date of Patent: Apr. 6, 1993.
- [17] Saitto A., Mica G. Reflector distortion compensation system for multiple-beam wave satellite antennas. Patent US 4,586,051. H01Q 19/10. Date of Patent: Apr. 29, 1986

Information about authors:

Choni Yu.I. — PhD, docent, associate professor, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, 420111, Russia; SPIN-code 5008-0141, Scopus Author ID: 6602618753, ORCID: 0000-0002-2787-7959, WoS Res. ID: A-2896-2019

Romanov P.V. — postgraduate student, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, 420111, Russia

Mochalov V.V.r — lead engineer, JSC Academician M.F. Reshetnev Information Satellite Systems, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russia

УДК 004:621.396(045)

Моделирование систем связи с помощью MATLAB и прототипирование на платформе SDR

© Т.А. Шарипов¹

timursharipov9@mail.ru

К.В. Шишаков¹

shishakovkv@mail.ru

А.А. Симушин²

hobnab@istu.ru

Ю.Т. Загидуллин²

zagidullinyut@mail.ru

¹ Ижевский Государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, Ижевск, 426069, Россия, Удмуртская Республика

² АО "Сарапульский радиозавод", Удмуртская Республика, Сарапул, 427960, Россия

Рассмотрены основные вопросы моделирования систем связи с помощью пакета прикладных программ MATLAB и последующего прототипирования на платформе SDR. Разработан стенд, имитирующий работу системы радиосвязи. В стенде учтены современные модели трактов формирования и обработки сигналов, частотные характеристики приемников и передающих трактов, мощности передатчиков, чувствительности приемников, скорость передачи, шумы в канале связи, характеристики затухания радиотрасс. Для учебного процесса в стенд включены возможности исследования эффективности различных алгоритмов кодирования информации, тестирование антенно-фидерных устройств, а также оценка новых протоколов передачи. Настройка и управление оборудованием, формирование сигнала и обработка данных выполнены в среде графического программирования LabVIEW.

Ключевые слова: программно-конфигурируемое радио, имитационное моделирование, модуляция, передача цифровых сигналов, SDR, MATLAB

Введение. Для уменьшения стоимости разработки современных линий и систем связи, работающих в зашумленной электромагнитной обстановке, широко применяется имитационное моделирование. На его первых этапах в качестве базиса компьютерного моделирования наиболее эффективно использовать пакет прикладных программ MATLAB, который при необходимости может дополняться специализированными программами расчета антенно-фидерных устройств. Полученные здесь результаты далее проверяются с помощью прототипирования на платформе SDR (англ. *Software-defined radio* — программно-определяемая радиосистема). При этом передача и прием радиосигнала выполняются на физических элементах, а компоненты тракта (смесители, фильтры, усилители, модуляторы/демодуляторы, детекторы и т. п.) реализуются в программном виде.

Моделирование систем связи с помощью MATLAB. Комплексная имитационная модель систем связи включает множество составных моделей входящих в нее элементов[1]: [Аналоговый сигнал (информация)] ⇒ [Аналого-цифровой преобразователь (перевод сигнала в цифровую форму)] ⇒ [Кодер источника (сжатие информации)] ⇒ [Кодер канала (помехоустойчивое кодирование)] ⇒ [Модуляция несущей частоты] ⇒ [Фильтрация] ⇒ [Согласующее устройство] ⇒ [Передающая антенна] ⇒ [Канал связи (ослабление, искажение и зашумление сигнала)] ⇒ [Приемная антенна]

⇒ [Согласующее устройство] ⇒ [Фильтрация] ⇒ [Понижение частоты] ⇒ [Демодулятор] ⇒ [Декодер канала] ⇒ [Декодер источника] ⇒ [Цифроаналоговый преобразователь] ⇒ [Аналоговый сигнал (информация)]. Для узконаправленных антенных решеток сюда еще добавится модель углового наведения передающей антенны (автосопровождения лучом приемной антенны).

Практически все перечисленные элементы могут быть быстро и эффективно промоделированы в пакете программ MATLAB, а вся структура в первой редакции — в Simulink MATLAB, когда модели кодеров, модемов и других элементов выбираются стандартными из соответствующих библиотек MATLAB.

Основным критерием эффективности таких систем связи обычно выбирают вероятность битовой ошибки BER, зависящую от отношения [Сигнал] / [Шум] на входе приемника [1]. При детальном исследовании на нее также будут влиять и характеристики всех перечисленных выше элементов.

Для упрощения практических расчетов часто выполняют условное разделение-приведенной комплексной модели на модели энергетической и цифровой связи, объединяемые через отношение [Сигнал] / [Шум] на входе приемника. Сначала проводят энергетические расчеты бюджета радиолинии. При этом расчет сигнала на входе приемника будет выполняться известными методиками [2, 3], учитывающими мощность передатчика, активные потери в передающем антенном тракте, потери на рассогласование, ослабление сигнала с расстоянием и вдоль трассы, активные потери и рассогласование в приемном антенном тракте, коэффициенты усиления антенн и другие факторы. В свою очередь, при расчете шума на входе приемника потребуется учесть шумовые температуры антенн, случайные флуктуации сигнала на трассе и другие нестационарные факторы приема-передачи сигнала.

При моделировании широкополосных систем связи дополнительно важно учесть погрешности широкополосного согласования антенн с фидерными трактами. Для этого могут потребоваться специализированные программные продукты по расчету характеристик антенн и их согласующих контуров [4, 5].

После определения отношения [Сигнал] / [Шум] на входе приемника, исследование модели цифровой связиможно существенно упростить. В качестве примера приведем один из вариантов учебной схемы моделирования в Simulink (рис. 1) с QPSK-модулятором и БЧХ — помехоустойчивым кодером, где помехи задаются в канале с АБГШ [6]. Она позволяет построить график зависимости вероятности ошибок (BER) от отношения сигнал/шум в канале (E_b/N_0 , дБ).

Прототипирование системсвязи на платформе SDR. Для определенности выберем платформу National Instruments — NIPXIe-7966Rc модулем NI 5791R. Формированиепередаваемого сигнала, его модуляция, а также настройка приемопередающего оборудования осуществляется в среде разработки LabVIEW.

Передающий блок SDR-трансивера имеет коммуникационный процессор, основной задачей которого является упаковка бит передаваемых данных в символы модуляции и генерация на их основе модулирующего сигнала определенной системы связи, который поступает на цифроаналоговый преобразователь и далее на радиоинтерфейс. Приемный блок SDR устройства содержит аналого-цифровой преобразователь, коммуникационный процессор, осуществляющий демодуляцию сигнала и преобразование демодулированных символов системы связи в биты данных. Роль центрального процессора заключается в обработке пользовательских протоколов обмена данными [7].

Использование SDR-трансивера USRP X300 позволяет генерировать различные радиосигналы для измерения параметров сигналов [8].

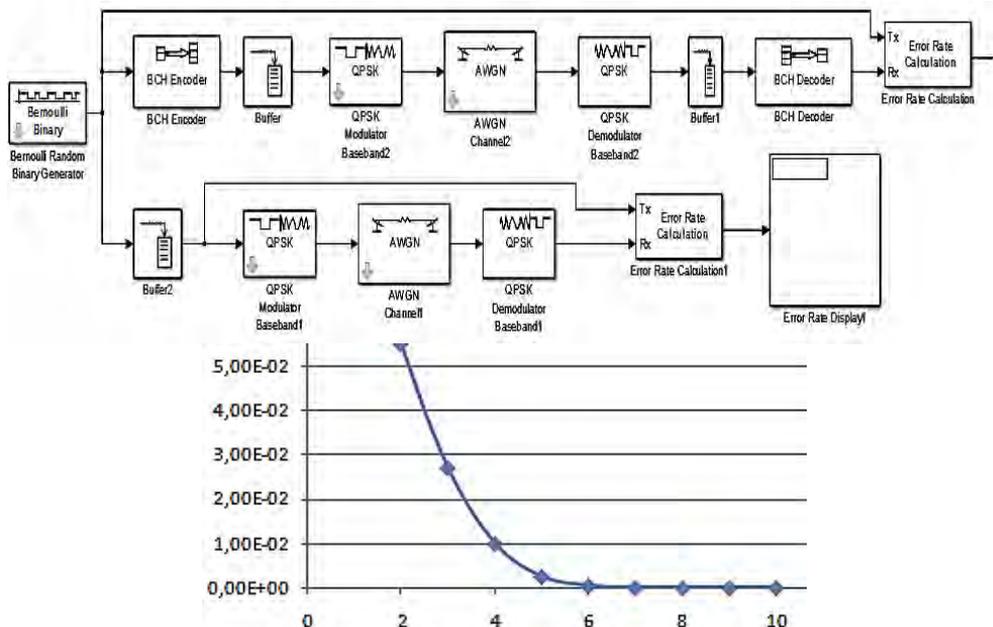


Рис. 1. Схема моделирования BER в системе связи с QPSK-модулятором и BCH — помехоустойчивым кодером и получившийся график зависимость BER от E_b/N_0

В основе PXI-платформы лежат стандартные компьютерные технологии: шина PCI/PCI Express, процессор и периферийные устройства. Архитектурно PXI состоит из шасси, в которое устанавливаются модульные приборы, контроллеры или интерфейсы для удаленного управления платформой [9].

В качестве оборудования SDR используется продукты компании National Instruments. PXIe-7966R — это модуль PXI FPGA, обеспечивает гибкую настраиваемую систему ввода-вывода для LabVIEW FPGA. NI5791R — приемопередающий адаптер модуля, работающий в диапазоне от 200 МГц до 4,4 ГГц. Стенд имеет два комплекта данного оборудования, поэтому один из них используется в качестве передатчика, а другой задействован в виде приемника.

Блок-диаграмма радиоинтерфейса *NI 5791R* представлена на рис. 2.

Для настройки передатчика и приемника использован пример Simple NI-579x Streaming, пакет для моделирования от NI: Modulation Toolkit, а также примеры из практического курса «Основы передачи ВЧ-сигналов» [10]. В качестве элементов для управления и получения данных были использованы программные решения в LabVIEW [11].

При настройке передатчика инициализируется область памяти, куда поступают данные для передачи. Для формирования данных была собрана схема, изображенная на рис. 3. Данная схема формирует комплексный модулированный сигнал в основной полосе частот, который складывается с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) и поступает на ПЛИС. Затем с помощью модуля NI 5791R, являющегося аналоговой частью передатчика, происходит циклическая передача данных.

Для точного контроля уровня E_b/N_0 приемник и передатчик соединяются через коаксиальный кабель.

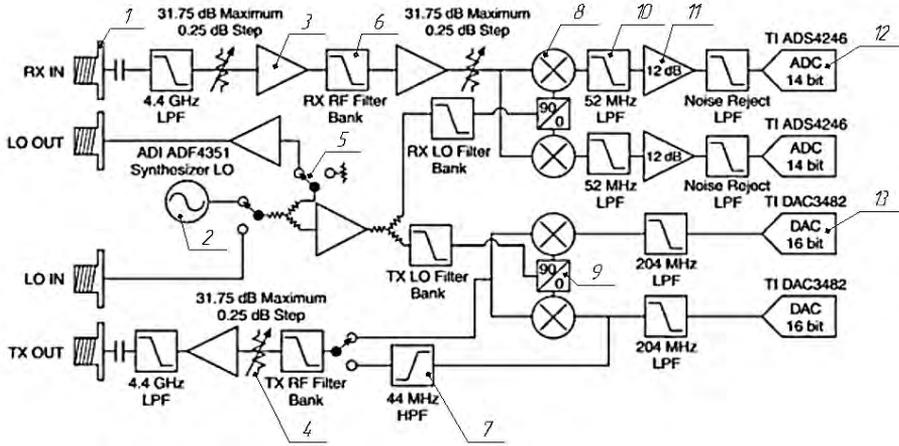


Рис. 2. Блок схема модуля NI 5791R:

- 1 — разъем; 2 — внутренний гетеродин; 3 — буфер; 4 — перестраиваемый аттенуатор; 5 — переключатель; 6 — банк цифровых фильтров; 7 — фильтр верхних частот; 8 — смеситель; 9 — преобразователь фазы на 90°; 10 — фильтр низких частот; 11 — усилитель 12 дБ; 12 — четырнадцатититбитный АЦП; 13 — шестнадцатититбитный ЦАП

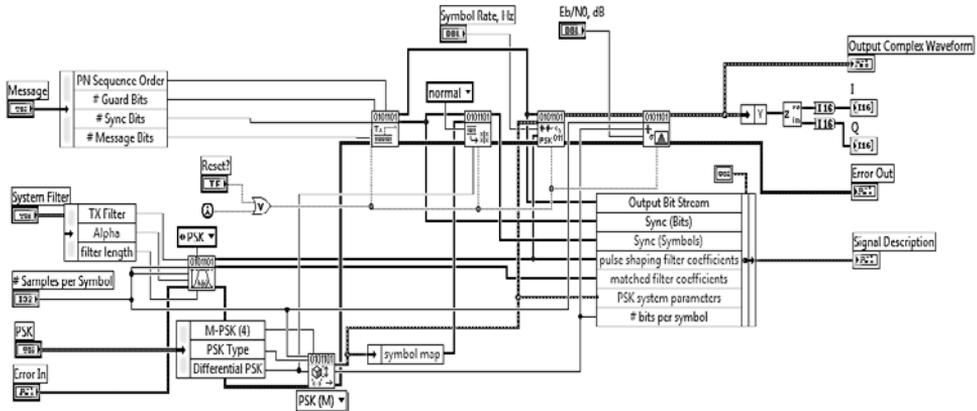


Рис. 3. Блок схема формирования модулированного сигнала с АБГШ

Алгоритм формирования сигнала по данной схеме состоит из следующих этапов: устанавливаются параметры сигнала; формируется модулирующий поток бит; задается формирующий фильтр, с помощью которого обрабатывается поток бит; производится модуляция полученным сигналом; к полученному комплексному модулированному сигналу добавляется АБГШ.

Данная схема позволяет изменять такие характеристики модулятора, как количество бит информационного сообщения (Message), защитных битов (Guardbits), битов синхронизации (Syncbits); тип и параметры формирующего фильтра (System Filter); тип и параметры сигнала (PSK(M)); количество отсчетов на символ (Samplesper Symbol); символьная скорость (Symbol Rate), отношение сигнал/шум (Eb/N0).

Схема позволяет выбрать различные методы манипуляции: PSK, FSK, ASK, QAM, MSK, CPM, PAM.

Передаваемый пакет состоит из защитных битов, битов синхронизации и информационной посылки.

Помимо передачи псевдослучайной последовательности бит стенд был доработан для передачи текстового сообщения по каналу с АБГШ (рис. 4, 5).

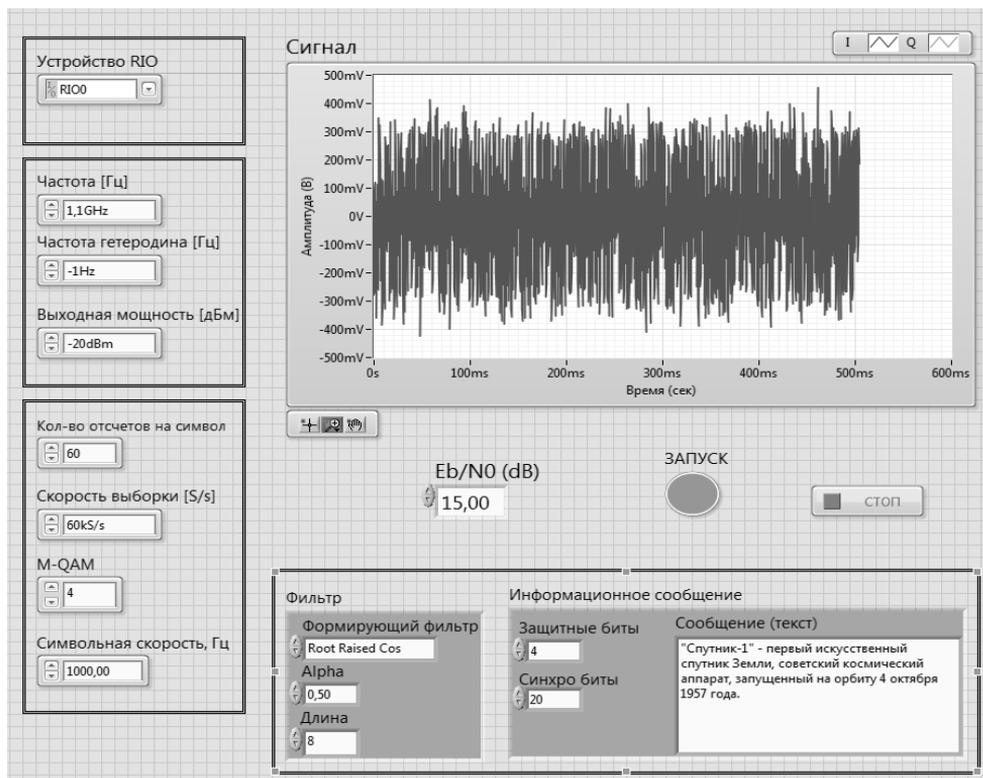


Рис. 4. Лицевая панель управления передатчиком при $E_b/N_0 = 7$ дБ

На лицевой панели задаются имя используемого модуля (RIO Device); частота несущего сигнала, Гц; частота гетеродина, Гц; мощность выходного сигнала, дБм; поле ввода количества бит для информационного сообщения; поле ввода/выбора параметров формирующего фильтра; поле выбора параметров сигнала (PSK); скорость выборки; символьная скорость, Гц; количество отсчетов на символ; остановка передачи и завершение работы устройства (Стоп).

Рассчитываются и выводятся на индикатор спектр сигнала, уровень сигнала, синфазная и квадратурная составляющие сигнала, сигнальное созвездие.

На данном стенде было исследовано влияние значения E_b/N_0 в канале связи на достоверность передачи данных. В качестве примера на рис. 5, б показан нечеткий вид получившегося сигнального созвездия для $E_b/N_0 = 3$.

Взаимодействие SDR трансивера со средой MATLAB при передаче сигнала. SDR трансивер USRP X300 имеет возможность записывать сигналы в квадратурах в

аудиоформате *.wav в полосе от 200 кГц до 10 МГц на несущей частоте в диапазоне от 200 МГц до 4,4 ГГц. Это дает возможность не только проводить моделирование работы различных радиосистем, но и эффективно отлаживать алгоритмы при проектировании реальных систем связи. Например, можно настроиться на одну из частот цифрового телерадиовещания DVB-T2, произвести запись сигнала в полосе 8 МГц и в дальнейшем обработать эту запись средствами MATLAB.

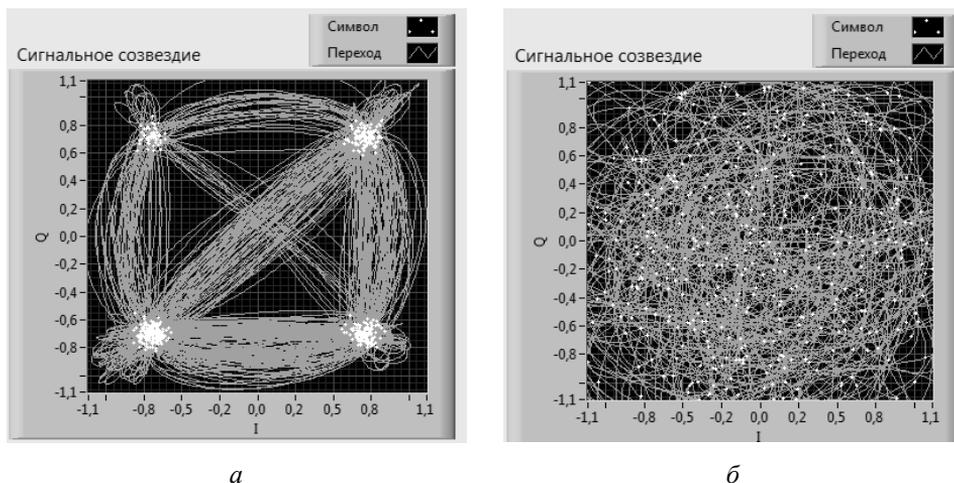


Рис. 5. Лицевая панель управления приемником при $E_b/N_0 = 15$ дБ (а), 3 дБ (б)

Таким образом, стыком между программно-аппаратным SDR трансивером и программной оболочкой является аудиофайл.

Возможны следующие варианты взаимодействия: 1) постобработка, когда сначала производится запись SDR-приемником, а потом, по окончании записи, проводится считывание файла командой `audioread()` и последующая обработка отсчетов сигнала; 2) обработка в реальном времени, когда отсчеты принимаемого SDR-приемником сигнала непосредственно отправляются в заранее созданный массив отсчетов в программе MATLAB.

Зачастую для отладки программы достаточно применять постобработку сигнала, что существенно проще по сравнению с обработкой в реальном времени. При считывании аудиофайла отсчеты сигнала загружаются в определенный массив с указанием частоты дискретизации. Далее отсчеты сигнала обрабатываются в соответствии с заданным алгоритмом. Например, можно отладить систему синхронизации, блок демодулятора, помехоустойчивого кодирования, провести оценку тракта приемопередатчика и определить искажения, вносимые каналом связи.

Для удобства отладки в MATLAB содержится множество функций, таких как графический вывод результатов, стандартные функции телекоммуникационных систем (Telecommunication Toolkit), например, цифровая модуляция, канальное кодирование и т. д. При необходимости можно создать собственную функцию, которая будет реализовывать некоторый уникальный алгоритм обработки.

Кроме возможности записывать сигнал SDR-трансивер USRP X300 позволяет воспроизводить аудиофайл с заданной частотой дискретизации на заданной несущей

частоте. Сам аудиофайл можно создать в среде MATLAB, используя функцию `audiowrite()`. Она преобразует отсчеты сигнала в массиве в wav-файл. В итоге, если использовать два трансивера, то можно проводить моделирование работы телекоммуникационной системы с учетом распространения сигнала по трактам приемника и передатчика, а также по реальному радиоэфиру. Это позволит учесть ряд особенностей при проектировании реальных устройств, которые бы не проявились при простом имитационном моделировании.

В заключение отметим, что рассмотренные направления взаимодополняющего моделирования с помощью MATLAB и прототипирования на платформе SDR не охватывают всех возможностей имитационного моделирования современных систем связи. Часть из них были только кратко обозначены в статье.

Исследование выполнено в рамках проекта № 11.00.00/18ХВВ.

Литература

- [1] Галкин В.А. *Цифровая мобильная радиосвязь*, 2007, 432 с.
- [2] Шишаков К.В., Бояршинов М.А., Караваев П.В., Батулин А.С., Савельев А.В. Методика расчета радиолиний между двумя антеннами. *Интеллектуальные системы в производстве*, 2016, № 3, с. 64–67.
- [3] Шишаков К.В., Бояршинов М.А., Караваев П.В., Батулин А.С., Савельев А.В. Расчет и повышение эффективности основных параметров радиолиний с укороченными вибраторными антеннами КВ и УКВ диапазонов. *Интеллектуальные системы в производстве*, 2016, № 4, с. 16–25.
- [4] Верба Б.П., Мосунов Д.Г., Шишаков К.В. Способы построения согласующих антенных устройств. *Приборостроение в XXI веке — 2016. Интеграция науки, образования и производства*: сб. матер. XII Междунар. науч.-техн. конф. 2017, с. 43–50.
- [5] Верба Б.П., Мосунов Д.Г., Шишаков К.В. Проектирование антенны диапазона 230–280 МГц: моделирование основных параметров, исследование ШСУ различных типов. *Вестник ИжГТУ*, 2018, № 3, с. 149–154.
- [6] Шишаков К.В. *Основы алгоритмов помехоустойчивого кодирования*: учеб. пособие. Ижевск, ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, 2018, 232 с.
- [7] Сорохтин Е.М., Минеев С.А. *Распределенные программно-определяемые радиосистемы*. Н. Новгород: Вестник Нижегородского университета имени Н.И. Лобачевского, 2010, с. 383–385.
- [8] *Образовательная программа National Instruments*. URL: <http://russia.ni.com/sites/default/files/Брошюра Образовательная программа 2014 LQ3.pdf> (дата обращения 14.01.2019).
- [9] NI-5791, РЧ-адаптерный модуль для FlexRIO. URL: <http://www.ni.com/ru-ru/support/model.ni-5791.html> (дата обращения 14.01.2019).
- [10] *Основы передачи ВЧ-сигналов*. Практический курс. URL: <http://russia.ni.com/> (дата обращения 14.01.2019).
- [11] Евдокимов Ю.К., Линдваль В.Р., Щербаков Г.И. *LabVIEW для радиоинженера: от виртуальной модели до реального прибора*. Москва, ДМК Пресс, 2007, 400 с.

Сведения об авторах:

Шаринов Тимур Альбертович — магистрант, ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Шишаков Константин Валентинович — канд. физ.-мат. наук, доцент, ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, Ижевск, Россия, SPIN-code: 6323

Симушин Алексей Александрович — ведущий инженер-программист, АО «Сарапульский радиозавод», Сарапул, Россия, SPIN-code: 6879-9408

Загидуллин Юрий Такиуллович — ведущий инженер-программист, АО «Сарапульский радиозавод», Сарапул, Россия, SPIN-code: 8034-8719

Simulation of Telecommunication System in MATLAB and its Prototyping on SDR Platform

© Т.А. Sharipov ¹	timursharipov9@mail.ru
К.В. Shishakov ¹	shishakovkv@mail.ru
А.А. Simushin ²	hobnab@istu.ru
Yu.Т. Zagidullin ²	zagidullinyut@mail.ru

¹ Ижевский Государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, Ижевск, 426069, Россия, Удмуртская Республика

² АО «Сарапульский радиозавод», Удмуртская Республика, Сарапул, 427960, Россия

The fundamentals of telecommunication system simulation using MATLAB application package and system prototyping on SDR platform are considered. Test bench, which simulate wireless system operational, is developed. Test bench includes modern models of signal generating/processing channel, transceiver frequency characteristics, transmitter power, receiver sensitivity, baud rate, channel noise, fading characteristic of radio path. Also bench contains ability to research the efficiency of different encoding algorithms in educational needs. It allows to test antenna-feeder device and to estimate new transfer protocols. Device customizing and control, signal generating and processing are implemented in graphical programming environment LabVIEW.

Keywords: Software-Defined Radio, simulation, modulation, digital signal transmission, SDR, MATLAB

This investigations was funded to the research project No. 11.00.00/18XBB.

References

- [1] Galkin V.A. Tsifrovaya mobil'naya radiosvyaz', 2007, 432 s.
- [2] Shishakov K.V., Boyarshinov M.A., Karavayev P.V., Baturin A.S., Savel'yev A.V. Metodika rascheta radiolinii mezhdu dvumya antennami. Intellektual'nyye sistemy v proizvodstve, 2016, № 3, s. 64–67.
- [3] Shishakov K.V., Boyarshinov M.A., Karavayev P.V., Baturin A.S., Savel'yev A.V. Raschet i povysheniye effektivnosti osnovnykh parametrov radiolinii s ukorochennymi vibra-tornymi antennamiKV i UKV diapazonov. Intellektual'nyye sistemy v proizvodstve, 2016, № 4, s. 16–25.
- [4] Verba B.P., Mosunov D.G., Shishakov K.V. Sposoby postroyeniya soglasuyushchikh anten-nykh ustroystv. Priborostroyeniye v XXI veke — 2016. Integratsiya nauki, obrazovaniya i proiz-vodstva: sb. mater. XII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. 2017, s. 43–50.
- [5] Verba B.P., Mosunov D.G., Shishakov K.V. Proyektirovaniye antennoy diapazona 230– 280 MGts: modelirovaniye osnovnykh parametrov, issledovaniye SHSU razlichnykh tipov. Vestnik IzhGTU, 2018, № 3, s. 149–154.
- [6] Shishakov K.V. Osnovy algoritmov pomekhoustoychivogo kodirovaniya: ucheb. posobiye. Izhevsk, IzhGTU im. M.T. Kalashnikova, 2018, 232 s.
- [7] Sorokhtin Ye.M., Mineyev S.A. Raspredeleynnye programmno-opredelyayemyye radiosistemy. N. Novgorod: Vestnik Nizhegorodskogo universiteta imeni N.I. Lobachevskogo, 2010, s. 383–385.

- [8] Obrazovatel'naya programma National Instruments. URL: [http://russia.ni.com/sites/default/files/Broshyura Obrazovatel'naya programma 2014 LQ3.pdf](http://russia.ni.com/sites/default/files/Broshyura%20Obrazovatel'naya%20programma%202014%20LQ3.pdf) (data obrashcheniya 14.01.2019).
- [9] NI-5791, RCH-adapternyy modul' dlya FlexRIO. URL: <http://www.ni.com/ru-ru/support/mod-el.ni-5791.html> (data obrashcheniya 14.01.2019).
- [10] Osnovy peredachi VCH-signalov. Prakticheskiy kurs. URL: <http://russia.ni.com/> (data obrashcheniya 14.01.2019).
- [11] Yevdokimov YU.K., Lindval' V.R., Shcherbakov G.I. LabVIEW dlya radioinzhenera: ot virtual'noy modeli do real'nogo pribora. Moskva, DMK Press, 2007, 400 s.

Information about authors:

Sharipov T.A. — Master's Degree Student, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

Shishakov K.V. — PhD in physical mathematics, associate professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia, SPIN-code: 6323-1182

Simushin A.A. — advanced software engineer, JSC “SRZ”, Sarapul, Russia, SPIN-code: 6879-9408

Zagidullin Yu.T. — advanced software engineer, JSC “SRZ”, Sarapul, Russia, SPIN-code: 8034-8719

Содержание

<i>Агапов О.А., Балакин Д.А., Добродумов А.Б., Керский Е.В., Юрков М.В.</i> Моделирование антенного радиоэлектронного комплекса средствами MATLAB и Simulink	3
<i>Азин И.Е., Розкаряка П.И.</i> Опыт разработки прототипа двуногого шагающего робота с использованием среды MATLAB	14
<i>Артёмьев А.В., Быков А.И.</i> Пилотный проект применения пакета MATLAB для разработки программного обеспечения, управляющего работой стендового оборудования для экспериментальной наземной отработки модулей космических аппаратов	23
<i>Асадуллаев Р.Г., Щетинина Е.С.</i> Имитационная модель управления протезом кисти руки с учетом обработки двух каналов входных данных	33
<i>Атыева И.Р., Зыкин А.А., Хворенков В.В., Копысов А.Н., Батурин И.С.</i> Использование графической среды Simulink для создания имитационной модели спутникового канала связи	40
<i>Богославский Н.В., Понятский В.М., Федорищева В.Г., Рословец П.В.</i> Использование MATLAB для валидации и верификации встраиваемого программного обеспечения	50
<i>Виноградов С.С.</i> Методология разработки тяжелого БВС вертолетного типа и настройки его САУ	65
<i>Данилов С.Н., Мельникова Д.Д., Сыщикова Д.А.</i> Модели систем наведения: построение средствами визуализации	76
<i>Дмитриев А.Г.</i> Кусочно-непрерывная сегментация экспериментальных сигналов	85
<i>Щеглов Е.Д., Еременко В.Г.</i> Математическая модель батареи фотоэлектрической с регулированием мощности параллельного типа	90
<i>Иванов И.П., Басараб М.А., Колесников А.В.</i> Прогноз самоподобного сетевого трафика на основе фрактальной авторегрессионной модели скользящего среднего	96
<i>Копысов А.Н., Благодатский Г.А., Хворенков В.В., Батурин И.С., Баранов В.П.</i> К вопросу применения метода парных сравнений при разработке когнитивных систем связи	106
<i>Литвинов В.Л.</i> Нелинейные математические модели продольно-поперечных колебаний одномерных механических объектов с движущимися границами ...	116
<i>Ляпцев А.В., Денисевич А.А.</i> Использование компьютерных моделей преподавателем для усиления наглядности при обучении физике	131
<i>Малов М.С., Кожевников С.О.</i> Моделирование движения жидкости в рабочих органах механоактиватора с помощью MATLAB	143
<i>Молчанов А.С., Чаусов Е.В.</i> Математическое моделирование цифровых оптико-электронных систем военного назначения при проведении государственных летных испытаний	149

<i>Морозов Ю.В., Райфельд М.А., Спектор А.А.</i> Моделирование классификаторов для локационных систем	159
<i>Петров В.П., Якушев И.Ю.</i> Исследование производительности ММО систем пятого поколения в неселективном канале Рэлея	165
<i>Понятский В.М.</i> Исследование с помощью MATLAB компенсации систематической ошибки с помощью фильтра Калмана в информационно-измерительных системах	176
<i>Понятский В.М., Романов А.В.</i> Использование MATLAB для оценки мощности приводов механизма панкратического объектива	185
<i>Пушков Р.Л., Евстафиева С.В.</i> Моделирование системы управления приводом в учебном процессе	197
<i>Семененко М.Г.</i> Обучение студентов использованию нейросетевых технологий в моделировании сложных технических объектов	209
<i>Цымай Ю.В.</i> Методика моделирования встраиваемой системы управления на базе программируемого контроллера	215
<i>Чони Ю.И., Романов П.В., Мочалов В.В.</i> Моделирование алгоритма коррекции кластеров спутниковой МГЗА при смещении наземных маяков из центров локальных зон покрытия	224
<i>Шарипов Т.А., Шишаков К.В., Симушин А.А., Загидуллин Ю.Т.</i> Моделирование систем связи с помощью MATLAB и прототипирование на платформе SDR	233

Научное издание

ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ И ОТЛАДКИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

VI ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ

Корректор *С.А. Серебрякова*
Художник *Э.Ш. Мурадова*
Компьютерная верстка *С.А. Серебряковой*

В оформлении использованы шрифты
Студии Артемия Лебедева.

Оригинал-макет подготовлен
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Подписано в печать 28.11.2019. Формат 70×100/16.
Усл. печ. л. 19,83. Тираж 50 экз. Заказ .

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
press@bmstu.ru
www.baumanpress.ru

Отпечатано: Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

В сборник включены доклады, представленные на VI Всероссийской научно-практической конференции «Технологии разработки и отладки сложных технических систем», которая состоялась в марте 2019 г. в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Тексты докладов размещены в Научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU.

ISBN 978-5-7038-5412-9



bmstu.press

